

陆面过程对气候影响的数值模拟: SSiB 与 IAP/LASG L9R15 AGCM 耦合及其模式性能*

孙 岚

吴国雄 孙菽芬

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学
数值模拟国家重点实验室(LASG), 北京, 100080)

摘 要

利用陆面过程模式 SSiB 与 IAP/LASG 发展的 L9R15 AGCM 的耦合 10 a 积分试验, 研究了全球尺度大气与地表的水分和能量交换以及陆地与大气环流和气候的相互作用。模拟表明: SSiB 模式可模拟出陆地上较为真实的表面通量及其日变化, 较好地定量描述土壤-植被-大气连续体系(SPAC)中能量和水分的传输过程。因此, 将其引入气候模式中能够模拟出比 CTL-AGCM 更合理的气候平均状态、水汽分布以及水汽输送的气候特征, 特别是亚洲夏季风水汽输送独特的地域性, 再现了大气环流, 尤其是陆面气候的基本特征。并指出, 陆面过程参数化的引进及其陆面状况的变化显著地改善了全球陆地上的水分平衡状况。

利用改进的再循环降水模式, 进一步研究了陆面过程参数化明显改进降水模拟的物理机制。指出全球陆地, 特别是盛夏北半球干旱、半干旱地区的再循环降水率明显减小, 与陆面上表面潜热通量的显著减小区一致, 从而克服了许多未耦合陆面过程的 AGCMs 因对地表水过程非常简单参数化导致的普遍存在着整个陆地降水偏高, 改善了全球陆地上的水分平衡状况。因此, 在充分耦合的陆气环流模式中模拟的降水分布与实况接近。

关键词: 陆气耦合模式(SSiB-AGCM), 再循环降水模式, 再循环降水率, 水分平衡, 陆地降水模拟。

1 引 言

陆面过程是影响气候变化的基本物理过程之一。陆地下垫面状况在很大程度上决定了陆地表面的能量和水分平衡, 从而深刻地影响着局地、区域乃至全球大气环流和气候的基本特征。研究大尺度地-气系统的水分平衡在气候变化研究中一直是一个薄弱的环节。我们在定量上对全球、局地的水分和能量收支尚知之甚少, 在以往的一些气候模式中往往简化甚至忽略。目前气候模式中阻碍气候模拟能力的“水分差距(water gap)”, 正是由于我们对水分循环的陆地分支认识不够引起的。全球气候模式对陆地上降水、蒸发以及水文过程处理得不完善, 以及对陆面过程的某些不适当的参数化, 从而影响了现代全球或区域性气候模式的模拟能力。因此, 为了了解气候变化的物理机制, 使大气环流模式能真实反

* 初稿时间: 1999 年 1 月 29 日; 修改稿时间: 1999 年 9 月 1 日。

资助课题: 国家自然科学基金重点项目“副热带高压带的变异机理”(编号 4963170)和国家科委攀登项目“气候动力学和气候预测理论的研究”。

映地球物理与生物化学过程,有必要深入研究典型的下垫面上的陆-气相互作用,以便正确地确定陆-气界面的通量,改进全球气候模式中现有的陆面过程参数化方案。

自1960年代末AGCM出现以来,最初陆面模式用空气动力学总体输送公式和几个均匀的陆地表面参数简单地参数化土壤水的蒸发和地表径流,即水箱模式(Bucket model)。此间广泛地开展把各种非生物简单陆面过程中各因子与气候相联系,并探讨其中的相互作用。但模拟结果在一定程度上依赖于AGCM中陆地水文过程的参数化的改进,这种状况促进了陆地水文过程的参数化研究。于是,1980年代以来AGCM中陆面过程参数化的一大进展是显式地引入了植被生物物理过程,主要以SiB(Sellers等,1986)和BATS(Dickinson等,1986,1993)为代表。随后,一系列详细程度不同的20多个陆面过程模式不断涌现。其本质上都属于计算土壤、植被与大气间交换方案(SVATS)。目前大气模式的动力框架已经发展得比较成熟,模式的完善程度基本上取决于物理过程参数化的设计。早期的模式比较研究^[1,2]分别指出在给定的海温强迫场条件下,各个模式的云-辐射过程和陆表能量通量都有较大的不确定性,是大气模式物理过程中最严重的问题。陆面过程很可能是今后提高模式模拟能力最重要的方面之一^[3]。在AGCM中陆面过程如何最适当地参数化,已经成为AGCM发展的一个重要方向,也是成功地进行气候数值模拟、研究气候变化的关键之一。

为此,正确地表述和模拟水分和能量的循环将是我们进一步完善气候模式所面临的迫切任务。本工作试图引进美国的包括细致的植被层陆面模式,并与IAP/LASG发展的L9R15 AGCM谱模式耦合,建立一个全球陆-气耦合模式。本文对比在模式中有和无陆面过程的模拟结果,去证实陆面过程在气候系统中的重要作用,并用机制模式的解析研究着重探讨降水显著改进的原因。

2 模式和试验

本文使用的模式中的大气部分,是一个改进的9层15波菱形截断的全球大气环流谱模式^[4]。全球高斯格点数为 48×40 ,相当于水平分辨率为 $7.5^\circ \times 4.5^\circ$ 经纬距。垂直方向采用 σ 坐标。模式的底层约991 hPa,顶层约在10 hPa,其中有3层位于800 hPa以下,3层位于200 hPa以上,故在边界层和平流层内都有比较好的垂直分辨率。模式中物理过程主要包括 k -分布辐射传输方案^[5],动量、热量和水汽的水平与垂直扩散,Manabe对流调整,以及边界层的Monin-Obuhov总体空气动力学参数化,其中陆地水过程参数化简单,只考虑了下垫面的粗糙度、潮湿度、雪盖和极冰等因子,且在全球陆地上粗糙度和潮湿度均取固定值,显然这种取法不十分真实,该模式称之为CTL-AGCM。

新的陆面过程模式是采用美国马里兰大学海-陆-气研究中心(COLA)先进的简化的简单生物圈模式(SSiB)^[6]。该模式由土壤、植被冠层和近地层大气3部分组成。植被处理为水平均匀的“大叶子”,有森林、草本植物和农作物等11种植被类型。土壤按植被的根系分布深度为2 cm的浅层根区、0.2~0.5 m深层根区以及0.3~2 m水分重力渗漏层,总层土壤的厚度依植被类型而定。地表是镶嵌组合,没有考虑下垫面为湖面的情形。这些植被和土壤的分类分别取自Kuchler(1983)和Matthews(1984,1985)数据库。模式中用20多个参数来描述植被、土壤的生理和物理特性。植被参数主要包括光学参数、形态参数和

生理参数。土壤参数则包括土壤热力性质参数和水分传输性质参数。这些参数中一些是来自现场观测, 大部分来自 Dorman 和 Sellers(1989) 以及 Willmott 和 Klink(1986), 其中月均 LAI、绿色度来自 Klink 和 Willmott(1985)。SSiB 中植被、土壤中的物理过程包括辐射、感热、潜热、植被冠层叶面对大气降水的截留和滴落及土壤内水流等, 可定量地刻划复杂的大气和陆表水分循环过程, 尤其是对植物生理过程的描述。SSiB 模式所需要的大气边界条件均由 AGCM 模式最底层高度上格点平均值提供, 其与大气环流模式的耦合称之为 SSiB-AGCM。

