

海气耦合气候模式对大气中水汽输送、辐散 辐合与海气间水通量交换的模拟*

周天军 宇如聪 张学洪 俞永强
李薇 刘海龙 刘喜迎

(中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 基于 ECMWF 再分析结果对 LASG 第三代全球海洋-大气-陆地耦合系统模式 (GOALS) 的两个版本和第四代耦合气候模式初始版 (FGCM-0) 所模拟的大气水汽输送与辐散辐合特征、海气间水通量交换, 进行了评估分析。结果表明: (1) 对垂直积分的水汽通量场的流函数及其对应的无辐散水汽通量矢量的模拟, 三个耦合模式都能够较为合理地再现副热带大洋的涡旋结构、中纬度西风带的东向水汽输送、赤道东风带的西向水汽输送和东亚夏季风水汽输送等行星尺度特征及其季节变化, 只是 GOALS 的涡旋位置、FGCM-0 的涡旋中心强度, 较之实际略有偏差。(2) 反映在垂直积分的水汽通量场的势函数和对应的无旋水汽矢量上, 对南北半球副热带大洋水汽辐散区、热带辐合带 (ITCZ)、东亚夏季风区强烈的水汽辐合特征等的模拟, FGCM-0 的结果相对合理。GOALS 的热带辐合中心过于集中在印度尼西亚群岛附近, 东亚夏季风水汽辐合中心偏南。(3) 关于海气水通量交换, FGCM-0 较为理想地再现了副热带的净蒸发、ITCZ 和中高纬度的净降水特征以及夏季 ITCZ 的季节性北移, 但对南太平洋辐合带 (SPCZ)、副热带南大西洋的净蒸发特点, 以及阿拉伯海和孟加拉湾季节变化的差异, 模拟结果不理想。FGCM-0 在模拟 SPCZ 上的偏差, 是由海气耦合过程造成的。GOALS 未能合理再现 ITCZ 和 SPCZ 降水大于蒸发的特点, 其净降水集中在西太平洋暖池区; 但对副热带南大西洋、北印度洋水通量季节变化的模拟相对合理。

关键词 耦合气候模式; 水汽输送; 海气水通量交换; 模式评估

1 引言

自 1980 年世界气候研究计划 (WCRP) 成立以来, 它所组织和推动的所有大型科学研究和试验计划, 例如热带大气—全球海洋研究计划 (TOGA)、世界大洋研究计划 (WOCE)、全球能量与水循环试验 (GEWEX) 和近年推出的气候变率与可预报性研究 (CLIVAR) 等, 均包含两个最基本的内容: (1) 大气、海洋、海冰等观测资料的收集、整编和全球气候观测系统的逐步建立; (2) 气候系统模式的发展和完善。到了 20 世纪 80 年代末和 90 年代初, 更以推动这两大内容的有机结合为宗旨, 相继组织和推出了大气模式比较计划 (AMIP)、海洋模式比较计划、陆面过程模式比较计划

2000-03-21 收到, 2000-08-04 收到修改稿

* 中国科学院“百人计划”项目“海气耦合模式的有效化研究”、国家自然科学基金资助项目 40005004、中国科学院知识创新项目 KZCX2-108 以及“王宽诚博士后奖励基金”共同资助

(PILPS) 和耦合模式比较计划 (CMIP) 等。开展对气候模式的评估、验证已成为国际上的热门研究领域。

气候模式是研究气候系统的活动规律、了解过去的气候演变、预测未来的气候变异、评估人类活动对气候影响的强有力工具, 尽管当前气候模式已在模拟和预测中得到广泛应用, 但在未来相当长的时期内, 仍处于试验阶段。要利用气候模式真实再现客观气候系统, 预测其未来变化, 必须充分利用实际观测资料, 对现有模式进行系统性的检验, 准确评估其能力, 发现其薄弱环节, 从而不断对其加以完善。从 50 年来数值天气预报的发展历史, 可以看出这种检验、评估和不断改进的过程是气候模式发展的必然阶段。

水循环是联系气候系统各个圈层的重要纽带^[1]。在气候系统中, 海洋与大气之间存在着非常强的水通量交换。据估计, 全球蒸发的 86%、全球降水的 78% 是集中在海洋上的, 海洋作为水汽之源, 其蒸发和降水形势的微小变化, 就足以引起相对较小的陆表水循环的剧烈变化^[2,3]。因此, 评估耦合气候模式所反映的水循环过程, 是气候模式评估中的一项重要工作。

2 模式简介、计算方法和评估方案

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) 发展的第三代全球海洋-大气-陆地耦合系统模式 (Global Ocean Atmosphere Land System Model), 简称为 GOALS^[4]。GOALS 模式的第一版本于 1996 年底正式定型, 随后不断发展完善, 陆续推出第二、第三和第四版本。其中第二版本 GOALS-2 和第四版本 GOALS-4 分别参加了国际耦合模式对比计划的第一阶段 (CMIP I) 和第二阶段 (CMIP II), 本文分析讨论的即是这两个版本的长时间积分结果。GOALS-2 和 GOALS-4 的基本动力框架完全相同。其大气部分是一个在引进基础上改进的谱模式, 水平方向为菱形十五波截断, 水平分辨率约相当于 7.5° (经度) \times 4.5° (纬度); 垂直方向采用 σ 坐标, 分为不等间距的 9 层。为减小截断误差, 模式引入了一个全球平均气温和重力位势高度的标准层结扣除^[5]。辐射加热采用关于整个长波和短波近红外波段气体吸收透过率函数的拟合方案 (分布)^[6,7]。模式中的云由模式变量诊断得到^[8]。GOALS 在大气模式耦合了一个比较先进的陆面过程模式, 它包括 1 个植被层和 3 个土壤层, 考虑了 11 种类型的植被^[9]。GOALS 的海洋部分为一原始方程格点模式, 在垂直方向使用 η 坐标, 分为不等距的 20 层, 最大深度 5 500 m。模式水平分辨率为 5° (经度) \times 4° (纬度), 采用 B 网格系统。模式的海陆分布和海底地形近于真实^[10]。海洋模式耦合了一个热力学海冰模式, 来预报两极附近的海冰分布和厚度^[11]。

