

# 陆面过程模式研究简评\*

史学丽

(国家气候中心, 北京 100081)

## 提 要

主要总结了陆面过程模式的发展状况, 对一些国际间合作进行的计划、试验成果以及我国在这方面的研究情况加以介绍和评述, 最后给出陆面模拟研究中存在的难点、问题及可能的解决途径.

关键词: 陆面过程 参数化方案 比较计划(PILPS) 雪盖 土壤分层

## 引 言

陆地表面是一个非常复杂的系统, 除地形起伏外, 上面还有诸如森林、草地、耕地、积雪和冰川等多种覆盖物, 因而是气候系统的一个重要下边界. 陆面与大气发生复杂的相互作用, 交换水分和能量从而对气候产生重大影响, 例如陆面雪盖, 其独特的性质(如高反照率、低热传导率及水文特点)可以影响陆面的水分收支和陆-气能量收支<sup>[1]</sup>; 另外, 模式的敏感性研究发现陆面特征(如反照率、粗糙度、土壤水分等)的变化对气候会产生强烈的影响(如 Charney et al., 1977; Shukla and Mintz, 1982; Sud et al., 1985)<sup>[2]</sup>.

随着人们对陆面过程及其对天气和气候重要作用认识的逐步深入, 在短短的几十年里, 陆面模式从简单、缺乏真实性的参数化方案逐步发展为真实程度很高的陆-气交换模式. 本文将简述陆面参数化的发展过程, 介绍陆面观测试验及陆面方案的比较计划(PILPS), 并对我国学者在这一领域的研究成果进行介绍, 总结陆面过程研究中存在的难点和问题, 提出解决问题的可能途径.

## 1 陆面过程模式的发展过程

最早的陆面过程研究出现在 20 世纪 50 年代, Budyko(1956)提出简单的陆面方案来参数化大气和陆面相互作用. 60 年代末 GCM 出现以后, 陆面过程作为模式中的一个分量来表达, 以保证系统的能量和水分守恒<sup>[3]</sup>. 80 年代以来, 随着观测手段的不断改进和资料的不断丰富, 以及对陆面过程重要性认识的逐步深入, 复杂的陆面模式飞速发展起来, 如 BATS<sup>[4,5]</sup>, SiB<sup>[6]</sup>和 LSM<sup>[7]</sup>等.

陆面过程模式的发展大体经历了 3 个阶段: 最初是 Manabe 等(1969)的简单“吊桶(B

\* 本研究得到国家重点基础研究发展规划 G1998040900 项目第一部分和国家“九五”重中之重科技攻关项目 95-906-02-04 的联合资助.

1999-06-28 收到, 2000-05-17 收到再改稿.

ucket) ”模式, 在整个陆面上将地面参数(地面反照率、空气动力学粗糙度、土壤湿度)取为均值, 将土壤看作“吊桶”, 假设地面的蒸发与桶里的水量(最大容水量为 15 cm)成正比, 这显然存在很多缺陷。80 年代以来发展的较为复杂的陆面方案, 采用不均匀的地面参数, 将地表覆盖物分成不同类型, 每一种类型都对应一套参数, 模式还较为真实地考虑植被的作用(尤其是植被生理过程), 这类模式在本质上都属于计算土壤-植被-大气间辐射、水汽和热量等交换的方案, 但是他们的不足之处在于对植被的生化过程缺乏动态的详细描述。90 年代以后, 新一代陆面模式中考虑了植物的水汽吸收和碳交换, 广泛吸收了其他学科的内容, 尤其是植物的生物化学过程, 如 SiB2 等。

目前研究中常用的是第二阶段的模式, 例如 Dickinson 等(1986, 1993)的生物圈-大气传输方案(BATS)和 Y. Xue 等(1991)在 SiB 基础上简化单层生物圈模式(SSiB)<sup>[8]</sup>等, 表 1 中列出的是一些主要陆面模式的基本情况简介。