取自 1979~1988 年具有季节变化的气候平均 SST 和海冰强迫, 各陆面变量初始条件取: 各层土壤温度取自 AGCM 多年积分中最后一天的表面地温; 各层土壤湿度在热带内为 0.85, 热带以外为 0.25; 林冠叶面截留水量和地表积雪设为零。下面的结果, 即取两种不同陆面方案的 AGCM 积分达准平衡态后的 10 a 平均作为全球模拟场。为了说明引入细致的陆面物理过程参数化方案(SSiB-AGCM), 相对于未耦合陆面过程的原模式(CTL-AGCM) 模拟结果的显著改进之处, 以下着重选取几个基本大气变量和其它变量对耦合模式中 7 月全球平均气候状态和全球水分循环的模拟能力进行检验。将 CTL-AGCM 部分结果及其差异场也一并给出, 一方面可反映物理过程参数化的改变对模式气候的影响, 另一方面还可指出模式中的不足之处, 为进一步改进和完善模式提供理论基础及依据。限于篇幅, 不再给出观测结果的图例。

3 降水再循环模式的改进

陆地上蒸发和降水是全球水分循环的重要组成部分。而陆地上的降水并非全部经由地表径流流失, 其中有很大一部分降水借助陆面蒸散重新返回到大气, 通过垂直运动凝结致云再形成降水, 称之为再循环降水(recycled precipitation)。其与总降水量的相对贡献定义为再循环降水率(precipitation recycling ratio), 该量是陆面蒸发(蒸散), 因而也是表面潜热通量对局地降水贡献的一个度量, 为气候对陆面过程敏感性研究提供了有重要现实意义的指标。

现有的估计某地区水分循环的最简单模式是由 Budyko 和 Drozdov 于 1953 年提出的一维线性模式^[7](通常称 Budyko 模式)。Brubaker 等将其扩展到二维, 但仍作了与 Budyko 模式类似的线性假设, 得出的结果仍是区域平均值^[8]。之后, Eltahir 和 Bras^[9]对此作了根本的改进。从水汽平衡方程出发, 根据观测资料的分析, 利用逐次逼近法得到再循环降水率的空间分布及其季节变化。伊兰又作了进一步的改进, 将 Brubaker 模式中通量项的线性平均引入 Eltahir 和 Bras 模式, 使两者统一起来, 并用实测资料估算了长江流域再循环降水率分布^[10]。

上述模式均是针对陆地上某一区域来求解的, 需要人为给定边界条件。通过计算我们发现边界的选取对结果有一定影响。图 1a, b 分别给出不同计算区域再循环降水率的格点值。从图中可见区域 1 和区域 2 相重叠的区域(26~36°N) 内相同格点值均有一定差别。如 30~32°N, 92~96°E 的中心值在区域 1 为 26%, 而在区域 2 却为 28%, 且区域 2 中其余格点值比区域 1 普遍增加 1%~2%。如此看来, 其解连续地依赖于所给边值。此外, 我们还选取了各种不同的边界条件, 均出现与上述类似的结果。

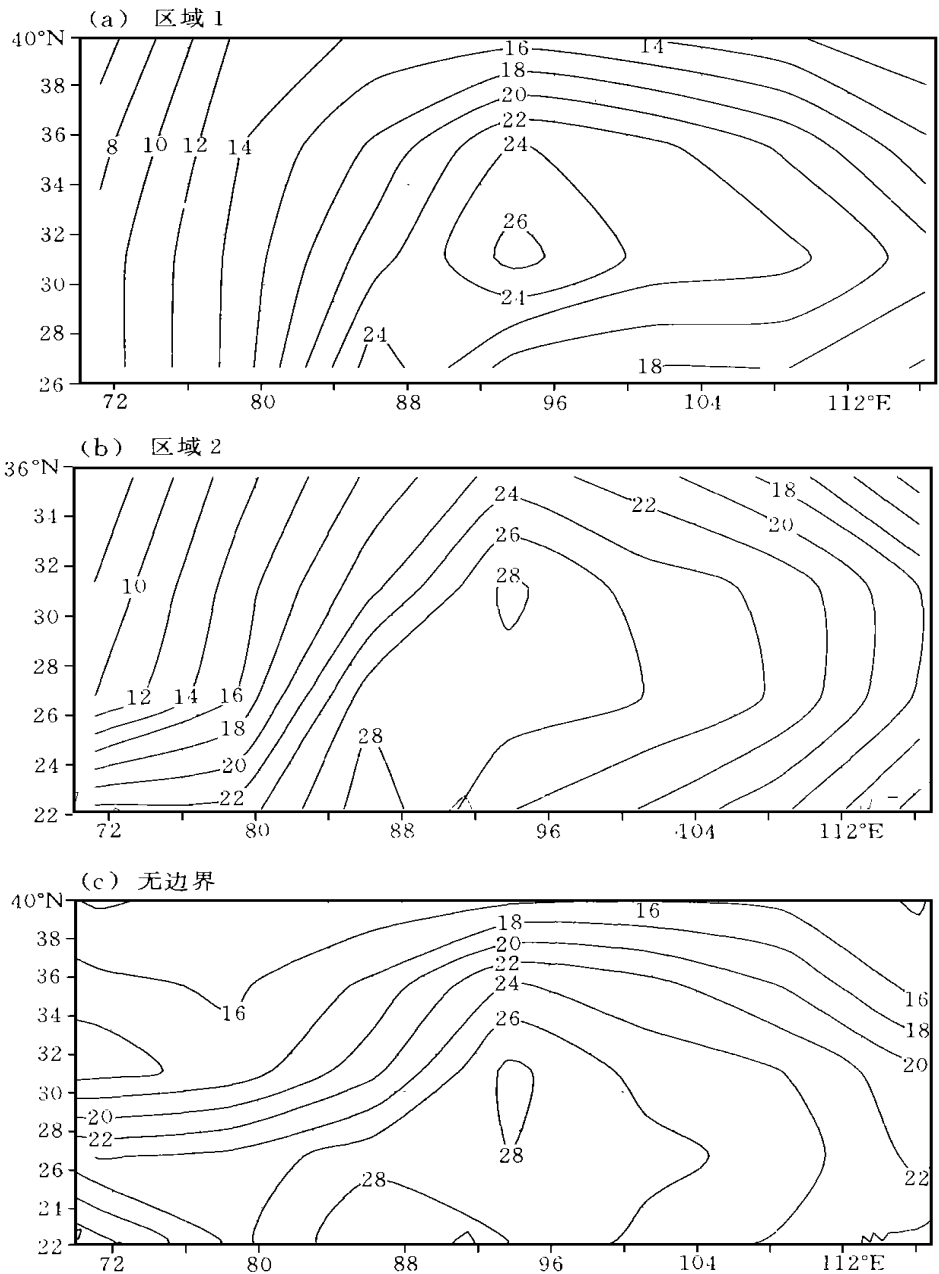


图 1 再循环降水率的地理分布

(a. 旧模式区域之一; b. 旧模式区域之二; c. 新模式)

为此, 本文将计算区域扩展到全球, 避免人为给定边界条件带来的不确定性, 使结果较为客观。订正后的模式计算结果如图 1c 所示。

4 结果及其分析

4.1 全球气候平均状态

模拟的 7 月表面潜热通量、表面感热通量及其差异的分布分别如图 2a, b 所示。在亚洲东部、南部以及北美季风区大范围的陆地上 CTL-AGCM 中潜热通量普遍在 120 W/m^2 以上, 可与热带洋面上的潜热通量相比拟; 而 SSiB-AGCM 最明显的改进是夏半球内陆潜热通量显著减小, 如北非、西亚至东亚的腹地、北美均减小 80 W/m^2 以上, 与观测值更加接近。这主要是因为 CTL-AGCM 中给定全球陆地统一湿润系数不真实以及未考虑植被和土壤的表面阻抗, 故导致过高估计地表蒸发。