表 1 LASG 海-气-陆耦合系统模式 GOALS 两个版本间的差别

模式版本	物理过程	耦合方案	耦合通量
GOALS-2	考虑太阳辐射的季节变化	逐月通量距平耦合	热通量和动量通量
GOALS-4	考虑太阳辐射的日变化	逐日通量距平耦合	热通量、动量通量和水通量

GOALS-4 较之 GOALS-2 的改进, 主要表现在三个方面: 首先, GOALS-4 的大气部分考虑了太阳辐射的日变化, 而 GOALS-2 则只考虑了月变化; 其次, 海洋模式与大气模式的耦合, GOALS-2 只考虑了热通量交换和动量交换, 而 GOALS-4 则在此基础上, 进一步引入海气间的水通量交换; 第三, 海洋模式与大气模式的耦合方案不同, GOALS-2 采用“修正的月通量距平耦合方案”^[12], GOALS-4 则采用逐日耦合。二者间的上述差别, 具体可概括为表 1。这两个模式版本均成功控制了海表气候漂移, 完成了 200 年的长期积分。

NCAR CSM 是一由大气模式 (CCM3, L18T42)、海洋模式 (NCOM)、陆表生物圈模式 (LSM)、简单的土壤水循环模式、动力学和热力学海冰模式组成的气候系统模式。各模式子系统通过一个耦合器耦合起来。有关该模式的具体技术细节, 可查阅文献[13]。LASG FGCM-0 是基于 NCAR CSM 的耦合框架, 将其海洋分量模式替换为 LASG 新近发展的第三代大洋环流模式 (L30T63 OGCM)^[14]而发展起来的¹⁾。

本文重点考察大气的整体水汽输送等特征, 垂直积分的大气水汽通量项可以表示为

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} q \mathbf{V} dp. \quad (1)$$

对任一变量 A , $\partial A / \partial p$ 项在 $\ln p$ 坐标系中转变为 $(1/p)(\partial A / \partial \ln p)$ 的形式, 利用中央差分格式来计算比直接在 p 坐标系中差分要更为精确一些^[15]; 相应的, 垂直积分变为 $(1/g) \int_{p_t}^{p_s} A dp = (1/g) \int_{\ln p_t}^{\ln p_s} p A d \ln p$, 本文即作此处理。

对于月平均, 水汽通量可以分解为定常和瞬变两个分量,

$$\bar{\mathbf{Q}} = \mathbf{Q}_S + \mathbf{Q}_T = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} \bar{q} \bar{\mathbf{V}} dp + \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} q' \mathbf{V}' dp. \quad (2)$$

定常分量反映的是类似季节性的大气活动中心那样的、保持相对稳定的环流系统对水汽通量项的贡献, 而瞬变分量反映的是偏离月平均状况的、变化频繁的系统的贡献。本文重点分析的是其定常分量, 因为 GOALS-2 的大气部分只考虑了太阳辐射的季节变化, 同时海洋与大气模式的耦合, 是逐月进行的, 这使得耦合系统难以真实再现瞬变分量的变化。

为考察水汽的辐散、辐合及输送特征, 将其分解为无旋和无辐散两部分:

$$\mathbf{Q} = \nabla \varphi + \mathbf{k} \times \nabla \psi, \quad (3)$$

其中 φ 为水汽势函数, ψ 为水汽流函数, 有

$$\nabla^2 \psi = \mathbf{k} \cdot \nabla \times \mathbf{Q} = \nabla \cdot \mathbf{Q} \times \mathbf{k}, \quad (4)$$

$$\nabla^2 \varphi = -\nabla \cdot \mathbf{Q}. \quad (5)$$

求解泊松方程, 可得到垂直积分水汽通量的流函数和势函数; 后按照下式, 进一步求得无辐散和无旋的水汽通量部分:

1) 俞永强等, IAP LASG 第四代全球海气耦合模式 (私人通信)。

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{g} \int_0^{p_s} q u dp \right) \Big|_{\varphi} = - \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \\ \left(\frac{1}{g} \int_0^{p_s} q v dp \right) \Big|_{\varphi} = - \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{g} \int_0^{p_s} q u dp \right) \Big|_{\psi} = - \frac{\partial \psi}{\partial y}, \\ \left(\frac{1}{g} \int_0^{p_s} q v dp \right) \Big|_{\psi} = \frac{\partial \psi}{\partial x}. \end{cases} \quad (7)$$

关于海气间水通量交换的估算, 沿垂直方向从地表到大气顶, 单位气柱内总水汽的平衡方程可表示为

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{Q} = E - P, \quad (8)$$

其中, $w = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} q dp$ 为大气可降水量; E 为海表蒸发项, P 为降水项。对于较长时间(月)、较大范围的平均状况而言, 大气的局地水汽贮存率 $\partial w / \partial t$ 接近于零, 因此, 方程(8)可简化为

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{Q}} = \bar{E} - \bar{P}. \quad (9)$$

根据(9)式即可估算出全球大洋上的海气水通量交换。

从 GOALS-2、GOALS-4 和 FGCM-0 的长期积分中各选取 10 年, 求其平均, 得到月平均的比湿、风速和表层气压。GOALS 和 FGCM-0 模式的大气部分的水平分辨率分别相当于 $7.5^\circ \times 4.5^\circ$ 和 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$, 本文为处理方便起见, 所有的模式输出量, 都采用双线性插值技术, 将其均匀内插到 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 分辨率的水平网格上。用于反映实际的大气水循环特征的是 ECMWF 再分析月平均资料, 从 1979 到 1993 年总计 15 年, 取其平均, 代表气候平均状况, 再分析资料分布在 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的经纬网格上^[16]。

3 分析与讨论

3.1 大气水汽输送

图 1 给出观测和模拟的 1 月份垂直积分的水汽通量场的流函数, 及其对应的无辐散水汽通量矢量。其中流函数的单位应为 kg s^{-1} , 这里除以水的密度, 将其转换为 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, 再除以 10^6 , 最终单位为 $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 。需说明的是, 本文考察的所有指标, 都是月平均的定常分量, 以下不再重复说明。无辐散通量反映的是水汽沿等压线输送的部分。ECMWF 资料揭示, 1 月份全球大气水汽输送的主要特征, 是与副热带涡旋相对应, 北半球大洋上存在顺时针的涡旋结构, 南半球大洋上存在逆时针的涡旋结构; 在南、北半球副热带涡旋的西缘, 自低纬向高纬存在很强的水汽输送, 在副热带涡旋的东缘, 则为很强的向赤道水汽输送; 中纬度为西风带水汽东向输送, 赤道和热带地区则为东风带水汽西向输送。对比 ECMWF 资料, 不难发现, FGCM-0 和 GOALS 都能够