表 1 参加 PILPS 比较计划的一些陆面方案基本情况<sup>[15]</sup>

模式名称	主要应用	时间步长(m in)	调态时间(年)	冠层层数	T <sub>s</sub> 层数	Q <sub>s</sub> 层数	根带层数	强迫场(输入场)	截留过程	遵循的定律		
										冠层	土壤温度	土壤湿度
BASE	GCM	20	5	1	3	3	3	Pr, Ta, Ws, Hu, SW, LW, Ps	Yes	空气动力学	热力扩散	Philip-deVries
BATS	GCM	30	3	1	2	3	2	Pr, Ta, Ws, Hu, SW, LW, Ps	Yes	Penman-Monteith	强迫-恢复	Darcy定律
BUCK	GCM	30	1	0	1	1	1	-	NO	隐式	热平衡	吊桶+变率
CAPS	GCM	30	1	1	3	3	2	-		Penman-Monteith	热力扩散	Darcy定律
CLASS	GCM	30	3	1	3	3	2	Pr, Ta, Ws, Hu, SW, LW, Ps	Yes	Penman-Monteith	热力扩散	Darcy定律
CSIRO9	GCM	30	2	1	3	2	3	-	Yes	空气动力学	热力扩散	强迫恢复
ECHAM	GCM	30	5	1	5	1	1	Pr, Ta, Tdp, Ws, Cl, Ps		空气动力学	热力扩散	吊桶变率
IAP94	GCM	60	60	1	3	3	6	Pr, Ta, Ws, Hu, SW, LW, Cl, Ps		Penman-Monteith	热力扩散	Darcy定律
ISBA	GCM	5	1	1	2	2	2	Pr, Ta, Ws, Hu, SW, LW, Ps	Yes	空气动力学	强迫-恢复	强迫-恢复
MOSAIC	GCM	5	6	1	2	3	1	Pr, Ta, Ws, Hu, SW, LW, Ps	Yes	Penman-Monteith	强迫-恢复	Darcy定律
PLACE	GCM 等	30	3	1	7	50	2	-	Yes	空气动力学	热扩散	Darcy定律
SECHIBA2	GCM	30	2	1	7	2	2	-	Yes	空气动力学	热扩散	Choisnel
SSiB	GCM	30	2	1	2	3	2	Pr, Ta, Ws, Hu, SW, LW	Yes	Penman-Monteith	强迫-恢复	扩散方程
UKMO	GCM	30	1	1	4	4	4	Pr, Ta, Ws, Hu, SW, LW, Ps		Penman-Monteith	热力扩散	Darcy定律
VIC-3L	GCM	60	1	1	2	3	2	-	Yes	Penman-Monteith	热力扩散	Variable Infiltration

注: Pr—降水, Ta—空气温度, Tdp—露点温度, Ws—风速, Hu—湿度, SW—向下短波辐射, LW—向下长波辐射, Rn—净辐射, Cl—云量, Ps—表面气压, \* GCM 代表中尺度 GCM, P-M 代表 Penman-Monteith 定律, T<sub>s</sub> 指土壤温度, Q<sub>s</sub> 土壤湿度, —表示情况不详(引自文献[15])。

## 2 国际上对陆面过程的研究

陆面过程及其模拟研究的迅速发展与国际间的合作是密不可分的. 尤其是近 20 年来, 国际上的许多组织、机构及院校针对陆面过程进行了多学科的研究, 如世界气象组织(WMO)、世界气候研究计划(WCRP)设立的全球能量和水循环试验计划(GEWEX). 这些研究主要包括外场观测试验研究和陆面方案的性能比较两方面的内容.

表 2 大尺度地气观测试验(引自文献[9])

试验名称	时间	地点	试验面积/km <sup>2</sup>	主要目的
HAPEX - MOBILHY	1985~ 1988	法国西南	100× 100	能量-水交换、中尺度模拟
FIFE	1987~ 1989	美国	15× 15	能量-水-碳交换过程, 遥感研究
KUREX	1988~ 1991	莫斯科西南 50 km 处		能量-水-碳交换, 遥感研究
EFEDA	1991~ 1995	西班牙中部	100× 100	能量-水-碳交换, 遥感
HAPEX -SAHEL	1992	尼日尔	100× 100	能量-水-碳交换, 遥感, 中尺度模拟
BOREAS	1992~ 1996	加拿大	1000× 1000	能量-水-碳交换, 碳循环, 生物地理、土壤生态, 中尺度模拟, 遥感
GCLP	1995~ 2000	美国密西西比	2000× 2000	能量水碳交换、尺度研究、中尺度模拟遥感应用
LBA	1998~ 2000	巴西亚马逊	2000× 2000	能量水碳交换, 尺度研究, 中尺度模拟遥感应用
ABRACOS	1900~ 1994	巴西亚马逊		塔层微气象、遥感、生态、水化学、水平衡、植物与土壤物理
HEIFE	1990~ 1994	中国黑河	100× 100	水热平衡, 沙漠风暴
REKLIP	1991~ 1999	德、法、瑞士	10 <sup>3</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	微气象、遥感和热量通量
OASIS	1993~ 1996	澳大利亚 半干旱地区	10 <sup>3</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	微尺度与中尺度平流过程, 能量与物质输送过程
NOPEX	1994~ 1996	瑞典	10 <sup>0</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	中尺度模拟、遥感研究
Lockeget Sleigh	1992	澳大利亚	10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	边界层气象模拟
TVER	1990~ 1994	俄罗斯	10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	遥感、生态、地-气相互作用