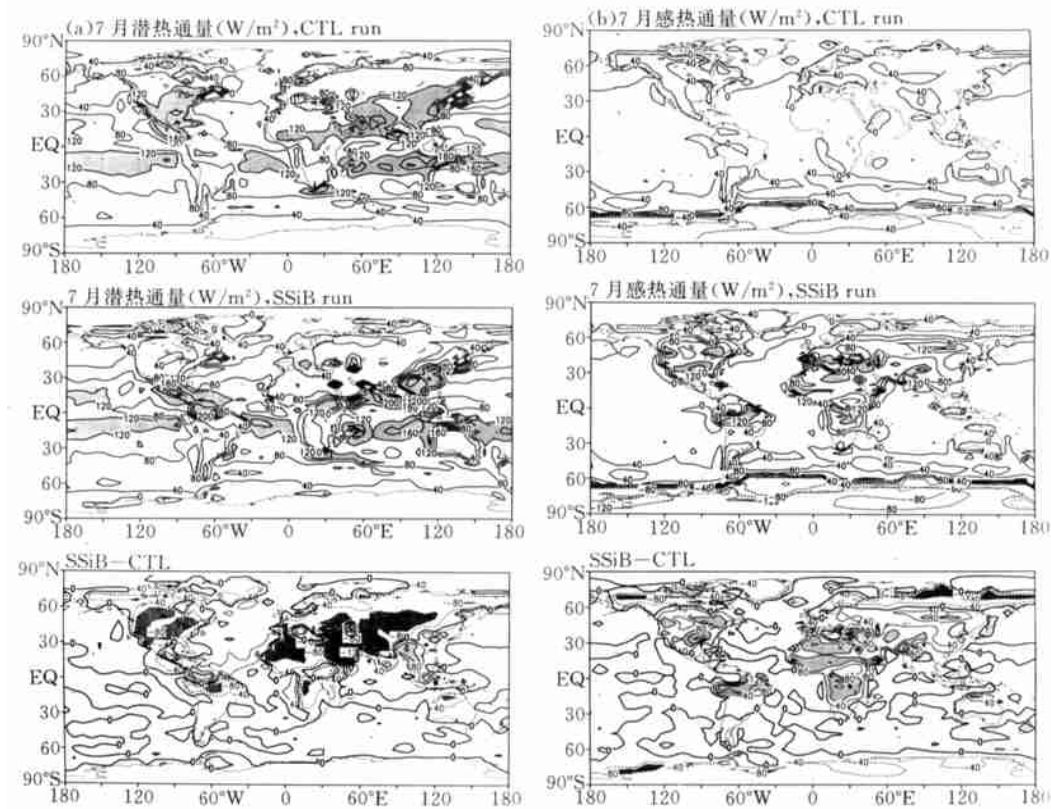


图 2 由 IAP/LASG 气候模式 CTL-AGCM (上图)、SSiB-AGCM (中图) 模拟得到 1979~1988 年的 7 月平均表面通量 (Wm^{-2}) 及其差异 (SSiB-CTL) (下图) 的分布 (a. 潜热; b. 感热)

相反地, 上述陆地潜热通量减小, 使地面变暖, 于是 SSiB-AGCM 模拟的感热通量较 CTL-AGCM 在陆地上大大增加, 如北半球副热带沙漠地区出现大于 120 W/m^2 的感热加热, 其大陆西岸的西非和北美感热通量与观测十分接近, 尤其在青藏高原地区的感热通量高达 180 W/m^2 以上; 而 CTL-AGCM 中全球陆地感热通量普遍偏低, 北非沙漠区甚至为小于 40 W/m^2 的低值区。由差异图可见, 全球沙漠干旱区 SSiB-AGCM 比 CTL-AGCM 增加 80 W/m^2 以上。

对地表气温的模拟(图3)最显著的改进是SSiB-AGCM模拟出北非-阿拉伯半岛、印度东北部的35℃高温区,只是中心强度比实测偏高5℃;而CTL-AGCM却不能模拟出这些高温区。由差异图可见,50°N以南大陆普遍升温,尤以北非最为显著,高达12℃以上。

图4是模拟的海平面气压的分布。SSiB-AGCM的改善在北半球较CTL-AGCM明显。如亚洲季风低压位置和控制范围都和实测接近,但轴线向东北方向伸得不够,而

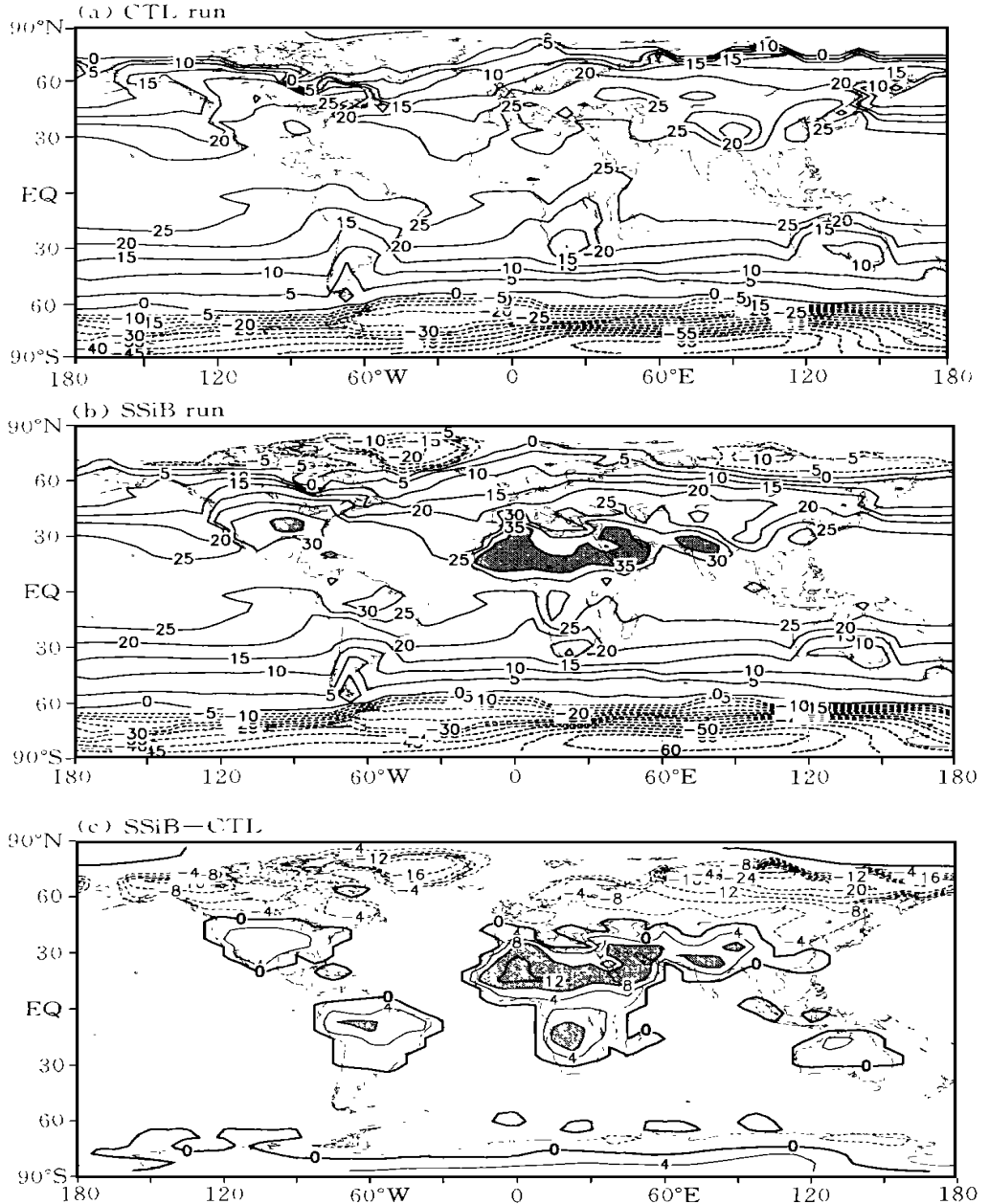


图3 由IAP/LASG气候模式CTL-AGCM(a)、SSiB-AGCM(b)模拟得到1979~1988年的7月平均表面气温()及其差异(SSiB-CTL)(c)的分布

