

林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 等. 陆面水文过程研究进展. 大气科学, 2008, **32** (4): 935~949

Lin Zhaohui, Liu Huizhi, Xie Zhenghui, et al. Recent progress in the land-surface and hydrological process studies. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (4): 935~949

陆面水文过程研究进展

林朝晖 刘辉志 谢正辉 王爱慧 刘少锋

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 本文回顾了近年来中国科学院大气物理研究所在陆面水文过程的观测、模式发展以及陆气相互作用研究等方面所取得的重要研究成果。首先概述了近年来在中国区域所开展的陆气相互作用野外观测试验, 通过资料分析揭示了国际上现有陆面模式对于旱/半干旱地区陆气相互作用模拟的偏差, 指出典型干旱/半干旱区陆面过程参数修正的必要性; 随后重点描述了陆面过程模式中积雪覆盖度和冻土参数化方案的发展, 中国区域土壤湿度的时空分布特征及其对区域气候的影响, 以及中国区域大尺度水文模式的研制和应用等; 最后给出了陆面水文过程研究的趋势和发展方向的展望。

关键词 陆面过程 水文模式 陆气相互作用 土壤湿度 地下水

文章编号 1006-9895 (2008) 04-0935-15

中图分类号 P461

文献标识码 A

Recent Progress in the Land-Surface and Hydrological Process Studies

LIN Zhaohui, LIU Huizhi, XIE Zhenghui, WANG Aihui, and LIU Shaofeng

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract This paper reviews recent advances in the field observation of land-atmosphere interaction, the development of land-surface and hydrological model, and the impact of land surface processes on the regional climate variations at the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. Firstly, the field campaigns over different characteristic land surfaces have been briefly summarized, and the discrepancies of current land surface models in the simulation of land-atmosphere interaction over arid and semi-arid regions have been revealed by using the field observation data, and the necessity of the parameter calibration for the land surface model has been pointed out; then, the development of land surface model have been introduced, with focus on the parameterization of fractional snow cover and permafrost processes; the spatial-temporal distribution of soil moisture and its importance in the weather forecast and seasonal climate simulation and prediction have also been introduced in this paper, together with the development of large-scale distributed hydrological model system and its applications over China. Finally, the prospects for studies of the land-surface and hydrological processes are briefly discussed.

Key words land-surface process, hydrological model, land-atmosphere interaction, soil moisture, ground water

1 引言

作为全球气候系统的重要组成部分, 陆面水文过程对全球乃至区域气候有着十分重要的作用, 尤

其在东亚区域, 陆面-水文过程及其与大气的相互作用对区域气候有着十分重要的作用。因此, 深入研究发生在地-气交界面上的各种物理、化学和生物过程, 并将这些过程参数化用于数值模拟, 可以

收稿日期 2008-03-14, 2008-03-17 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575040, 中国科学院三期创新资源和海洋科技创新基地重要方向项目 KZCX2-YW-217

作者简介 林朝晖, 男, 1968 年出生, 研究员, 主要从事地球系统模式发展、短期气候预测研究、陆面水文过程及陆气相互作用方面的研究。E-mail: lzh@mail.iap.ac.cn

在数值模式中更准确地反映真实的陆地和大气之间的相互作用,进而提高气候模式对区域乃至全球气候的模拟和预测能力,这正是陆面过程研究的重要目标之一。

此外,在世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)等大型研究计划的推动下,气候系统模式对陆面水文过程的模拟已经得到越来越多的重视。但与常用的水文模式相比,大气模式中的陆面参数化方案对水文过程的处理都比较简单。加强大气水文研究,有助于弥补原有参数化方案中径流计算的不足,提高大气模式和水文模式的预报精度及延长水文模式的预报期,并可用于研究水循环对气候变化及人类活动的响应;对于实时洪水预报预警、水资源可持续利用、缓解水资源供需矛盾及促进区域经济规划和发展等方面具有重要的科学意义和广阔的应用前景。

近年来,中国科学院大气物理研究所在陆面水文过程研究领域开展了一系列卓有成效的工作,并取得了一系列重要的研究成果。本文旨在回顾近年来中国科学院大气物理研究所的科研工作者在陆面、水文过程的观测、模拟及模式发展及其应用等方面所取得的成果。

2 陆气相互作用的野外观测试验及其应用

我国地处东亚季风区,地形独特复杂,西部地区 and 黄土高原、内蒙古草原地处干旱、半干旱区,青藏高原是世界上最大的高原,东部地区是典型的湿润区,这些典型下垫面上的陆-气相互作用不仅直接影响到我国不同区域的气候和环境变化,而且对东亚、乃至全球的气候和环境变化都有重要影响。为深入了解我国不同区域的陆气相互作用特征,需要对我国不同下垫面的陆气相互作用进行观测,并通过野外观测资料的分析,进一步了解我国不同典型下垫面的陆气相互作用的特征。为此,我国科学家开展了一系列的野外观测试验。

为了深化对中纬度半干旱草原气候-生态相互作用过程、机制及其对全球变化的响应与贡献的认识,国家自然科学基金委员会于1997~2001年启动了一项名为“内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)”的野外观测试验,该试验在内蒙古锡林郭勒草原执行,以典型草原为主,包

括草甸草原、稀疏沙地草原等在内的中尺度试验区开展了多点、多要素的综合观测。结合草原站已进行的长期监测资料^[1],IMGRASS计划的初步研究结果^[2]表明:该地区 N_2O 排放远小于IPCC 2001报告对温带草原贡献的估计值,其原因在于土壤微生物对环境的响应;对 CO_2 的观测表现出极大的变动性,草地退化对草地作为 CO_2 汇有重要减小作用。

此外,在国家重点基础研究发展规划项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测”的支持下,中国科学院大气物理研究所在吉林通榆建立了“干旱化和有序人类活动”长期观测实验站^[3],同时也是国际协同加强观测计划(CEOP)的地面观测站。该站于2002年10月正式建成,并开始连续观测,这是目前在我国为数不多的对地气界面间物质和能量变换过程进行长期监测的野外实验站。该长期观测实验采取一年四季连续的观测地气间通量交换,研究地气通量交换过程的日、月、季及年变化,为气候模式中半干旱地区陆面过程参数化的改进提供了可靠的验证数据。刘辉志等^[3]利用该站2002年10月~2003年3月观测资料对地面能量通量进行了分析,研究结果表明:在非生长季,半干旱地区农田和退化草地下垫面近地面层能量收支基本一致,感热通量占主要地位,占净辐射通量的70%左右,潜热通量及地热流都很小,通常小于 30 W/m^2 。对该站水汽和二氧化碳通量的季节和日变化规律的分析表明,在干季有效能量主要分配为感热通量,潜热通量在干季通常很小;在湿季,潜热通量与感热通量相当,但农田下垫面的潜热通量大于退化草原下垫面。在非生长季,两种不同下垫面地气间二氧化碳通量都很小;白天由于光合作用,在生长季农田下垫面吸收 CO_2 通量较退化草原大,但比湿润地区稻田下垫面小一个量级,远小于森林生态系统^[4]。

此外,在国家重点基础研究发展规划项目(973项目)的支持下,中国科学院大气物理研究所还在我国西北典型干旱区开展了“我国西北干旱区陆气相互作用野外观测实验”(敦煌双墩子戈壁、青藏高原五道梁地区和巴丹吉林沙漠临泽地区)^[5],对该地区的观测也进一步加深了对干旱区陆气相互作用的认识^[6]。

诸多前人研究结果表明,现有的气候模式对不

同地区陆气相互作用模拟结果的优劣,在很大程度上是由于陆面过程模式对不同地区陆面过程的描述不够合理,这是由于每一个(类)陆面过程模式的参数化方案发展及参数优化在很大程度上都与特定的陆面观测试验的开展密不可分。总的说来,现有陆面过程模式对干旱区陆气相互作用的模拟能力相对较差,这也是由于缺乏专门针对半干旱区设计的长期连续的地表-植被-大气相互作用强化观测试验的支持。因此上述野外观测试验的结果,也被广泛地利用于陆气相互作用的分析以及陆面过程模式的验证和改进之中。

朱德琴等^[7]利用干旱/半干旱区敦煌戈壁、通榆退化草地和农田陆面过程野外观测资料,分析了陆面过程模式(SSiB)对敦煌戈壁下垫面陆气相互作用的模拟能力;研究结果表明,在没有降水的情况下,SSiB在中国西北典型干旱区荒漠戈壁下垫面上具有一定的模拟能力。同时利用该陆面过程模式,朱德琴^[8]应用多判据(MC)方法,对这些地区的陆面过程基本参数进行了评估,结果表明,采用优化后的参数,使得模式在这些地区的模拟能力得到了较大的提高和改进。上述标定实验的结果表明,陆面过程模式模拟与观测之间的差别可以通过用实测资料修正参数来减小,尤其是对典型干旱区,标定前后模式在这一地区的模拟性能有实质性的提高和改进,对半干旱区的模拟改进也很大,这至少说明陆面模式中对这些地区的参数指定还有相当的不准确性和不确定性,因此,对典型干旱/半干旱区陆面过程参数进行修正显得尤其重要。