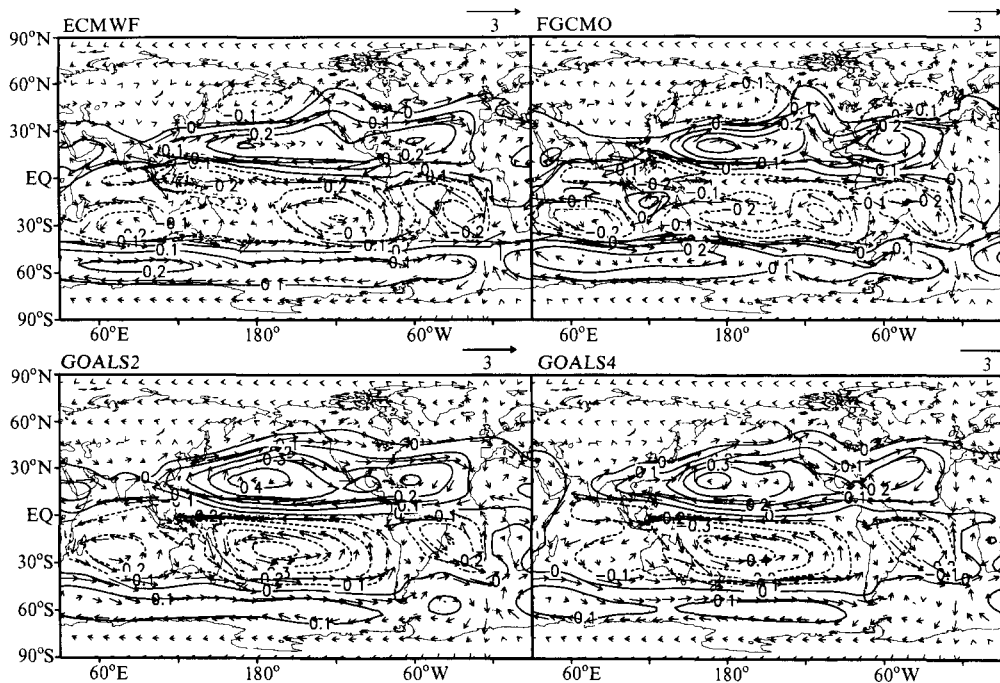


图1 1月份垂直积分的水汽通量场的流函数(细等值线, 单位: $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 等值线间隔为0.1)和无辐散的水汽通量场(矢量, 单位: $10^2 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

较为理想地反映上述行星尺度特征。不足之处在结构上, GOALS 模拟的北太平洋副热带涡旋的北缘偏北, 使得实际存在于 $30\sim 60^\circ\text{N}$ 之间的弱逆时针涡旋, 未能得到反映; 同时, 模拟的南太平洋副热带涡旋的中心位置, 明显偏西。在强度上, FGCM-0 模拟的南半球副热带涡旋偏弱至少 $10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, GOALS 模拟的北太平洋副热带涡旋则偏弱 $10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 左右。

与图1相对应, 图2给出了7月份的情况。夏季北半球副热带涡旋显著增强, 范围北伸; 同时, 印度洋季风环流出现, 典型特征是强劲的索马里急流, 这增强了跨赤道的北向水汽输送。赤道东风带是连接三个大洋的水汽输送的主要通道。三个耦合模式都能够较为合理地再现上述季节变化, FGCM-0 模拟的副热带涡旋结构, 和实际极为相似, 只是强度偏弱 $10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 左右; GOALS 的结果, 尽管模拟的北太平洋副热带涡旋范围略偏北, 但强度却近于实际。另外, 对北大西洋副热带涡旋的模拟, 在强度上, 三个模式的结果都偏弱, 其中 GOALS-4 较之 GOALS-2 又弱 $10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 。

这里特别强调的是对东亚夏季风特征的模拟。ECMWF 资料揭示, 大致以印度半岛中部为界, 在热带印度洋和东亚地区, 流函数呈现出北负南正的偶极子型。这种南北反对称型的存在, 使得南半球水汽跨越赤道, 通过索马里急流北向输送, 随后在喜马拉雅山系南麓折而向东, 经由中南半岛和南海, 进一步向北输送。该偶极子型呈南强北弱的特点, 其中心强度分别为 $4 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 和 $2 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 。对比之下, 不难发现, 三个耦合模式都在一定程度上真实地反映了上述特点, 但在结构上, GOALS 显然更接近