CTL-AGCM 模拟的强度和范围都偏大。最大的改进是对北大西洋副热带高压形态的模拟,但中心值比实测低 5 hPa 左右,可是 CTL-AGCM 模拟的副高更弱。进一步的分析表明,与上图所示 SSiB-AGCM 模拟出北非地表高温区相对应(图 3),使得盛夏在北非大陆西岸感热加热率($\partial q_{sh} / \partial t < 0$)增强,不仅使陆面上气压降低;还加强上空负涡源的强度,于是在 β 效应作用下,使陆面西侧洋面上的北大西洋副热带高压得以加强^[11]。

图 5 给出了模拟的全球 7 月降水及其差异的分布。CTL-AGCM 中,赤道非洲至亚洲

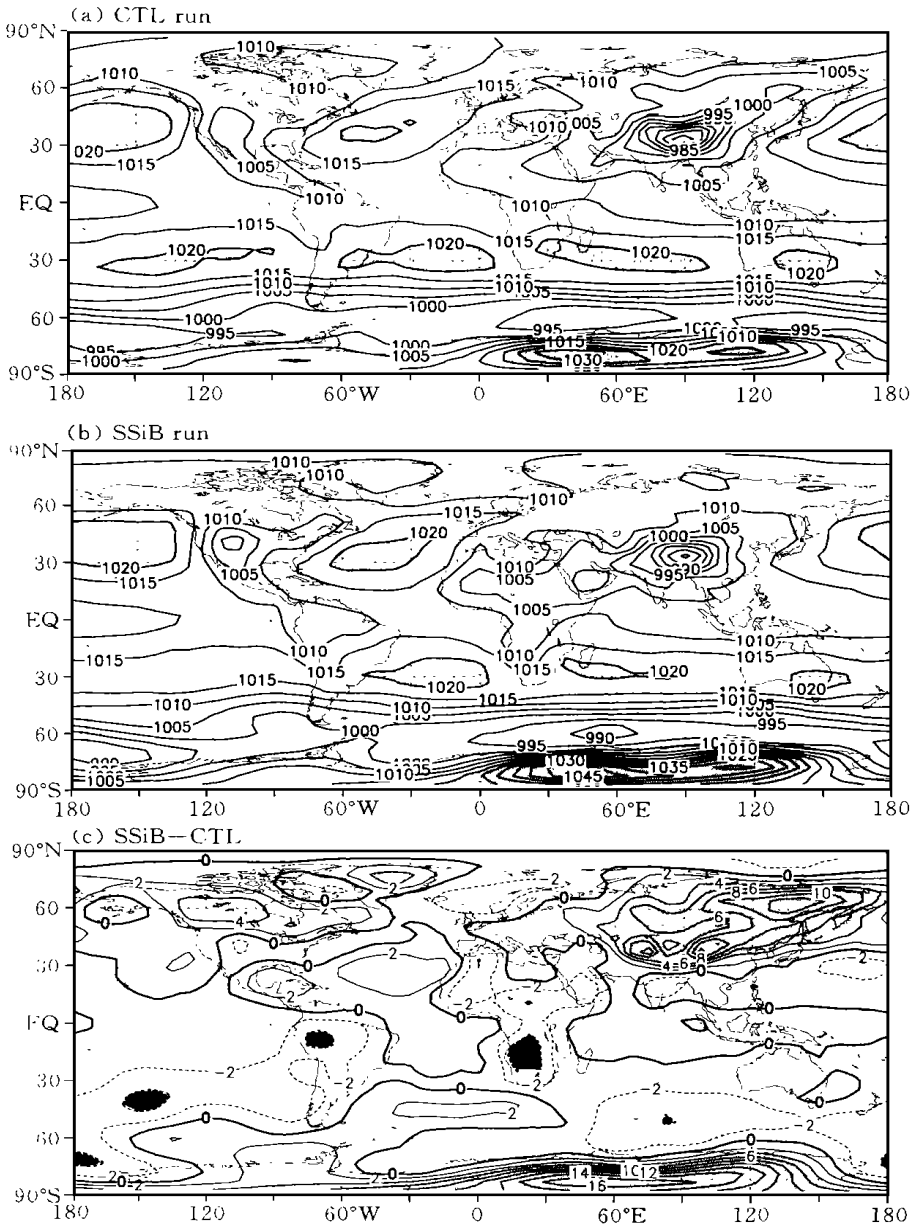


图 4 由 IAP/LASG 气候模式 CTL-AGCM (a)、SSiB-AGCM (b) 模拟得到 1979~1988 年的 7 月平均海平面气压(hPa)

季风区大于 2.0 mm/d 的大范围降水区连接成片, 降水中心明显偏大; 北美中西部干旱区也出现大于 4.0 mm/d 的降水。而 SSiB-AGCM 模拟的降水比 CTL-AGCM 改进明显, 最大的改善是北半球夏季内陆降水显著减小。如在近赤道非洲、青藏高原附近降水减值中心高达 8.0 mm/d 以上, 北美东部、西伯利亚东北部和印度尼西亚降水也减少 4.0 mm/d 以上。使得亚洲季风区、近赤道非洲雨带分开, 尤其是东亚沿岸 2.0 mm/d 降水分布与实测十分接近; 北非、北美西部干旱少雨区更趋近于实况。关于降水减小的原因试用图作如下解释。