利用通榆地表-大气相互作用强化观测资料,Guo等^[9]检验了NCAR CLM3、CoLM、SiB2等多个陆面过程模式对该地区农田、退化草地等典型下垫面类型的陆-气相互作用基本特征,并进行了一系列试验,发现虽然这些模式能够较合理地刻画地表感热/潜热通量输送的日变化和季节变化的基本特征以及土壤温度/湿度廓线分布,特别是CoLM模式总体模拟性能较好,但这些模式对土壤湿度的模拟都不理想,而土壤湿度对半干旱区的陆-气相互作用至关重要,它的变化可以显著影响地表感热/潜热输送的日变化和季节变化,从而凸现出改进和发展适用于半干旱区的水文过程参数化方案的迫切性。

利用淮河流域能量和水分循环试验(HUBEX)

以及青藏高原的地气相互作用观测结果对通用陆面过程模式(CoLM)的验证结果表明,通用陆面过程模式CoLM对东亚地区的陆气通量有着很好的模拟能力^[10, 11]。

曹晓彦和张强^[12]利用“中国西北干旱区陆气相互作用试验”2000年5~6月在甘肃敦煌进行的陆气相互作用野外试验的观测资料,首先确定了西北干旱区荒漠戈壁的陆面过程参数,并用这些参数改进陆面过程模式SVA^[13],然后用该陆面过程模式对敦煌陆气相互作用野外试验荒漠戈壁上的感热通量、潜热通量、摩擦速度以及净辐射、地表和土壤温度、土壤水分等重要陆面变量进行了模拟,结果表明模拟值与观测值非常接近。

此外,上述野外观测试验资料还被广泛应用于其他陆面生态模型的验证。姜纪峰等^[14]利用集成生物圈模型(IBIS),对国际协调强化观测计划(CEOP)半干旱区基准站之一的吉林通榆观测站草地和农田生态系统2003年全年的CO₂和水、热通量变化进行模拟,研究结果表明,除CO₂通量模拟结果不够理想外,IBIS模型较好地模拟了通榆观测站的感热通量和潜热通量。而王超等^[15]则应用BIOME2BGC模型模拟了国际协调强化观测计划(CEOP)亚澳季风比较研究(CAMP)的一个地面观测基准站半干旱地区吉林通榆2002年10月~2003年9月草地和农田生态系统的潜热通量,并将模拟结果与通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测站涡度相关法测定的观测值进行了比较,结果表明两者基本一致。

3 陆面过程模式研制及与气候模式的耦合

3.1 陆面过程模式研制及其改进

自20世纪80年代末,中国科学院大气物理研究所的科研工作者就开始了陆面过程模式的研制^[16, 17],并参加国际上一系列的陆面过程模式比较计划。在此基础上,利用中国科学院大气物理研究所自行发展的陆面过程模式IAP94^[17]作为三个蓝本之一,Dai等^[18]在总结几个陆面过程模式特色的基础上发展了通用陆面过程模式CoLM,并被国际上广泛应用。利用包括中国地区的各种野外观测试验的离线(offline)试验结果表明,CoLM能够较为合理地模拟出世界上不同地区的陆面物理过

程^[10, 18]。

刘少锋和林朝晖^[11]利用东亚地区多种不同下垫面的野外观察资料,进一步考察了 CoLM 对东亚地区三种典型下垫面(高原稀疏植被下垫面、森林、水田)的模拟能力。结果表明,在高原稀疏植被下垫面,CoLM 模拟的近地面气温跟实测较为接近,同时 CoLM 还可以较好地模拟出土壤温度随时间和深度的变化特征;除感热通量外,CoLM 所模拟出的其他能量通量的变化均与观测实况比较一致。对于淮河流域的水田下垫面,CoLM 模式较好地模拟出了各能量通量的主要变化特征及其季节差异,如水田的净辐射以及潜热通量夏季最大,而感热通量则是秋季最大等。对于森林下垫面,CoLM 所模拟出陆气间的各能量通量均与实测较为接近,尤以夏季的模拟性能最好(图 1)。

积雪是陆表过程模式中非常重要的一个组成部分。当前 CLM3 陆面过程模式中积雪对于植被垂直覆盖度的参数化方案并不随植被高矮的不同而不

同,根据模式中的方案,至少需要 50 cm 深的雪才可以完全覆盖草地,因此对于高纬度冬季低矮植被(草地或农作物)下垫面,当积雪厚度小于 50 cm 的情况下,计算的向下热通量过大,以至于积雪融化过快。为了解决融雪过快这一问题,基于物理背景考虑,我们提出了新的植被垂直覆盖度的参数化方案^[19]。

运用该参数化方案,用加拿大 Saskatoon 地区(植被覆盖以 C3 草为主,52.16°N,106.13°W)^[20]的实测的气象资料作为模式的外界输入,模式开始运行 2 年(从 1994 年 6 月到 1996 年的 5 月)作为“spin-up”,然后用模式的最后结果作为初始条件运行两个 2.5 年模拟(从 1994 年 6 月到 1996 年的 11 月)。通过研究发现,当积雪的厚度小于 50 cm,地表仍然被当作绿色植被覆盖。相应的,草的参数(如粗糙度长度、位移高度)而不是雪参数被用来计算湍流通量。在这期间,当有相对高温度的气团移来时(图 2e),计算得到的向下感热通量 SH 过

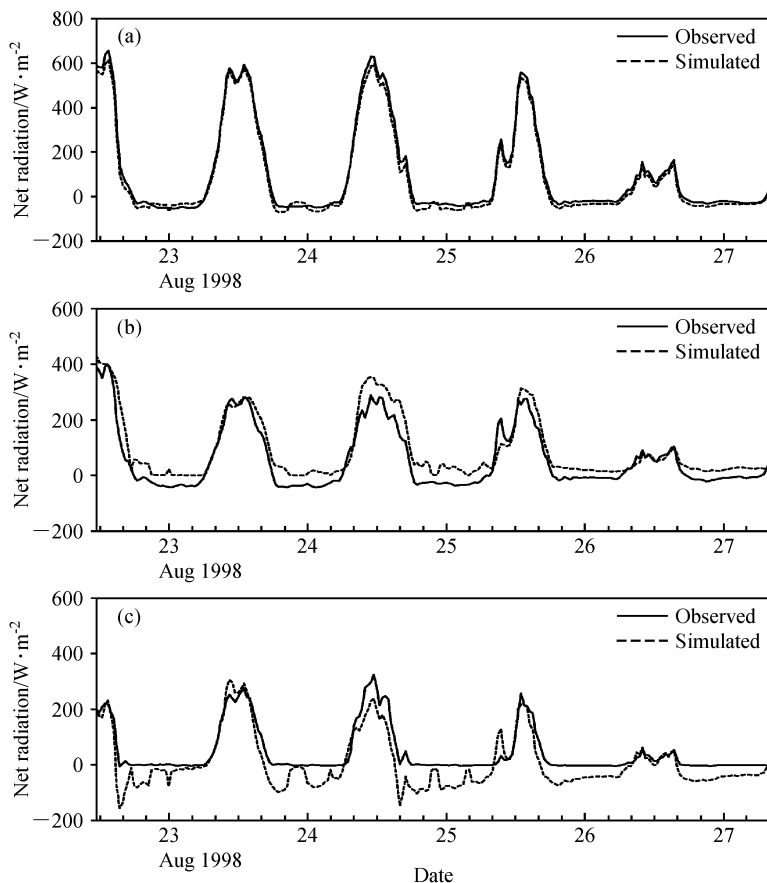


图 1 1998 年 8 月 22~27 日观测和 CoLM 模拟的淮河流域森林下垫面的净辐射(a)、潜热(b)和感热(c)随时间演变图

Fig. 1 Observed and CoLM simulated (a) net radiation, (b) latent heat, and (c) sensible heat from 22 Aug to 27 Aug 1998 at forest site during HUBEX experiment