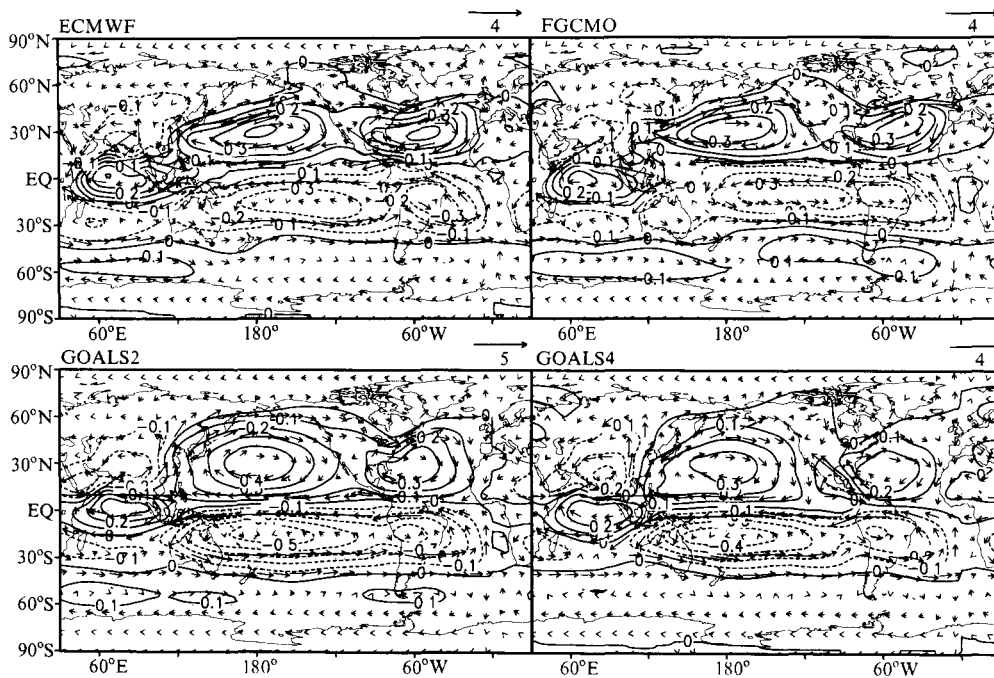


图2 同图1, 但为7月份的情况

真实。

3.2 大气水汽的辐散辐合

图3给出观测和模拟的1月份垂直积分的水汽通量场的势函数(单位应为 kg s^{-1} , 这里除以水的密度, 将其转换为 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, 再除以 10^6 , 最终单位为 $10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$), 及其对应的无旋水汽矢量。与图3相对应, 图4给出7月份的情况。无旋通量是水汽穿过等压线输送的部分, 揭示水汽的辐散、辐合特征。由图可见, 相对于无辐散部分, 无旋部分要小一个量级, 是个小量, 但它对水汽的源和汇具有重要作用。

根据ECMWF资料, 1月份北半球副热带大洋、南半球副热带东太平洋是水汽辐散区, 从热带印度洋向东、经由印度尼西亚群岛到南太平洋辐合带(SPCZ), 为较强的水汽辐合区; 中纬度南大西洋西部, 也存在较强的水汽辐合。耦合模式的模拟结果, FGCM-0无论在空间分布型, 还是在强度上, 结果都较为合理。GOALS-2的结果, 一是模拟的辐散、辐合中心强度偏大, 二是东太平洋辐散中心位置偏西, 南太平洋辐合中心过于集中在印度尼西亚群岛到澳洲之间。相比之下, GOALS-4对南太平洋辐合中心的模拟, 在强度上有所改善。

7月份全球水汽辐散、辐合的显著特点, 是东亚季风区为很强的水汽辐合区; 北太平洋大致以 180° 日界线为界, 西部为水汽辐合区, 东部为辐散区; 印度洋大致以赤道为界, 东北为水汽辐合区, 以南为水汽辐散区。对比之下, FGCM-0对上述特征的模拟较为理想, 只是其辐合中心的强度偏弱。GOALS的不足之处是模拟的东亚季风区水汽辐合区过于偏南, 已跨越赤道进入澳洲大陆, 东太平洋辐散中心的零线, 向西已超过

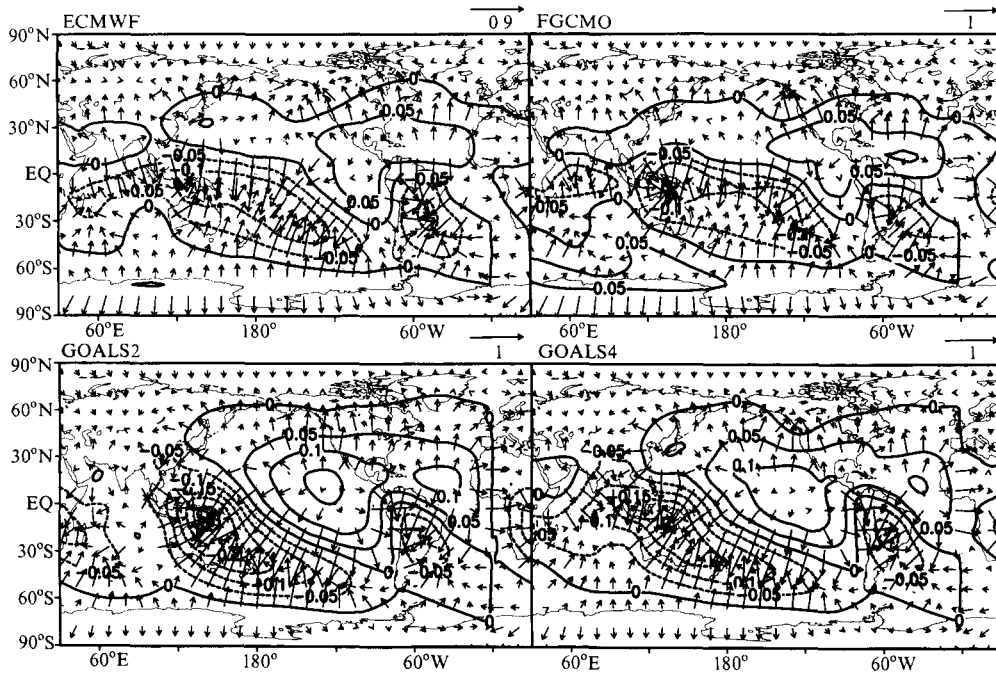


图3 1月份垂直积分的水汽通量场的势函数(细等值线, 单位, $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 等值线间隔为0.1) 和无旋的水汽通量场(矢量, 单位, $10^2 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