图 6 分别是两组试验中再循环降水率及其差异的分布。可以清楚地看到, 7 月 SSiB-

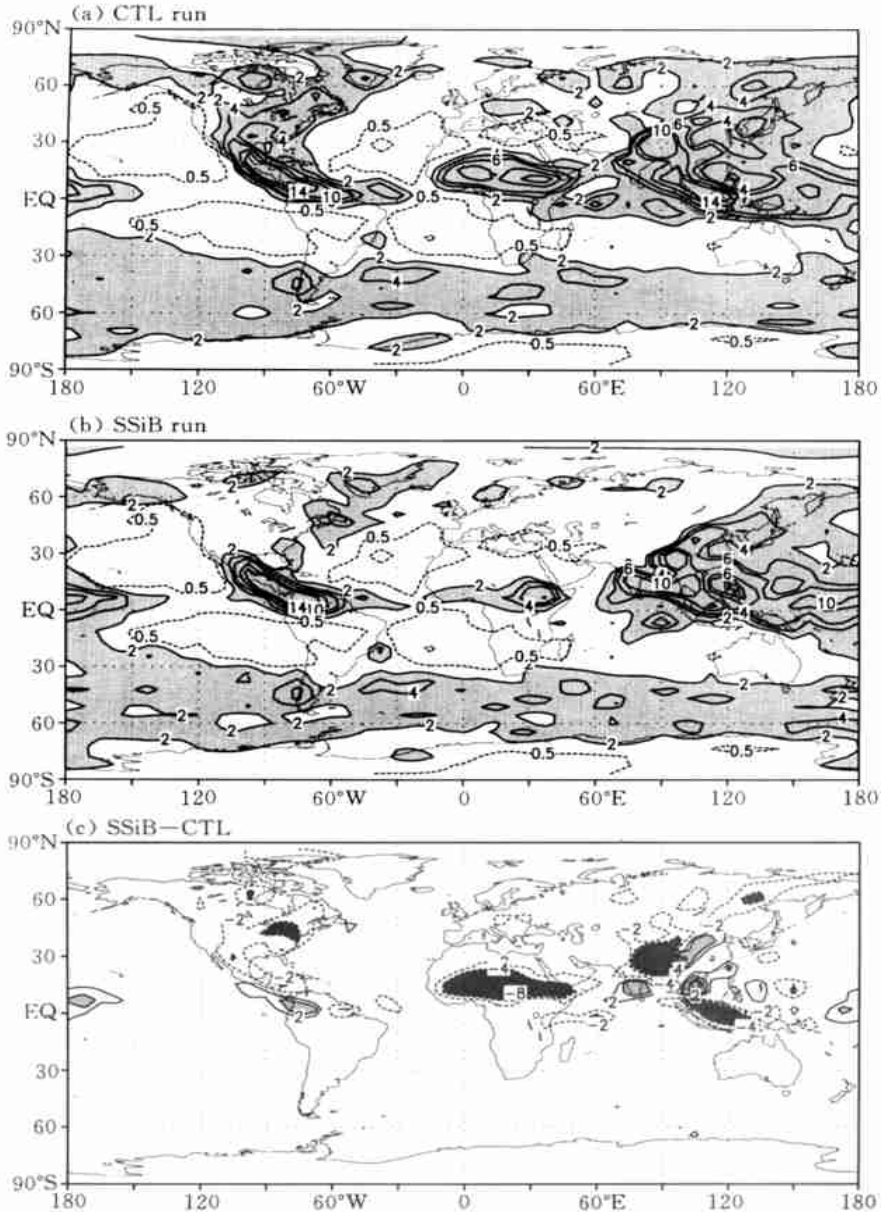


图 5 同图 3, 但为降水率 (mm/d)

AGCM 和 CTL-AGCM 中再循环降水率最大差异在夏半球陆地。CTL-AGCM 不仅高估副热带干旱陆地的再循环降水率, 而且在中高纬陆地亦夸大再生式降水。如在西伯利亚出现大范围大于 20%、甚至 60% 之高的再循环降水率(图 6a)。SSiB-AGCM 中上述区域再循环降水率普遍降至 25% 以下。从差异图可看出, 除了亚洲季风区以外, 全球各大洲的再循环降水率普遍减小, 在亚洲腹地、澳洲、北美及非洲南部这些干旱、半干旱地区再循环降水率的减值中心高达 10% 以上。注意到差异图上再循环降水率减小(增加)与表面潜热通

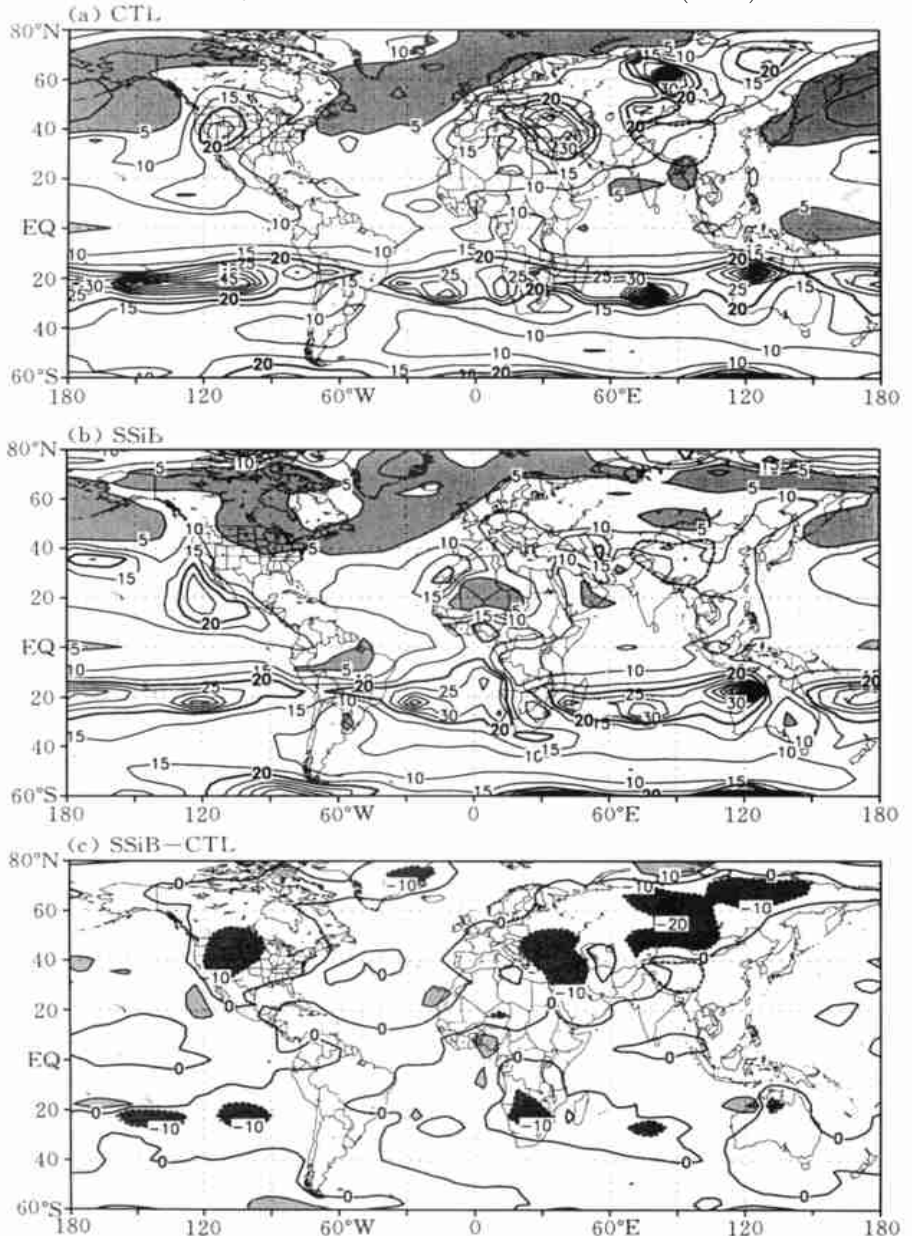


图 6 由 IAP/LASG 气候模式 CTL-AGCM(a)、SSiB-AGCM(b) 模拟得到 1979~1988 年的 7 月平均再循环降水率 (%) 及其差异 (SSiB-CTL)(c) 的地理分布

量负(正)异常一致(图 2a),尤其是陆地上表面潜热通量的显著减小区对应再循环降水率的一致减小。

以上的分析表明 CTL-AGCM 中由于全球陆地上湿润系数取单一固定常数,没有明显考虑地表水分循环的物理过程,从而夸大了陆面蒸发及再生式降水。在耦合的陆气模式中这种误差得到克服,从而使模拟的降水分布与实际十分接近。