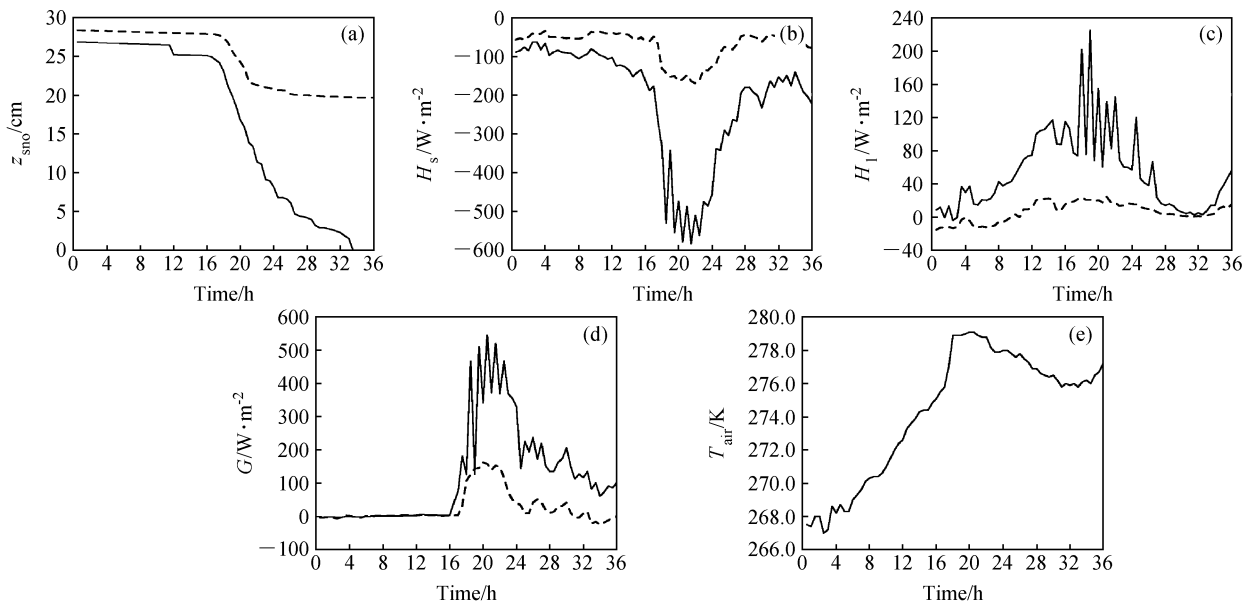


图2 1996年1月11~13日原CLM3模式(实线)和采用新积雪覆盖度方案的CLM3模式(虚线)在加拿大的草场(52.16°N, 106.13°W)的模拟情况对比: (a) 雪深; (b) 感热; (c) 潜热; (d) 地热通量; (e) 气温

Fig. 2 Simulations using the standard CLM3 (solid line) and CLM3 with new snow fraction formulation (dashed line) during 11–13 Jan 1996 over a Canadian grass site (52.16°N, 106.13°W): (a) Snow depth (z_{sno}); (b) sensible heat (H_s); (c) latent heat (H_l); (d) ground heat flux (G); (e) air temperature (T_{air})

高(注: 向上为正, 图 2b)。根据地表能量平衡, 高估的SH引起地表热通量 G 为过大(注: 向下为正, 图 2d), 从而导致图 2a 中的积雪的快速融化。用我们新的方程, 积雪的融化速率变得更合理(图 2a)。此外, 在图 2b~d 中地表通量变化曲线的锯齿形(不稳定)也消失, 地面通量的量级也变得比较合理。

冻土在全球范围的分布很广, 尤其对于我国而言, 多年和季节性冻土面积占陆地面积的 75%。已有的大量研究工作表明, 冻土过程对气候变化的影响是不能忽视的。高荣等^[21]研究了青藏高原冬春积雪和季节冻土年际变化的差异, 并对其成因进行了分析, 指出冻土与其上积雪之间存在着相互作用, 从而直接或间接地影响了它与雪盖或与其上大气的能量交换; 比如高原积雪时反照率增大会导致高原季节性冻土变厚, 但当积雪过厚时对它又对冻土有保温作用, 使冻土融化。现阶段, 在陆面过程模式和气候模式中考虑土壤的冻融过程已成为研究区域气候和全球气候变化的主要手段之一。李倩和孙荻芬^[22]通过量级估计和模型数值模拟结果的分析, 发展了简化且精度较好的土壤水热传输耦合统一模型, 并对该简化的统一土壤模式进行变量变

换, 以土壤总焓和土壤水总质量替代温度和体积含水量作为方程预报量^[23], 以克服该冻土模式计算过程中由于需预估冰水相变速率项产生的误差造成的不确定性, 建立了新的通用土壤模型统一体系; 与观测结果相比, 改进后的统一土壤模型能很好地模拟出在湿润与干旱、冻土与非冻土和均质与非均质土壤中的水热传输过程。随后, Zhang 等^[24]为寒区发展了一个考虑了水的相变并包括水流和热传输的冻土参数化方案, 该方案采用混合 Richards 方程描述冻土中热力过程对土壤水流的影响, 冻土的水力和热力参数化中同时考虑了液态水和冰的过程。

而对于陆面过程模式中的冠层辐射传输模型, Dai 和 Sun^[25]发展了一个垂直方向高分辨率的辐射传输模型, 该模型与现在通常用的二流近似方案的区别在于, 它考虑了复杂的冠层形态学和叶子光学特征的非均匀性对冠层辐射传输的影响, 冠层的总叶面积指数分成许多层, 在每一层中考虑散射辐射角度分布和叶面角度分布对辐射传输的影响。

此外, Zeng 和 Wang^[26]针对 CLM 中地表粗糙度和零平面位移是独立于叶面指数 (Leaf Area Index, LAI) 和植被的覆盖度 (Fraction of Vegetation Cover, FVC) 的不足, 提出了新的计算地表粗

糙度和零平面位移的参数化方案,从而较好地解决了在模拟的土表温度存在的一些不连续的现象。

3.2 陆气耦合模式及其应用研究

陆面过程模式的改进和完善,其最终目标是通过与天气、气候系统模式的耦合,最终改进天气或气候模式的模拟和预测能力。

为此,包庆等^[27]利用 LASG 全球大气环流谱模式,实现了与两个陆面模式 (NCAR 通用陆面模式 CLM、简化的简单生物圈模式 SSiB) 的耦合,指出耦合了 CLM 的 LASG 陆气耦合模式对表面感热、温度、降水率、潜热通量和海平面气压场的模拟能力大大提高,尤其对于夏季表面感热通量场,使亚洲北部和东南部、格陵兰岛以及北美洲大部分地区的数值从 100 W/m^2 降低到接近 60 W/m^2 ,与 NCEP 再分析资料一致,同时新版本的陆气耦合模式模拟陆地表面能量收支趋于平衡。

同样,刘少锋^[28]基于国际上通用的 OASIS 耦合器,实现了 CoLM 陆面过程模式和 IAP9L 大气环流模式的耦合,建立起一个新的基于 OASIS 耦合器的 IAP 陆气耦合模式 IAP9L_CoLM。利用 CMAP 降水和 NCEP 再分析等资料对陆气耦合模式 IAP9L_CoLM 的模拟性能进行了评估,并与原来 IAP9L_SEBEFR 的模拟结果进行比较,结果表明: IAP9L_CoLM 能更好地保证地表和大气顶的能量平衡,并较好地模拟出冬季和夏季降水、近地面气温、海平面气压和地表感热通量、潜热通量等的基本气候态,对东亚地区雨带进退的模拟也比较成功;而且 IAP9L_CoLM 极大地改善了模式对非洲和南美降水的模拟,特别是 IAP9L_CoLM 成功地再现了夏季非洲沿赤道降雨带 (图 3);此外,由于 CoLM 中包含有一个比较完善的雪盖模块, IAP9L_CoLM 对南极和格陵兰的气温模拟有很大的改进 (如基本消除了原来模式中存在的南极偏冷现象),相应海平面气压的模拟也有很大改进。

通过改进区域气候模式中陆面过程模式的参数,朱德琴^[8]考察了改进参数前后模式模拟结果的差异,数值模拟结果表明,在区域气候模式中,陆面过程模式的改进可以影响地面感热、蒸发场的分布,进而影响大气与陆面的能量和水汽交换,使得高空水汽场、风场的分布发生变化,从而影响到相对应地区的降水分布。并且从对模拟的降水分布形式与观测的比较来看,气候模式中陆面过程方案中

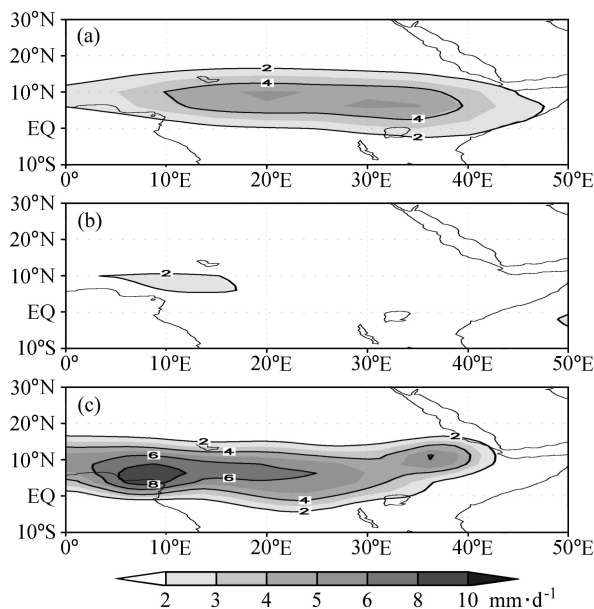


图3 耦合 CoLM 前后的 IAP 陆气耦合模式对非洲中部夏季 (JJA) 降水的模拟情况及其与观测的比较: (a) 耦合后; (b) 耦合前; (c) CMAP 观测结果