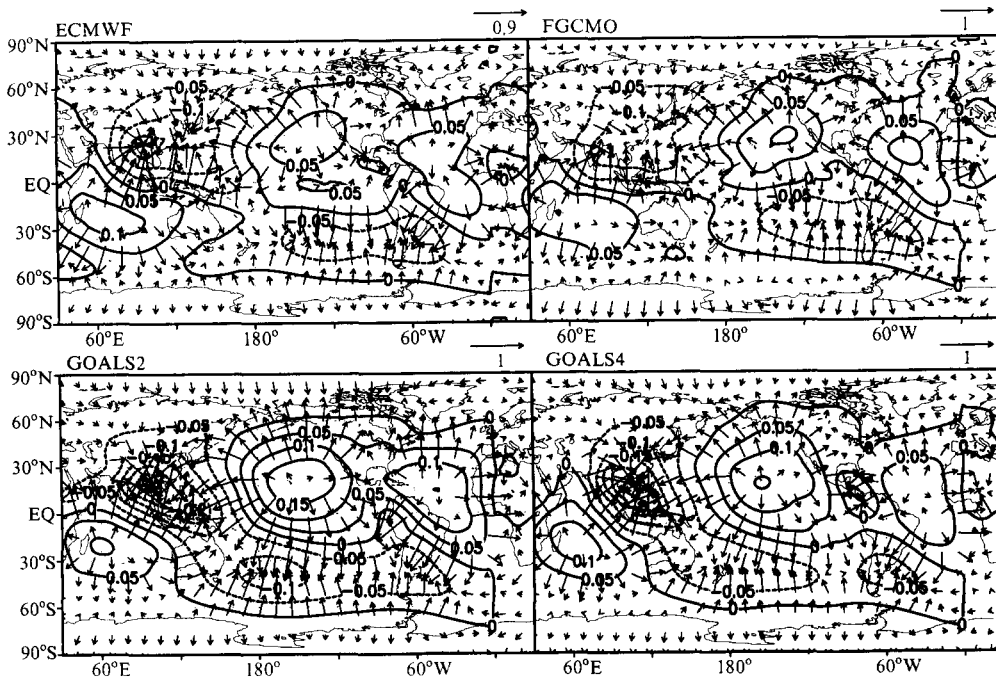


图4 同图3, 但为7月份的情况

日界线; 其辐散、辐合中心的强度, 较之实际偏大。另外, 注意到对副热带大西洋辐散中心的模拟, 在强度上, GOALS-4 较之 GOALS-2 有明显改进。

3.3 海气间水通量交换

图 5、6 分别给出了根据 ECMWF 资料估算和耦合模式模拟的全球海气间水通量交换在 1、7 月份分布的情况。实际的海气水通量交换季节变化的主要特征, 一是副热带的净蒸发在冬季加强, 二是 ITCZ 的位置偏向夏半球, 对应的 SPCZ 范围在 7 月份明显北缩。FGCM-0 较为合理地反映出北半球副热带净蒸发和 ITCZ 的季节变化, 其不足主要在于: 对实际呈西北-东南向的 SPCZ 的模拟, 冬夏季在纬向方向都过于平直, 这直接影响到对南半球副热带东太平洋净蒸发区的模拟; 对副热带南大西洋的净蒸发区的模拟, 冬夏季都偏弱。相对之下, GOALS 的主要缺点是模拟的 ITCZ 特征, 在冬夏季都不明显, 但对 FGCM-0 难以反映的副热带南大西洋的季节变化, GOALS 的结果相对合理。

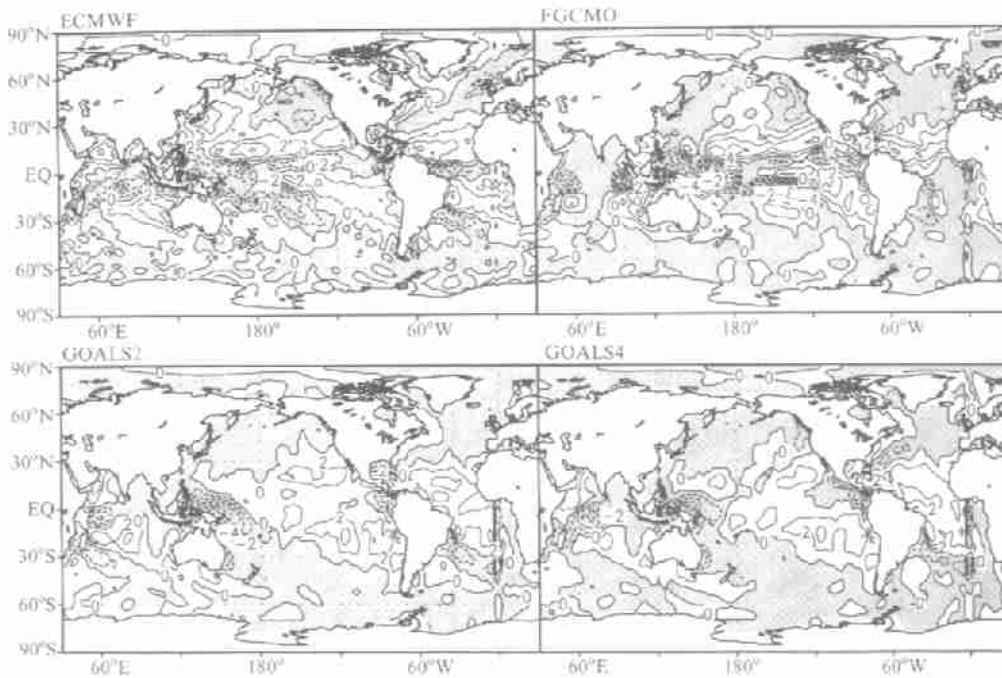


图 5 根据 ECMWF 资料估算和耦合模式模拟的 1 月份全球海气间水通量交换 (单位: mm d^{-1})

需要强调的是对印度洋水通量季节变化的模拟。北印度洋的季节变化, 孟加拉湾不同于阿拉伯海: 前者冬季失去水分、夏季得到水汽; 而整个阿拉伯海在 1 月份都失去水汽, 夏季其西部依然很干, 但东部却存在净降水 (这实际上是夏季风水汽输送的结果)。对比之下, FGCM-0 未能反映出北印度洋的上述季节变化特点, GOALS 对阿拉伯海季节变化的模拟则较为成功。

对应于图 5 和图 6, 图 7 中给出了 1、7 月份纬向平均的全球海气水通量的经向廓线。对比之下, FGCM-0 能够合理再现北半球副热带 ($20\sim 30^{\circ}\text{N}$) 的净蒸发及其季节变化, 以及夏季 ITCZ 的北移及其净降水特点, 但对夏季南半球副热带的净蒸发特点,