需要说明,上述计算的再循环降水率是格点区域内的平均值,不同于一定范围(如几千公里尺度)地区的平均值。而且局地蒸散的水汽对降水形成的影响是与区域的面积大小呈线性关系,如亚马逊流域热带雨林中区域尺度为 2500 km 时,年均再循环降水率为 35%^[9],而当尺度减小至 2300 km 时,年均再循环降水率已降至 25%^[8]。根据区域面积和再循环降水率的线性关系式^[12],可求得模式中上述亚马逊流域高斯格点区域内年均再循环降水率分别为 9%(7%)(图略),这与前面提及的根据实测资料计算的亚马逊流域年均再循环降水率十分接近。表明降水再循环模式改进后结果是合理的。

由以上的分析可以明显地看到 SSiB 中陆表性质和条件通过对地表辐射平衡以及动量、热量和水汽的输送过程影响大气运动的状态,这些过程彼此相互作用并受地表能量平衡的约束,其中水分循环在全球气候形成中具有独特的作用。两种截然不同的陆面过程参数化方案对水分循环的模拟同样表现出很大的差异。

4.2 全球水分循环的气候平均态

CTL-AGCM 和 SSiB-AGCM 模拟的大气可降水量(\overline{PW})及其差异的分布如图 7 所示。可见 SSiB-AGCM 在全球沙漠和半干旱地区、主要山脉以及赤道洋面均比 CTL-AGCM 有显著改进。特别是北非撒哈拉、中亚、印度北部干旱沙漠区,在 CTL-AGCM 中 \overline{PW} 都高达 55 mm 以上,几乎与赤道印度洋至中太平洋全球水汽含量高值区相当;而在 SSiB-AGCM 中都降至 20 mm 以下,同时青藏高原附近亦减小一半左右,这些都与观测更为接近。此外,赤道印度洋至中太平洋、亚马逊流域 \overline{PW} 为 50 mm 的等值线与观测比较一致;而在 CTL-AGCM 中都偏大 10 mm 以上,且控制范围过于横向扩展等等。可见,CTL-AGCM 不仅在半干旱和沙漠地区出现高湿水汽含量,而且在热带也产生过高水汽分布。从差异图可以看出 SSiB-AGCM 中全球陆地上 \overline{PW} 普遍减小,尤以北非撒哈拉至西亚沙漠区为甚。如这些地区、西伯利亚和北美中东部 SSiB-AGCM 减值高达 20 mm 以上。这与表面蒸发的显著减小区是一致的(图 2a),足见蒸发的变化所造成的整层气柱持水量的变化很大。值得注意的是 \overline{PW} 正(负)差异与降水正(负)异常(图 5)相对应,表明整层大气持水量增加(减少),降低(增加)了大气稳定度,提供(减弱)了降水水源。

图 8a, b 分别给出 CTL-AGCM 和 SSiB-AGCM 模拟的 7 月平均纬向、经向定常水汽输送的分布。与 CTL-AGCM 相比,SSiB-AGCM 最显著的改进是再现了亚洲季风在全球大气水份循环中起的重要作用。如南亚季风区印度半岛及其附近海域水汽输送纬向非对称性的控制范围(50~110 E)与实测接近;而 CTL-AGCM 则过于沿赤道向西扩伸(0~110 E)(图 8a)。这是由于 SSiB-AGCM 中考虑的各种生态群落及其相应的表面粗糙度对低层流场因而也是水汽输送产生明显差异。图上还表明陆地上植被的季节变化对环流产生显著影响,尤其对季风。如在 SSiB-AGCM 中印度半岛和中南半岛地面粗糙度 7 月比 1 月各大 2 和 3.6 倍之多(植被类型为 2、12),明显地高于其它植被类型;而 CTL-AGCM 中

全球 z_0 各种季节均取固定值 29.62 cm, 7 月份显著地低于 SSiB-AGCM 中 z_0 的 72% 和 43%。这在 7 月份亚洲季风区经向水汽输送的分布上表现得更清楚。如图 8b 所示, SSiB-AGCM 较真实地模拟出实测中亚洲季风区明显的地域特征。强大的索马里越赤道气流在阿拉伯海上呈反气旋环流形势, 在印度半岛到孟加拉湾季风槽线区为气旋性环流, 从而形成印度为北风的水汽输送, 孟加拉湾为南风水汽输送的交错态势; 另一个向北的水汽输送位于江淮流域、华南至南海, 且其中有两个北风的水汽输送中心, 最大的位于长江中下游,

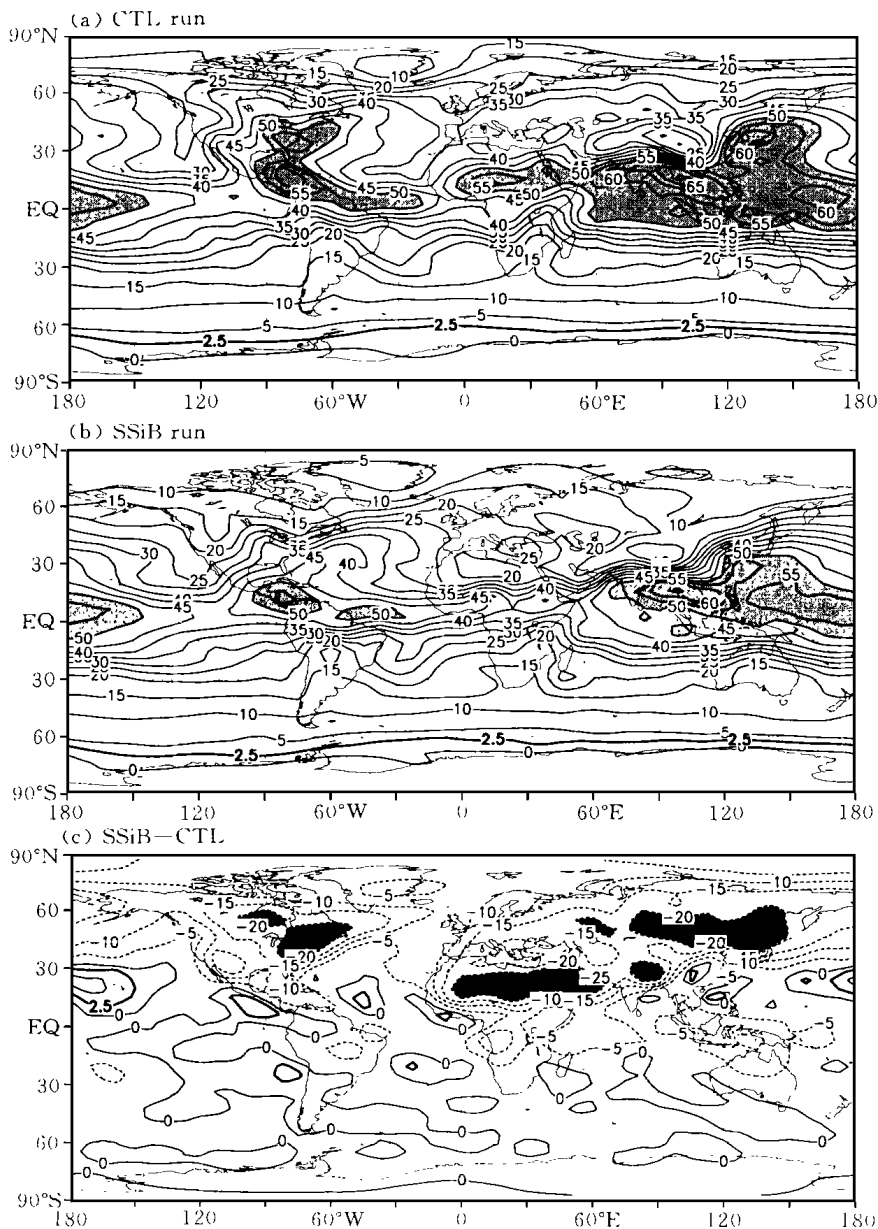


图 7 同图 3, 但为大气可降水量(mm)