Fig. 3 JJA (Jun, Jul, Aug) mean precipitation in central Africa simulated by IAP land-atmosphere coupled model (a) with CoLM and (b) without CoLM, (c) CMAP observation

应用优化参数以后,对我国整体降水的模拟有所改进,尤其是在华北、江淮流域及华南地区降水的模拟有了较大的改进。

张宇等^[29]将其发展的冻土过程参数化方案^[30]与 NCAR CCM3.6 相耦合,考察了冻土过程在气候模式中的效应,模拟结果指出,模式能够较好地模拟出北半球中高纬度和高原地区的多年冻土分布,并且对中高纬地区地面温度及高层大气温度和水汽场的模拟均有较大的改进。

此外,陆面过程的改进对天气过程的模拟和预测也有着十分重要的作用。雷航等^[31]考察了不同陆面过程模式对 IAP 沙尘天气数值预测系统模拟和预测效果的影响,研究表明,陆面过程模式的改进,可以改善模式对地表土壤湿度的模拟,进而改进了决定起沙与否的关键因子临界摩擦速度的模拟,从而提高了预测系统对起沙范围和强度的模拟效果。

诸多研究均表明,植被-气候之间的相互作用在地球气候与环境系统的演变中起着十分重要的作用。因此在现有气候系统模式中,实现与植被动力学模式的耦合,成为现阶段气候系统模式乃至地球

系统模式发展的方向。

毛嘉富等^[32]将陆面生态模式 AVIM 的物理模块耦合到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) 的 GAMIL 大气环流模式中, 替换了 GAMIL 中的陆面模式 BATS。结果发现, 新版本明显改进冬、夏季陆地表面的感热、潜热场通量, 尤其在夏季, 非洲大陆的中北部、欧亚大陆、北美中部以及南美北部等地区, 新版本的感热场模拟值均比旧版本低, 更接近 NCEP 再分析资料的结果; 同样, 对于地表面温度场, 新版本在夏季明显减弱了旧版本在大陆上的暖偏差, 模拟的结果更合理。刘少锋等^[33]通过引入一个考虑不同植被功能类型 (PFTs) 之间动态的生长和竞争的植被动力学模型 VEGAS^[34], 在 IAP9L_CoLM 的基础上, 初步建立了一个大气-陆面-植被耦合模式 IAP9L_CoLM-VEGAS。图 4 (见文后彩图) 给出了该模式对全球叶面积指数 (LAI) 的模拟情况, 同时与观测资料^[35]进行比较, 结果表明, 耦合了 VEGAS 的 IAP 大气-陆面-动态植被模型, 可以较好地模拟出观测的叶面积指数的空间分布及其季节变化特征。

4 土壤湿度及其对区域气候影响的研究

作为陆面过程中最为重要的一个物理量, 土壤湿度的异常将会导致地表反照率 (通过改变土壤的颜色)、土壤的热容量、地表的蒸发以及植被的生长状况的变化, 从而改变地表向大气输送的感热、潜热和长波辐射通量, 从而最终影响气候变化。

利用中国地区台站观测资料, 一些学者分区域和季节研究了土壤湿度的时空分布特征^[36~40]。张文君^[36]指出中国土壤湿度呈东北地区和华东地区偏湿, 华北地区和河套偏干的分布, 赵秀兰等^[37, 38]则发现黑龙江地区和华北地区土壤水储量呈减少趋势, 且春季变干幅度大于夏季。Nie 等^[39]对中国地区土壤湿度的时空尺度进行分析时, 指出土壤湿度具有 1~3 个月的时间尺度和 200~600 km 的空间尺度。

鉴于台站土壤湿度观测资料的局限性, 因此借助于不同复杂程度的陆面植被模式而获得的再分析土壤湿度资料, 也已经广泛应用于研究土壤湿度对区域乃至全球气候异常的影响。张文君^[36]对比分

析了 ERA40、NCEP/NCAR、CLM 和 GSWP2 土壤湿度资料, 发现 GSWP2 更好地模拟了观测土壤湿度的空间分布和季节循环, ERA40 土壤湿度的年际变化与观测最接近。

Zhan and Lin^[40]则验证了 CPC 土壤湿度在中国区域的适用性, 并与 NCEP/NCAR 和 NCEP/DOE 再分析土壤湿度进行比较, 结果表明, CPC 土壤湿度无论是在空间分布, 还是在异常的年际变化方面, 都与观测最为接近。

此外, Dan 等^[41]利用植被模式结合观测资料研究了 1989~1998 年之间中国土壤湿度的变化, 在观测资料验证的基础上得出 AVIM 植被模式所模拟的土壤湿度在其空间分布和季节循环上都与观测一致, 在此基础上, 对土壤湿度与气候的关系进行了研究, 以 1998 年江淮流域洪水为例, 研究表明土壤湿度的异常偏高也是造成该地区洪水的一个重要原因。

利用 HUBEX 试验期间淮河流域的观测资料, Lin 等^[42]分析了该地区土壤含水量的垂直分布, 并指出 60 cm 深度为土壤含水量变化的转折点。Zhan 等^[40]利用中国更多的台站观测土壤湿度资料, 给出了东北地区和中部地区土壤湿度的垂直分布, 同样发现 60 cm 深度为土壤湿度变化的转折点 (图 5)。

土壤湿度的变化反映了干湿的变化, 苏明峰等^[43]利用土壤湿度对 PDSI 指数进行了校正, 研究全球变暖对干湿的影响, 指出 PDSI 指数可以很好地表示土壤湿度的变化, 表面气温的异常对土壤湿度具有显著影响; 郭维栋等^[44]利用通过统计方法

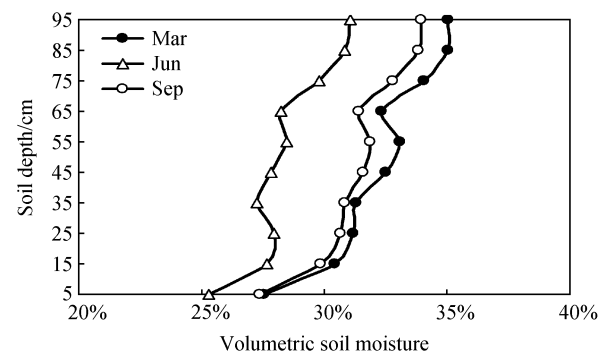


图 5 1983~1989 年平均中部地区 (10 站平均) 月平均土壤体积含水量随深度变化
Fig. 5 Vertical profile of 8-year mean (1983-1989) monthly volumetric soil moisture over central China (Averaged over 10 stations)

反演得到的土壤湿度研究中国北方干旱, 同样发现华北地区在 20 世纪 60 年代末到 70 年代末显著偏湿, 90 年代末干旱; 东北地区在 70 年代前后显著干旱, 90 年代以来仍然干旱。

有关土壤湿度与区域气候、生态环境的关系等方面也已开展了一系列研究工作。杜睿等^[45]得出土壤含水量与羊草草原土壤 N_2O 排放通量间存在阶段函数关系; Wang 等^[46]发现土壤湿度与地表反照率呈 e 指数衰减关系, 与土壤热传导率呈幂函数关系; 张文君^[36]的资料诊断结果则表明, 土壤湿度异常对后期降水的影响相对不明显。

Jiang 等^[47]运用大气模式 (RAMS) 研究了土壤湿度的空间非均匀性对中尺度动量和通量的影响, 结果表明地表水、热通量的网格平均值的代表性较好, 而中尺度通量的网格平均值的代表性较差。

利用 IAP94 陆面模式和 HUBEX 的观测资料, 林朝晖等^[48]研究了模式对土壤湿度初值的敏感性, 结果表明对于森林和旱田下垫面, 当土壤含水量减少时, 地表净辐射和潜热通量减少, 而感热通量增加, 土壤含水量初值的敏感性在晚春和夏季较强, 在秋季偏弱。利用马柱国^[49]反演得到的土壤湿度作为初始场, 郭维栋等^[50,51]发现土壤湿度初始场对提高短期气候预测技巧有一定的作用。佟华等^[52]则使用固定值与 6 h 预报的背景场加权作为土壤湿度的初值, 发现 2 m 温度的预报误差可以得到明显的减小。李巧萍等^[53]利用区域气候模式 (RegCM_NCC) 研究了淮河流域春季初始土壤湿度异常对后期区域气候的影响, 结果表明, 土壤湿度的正异常使得异常区域内降水增大、地表气温降低; 土壤湿度的负异常导致异常区域内降水减少、地表气温升高。