### 2.1 外场观测试验

陆面过程资料不同于常规气象资料, 它包括的内容繁多而且观测困难(如土壤温湿度、植被的生理参数等), 因而全面、长时间的记录非常稀少; 但另一方面, 陆面过程模式中参数的标定和验证都需要有观测资料支持. 因此从 80 年代中期以来, 在全球不同的气候带开展了一系列国际间合作的陆面过程观测试验, 其中既有单一地点上的观测, 也有大尺度的区域观测(详见表 2)<sup>[9]</sup>. 例如 90 年代初期, 在我国甘肃黑河流域进行了“中日合作的黑河地区陆-气相互作用野外观测试验研究(HEIFE)”, 简称黑河实验, 这是为数不多的在干旱和半干旱地区的一次观测试验. GEWEX 在 90 年代后期利用先进的地球观测系统开展了更广泛的综合观测, 如 Amazonia 流域的大尺度生物-大气试验(LBA)、波罗的海试验(BALTEX)、GEWEX 亚洲季风试验(GAME), 其中 1998 年夏季, 在我国进行了

亚洲季风区“淮河流域能量和水分循环试验(HUBEX)”、青藏高原地—气系统物理过程及其对全球气候和中国灾害性天气影响的观测和理论研究(TIBET)和“南海季风试验(GAME-SCSMEX)”,这3个试验与“海峡两岸及临近地区暴雨试验研究(HUAMEX)”统称为四大气象科学试验。

观测试验资料为陆面模式的发展、标定和改进提供了有力的支持,每一个陆面模式的出现都与一些系统的陆面观测研究有关。例如,BATS和SiB模式的发展与巴西亚马逊地区的微气象学试验(ARME)有密切关系;ISBA与HAPEX-Mobilhy的大型观测有关;前苏联的长期土壤、雪盖等观测资料为模式中相应部分的改进提供了基础,我国干旱半干旱地区的黑河试验则为进一步改进模式参数、提高对不均匀下垫面的模拟结果创造了条件。

## 2.2 PILPS比较计划简介

为了进一步改进模式,提高模式对陆面—大气之间的水、能量和碳交换的模拟,国际间开展了陆面参数化方案相互比较计划(PILPS)。PILPS是由WMO/WGNE和GEWEX/GCIP共同发起的,也是GCM模式比较计划(AMIP)子计划(Subproject-12)中的一项重要内容,其目的是更好地了解大气模式中陆面方案的模拟能力和可能应用<sup>[10]</sup>。自从1992年开展以来,PILPS采用独立试验方式提供大气强迫场、模式参数、平衡方案和初条件等观测资料,从不同方面检验陆面模式/方案的性能。参加PILPS的有20多个模式(参见表1),它的总体设计步骤是:第1阶段主要用大气模式产生的大气强迫来作简单的“独立(offline)”积分;第2阶段是将不同陆面方案的“独立”积分结果与观测的通量做比较;第3阶段是与AMIP结合进行的,将陆面方案与所选的主模式耦合,并相互比较模拟的全球大陆气候<sup>[11]</sup>。第4阶段是比较所选的PILPS陆面方案和他们自己的主模式耦合的结果。

第1阶段比较GCM大气强迫下的陆面方案独立试验,共有3个子阶段。第1(a)阶段主要研究初始土壤湿度值对模拟结果的影响,即比较模式在异常的初始土壤含水量或一些异常的环境强迫(如干旱)下,趋向平衡态的调整过程(sp<sub>in</sub>-up)。结果发现模式达到水、热平衡需要几年的时间,时间的长短与总持水量和初始湿度有关。在初始土壤湿度值不为零的条件下,“吊桶”类模式中sp<sub>in</sub>-up时间与最大有效土壤湿度呈线性关系,这是比较复杂的“非吊桶”类模式的一个特例;在初始土壤湿度或降水为零时,这种线性关系不成立<sup>[12]</sup>。1(b)和1(c)阶段是针对1(a)出现的差异进行进一步的研究。

第2阶段包括4个子阶段,分别用不同空间尺度、不同气候条件和不同植被特征的观测资料来驱动陆面模式,并将模式输出结果与观测值(陆地表面的水、热通量)做比较。研究表明:尽管陆面模式对于总的水分和能量的模拟结果与观测很一致,但是各分量的模拟仍存在大的差异,并且可能与观测结果偏离较远<sup>[13]</sup>。

2(a)阶段用新西兰的Cabauw观测资料<sup>[14]</sup>(1年)作为输入场,主要比较不同模式的能量和水分收支及其联系。经过一系列的水分能量守恒检验后,发现在相同的大气强迫下,23个模式得出的感热和潜热通量差别分别为 $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,蒸散和径流的差别为315 mm,可见不同模式对能量和降水的分配差异较大<sup>[15]</sup>。

第2(b)阶段是用法国南部的外场观测试验HAPEX-Mobilhy(Goutorbe and Tarrieu, 1991)作为比较对象,目的是量化土壤湿度预报的差别、确定这种差别是否对大气或生态模式很重要和了解造成这些差别的原因。与前面的试验结果一样,在相同的强迫和初

始条件下,不同方案得到的平衡态不同,达到平衡态的时间也不同.模式对土壤水分的模拟都很好(一致接近 200 mm),但水分的分配(蒸发、径流和排水)显著不同,模拟的总排水量范围为 40~300 mm,这些差别可能是由于模式的结构差异和对某些过程的概念不同造成的<sup>[16-17]</sup>.研究还认为,在陆面模式中,能量和水分应该作为不可分的整体,不应该孤立考虑.