其次位于南海中部,很好地再现了东亚季风中水汽输送具有更大的纵长经向尺度特征。而这些在 CTL-AGCM 中都偏为东西向,不能再现实测分布状况。

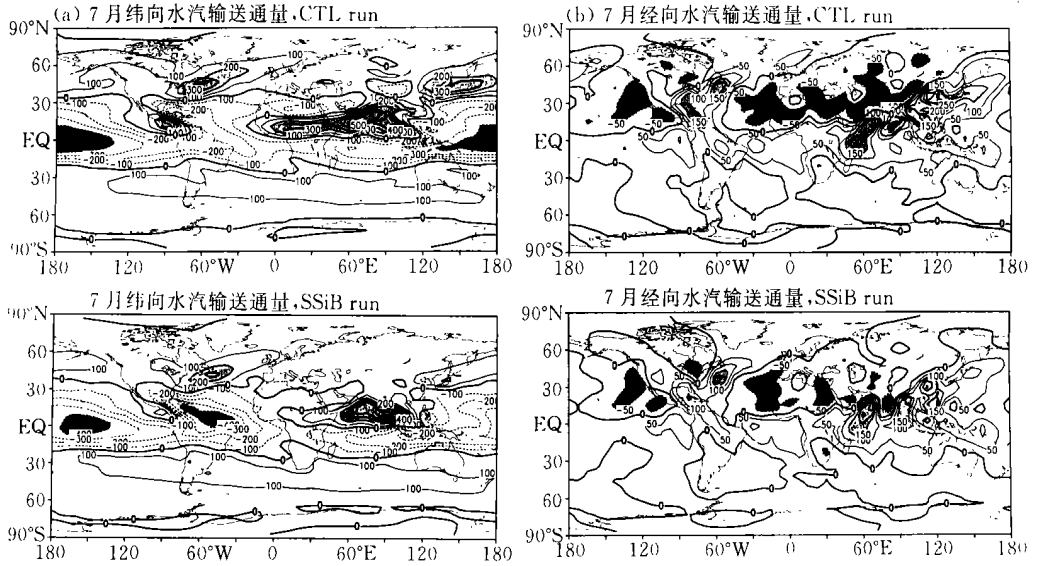


图 8 由 IAP/LASG 气候模式 CTL-AGCM (上图)、SSiB-AGCM (下图) 模拟得到的 1979~1988 年 7 月平均定常水汽通量
(a. 纬向水汽通量; b. 经向水汽通量。单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

4.3 水分平衡

利用水汽平衡方程可检验模式中大气水汽平衡状况,两组试验 $\{\nabla \cdot \bar{Q}(E - P)\}$ 的结果分别示于图 9。从图中看出,SSiB-AGCM 在全球陆地上差异已显著地减小。最大正(负)差异分别位于中南半岛经印度尼西亚岛屿至赤道西太平洋以及拉丁美洲至南美洲北部(海洋上副热带高压所在的范围);而在 CTL-AGCM 中青藏高原附近陆地上却出现大于 14.0 mm/d 以上的正差异。

可见,引入陆面细致的物理过程参数化后,GOALS/LASG 模式中全球水分平衡,尤其是陆地上有明显的改善。注意到在利用水汽平衡方程计算中已略去水汽扩散项,且用候平均的结果,以及只取有限的菱形截断波数,无疑都会对结果的定量表示有一定的影响。但从大尺度形势分析,仍能定性地反映主要结果。

5 小结与讨论

本文分析了 IAP/LASG GOALS 气候模式中两种不同陆面方案 10 a 积分结果,着重讨论了模式对盛夏气候平均态和全球水分循环的模拟能力,部分结果与相应的观测进行了比较。对再循环降水模式进行了改进,并用机制模式的解析研究进一步探讨了数值模拟 10 a 积分结果中陆面水文过程对气候影响的机制。结果表明:

虽然 SSiB-AGCM 尚存在一些有待改进之处,但发现引进陆面过程后,陆面次网格尺度过程的处理较 CTL-AGCM 完善,也改善了动量、热量和水汽通量的计算,从而使 SSiB-