5 水文模式改进及其数值模拟研究

现阶段各种不同复杂程度的气候系统/地球气候系统模式中的陆面过程虽然可以较好地模拟大气-陆面之间的能量和水文平衡过程, 但对于地表以及地下水文过程的模拟, 仍然存在着很大的不足之处^[54]。因此, 在已有的陆面模式设计和经验的基础上, 发展大尺度分布式水文模式, 并实现与陆面过程以及地球气候系统模式的耦合, 进一步揭示地表、土壤以及地下水文过程与气候之间的相互

作用, 已成为现阶段气候-水文学科交叉的热点问题。

5.1 陆表水文过程研究

VIC (Variable Infiltration Capability) 模型是在吸收新安江模型蓄水容量曲线的基础上所建成的一个大尺度陆面水文模型^[55]。在该模式基础上, Liang 等^[56]和 Xie 等^[57]发展了能同时考虑蓄满产流和超渗产流机制以及土壤性质次网格非均匀性对产流影响的地表径流机制, 随后建立了 $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ 分辨率的中国区域大尺度陆面水文模型框架^[58], 在上述框架的基础上, Xie 等^[57]、袁飞等^[59]和 Yuan 等^[60,61]模拟了气候变化对流域水文特性的影响, 同时还发展了模型参数移植方法^[62], 使陆面过程模型的有效性从资料丰富的区域移植到资料缺乏的区域, 以改进陆面水文过程模拟, 并给出该模型在中国区域的一个参数估计。Tian 等^[63]则根据潜水面坡度的不同, 基于 Boussinesq-Storage 方程, 建立了同时考虑潜水面水分储存和非饱和层水分入渗两方面影响的地下径流机制。

TOPMODEL (TOPography-based hydrological Model) 是 Beven 和 Kirkby^[64]于 1979 提出的一个以地形为基础的半分布式水文模型, 主要应用于山坡尺度的中小尺度流域模拟。Zhang 等^[65]采用该模型, 模拟我国多个流域断面出口的径流过程, 并在应用过程中, 对模型结构进行了一些改进。经典的 TOPMODEL 产流计算是在子流域上进行的, 模型并不计算每个栅格上的产流, 而是以地形指数分类进行计算。这种方法对流域的地形指数的空间非均匀性考虑不够充分, 因此有必要将产流细化到网格上进行计算, 同时对原有的汇流方案——等流时线法进行了网格化改进, 在汉江子流域得到了成功的应用^[66]。同时利用 DEM、遥感等资料, 发展地形指数算法^[67], 基于原有的以子流域为计算单元的 TOPMODEL 模型, 发展新一代网格化分布式水文模型, 尝试与陆面模式和气候模式的耦合。

此外, 利用分布式水文-土壤-植被动力模型 DHSVM, 王守荣等^[68]实现了该模式与区域气候模式 PNNL RCM 和 NCAR-RegCM2 的单向耦合, 并将其应用于我国滦河、桑干河流域的水文模拟及对变化环境的响应。Zhang 等^[69]还利用区域系统环境集成模式 RIEMS (Regional Integrated Environmental Model System) 与大尺度汇流模型 LRM

(Large-scale Routing) 嵌套, 在黄河流域进行河川径流作模拟, 证实该方法在大尺度流域的应用性能。

值得指出的是, 对于大尺度网格化水文模式的研制, 其中数字流域的提取方法是大尺度水文模式发展的重要内容之一。有鉴于此, 杨传国等^[54]提出一种基于 1 km 数字高程 (DEM) 生成更大网格尺度 DEM 数据, 同时可以保持流域河网信息并减缓高程、坡度等地貌参数信息量衰减速度的有效方法, 利用该方法和常规的网格平均法生成黄河唐乃亥以上流域的 5 km、10 km、15 km 和 20 km 两套 DEM 数据, 分别提取高程、坡度、地形指数等流域特征参数, 并与 1 km DEM 提取的上述参数进行比较。对两种方法的评价结果显示, 随着网格尺度的增大, 该新算法所获得的 DEM 数据可以保持河网的连续性, 提取出合理的流域范围, 减缓地形信息量的衰减速度。该方法满足构建大尺度分布式水文模型提取数字流域的需要。

基于上述研究, 林朝晖等^[70]通过引入一个网格化的分布式水文模式 HMS (Hydrologic Model System) 水文模型系统 (Hydrologic Model System, HMS)^[71, 72], 建立了中国区域 20 km×20 km 和 10 km×10 km 两种分辨率的模型参数库和驱动数据库, 进而初步建成适合于我国的大尺度网格化水文模型, 该模式可以较好地考虑地表水、地下水、土壤水和河流-地下水相互作用等各个水文过程, 可用于开展大尺度流域、区域, 以至大陆尺度的气象水文模拟。该模型系统在淮河、红河等流域进行了较好的标定, 得到了高精度的水文模拟结果, 1980~1987 年 8 年间的模拟序列与实测序列相比, 相关系数为 0.94, 效率系数达到 0.87 (图 6)。

此外, 该模型系统还可以模拟出任一时段模式变量的空间分布, 图 7 (见文后彩图) 给出了模式模拟的 2005 年淮河流域每个网格的年平均流量的空间分布, 从图 7 中可以发现, 模式模拟的淮河流域自正阳关站以下干流的年平均流量均大于 1200 m³/s, 与观测实况较为相符。

鉴于上述大尺度分布式水文模式对水文过程及空间分布的模拟能力, 这些模式不但可广泛应用于流域洪水调度和制定预报预警方案, 还可用于实现与陆面、大气模式的耦合, 最终提高气候系统模式对水文过程的模拟能力。

5.2 地下水文过程研究

地下水位的分布和变化在很大程度上是受气候条件、植被地形以及人类活动的影响。反过来, 区域地下水位的变化, 影响土壤含水量的变化和分布, 进而影响土壤蒸发、植被蒸腾和低层大气感热和潜热通量的分配, 从而对气候有重要的影响, 地下水和地表水及气候有着重要的相互作用。目前用于全球和区域气候研究的陆面过程模式, 大都忽略了地下水水位的变化, 没有区域地下水位的动态表示。

通过改进陆面过程的参数化描述, Liang 等^[56]和谢正辉等^[73]将地下水位的动态表示问题归结为运动边界问题, 利用有限元集中质量法直接求解^[74], 发展了能够动态表示地下水位的陆面过程模式。随后, Yang 和 Xie^[75]针对上述运动边界问题, 通过数学变换将其转换成固定边界问题进行求解, 在离散时只需对非饱和区域进行分层, 在同样的分层数下, 提高了网格的分辨率。在求解过程中分层固定, 大约 20 层就可以有很好的精度, 减少了计算量, 同时避免了地下水位深度尺度的选取问题, 使得将该模型引入当前的耦合气候陆面水文模

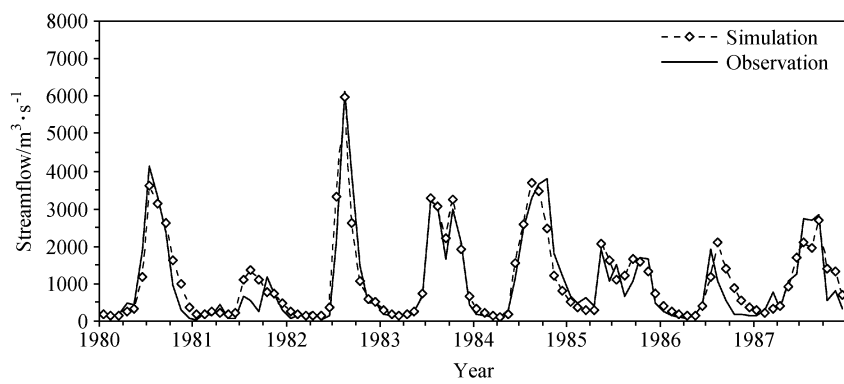


图 6 大尺度水文模式模拟的淮河流域蚌埠站 1980~1989 年流量结果及其与观测的比较。实线：观测；虚线：模拟
Fig. 6 The simulated streamflow during 1980 - 1989 by the large-scale hydrological model system and its comparison with the observation

式中用于气候与地下水的相互作用研究成为可能。

利用包含地下水位动态的 CLM 模型进行全球模拟试验,同时将原来版本的 NCAR/CLM 进行对比模拟试验,多年平均的对比结果表明:由于引入了地下水位的动态变化,新的带有地下水位动态表示的 CLM 模式能够改善原来的 CLM 模式模拟土壤湿度偏小的趋势,从而使得陆气之间的感热通量变小、潜热通量变大,从而缓解原来的 CLM 模式模拟地表气温在冬季模拟的冷偏差和夏季模拟的热偏差。