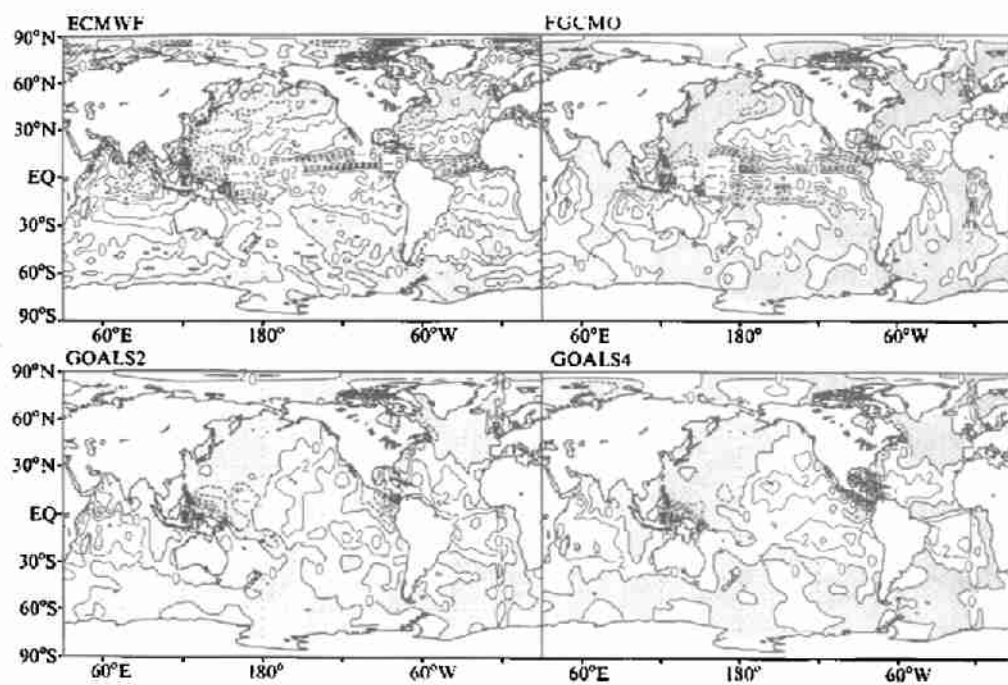


图6 同图5, 但为7月份的结果

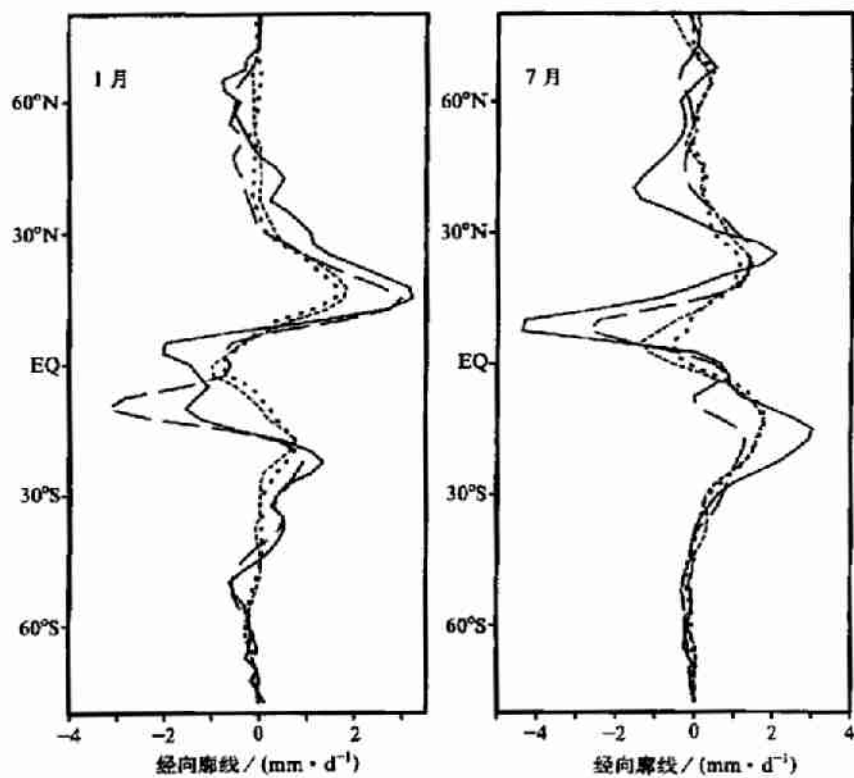


图7 1月份和7月份纬向平均的全球海气间水通量交换的经向廓线
 实线: ECMWF; 长虚线: FGCM-0; 短虚线: GOALS-2; 点线: GOALS-4

以及 1 月份南半球 ITCZ 的净降水特征, 模拟的都偏差。因此, 从纬向平均廓线上看来, FGCM-0 对北半球水通量分布的模拟, 明显好于南半球。GOALS 对南北半球副热带的净蒸发特点及其季节变化的模拟, 结果相对较合理, 主要不足是对 ITCZ 的模拟。另外, GOALS 的两个版本之间, 在水通量的分布型上没有大的区别, 只是在量值上略有不同。

3.4 海气耦合过程对水通量交换的影响

根据上面的讨论, FGCM-0 的一个主要不足, 是模拟的南太平洋辐合带在纬圈方向过于平直, 且靠近赤道, 使得无论是年平均还是冬夏季, 热带的净降水带都呈现出类似“双 ITCZ”的特征, 即实际的 SPCZ 特征在模式中被极大地歪曲了。为考察造成这种状态偏离的原因, 我们利用 AMIP 计划提供的 1979~1993 年的逐月 SST 资料, 强迫 FGCM-0 的大气模式部分 CCM3, 完成 15 年的积分。对模式大气输出量取 15 年平均, 代表月平均气候状态。随后, 同样按照式 (9), 计算得到单独的大气模式模拟的海面上的蒸发降水差, 其冬、夏季情况如图 8 所示。将图 8a、b 分别与图 5、6 中对应的 ECMWF 和 FGCM-0 结果做对比, 可以发现, 利用观测 SST 强迫单独的大气模式, 可以相对较为理想地再现 ITCZ 和 SPCZ 的水通量分布特点及其季节变化。实际上, FGCM-0 对 SPCZ 的歪曲, 是当今国际上大部分海气耦合模式所共同存在的问题。Mechoso 等^[17]曾对国际上 11 个应用较广的海气耦合模式所模拟的赤道太平洋的季节循环进行了分析, 发现大部分模式表现出“双 ITCZ”的特点, 结果和本文相似。他们指出, 这主要是因为海气耦合模式的赤道东太平洋冷舌太强、向西伸展的幅度过大、同时秘鲁以西洋面和靠近 10°N 的带状区域海温偏高的结果。分析本文的结果, 发现 FGCM-0 模拟的 7 月份赤道及热带太平洋 SST 的偏差同样具有上述特点 (图略)。但造成这种偏差的机制, 目前尚不清楚, Mechoso 等^[18]认为蒸发-表层风之间的反馈、云-辐射效应、秘鲁西海岸海水的上翻等都具有一定影响。