第 2(c)阶段用美国的 Red River-Arkansas 盆地的观测资料作初始场和参考场,比较能量通量和水分通量的时空分布,共有 16 个模式参加比较,发现模拟结果间的差异与前面研究中的相当.研究还发现:相互联系的水分和能量循环可造成土壤水分的变化,模式对其中一个过程的参数化的不足可能影响其他通量和存储项.

第 2(d)阶段用苏联的水平衡站 Valdai 观测资料作为检验依据,其目的在于检验季节和年际水文过程,尤其是雪和冻土过程, Yang 等用 BATS、LSM 做了相应的研究<sup>[18]</sup>.

第 3 阶段主要是研究与 AMIP 中的大气模式相耦合的几个陆面方案的模拟,主要目的是继续评估陆面模式在 AMIP II 中的作用.

第 4 阶段的总体目的是更好地综合大气(气候和天气预报)模式中的陆面参数化,大体包括了 3 个阶段.首先,评估陆面方案与所选的大气 GCM(NCAR 的 CCM3, 4(a))和区域数值天气预报模式(澳大利亚 BMRC 的 LAPS, 4(b))的耦合,目的在于探索模式交换的方法,增加了解这些模式在与大气反馈和水文差异相互作用中的变化.研究表明,准确的陆面参数化对预测全球和区域气候及短期数值预报很重要<sup>[19]</sup>.在 4(c)阶段,将大气模式和区域模式的耦合结果进行相互比较,力求发展一个通行的方法,来进行陆面方案和气候、天气预报模式间的参数交换.

PILPS 已取得了一定的成功.但由于陆面过程的复杂多样性,模式中仍存在很多不确定性,例如在相同的初始条件强迫下,不同模式的结果相差很大(感热通量、潜热通量、径流等);大多数方案对湿润区植被分布均匀地区的模拟较好,而对雪盖、冻土、沙漠及分布不均匀的下垫面的模拟有很大缺陷;不同的陆面模式对能量和水分的分配存在很大差别.尽管仅通过 PILPS 不可能完全断定这些差异是否与陆面模式所包括的过程、基本结构,或具体的参数化方法和标定模式的资料有关,但通过比较可以有益于单个模式和整个陆面过程参数化的改进.

### 3 我国关于陆面过程的研究状况

我国的地形和陆面条件很复杂,尤其是青藏高原大地形的存在,使得季风在我国的活动具有很强的“局地性”,因此增加了模式对陆面过程描述的不确定性和季风模拟的难度.有关青藏高原对我国天气和气候的动力学、热力学作用的研究成果很多,已得到一些比较有用的统计相关关系(如高原积雪与长江流域降水异常之间的正相关).如果我们能在模式中体现这些统计相关关系,将对我国的气候预测有重要的意义.

许多模式的敏感性研究都表明,下垫面类型的改变将导致降水量和土壤质地等的变化,而陆面模式是研究这类问题的一个常用方法,例如常见的沙漠化影响.因此在研究城市的环境保护和沙漠化影响等方面,陆面过程模式都是一个重要手段.

我国学者对陆面过程的研究很多, 其中不仅有观测试验, 还有模式的模拟研究. 1990年6月~1992年10月期间在河西走廊黑河流域中段进行的以水分和热量交换为中心的地气相互作用综合观测试验, 被列为 WCRP 关于水文大气先行性试验(HAPEX)的第三个较大的国际性试验项目和“国际地圈-生物圈研究计划(IGBP)”的组成部分<sup>[20]</sup>. 试验得到了黑河流域沙漠、戈壁、绿洲等不同下垫面的太阳辐射、大气边界层气象以及绿洲生物气象方面的大量观测资料, 还有一些气象水文资料, 为干旱地区陆面过程的理论和参数化研究提供了有益的观测试验基础<sup>[21-23]</sup>. 试验得到干旱地区的如下陆面特征参数值: 夏季沙漠和戈壁的地表反射率约为 0.25~0.26, 绿洲约 0.15, 与湿润地区相当. 夏季平均的 Bowen 比大于 6.0, 但绿洲的只有 0.24. 沙漠和戈壁的地表空气动力学粗糙度分别为  $4.5 \times 10^{-3} \text{ m}$  和  $1.2 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-3} \text{ m}$ , 中性层结条件下的总体输送系数分别为  $6.3 \times 10^2$  和  $4.5 \times 10^2$ , 他们的夏季层结稳定度动态范围分别为 8.3 倍和 26.3 倍, 因此在模式中应该考虑层结的变化.