6 结束语

本文简要介绍了中国科学院大气物理研究所近年来在陆面水文过程研究领域所开展的一系列创新性的工作及取得的重要研究成果。在陆气相互作用野外观测方面,主要介绍了在通榆、敦煌以及内蒙古锡林郭勒草原等不同典型下垫面所开展的陆气相互野外观测试验;在陆面过程模式发展方面,介绍了利用野外观测资料对陆面过程模式的验证,以及模式参数校正方面的工作,同时还重点介绍了陆面过程模式中冻土、积雪等参数化的研制,并总结了陆气耦合模式对东亚以及全球气候模拟性能的改进;在水文模型方面,介绍不同水文模型在中国区域的移植及应用情况,以及地下水模型的研制;此外,本文还重点介绍了土壤湿度的时空分布特征,及其在天气气候模拟和预测中的重要作用。

然而必须指出,由于复杂多变的下垫面特征,我国陆气相互作用的过程及其机理是十分复杂的,仍需坚持长期的野外观测试验以获取相关长时间序列的观测资料。在陆面过程模式发展方面,还存在诸多值得改进和完善之处,如地表非均匀性的处理、土壤温度/湿度变化的耦合效应以及叶面与冠层空气潜热传导率的不确定性等。此外,现阶段陆面过程模式对青藏高原,以及干旱、半干旱地区陆气相互作用的表述与观测相比还存在着较大的误差,这些也都是亟待解决的问题。另外,由于大气水文过程的时空尺度的差异,大气陆面水文的双向耦合仍然是大气水文研究的难点,因此需进一步加强大气、水文学科的交叉研究,发展具有物理基础的大尺度水文模型,使之成为地球系统模式的有机组成部分。

参考文献 (References)

- [1] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤植被大气相互作用 (IMGRASS) 综合研究. 地学前缘, 2002, **9** (2): 295~306
Lü Daren, Chen Zuozhong, Chen Jiayi, et al. Composite study on Inner Mongolia semi-arid grassland soil - vegetation - atmospheric interaction (IMGRASS). *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, **9** (2): 295~306
- [2] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用综合研究. 气象学报, 2005, **63** (5): 571~593
Lü Daren, Chen Zuozhong, Chen Jiayi, et al. Study on soil-vegetation-atmosphere interaction in Inner-Mongolia semi-arid grassland. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (5): 571~593
- [3] 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验. 气候与环境研究, 2004, **9** (2): 378~389
Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu, Northeast China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 378~389
- [4] 刘辉志, 涂钢, 董文杰, 等. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化. 大气科学, 2006, **30** (1): 108~118
Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie, et al. Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO₂ between the land surface and atmosphere in the semi-arid area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (1): 108~118
- [5] 张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 西北干旱区陆-气相互作用实验 (NWC-ALIEX) 及其研究进展. 地球科学进展, 2005, **20** (4): 427~441
Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng, et al. NWC-ALIEX and its research advances. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2005, **20** (4): 427~441
- [6] Zhang Qiang, Huang Ronghui. Parameters of land-surface processes for Gobi in north-west China. *Bound.-Layer Meteor.*, 2004, **110**: 471~478
- [7] 朱德琴, 高晓清, 陈文. 陆面模式 (SSiB) 对敦煌沙漠戈壁下垫面陆面过程的模拟及敏感性试验. 中国沙漠, 2006, **26** (3): 466~472
Zhu Deqin, Gao Xiaqing, Chen Wen. Validation of SSiB Model over Gobi in Dunhuang and its sensitivity to vegetation parameters. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2006, **26** (3): 466~472
- [8] 朱德琴. 中国干旱/半干旱区陆面过程及其对区域气候影响

- 的数值模拟研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2007
- Zhu Degin. Numerical simulation of the land-surface process over arid/semi-arid area and its impact on regional climate. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [9] Guo Weidong, Song Yaoming, Fu Congbin, et al. Comparative study of different land surface schemes in simulating land-atmosphere interactions in semi-arid region of China. The 6th International Implementation Planning Meeting for the Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP) and the 3rd Integrated Global Observing Strategy Partners (IGOS-P) Integrated Global Water Cycle Observation Theme (IGWCO) Workshop, Washington, D. C., USA. 12 - 17 March 2007
- [10] 黄伟, 郭振海, 宇如聪. CLM在淮河流域数值模拟试验. 气象学报, 2004, **62** (6): 764~775
- Huang Wei, Guo Zhenhai, Yu Rucong. Numerical simulation of CLM over Huaihe basin. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (6): 764~775
- [11] 刘少锋, 林朝晖. 通用陆面模式 CLM 在东亚不同典型下垫面的验证试验. 气候与环境研究, 2005, **10** (3): 684~699
- Liu Shaofeng, Lin Zhaohui. Validation of common land model using field experiment data over typical land cover types in East Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (3): 684~699
- [12] 曹晓彦, 张强. 西北干旱区荒漠戈壁陆面过程的数值模拟. 气象学报, 2003, **61** (2): 219~225
- Cao Xiaoyan, Zhang Qiang. Numerical simulation of the land-surface process over desert and Gobi in arid region of Northwest China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (2): 219~225
- [13] 张强, 赵鸣. 干旱区绿洲与荒漠相互作用下陆面特征的数值模拟. 高原气象, 1998, **17** (4): 335~346
- Zhang Qiang, Zhao Ming. A numerical simulation of characteristics of land-surface process under interaction of oasis and desert in arid region. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1998, **17** (4): 335~346
- [14] 姜纪峰, 延晓冬, 黄耀, 等. 半干旱区农田和草地与大气间二氧化碳和水热通量的模拟研究. 气候与环境研究, 2006, **11** (3): 413~424
- Jiang Jifeng, Yan Xiaodong, Huang Yao, et al. Simulation of CO₂ and sensible/latent heat fluxes exchange between land surface and atmosphere over cropland and grassland in semi-arid region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (3): 413~424
- [15] 王超, 延晓冬, 黄耀, 等. 应用 BIOME-BGC 模型研究典型生态系统的潜热通量——半干旱地区吉林通榆的模拟. 气候与环境研究, 2006, **11** (3): 404~412
- Wang Chao, Yan Xiaodong, Huang Yao, et al. With BIOME-BGC Model on the latent heat fluxes of the typical ecosystem; Simulations in semi-arid area at Tongyu, Jilin Province. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (3): 404~412
- [16] Ji Jinjun, Hu Yuchun. A simple land surface process model for use in climate studied. *Acta Meteorologica Sinica*, 1989, **3** (3): 344~353
- [17] Dai Yongjiu, Zeng Qingcun. A land surface model (IAP94) for climate studies. Part I: Formulation and validation in off-line experiments. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, **14**: 443~460
- [18] Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E, et al. The common land model. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, **84**: 1013~1023
- [19] 王爱慧. 气候模式中的陆表过程参数化研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2006
- Wang Aihui. Understanding and improving land surface parameterizations in climate models. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006
- [20] Sellers P J, Hall F G, Kelly R D, et al. Experiment overview, scientific results, and future directions. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 28731~28770
- [21] 高荣, 韦志刚, 董文杰, 等. 青藏高原冬春积雪和季节冻土年际变化差异的成因分析. 冰川冻土, 2004, **26** (2): 153~159
- Gao Rong, Wei Zhigang, Dong Wenjie. Analysis of the cause of the differential in interannual variation between snow cover and seasonal frozen soil in the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2004, **26** (2): 153~159
- [22] 李倩, 孙菽芬. 通用的土壤水热传输耦合模型的发展和改进研究. 中国科学(D辑), 2007, **37** (11): 1522~1535
- Li Qian, Sun Shufen. Development of the universal and simplified soil model coupling heat and water transport. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2007, **37** (11): 1522~1535
- [23] 李倩, 孙菽芬. 冻土模式的改进和发展. 地球科学进展, 2006, **21** (12): 1339~1349
- Li Qian, Sun Shufen. Development of frozen soil model. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2006, **21** (12): 1339~1349
- [24] Zhang Xia, Sun Shufen, Xue Yongkang. Development and testing of a frozen soil parameterization for cold region studies. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, **8** (4): 690~701
- [25] Dai Qiudan, Sun Shufen. A comparison of two canopy radiative models in land surface processes. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, **24** (3): 421~434
- [26] Zeng X, Wang A. Consistent parameterization of above-canopy turbulence for sparse and dense canopies in Land Models. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, **8**: 730~737