4 结论

本文基于 ECMWF 再分析资料, 在分析 LASG GOALS 的两个版本和 FGCM-0 所模拟的大气水汽输送与辐散、辐合特征的基础上, 对其模拟的海气间水通量交换, 进行了有效化评估。主要结论如下:

(1) 对垂直积分的水汽通量场的流函数, 及其对应的无辐散水汽通量矢量的模拟, 三个耦合模式都能够较为合理地再现副热带大洋的涡旋结构、中纬度西风带的东向水汽输送、赤道东风带的西向水汽输送、东亚夏季风水汽输送等行星尺度特征及其季节变化, 尽管 GOALS 模拟的涡旋位置、FGCM-0 模拟的涡旋中心强度, 较之实际都略有偏差。

(2) 垂直积分的水汽通量场的势函数及其对应的无旋水汽矢量直接对应于水汽的辐散、辐合项, 对南北半球副热带大洋水汽辐散区、ITCZ 水汽辐合区等的模拟, 在空间分布和强度上, FGCM-0 相对合理。GOALS 的主要缺点, 是辐合中心过于集中在印度尼西亚群岛到澳洲大陆附近。对东亚夏季风区强烈的水汽辐合特征的模拟, FGCM-0 较为合乎实际, 而 GOALS 的辐合中心则偏南。

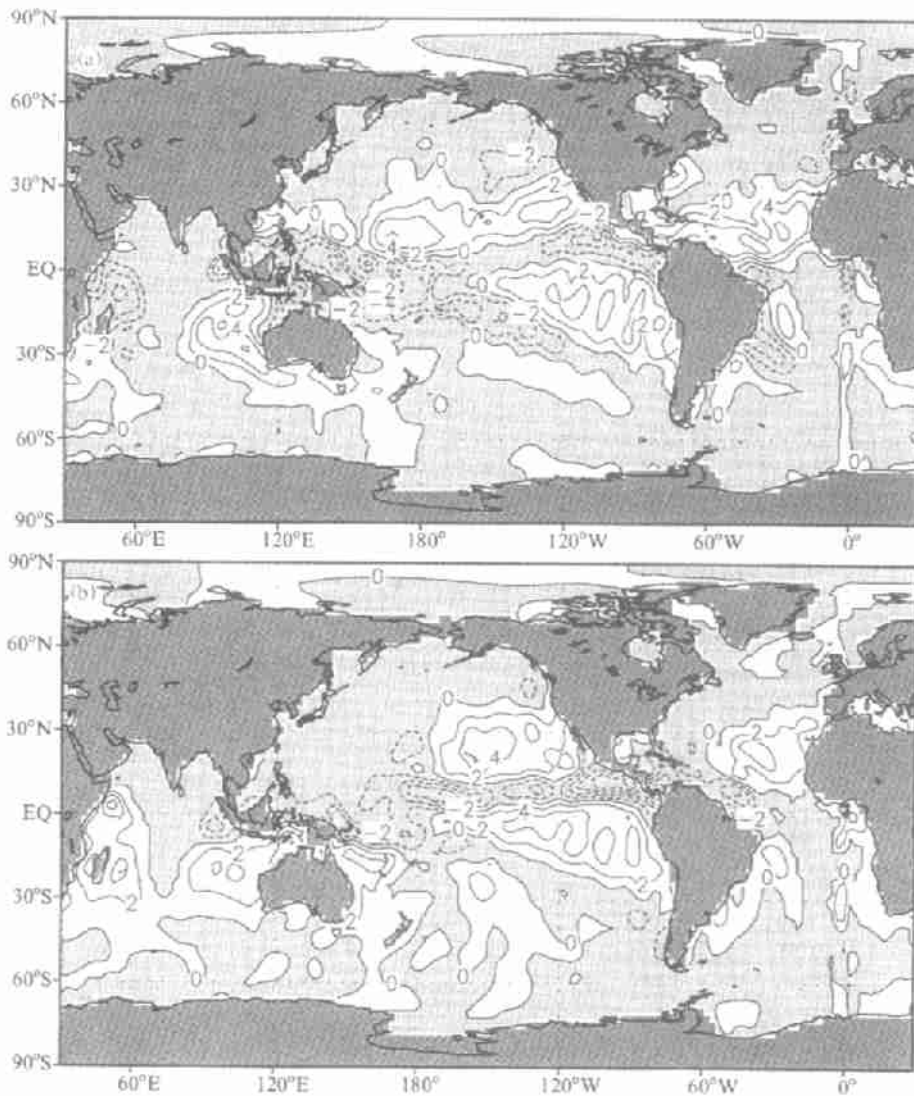


图8 利用实测 SST 强迫 CCM3 得到的水通量分布 (单位: mm d^{-1})
(a) 1月; (b) 7月

(3) 对全球海气水通量交换的模拟, FGCM-0 较为理想地再现了副热带的净蒸发、热带辐合带和中高纬度的净降水特征, 以及夏季 ITCZ 的季节性北移。总体而言, 其对北半球水通量交换的模拟, 明显好于南半球。其在南半球的不足, 是模拟的 SPCZ 位置偏差较大, 未能合理再现副热带南大西洋的净蒸发特点。分析表明, FGCM-0 对 SPCZ 的歪曲, 很大程度上是由海气耦合过程造成的, 而利用观测 SST 强迫 CCM3, 就能够相对合理地模拟出 SPCZ 的结构特点。GOALS 未能合理再现 ITCZ 和 SPCZ 降水大于蒸发这一特点, 其净降水过于集中在西太平洋暖池区。不过其对副热带南大西洋、阿拉伯海水通量季节变化的模拟, 相对合理。