在陆面模式的发展和改进方面, 我国的学者针对不同的研究重点, 发展了许多陆面方案或模式. 在积雪方面, 孙淑芬等<sup>[24]</sup>发展了一个复杂的三层雪模式(SAST), 比较详细地考虑了雪盖内部的压实、融化及相变等积雪内部过程, 在计算量不太大的情况下改进了许多模式对雪盖的模拟. SAST 已被用于 BATS、SSiB 等陆面模式和大气模式中, 得到较好的模拟效果. 林朝晖<sup>[25]</sup>通过改进 IAP2-LAGCM 中的地表反照率参数化方案, 使得新版本的 IAP-2L AGCM 模式能很成功地模拟出旬平均时间尺度上东亚夏季风降水带的突跳现象(图略). 在动态的植被生理描述方面, 季劲钧等发展了大气-植被相互作用方案(AVIM), 采用较多的土壤湿度分层(10层), 对我国不同气候带的模拟效果较好. 另外也有考虑过程较全面的模式, 如戴永久<sup>[26]</sup>根据多孔介质理论, 由土壤、雪盖和植被水分和热量守恒型控制方程发展的陆面模式 IAP94. 它用于中科院大气所的 IAP 两层大气环流模式中, 也是参加 PILPS 的一个方案, 模拟效果不错. 张晶等<sup>[27, 28]</sup>在 BATS 的基础上, 采用物理方程和经验解析公式相结合的方法求解土壤温度和湿度, 并考虑了降水次网格分布和雪盖的影响, 发展了陆面过程模式 LPM-ZD, 与区域气候模式 RegCM2 耦合, 对 1991 年的特大暴雨模拟效果比 BATS 有较大改进.

#### 4 陆面过程研究中存在的问题和难点

如前所述, 尽管陆面模式在某个或某些方面的模拟效果较好, 但是目前仍没有一个模式能很好地模拟整个过程(PILPS, 1996), 这是因为陆面模式的发展受到一系列条件的限制, 文献[4]曾对此做过总结, 例如完整、长时间资料的缺乏、非线性的处理. 另外以下几点也是陆面过程研究中的难点:

(1) 雪盖的处理 雪盖对能量和水平衡的重要作用使得陆面模式对它的描述很关键, 目前的雪模式繁简程度不一, 程序语句从几十行到上万行不等, 但从结构来看, 大多数模式都描述垂直方向的雪过程. 复杂的雪模式(如 Jordan (1991)<sup>[29]</sup>的模式), 目的在于研究雪的内部过程, 由于计算量太大, 所以不能用于大气模式中. 比较复杂的雪模式, 如 Loth 等 (1993)<sup>[30-31]</sup>和 Lynch-Stieglitz (1994)<sup>[32]</sup>的多层雪模式, 可用于气候模拟, 但缺点

是没有很好地与大气模式中所用的植被和土壤相联系, 还有一类就是比较简单的雪模式, 这类模式通常只考虑雪的表面过程(如雪反照率、表面升华、融化等), 没有显示区分雪盖和顶层土壤, 对雪的内部过程也仅作粗糙的描述, 当前许多大气和陆面模式中的雪模式都属于这一类。

由于研究目的不同(如用于大气模式、业务径流预报、气候监测、冻土研究等), 不同的雪模式侧重考虑的过程不尽相同, 并且对同一过程, 不同模式的描述也存在差异。许多学者都对它们的异同点进行过总结, Yang (1998) 曾比较全面地从不同的角度比较了 40 多个雪模式, 表 3 是部分比较结果。目前还不清楚全球气候模式中描述雪物理过程所需的最适宜复杂程度, 以及计算雪过程所需要的准确程度(如水汽扩散和液体水运动)。但正如 Dickinson 等所指出的, 如果不区分雪表温度和表层土壤温度, 在雪融化或降水时会产生严重的概念错误。因此一般认为: 雪模式应该分开考虑雪面温度和土壤温度, 而且还应该尽可能地以简单的形式表达尽可能多的雪内部过程信息(如考虑雪的存留作用、压实和融化过程等造成的变形过程、雪内的水分热量传输、反照率的变化等, 私人通信)。要发展模拟效果好、计算效率高的雪模式还有待于进一步研究。

(2) 土壤过程的问题 土壤温度和湿度是陆面模式的主要模拟量。观测研究表明, 土壤温度与湿度都有明显的持续性, 其中土壤湿度可维持一个半月以上, 而土壤层温度与同一地区或邻近地区后期降水也有显著的统计正相关, 并且层次越深滞后时间越长。因此大多数模式都在垂直方向上对土壤进行分层。