- [27] 包庆, 刘屹岷, 周天军, 等. LASG/IAP 大气环流谱模式对陆面过程的敏感性试验. 大气科学, 2006, **30** (6): 1077~1090
- Bao Qing, Liu Yimin, Zhou Tianjun, et al. The sensitivity of the spectral atmospheric general circulation model of LASG/IAP to the land process. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1077~1090
- [28] 刘少锋. IAP 大气-陆面-植被耦合模式的建立及陆气耦合强度的定量评估. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2007
- Liu Shaofeng. The development of a new IAP land-atmosphere-vegetation coupled model and the quantify the land-atmosphere coupling strength. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [29] 张宇, 吕世华, 孙淑芬. 冻土过程在 CCM3 模式中的气候效应. 高原气象, 2004, **23** (2): 192~199
- Zhang Yu, Lü Shihua, Sun Shufen. Climatic effects of frozen soil process in CCM3. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (2): 192~199
- [30] Zhang Y, Lu S H. Development and validation of a simple frozen soil parameterization scheme used for climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (3): 513~527
- [31] 雷航, 林朝晖, 孙建华. 一个改进的沙尘天气数值预测系统及其模拟试验. 气候与环境研究, 2005, **10** (3): 669~683
- Lei Hang, Lin Zhaohui, Sun Jianhua. An improved dust storm prediction system and its simulation experiments. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (3): 669~683
- [32] 毛嘉富, 王斌, 丹利, 等. 新一代格点大气环流模式与陆面生态模式 AVIM 的耦合研究. 大气科学, 2005, **29** (6): 897~910
- Mao Jiafu, Wang Bin, Dan Li, et al. Coupling of an atmosphere-vegetation interaction model (AVIM) to a new generation grid point atmospheric general circulation model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (6): 897~910
- [33] 刘少锋, 林朝晖, 蒋星, 等. IAP 大气-植被耦合模式的建立及其模拟试验. 气候与环境研究, 2008 (已接收)
- Liu Shaofeng, Lin Zhaohui, Jiang Xing, et al. The IAP coupled atmosphere-vegetation model and its numerical simulation. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008 (Accepted)
- [34] Zeng N, Mariotti A, Wetzel P. Terrestrial mechanisms of interannual CO₂ variability. *Global Biogeochem. Cycles*, 2005, **19**: 2539~2558
- [35] Hagemann S. An improved land surface parameter dataset for global and regional climate models. *Max Planck Inst. Meteorol (MPI)*, Rep. **336**, Hamburg, Germany, 2002
- [36] 张文君. 中国土壤湿度分布和变化的观测与模拟. 中国科学院大气物理研究所硕士学位论文, 2006
- Zhang Wenjun. Spatial distribution and temporal variation of the observed and simulated soil moisture over China. M. S. thesis (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006
- [37] 赵秀兰, 延晓冬. 近 20 年黑龙江省土壤水储量变化趋势研究. 地理科学, 2006, **26** (5): 569~573
- Zhao Xiulan, Yan Xiaodong. Change trend of soil water storage of Heilongjiang Province in recent 20 years. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 2006, **26** (5): 569~573
- [38] 赵秀兰, 延晓冬. 近 20 年华北地区土壤水储量变化趋势及水分管理与调配对策. 气候与环境研究, 2006, **11** (3): 371~379
- Zhao Xiulan, Yan Xiaodong. The trend of soil moisture storage in the last 20 years and its countermeasures of water management and regulation over North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (3): 371~379
- [39] Nie Suping, Luo Yong, Zhu Jiang. Trends and scales of observed soil moisture variations in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2008, **25** (1): 43~58
- [40] Zhan Yanling, Lin Zhaohui. Spatio-temporal characteristics of soil moisture over China and the evaluation of CPC soil moisture data set. The Second International Soil Moisture Working Group Meeting, 14-15 November, 2007, Beijing, China
- [41] Dan Li, Ji Jinjun, Zhang Peiqun. The soil moisture of China in a high resolution climate-vegetation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22** (5): 720~729
- [42] Lin Zhaohui, Yang Xiaosong, Guo Yufu. Preliminary study on land surface characteristics over Huaihe River basin. *Progress in Natural Science*, 2002, **12** (2): 120~125
- [43] 苏明峰, 王会军. 全球变暖背景下中国夏季表面气温与土壤湿度的年代际共变率. 科学通报, 2007, **52** (8): 965~971
- Su Mingfeng, Wang Huijun. Decadal co-variability of the summer surface air temperature and soil moisture in China under global warming. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2007, **52** (8): 965~971
- [44] 郭维栋, 马柱国, 姚永红. 近 50 年中国北方土壤湿度的区域演变特征. 地理学报, 2003, **58** (Suppl): 83~90
- Guo Weidong, Ma Zhuguo, Yao Yonghong. Regional characteristics of soil moisture evolution in northern China over recent 50 years. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **58** (Suppl): 83~90
- [45] 杜睿, 周宇光, 王庚辰, 等. 土壤水分对温带典型草地 N₂O 排放过程的影响. 自然科学进展, 2003, **13** (9): 939~945
- Du Rui, Zhou Yuguang, Wang Gengchen, et al. Impact of soil moisture on emission of N₂O in extratropical typical grassland. *Progress in Natural Sciences* (in Chinese), 2003, **13** (9): 939~945
- [46] Wang K, Wang P, Liu J, et al. Variation of surface albedo

- and soil thermal parameters with soil moisture content at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau. *Bound. - Layer Meteor.*, 2005, **116** (1): 117~129
- [47] Jiang J H, Hu F, Cheng X L. Impact of spatial heterogeneity of soil moisture on mesoscale fluctuations and mesoscale fluxes. *Chinese J. Geophys.*, 2006, **49** (2): 319~327
- [48] 林朝晖, 杨小松, 郭裕福. 陆面过程模式对土壤含水量初值的敏感性研究. *气候与环境研究*, 2001, **6** (2): 240~248
Lin Zhaohui, Yang Xiaosong, Guo Yufu. Sensitivity of land surface model to the initial condition of soil moisture. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 240~248
- [49] 马柱国. 中国东部土壤湿度和区域气候变化的关系及一个土壤湿度反演模式的建立. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1999
Ma Zhuguo. The relationship of soil moisture in East China with regional climate change, and the establishment of the soil moisture retrieval model. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1999
- [50] Guo Weidong, Wang Huijun. A case study of the improvement of soil moisture initialization in IAP-PSSCA. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (5): 845~848
- [51] 郭维栋, 马柱国, 王会军. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨. *气候与环境研究*, 2007, **12** (1): 20~28
Guo Weidong, Ma Zhuguo, Wang Huijun. Soil moisture—An important factor of seasonal precipitation prediction and its application. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (1): 20~28
- [52] 佟华, 刘辉志, 陈起英, 等. 土壤湿度初值对边界层物理量预报影响的分析. *气候与环境研究*, 2007, **12** (4): 546~552
Tong Hua, Liu Huizhi, Chen Qiying, et al. The impact of initial soil moisture to the forecast of boundary layer variables. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (4): 546~552
- [53] 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 土壤湿度异常对区域短期气候影响的数值模拟试验. *应用气象学报*, 2007, **18** (1): 1~11
Li Qiaoping, Ding Yihui, Dong Wenjie. A numerical study on effects of the soil moisture upon the regional short-term climate. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2007, **18** (1): 1~11
- [54] 杨传国, 林朝晖, 郝振纯, 等. 大气水文模式耦合研究综述. *地球科学进展*, 2007, **22** (8): 810~817
Yang Chuanguo, Lin Zhaohui, Hao Zhenchun, et al. Review of coupling atmospheric and hydrologic models. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2007, **22** (8): 810~817
- [55] Variable Infiltration Capacity (VIC) Macroscale Hydrologic Model [EB/OL]. <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/VIChome.html>. 2006
- [56] Liang X, Xie Z. Important factors in land-atmosphere interactions: Surface runoff generations and interactions between surface and groundwater. *Global and Planetary Change*, 2003, **38**: 101~114
- [57] Xie Zhenghui, Su Fengge, Liang Xu, et al. Applications of a surface runoff model with Horton and Dunne runoff for VIC. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (2): 165~172
- [58] 谢正辉, 刘谦, 袁飞, 等. 基于全国 50 km×50 km 网格的大尺度陆面水文模型框架. *水利学报*, 2004, **35** (5): 76~82
Xie Zhenghui, Liu Qian, Yuan Fei, et al. Macro-scale land hydrological model based on 50 km×50 km grids system. *Journal of Hydraulic Engineering* (in Chinese), 2004, **35** (5): 76~82
- [59] 袁飞, 谢正辉, 任立良, 等. 气候变化对海河流域水文特性的影响. *水利学报*, 2005, **36** (3): 274~279
Yuan Fei, Xie Zhenghui, Ren Liliang, et al. Hydrological variation in Haihe River basin due to climate change. *Journal of Hydraulic Engineering* (in Chinese), 2005, **36** (3): 274~279
- [60] Yuan Fei, Xie Zhenghui, Liu Qian, et al. An application of the VIC-3L land surface model and remote sensing data in simulating streamflow for the Hanjiang River Basin. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, **30** (5): 680~690
- [61] Yuan Fei, Xie Zhenghui, Liu Qian, et al. Simulating hydrologic changes with climate change scenarios in the Haihe River basin. *Pedosphere*, 2005, **15** (5): 595~600
- [62] Xie Zhenghui, Yuan Fei, Duan Qingyun, et al. Regional parameter estimation of the VIC land surface model: Methodology and application to river basins in China. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, **8** (3): 447~468, doi: 10.1175/JHM568.1
- [63] Tian Xiangjun, Xie Zhenghui, Zhang Shenglei, et al. A sub-surface runoff parameterization with water storage and recharge based on the Boussinesq-Storage Equation for a Land Surface Model. *Science in China (Series D)*, 2006, **49** (6): 622~631
- [64] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 1979, **24** (1): 43~69
- [65] Zhang W C, Li X, Cheng G D, et al. An experimental study of TOPMODEL on a small mountainous watershed in north-western China. Proceedings on Science and Technology Conference between Mainland China and Chinese Taipei, 2002, 26~35
- [66] 吴波, 张万昌. 基于栅格产汇流的 TOPMODEL. *长江流域资源与环境*, 2007, **16** (5): 661~666
Wu Bo, Zhang Wanchang. Grid-based TOPMODEL for runoff production and routing. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (in Chinese), 2007, **16** (5): 661~666
- [67] 雍斌, 张万昌, 陈艳华. TOPMODEL 中地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$