另外, 在 GOALS 模式的两个版本之间, 尽管第四版本较之第二版本在物理过程、耦合方案和耦合通量上都得到完善, 但是对大气水汽输送及其辐散辐合特征的模拟, 二者在效果上却是互有仲伯。这是模式发展过程中, 值得关注的一个问题。当然, 本文比较的只是多年平均的定常气候态, GOALS-4 较之 GOALS-2 的改进, 在气候振荡的幅度等变率特征上, 可能体现得更为明显。

参 考 文 献

- 1 Peixoto和Oort著, 吴国雄、刘辉等译, 气候物理学, 北京: 气象出版社, 1995, 213~239.
- 2 Schmitt R. W., The ocean component of the global water cycle, *Rev. Geophys., Supplement (U. S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991~1994, July 1995)*, 1995, 1395~1409
- 3 周天军、张学洪、王绍武, 全球水循环的海洋分量研究, *气象学报*, 1999, **57**, 264~282
- 4 吴国雄、张学洪、刘辉等, LASG全球海洋-大气-陆面系统模式 (GOALS-/LASG) 及其模拟研究, *应用气象学报*, 1997, **8** (增刊), 15~28.
- 5 Wu Guoxiong, Liu Hui, Zhao Yucheng and Li Weiping, A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance, *Adv. Atmos. Sci.*, 1996, **13**, 1~18.
- 6 Shi Guangyu, An Accurate Calculation and Representation of the Infrared Transmissions Function of the Atmospheric Constitutions, Ph. D Thesis, Dept. of Sci., Tokoku Univ of Japan, 1981, 191pp
- 7 王标, 气候模拟中的辐射传输模式, 中国科学院大气物理研究所博士论文, 1996, 92pp.
- 8 Liu Hui, Zhang Xuehong and Wu Guoxiong, Cloud feedback on variability of SST of western equatorial Pacific in GOALS-/LASG model, *Adv Atmos Sci*, 1998, **15**, 410~423.
- 9 Xue Yongkang, P. J. Sellers, et al, A simplified biosphere model for global climate studies, *J. Climate*, 1991, **4**, 345~364.
- 10 Zhang Xuehong, Chen Keming., Jin Xiangze, et al., Simulation of the thermohaline circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model, *Theor. Appl Climatol*, 1996, **55**, 65~87.
- 11 Parkinson C. L., W. M. Washington, A large-scale numerical model of sea ice, *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**, 311~337.
- 12 俞永强、张学洪, 一个修正的海气耦合方案, *科学通报*, 1998, **43**, 866~870.
- 13 Boville, B. A. and P. R. Gent, The NCAR climate system model, Version One, *J. Climate*, 1998, **11**, 1115~1130
- 14 Jin Xiangze, Zhang Xuehong and Zhou Tianjun, Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model, *Adv Atmos Sci*, 1999, **16**(2), 197~215.
- 15 Trenberth, K. E. and C. J. Guillemot, Evaluation of the global atmospheric moisture budget as seen from analyses, *J. Climate*, 1995, **8**, 2255~2272.
- 16 Gibson, J. K., P. Kallberg, S. Uppala, A. Hernandez, et al., ERA Description, ECMWF Reanalysis Project Report Series 1, European Center for Medium Range Weather Forecast, Reading, UK, 1997, 66pp.
- 17 Mechoso, C. R., A. W. Robertson, N. Barth, M. K. Davey et al., The seasonal cycle over the tropical Pacific in coupled ocean-atmosphere general circulation models, *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**, 2825~2838.

Features of Atmospheric Moisture Transport, Convergence and Air–Sea Freshwater Flux Simulated by the Coupled Climate Models

Zhou Tianjun, Yu Rucong, Zhang Xuehong, Yu Yongqiang,
Li Wei, Liu Hailong and Liu Xiying

*(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)*

Abstract Evaluation of the hydrological cycle is regarded as an important part of coupled model validations. The processes of atmospheric water vapor transport, convergence / divergence, and the air–sea freshwater exchange simulated by two versions of LASG Global–Ocean–Atmosphere–Land–System model (Hereafter referred to as GOALS), and the IAP LASG Forth Generation Global Coupled Climate Model Version–0 (FGCM–0), have been analyzed in this paper. The results show that for the global scale characteristics of the vertically integrated vapor flux fields, which is described in terms of the rotational and divergent components of the stationary parts of the vapor field, both GOALS and FGCM–0 can reproduce the subtropical gyres in each hemisphere, the eastward water vapor transport of the mid–latitude westerlies, and the westward vapor transport of equatorial easterlies reasonably, though the precise positions of the gyres simulated by GOALS, and the intensities of the gyre centers in FGCM–0 do not match the observations accurately. For the sources and sinks of atmospheric water vapor, FGCM–0 can reproduce the global scale features such as the divergence of water vapor over the subtropical oceans in each hemisphere, the robust convergence of water vapor in the Inter–tropical Convergence Zone and eastern Asian summer monsoon domain reasonably. The pattern of ITCZ has not been reproduced successfully in GOALS, water vapor convergence centralizes mainly in the western Pacific warm pool; in the mean time, the center of the Asian summer monsoon vapor convergence shift a little southward. Corresponding to the pattern of water vapor sinks and sources, FGCM–0 succeeds in the simulation of net water gain of ITCZ and mid–latitudes, the northward migration of ITCZ in boreal summer, and the net vapor loss of subtropical ocean, but fails in the reproduction of the net water gain of South Pacific Convergence Zone, the net water loss of the subtropical southern Atlantic, and the seasonal variation of the northern Indian Ocean. Further inspections show that mainly the air–sea coupling process causes the blemish of SPCZ in FGCM–0. GOALS fails in the simulation of net water gain in ITCZ and SPCZ, but succeeds in the reproduction of net water loss of the subtropical southern Atlantic, and the seasonal variation of the northern Indian Ocean. The evaluation provided here furnishes a guide for future improvement of LASG air–sea coupled models.

Key words: climate model; hydrological cycle, air–sea freshwater flux; model evaluation