土壤湿度(水汽)是陆面过程及气候模式中的一个重要而且非常敏感的物理量。模式中一般用土壤湿度百分比和土壤水分的深度(mm)来表示。PILPS 研究指出, 土壤湿度的初始值对模拟结果的影响较大, 因此土壤湿度的初值问题是一个非常关键的问题。模式中应用的土壤湿度初始值一般是应用计算得到的全球土壤湿度资料集, 但是不同的资料集之间在某些区域存在较大差异; 有些模式应用有限的观测资料, 但是由于土壤湿度的观测较少, 并且有的地区观测的深度和规则也有差别, 这也为模式的应用带来困难。我们认为解决这个问题的途径主要有两个: 一是利用已有的资料得到较好的全球性资料, 除利用地面观测资料外, 还可以利用卫星和遥感资料, 通过一定的算法得到较为合理、分布比较一致的土壤湿度初值; 二是改进模式中计算土壤湿度的方法, 尽量减少引入不确定的量。

表 3 陆面雪子模式总结<sup>[33]</sup>

	BASE	BATS	ECHAM	IAP94	ISBA	CAPS	SHAW	SSiB
最初使用时间	1995	1981	1991	1994	1995	1996	1987	1986
用处	BMRC 的 RCM	GCM, RCM	GCM, RCM	GCM	ARPEGE - GCM, NWF M	NWF M	了解雪过程、预报径流、评估雪灾	GCM, NWF M
层数	1 层	1 质量层, 2 热量层	1 层	3 层	—	1 层	将雪分层, 其厚度依赖与雪深	1 层
渗透	否	否	是	是	否	否	否	否

续表 3

	BASE	BATS	ECHAM	IA P94	ISBA	CAPS	SHAW	SSiB
吹雪	是	累积	否	否	否	否	否	否
次网格地形	否	不完全	否	否	不完全	否	否	否
考虑雪-植被相互作用	是	是	是	是	是	是	是	是
是否考虑冻土	显式诊断变量	是	是	是	—	否	是	否
是否用外场观测检验	是	是	是	是	—	是	是	是
是否有再冻结	是, 有选择性	是	间接地	是	否	否	热力特性变化	是
密度	改变	变化	诊断量	变化	变化	固定	变化	固定
热容/热传导率	选择性改变	变化	热容量固定, 传导率变化	变化	变化	固定	变化	固定
是否考虑水气的传输	否	否	是	是	否	否	是	否
积雪/土壤间的热传输	是	否	是	是	仅在独立试验中考虑	是	是	是
降水的热力对流	可以做(但不真实)	否	是	是	否	是	是	是

注: GCM—全球模式, RCM—区域气候模式, NWF M—数值天气预报模式。

至于土壤的分层, 大多数模式都将土壤分为一到几十层不等, 但大多数分为 3 层, 分别对应于土壤物理结构上的表层、根带和深层土壤, 如 BATS、SSiB 等。另外, 还有 4 层(如张晶等(1996)的 LPM-ZD)、6 层(Bonan(1996)的 LSM)、7 层(PLACE, SECHIBA2)、10 层(AVIM 和新版本的 BATS)。PILPS 研究已证明: 根带以下的土壤厚度对模拟结果的影响在天气和气候积分条件下不同, 这是否意味着针对不同的模拟需求, 分层方式也应当相应地改变? 陆面模式中的最佳土壤层问题至今仍无定论, 但一般认为: 靠近表面的土壤层应当细分, 因为那里受地面-大气界面的影响较大, 而越往深层, 土壤层的厚度可以加大。

(3) 水文过程的模拟 土壤水汽、径流和排水、植被蒸腾、冠层上的水分贮存与蒸发等过程都是陆面模式要考虑的水文过程, PILPS 结果表明不同陆面模式对它们的模拟结果差异较大。其中一个原因是模式考虑的径流和排水过于简单, 因为径流可以发生在土壤不同深度<sup>[34]</sup>, 而大多数模式只考虑其中的一层或某几层上的径流(见图 1), 因此这可能是陆面模式中考虑最少的部分。因为这些量的观测资料不多, 所以模拟结果与观测的比较也很

困难. 现在国际上进行了一些与水文过程相关的试验计划<sup>[35]</sup>(如 GSWP、GCIP 等), 相信随着这些计划的研究发展, 陆面模式对水文过程的模拟水平将会有所提高.