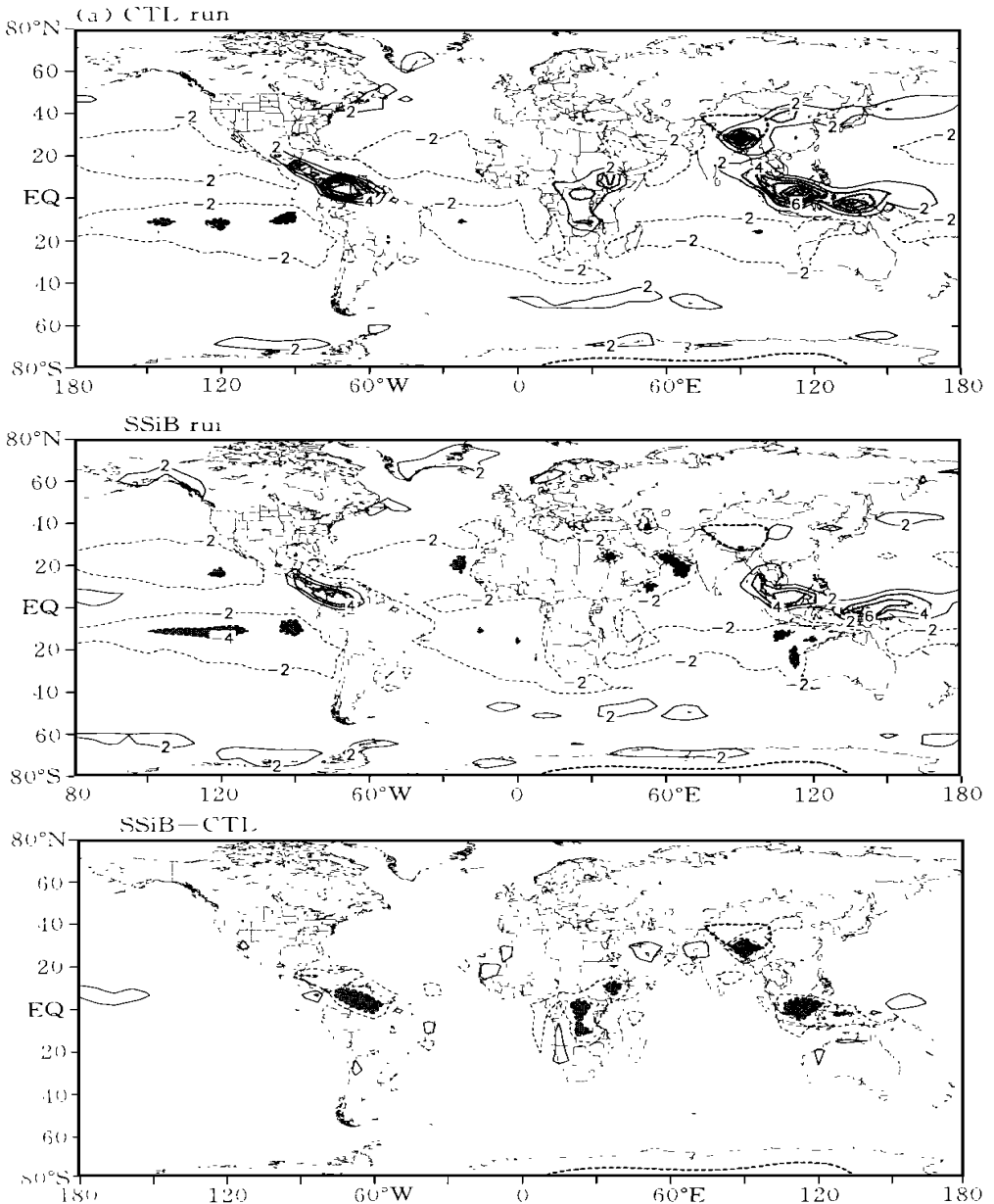


图9 由IAP/LASG气候模式CTL-AGCM(a)、SSiB-AGCM(b)模拟的
10a平均水汽平衡及其差异(SSiB-CTL)(c)的分布(单位:mm/d)

AGCM 比未耦合陆面过程的 CTL-AGCM 都有明显的改进, 模拟出合理的气候平均状态、水汽分布以及水汽输送的气候特征, 尤其是亚洲夏季风水汽输送独特的地域特征, 只是强度与观测仍有偏差。耦合模式较好地再现了大气环流, 尤其是陆面气候的基本特征。

陆气耦合模式再一次证实模式气候对地表蒸散是极为敏感的。再循环降水率可诊断测量这种局地蒸散或陆-气相互作用潜在性对局地降水形成的贡献, 不同的气候平衡态其

再循环降水率明显地不同。在充分耦合的陆-气环流模式中, 全球陆地, 尤其是盛夏北半球干旱、半干旱地区的再循环降水率明显减小与陆面上表面潜热通量的显著减小区一致, 从而克服了许多未耦合陆面过程的 AGCMs 普遍存在着整个陆地降水偏高的误差, 极大地改善了全球陆地的水分平衡状况。因之, 模拟的降水分布接近实际。

CTL-AGCM 中对地表水过程的参数化非常简单。陆面蒸发由湿润系数和潜在蒸发的乘积给出, 即该公式通过湿润系数 C_w 来修正。该系数不是由模拟的土壤湿度推算的, 而是假定蒸发是潜在蒸发的 $1/4$ 。它不同于 Bucket 模式中湿润系数的求法。计算潜在蒸发时将全球陆地粗糙度取固定值 29.62 cm 。这样, 没有明显地考虑地面水分循环, 也没有考虑水分由陆地流向海洋的输送, 从而使地表水过程的参数化大大地简化, 完整的水分循环被中断, 这种简单的蒸发参数化十分不真实, 常常表现出全球陆地上的降水偏多。此外, 还忽略了有植被地表对蒸发的附加阻力、土壤水分输送中扩散、降水的再蒸发以及大尺度降水强迫的非均匀性等许多重要的与水分循环有关的物理过程, 因而严重地影响了陆面气候的模拟。

总之, 数值试验结果的对比分析表明, 地表特征(尤其是植被)以及引入地表水过程参数化明显地改善了模式中水分循环过程, 其陆地分支和大气分支的相互作用对模式气候系统准平衡态的形成和维持极其重要。

参考文献

- 1 Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models. *J Geophys Res*, 1990, 95 (D10): 16601- 16615
- 2 Randall D A, Cess R D, Blanchet J P, et al. Intercomparison and interpretation of surface energy fluxes in Atmospheric General Circulation Models. *J Geophys Res*, 1992, 97: 3711- 3724
- 3 Dickinson R E. Land-atmosphere interaction. U S National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991- 1994. *Rev Geophys, Supplement*, 1995, 917- 922
- 4 Wu Guoxiong, Liu H, Zhao Y - C, et al. A nine - layer atmospheric general circulation model and its performance. *Advanced in Atmospheric Sciences*, 1996, 13 (1): 1- 18
- 5 Shi G Y. An accurate calculation and representation of the infrared transmission function of the atmospheric constituents: [Ph D Thesis]. Dept of Sci, Tokyo University of Japan, 1981, 191pp
- 6 Xue Y K, Sellers P J, Kinter J L, et al. A simplified biosphere model for global climate studies. *J Clim*, 1991, 4: 345- 364
- 7 Budyko M I, Drozdov O A. Zakonomernosti vlagoooborota v atmosfer (Regularities of the hydrologic cycle in the atmosphere). *Izvestiya AN SSSR, Seriya Geograficheskaya*, 1953, 4: 5- 14
- 8 Brubaker K L, Entekhabi D, Eagleson P S. Estimation of continental precipitation recycling. *J Clim*, 1993, 6: 1077- 1089
- 9 Eltahir E A B, Bras R L. Precipitation recycling in the Amazon Basin. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1994, 119: 779 - 793
- 10 伊兰. 亚洲季风区的水分循环与水分收支—GEWEX 亚洲季风区实验(GAME)预研究[博士论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1996, 156pp
- 11 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 I. 尺度分析. *气象学报*, 1999, 57 (3): 257 ~ 263
- 12 Eltahir E A B. Interactions of hydrology and climate in the Amazon Basin. Doctorate thesis. Cambridge: Mass Inst of Technol, 1993, 188pp

NUMERICAL SIMULATIONS OF EFFECTS OF LAND SURFACE PROCESSES ON CLIMATE: IMPLEMENTING OF SSiB IN IAP/LASG AGCM L9R15 AND ITS PERFORMANCE

Sun Lan

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081*)

Wu Guoxiong Sun Shufen

(*National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080*)

Abstract

This is an investigation of exchanges of energy and water between continents and the atmosphere. The Simplified Simple Biosphere (SSiB) model developed by Xue et al. (1991) was designed to explore the impact of and mechanisms of land surface-atmosphere interactions on hydrological cycle and general circulation by implemented in a modified version of IAP/LASG global spectral general model (L9R15 AGCM). The results of comparing the monthly simulations of AGCM with and without SSiB show that SSiB can produce a better partitioning of the land surface fluxes of heat and moisture and its diurnal variations. It also gives the transport of energy and water among atmosphere, vegetation and soil processes explicitly and realistically. So the coupled SSiB-AGCM runs lead to most conspicuous improvements of the simulated circulation, precipitation climatology as well as mean water vapor content and its transport, particularly in the Asian monsoon region in the real world than CTL-AGCM. It is also pointed out that both the implementation of land processes parameterization and the variations in land surface into the GOALS model improve hydrological balance over continents greatly and have a significant impact on the simulated climate.

Improved precipitation recycling model was employed to verify the impact of and mechanisms of land surface hydrology parameterization for atmospheric general circulation model on hydrological cycle and precipitation climatology. It is shown that as a consequence of reduced evapotranspiration over all land, particularly in the arid and semi-arid region during the Northern Hemisphere summer, the recycling precipitation rate is significantly reduced. Therefore the coupled SSiB-AGCM runs reduced the bias of too much precipitation over land surface in most AGCMs and much improved in the simulated precipitation over land in many regions of the world than CTL-AGCM.

Key words: Coupled land-atmosphere model (SSiB-AGCM), Precipitation recycling model, Recycling precipitation ratio, Hydrological balance, Simulated precipitation over land.