- 的新算法. 地理研究, 2007, **26** (1): 37~45
- Yong Bin, Zhang Wanchang, Chen Yanhua. A new algorithm of the topographic index $\ln(a/\tan\beta)$ in TOPMODEL and its resultant analysis. *Geographical Research* (in Chinese), 2007, **26** (1): 37~45
- [68] 王守荣. 滦河、桑干河流域分布式水文模式及其与区域气候模式嵌套模拟研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2000
- Wang Shourong. Studies on a distributed hydrologic model and simulations nested with regional climate model for Luan and Sanggan River basins. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000
- [69] Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. Stream-flow simulation for the Yellow River basin using RIEMS and LRM. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (3): 415~424
- [70] 林朝晖, 杨传国, 余钟波, 等. “中国区域大尺度分布式水文模型及其应用”. 气候系统模式发展与应用研究研讨会. 湖南长沙, 2007 年 10 月 20-26 日
- Lin Zhaohui, Yang Chuanguo, Yu Zhongbo, et al. The large-scale distributed hydrological model and its applications in Chinese region. Workshop on Developments and Applications of Climate System Dynamical Models, Changsha, Oct. 20-26, 2007
- [71] Yu Z, Lakhtakia M N, Barron E J. Modeling the river-basin response to single-storm events simulated by a mesoscale meteorological model at various resolutions. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104** (D16): 19675~19690
- [72] Yu Z, Pollard D, Cheng L. On continental-scale hydrologic simulations with a coupled hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 2006, **331**: 110~124
- [73] 谢正辉, 梁旭, 曾庆存. 陆面过程模式中地下水位参数化及初步应用. 大气科学, 2004, **28** (3): 374~384
- Xie Zhenghui, Liang Xu, Zeng Qingcun. A parameterization of groundwater table in a land surface model and its applications. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (3): 374~384
- [74] 谢正辉, 曾庆存, 戴永久, 等. 非饱和流问题的数值模拟研究. 中国科学(D), 1998, **28** (2): 175~180
- Xie Zhenghui, Zeng Qingcun, Dai Yongjiu, et al. Numerical simulation of an unsaturated flow equation. *Science in China (Series D)*, 1998, **41** (4): 429~436
- [75] Yang Hongwei, Xie Zhenghui. A new method to dynamically simulate groundwater table in land surface model VIC. *Progress in Natural Science*, 2003, **13** (11): 819~825

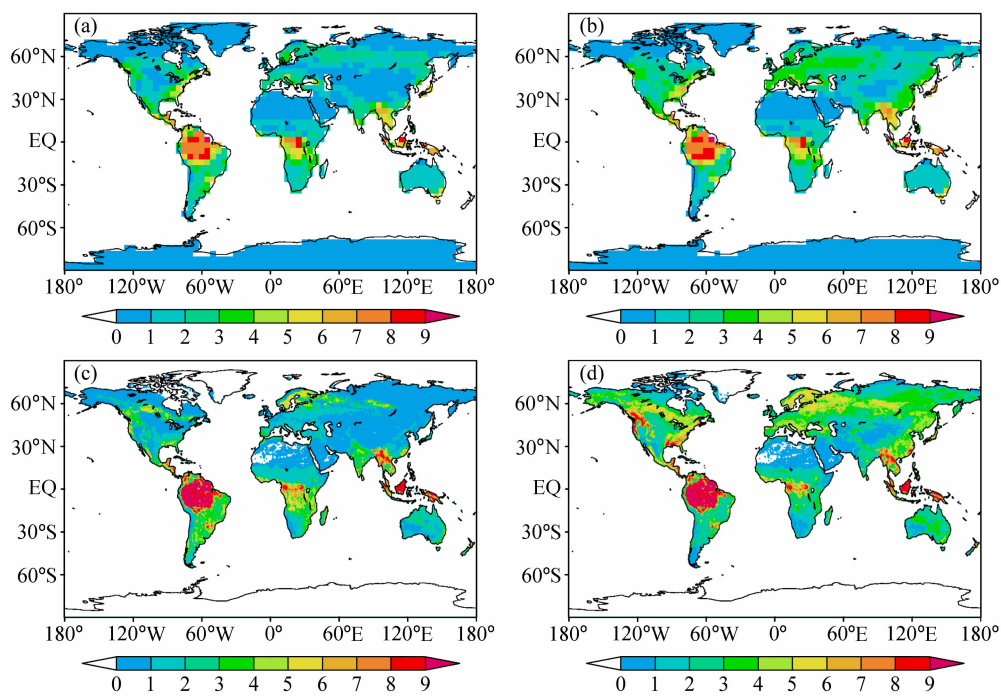


图 4 IAP9L_CoLM-VEGAS 模拟 (a、b) 和 Hagemann 观测 (c、d) 的平均叶面积指数：(a、c) 冬季；(b、d) 夏季
Fig. 4 Simulated Leaf Area Index (LAI) by IAP9L_CoLM-VEGAS in (a) DJF (Dec, Jan, Feb) and (b) JJA; (c) Hagemann DJF mean LAI; (d) Hagemann JJA mean LAI

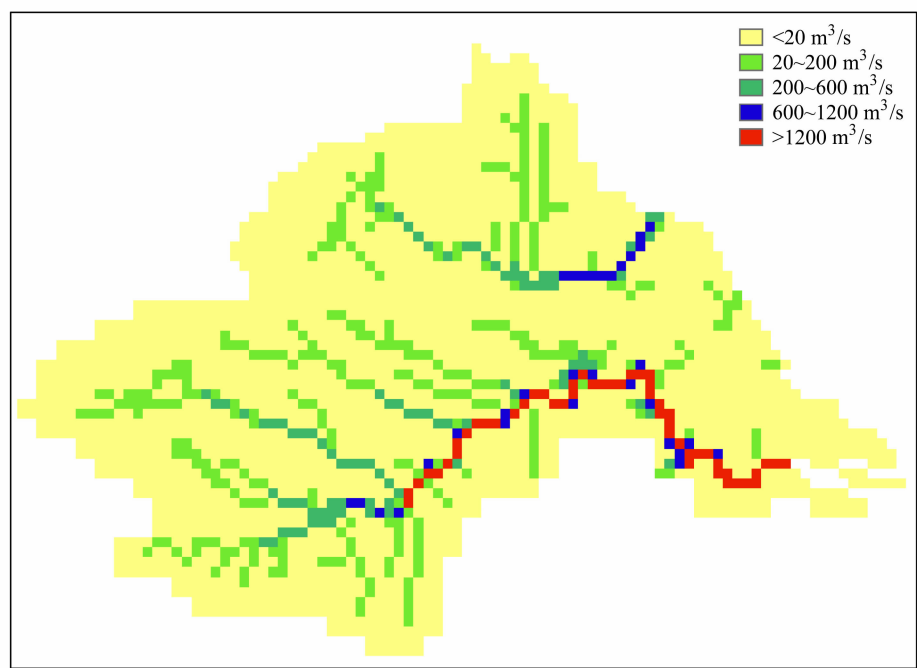


图 7 2005 年大尺度水文模式模拟的淮河流域年平均流量的空间分布
Fig. 7 The geographical distribution of annual mean streamflow over the Huaihe River basin in 2005 simulated by a large-scale hydrological model system