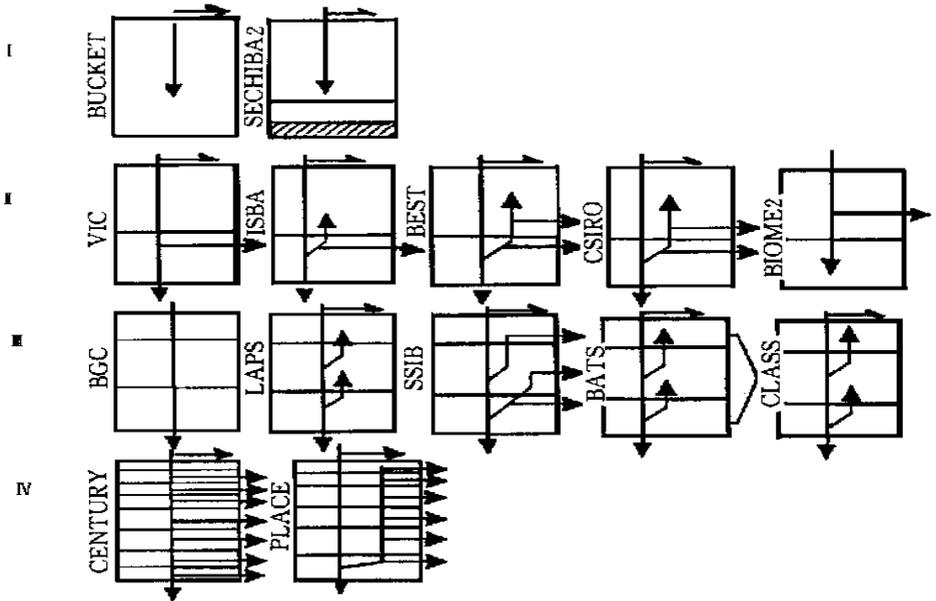


图1 参与 PILPS 第 2(b) 阶段陆面模式的径流和排水概念示意图  
(其中 I 组为一层土壤, II 为两层土壤, III 为三层土壤, IV 为多层土壤, 引自文献<sup>[15]</sup>)

## 5 总 结

近 20 年来, 陆面过程的模拟研究取得很大进展, 陆面模式从最初的简单“吊桶”模式, 到考虑植被生理过程的土壤-植被-大气传输模式, 直到考虑碳循环的复杂陆面模式, 已逐步完善起来, 模拟效果也不断改进. 国际间在外场观测试验、方案比较(PILPS 计划)等方面进行的一系列合作研究, 为陆面模式的改进和发展起着重要作用. 尽管模式在求解土壤温度和湿度、植被的水分和能量收支等方面都有许多进展, 但是在雪盖、水文过程、模式结构等方面仍存在一些不确定性. 陆面过程本身就很复杂, 再受到资料条件的限制, 因此我们对其客观规律的认识还不完全, 这无疑也增加了模式研究的难度. 所以, 今后陆面过程模拟研究的重点大体来说应集中于如下几个方面: 一是利用逐步完善的、高质量的实测资料进行诊断分析研究, 加深对陆面过程的认识; 二是利用先进的计算条件, 进一步比较不同的陆面方案, 保留其中较好的计算方法, 逐步改正不足之处, 并加入较为真实的物理、化学与生物内容, 使之能够更好地用于气候模拟和天气预报; 另外, 在资料不完善的情况下, 可以发展一些较好的计算方法, 尽量减少模式误差.

致谢: 感谢美国 Arizona 大学的杨宗良博士同意引用积雪模式的比较结果, 并对积雪和土壤过程进行了深入讨论, Maryland 大学薛永康博士提供 SSIB 模式并对陆面模式中的一些问题进行有益的讨论, 丁一汇教授对文章进行认真修改, 这里一并表示衷心的感谢.

## 参 考 文 献

- 1 Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. A model study of the short-term climatic and hydrologic effects of sudden snow-cover removal. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **11**: 1013~ 1024.
- 2 Shuttleworth W J. Macrohydrology—The new challenge for process hydrology. *J. Hydro.*, 1988, **100**: 31~ 56.
- 3 薛永康, 曾凡荣, Schlosser A C, Allen S J. 一个植被模式的检验和它在陆气相互作用中的应用. *大气科学*, 1998, **22**: 575~ 586.
- 4 Dickinson R E, Henderson-Sellers A and Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR/TN-387+ STR, Boulder(Colorado) 1993. 72.
- 5 Dickinson R E, Henderson-Sellers A and Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. NCAR/TN-275+ STR. Boulder(Colorado): NCAR, 1986. 69.
- 6 Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SiB) for use with in general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 505~ 531
- 7 Bonan G B. A Land Surface Model (LSM Version 1.0) for Ecological, Hydrological and Atmospheric Studies: Technical Description and User's Guide. NCAR Technical Note/TN-417+ STR, Boulder(Colorado): NCAR, 1996. 150.
- 8 Xue Y, Sellers P J, Kinter J L, et al. A simplified biosphere model for global studies. *J. Climate*, 1991, **4**: 345~ 364.
- 9 付培健, 王世红, 林有恒. 大气环流模式中地面参数化的发展. *地球科学进展*, 1999, **14**: 45~ 50.
- 10 Henderson-Sellers A, Yang Z L, Dickinson R E. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, **74**: 133~ 1349.
- 11 Henderson-Sellers A, Pitman A J, Love P K, et al. The project for intercomparison of landsurface parameterization schemes (PILPS): Phases 2 & 3. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1995, **76**: 489~ 503.
- 12 Yang Z L, Dickinson R E. Preliminary study of spin-up processes in land surface models with the first stage data of project for intercomparison of land surface parameterization schemes phase 1(a). *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 16 553~ 16 578.
- 13 Henderson-Sellers A, McGuffie K, Pitman A J. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS): 1992 to 1995. *Climate. Dyn.*, 1996, **12**: 849~ 859.
- 14 Beljaars A C M, Bosveld F C. Cabauw data for the validation of land surface parameterization schemes. *J. Climate*, 1997, **10**: 1172~ 1193.
- 15 Chen T C, Henderson-Sellers A, Milly P C D, et al. Cabauw experimental results from the project for intercomparison of land-surface parameterization scheme. *J. Climate*, 1997, **10**: 1194~ 1215.
- 16 Shao Y, Henderson-Sellers A. Validation of soil moisture simulation in landsurface parameterization schemes with HAPEX data. *Global and Planetary Change (Special Issue)*, 1996, **13**: 11~ 46.
- 17 Shao Y, Henderson-Sellers. Modeling soil moisture: A project for intercomparison of land surface parameterization schemes phase 2(b). *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 7227~ 7250.
- 18 Yang Z L, Niu G Y, Dickinson R E. Comparing snow simulations from NCAR LSM and BATS using PILPS 2d Data. Preprint, 14th Conference on Hydrology, A. M. S., Dallas, Texas, 1999. 316~ 317.
- 19 Hopkins L C, Henderson-Sellers A. PILPS phase 4b: The impact of coupled land-surface parameterization schemes to a regional model. Preprint, 14th Conference on Hydrology, A. M. S., Dallas, Texas, 1999. 328~ 329.
- 20 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验(HEIFE)的一些研究成果(代黑河实验专刊(4)前言). *高原气象*, 1994, **13**: 225~ 236.
- 21 汤懋苍, 郑光. 黑河实验区的自然地理状况及气候背景. *高原气象*, 1994, **13**: 237~ 245.
- 22 沈志宝, 邹基玲. 黑河地区沙漠和绿洲的地面辐射能收支. *高原气象*, 1994, **13**: 314~ 322.

- 23 张立盛, 钱正安, 陈伯民. 黑河地区地面阻曳系数的估算及其影响的数值实验. 高原气象, 1994, 13: 257~ 264.
- 24 孙菽芬, 金继明. 陆面过程研究中的几个问题. 应用气象学报, 1997, 8(增刊): 50~ 57.
- 25 林朝晖. 气候模式中的反馈机制及模式改进的研究[ 博士论文 ]. 北京: 中国科学院大气物理研究所. 1995. 224.
- 26 戴永久. 陆面过程模式及其与 GCM 耦合模拟研究[ 博士论文 ]. 北京: 中国科学院大气物理研究所. 1995. 287.
- 27 张晶, 丁一汇. 一个改进的陆面过程模式及其模拟试验研究第一部分: 陆面过程模式及其“独立(off-line)”模拟试验和模式性能分析. 气象学报, 1998, 56: 1~ 19.
- 28 丁一汇, 张晶, 赵宗慈. 一个改进的陆面过程模式及其模拟试验研究第二部分: 陆面过程模式与区域气候模式的耦合模拟试验. 气象学报, 1998, 56: 385~ 400.
- 29 Jordan R. A One-Dimensional Temperature Model for a Snow Cover Technical Documentation for SN THERM. 89. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, U. S. Army Corps of Engineers, Special Report 91-16, 1991. 49.
- 30 Loth B and Graf J F. Modeling the snow cover in climate studies 1: Long-term integrations under different climatic conditions using a multilayered snow-cover model. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103: 11 313~ 11 327.
- 31 Loth B, Graf J F. Modeling the snow cover in climate studies 2: The sensitivity to internal snow parameters and interface processes. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103: 11 329~ 11 340.
- 32 Marc L S. The development and validation of a simple snow model for the GISS GCM. *J. Climate.*, 1994, 7: 1842~ 1855.
- 33 Yang Z L. Description of recent snow models. In: E. Martin and R. Armstrong, ed. International Committee on Snow and Ice, 2000(accepted).
- 34 黄洪峰. 土壤、植物、大气相互作用原理及模拟研究. 北京: 气象出版社, 1997. 309.
- 35 Oki T, Musiak K. Global validation of land surface models by runoff dataset using total runoff integrating pathways (TRIP). Third International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle (Preprint Volume). Beijing, 1999. 560.

## RESEARCH ON LAND-SURFACE PROCESS MODELING—A REVIEW

Shi Xueli

(National Climate Center, Beijing 100081)

### Abstract

The recent status of land-surface process modeling in China and abroad is briefly summarized. Some international cooperative projects and experimental products are introduced and reviewed. Finally, problems and possible solutions in land-surface process modeling are presented.

**Key words:** Land-surface process    Parameterization scheme    PILPS project    Snow cover    Soil level