

文章编号:1006 - 7639(2003) - 03 - 0083 - 07

陆面过程观测试验研究进展

杨兴国^{1,2}, 牛生杰¹, 郑有飞¹

(1. 南京气象学院, 南京 210044; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘要:概述了国内外自 20 世纪 80 年代以来实施的 FIFE、LBA、HEIFE、IMGRASS、TIPEX 及 GAME-Tibet 等具有代表性的陆面过程试验的科学目的和所取得的主要科研成果。提出了陆面过程试验存在的局限性及在今后应该加强的方面。

关键词:陆面过程; 观测试验; 进展

中图分类号: P404

文献标识码: A

引言

陆面过程是指发生在控制地表面与大气之间水分、热量和动量交换的过程, 包括地面上的热力过程、水文过程和生物过程, 地表面与大气间的能量和物质交换以及地面以下土壤中的热传导和水热输送过程等。其时间尺度可以从 0.1s 到几年, 空间尺度可以从厘米到全球。陆面过程研究始于 20 世纪 60 年代, 主要以 GCM 敏感性实验为标志。伴随着陆面过程研究的深入, 其现场观测试验研究也逐渐得到重视和发展。从 20 世纪 80 年代开始, 随着 GEWEX、IGBP、LUCC 等一些大型国际核心研究计划的实施为标志, 全球在具有代表性的主要气候或生态区相继进行了总数超过 50 个的一系列陆面过程试验研究, 其中有代表性的是 FIFE、LBA、HAPEX/MOBILMY、EFEDA、BOREAS、NOPEX、GAME 等计划, 我国在同期也相继开展了以 HEIFE 和 TIPEX 为代表的多个试验研究。试验项目的实施把气候的基础理论研究提高到一个新的层次, 大气科学的研究也转向从气圈、水圈、生物圈、冰雪圈和岩石圈的相互作用来理解全球气候的变化, 同时也进一步认识到占地球表面积 30% 的陆地在全球气候系统中所起的作用。由于陆面构成的复杂性和不均匀性, 致使该领域的研究成为地球气候系统科学领域内最困难的一种挑战, 也是国际上竞相研究的前沿学科之一^[1~2]。

1 以 FIFE 和 LBA 等为代表的国外试验

陆面过程观测试验研究的核心内容是进行野外科学试验, 以揭示其内在的物理特性, 并在此基础上发展较为准确描述地气相互作用的陆面过程模式和参数化方案, 同时监测和分析天气气候变化。上世纪 80 年代开始随着对陆面过程在全球气候系统中所起作用认识的加深, 激发了一系列综合陆面过程试验的实施(见表 1)。试验区域几乎遍布全球各大

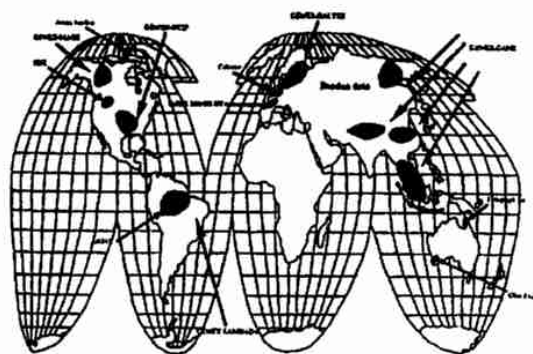


图 1 全球陆气相互作用观测试验地域分布
Fig. 1 Distribution of land - surface process field experiments on the world

收稿日期: 2003 - 07 - 23; 改回日期: 2003 - 09 - 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40205005)资助。

作者简介: 杨兴国(1967 -), 男, 甘肃民乐人, 副研, 硕士, 主要从事干旱气象观测试验研究。Email: yangxg@gsm.a.gov.cn

洲(图 1),本文主要介绍以 FIFE 和 LBA 为代表的部分试验项目。

1.1 FIFE 和 LBA 概述

作为国际上第一批实施的陆面过程试验项目之一,“第一次国际卫星陆面气候计划试验”(FIFE)无论在陆面过程研究方法方面,还是陆面过程机理方面均有其特殊地位和意义;该项试验是由美国航空航天局于 1987~1989 年在堪萨斯洲中部(39°N,96°W)面积为 15 × 15 km² 的牧场上进行的一项综合性陆面过程试验,也是国际上早期开展的最具代表性的陆面过程试验。主要研究目的是了解陆面和大气之间辐射、水汽和 CO₂ 交换的生物物理过程,发展和测试在一个像素标准上用遥感监测这些过程的方法等。在 1987 年和 1989 年分别进行的为期 57d 和 20d 的野外观测试验中获取了 1987~1989 年 3a 的 AVHRR、Landsat、SPOT 和 GOES 卫星资料,16 个自动气象站资料;同时进行了土壤湿度、径流、生物测定以及大气光学特性等观测;此外,还采用飞行器携带各种扫描仪、辐射表、散射表等对近红外、可见

光及高频电磁波范围内的辐射进行了观测,同时还测量了热量、水汽、动量和 CO₂ 通量。取得了边界层通量、垂直大气廓线、植被的组成和生物特性、试验点水文特性、大气光学特性、土壤湿度及土壤性质、地表面通量及辐射等资料。

“亚马逊流域大尺度生物-大气圈试验”(LBA)是由巴西发起的国际研究计划,旨在通过试验揭示亚马逊流域气候、生态、生物地球化学和水文等因子的特性、土地利用变化对上述要素的影响以及亚马逊流域与地球系统的相互作用;其研究内容分物理气候、碳循环、生物地球化学、大气化学、水文、土地覆盖和利用等专题;试验区域位于巴西亚马逊河流域 2 000 × 2 000 km² 范围内,下垫面主要包括原始森林、退化森林及草地等,试验时间 1996~2003 年;试验项目包括风场和云的探测,痕量气体、气溶胶、温室气体等的监测及地气之间物质和能量交换的观测等。与 FIFE 相比,LBA 无论是研究区域,还是研究内容都比前者丰富,而且下垫面也更加复杂。

表 1 国外主要陆面过程试验

Table 1 The main land surface process experiments

试验名称	实施时间	试验地区 尺度(km ²)	主要研究目标
BAL TEX	预试验 1994~1996 年, 加强观测 1997~2000 年	波罗的海流域 2 × 10 ⁶	水热与环境相互影响、资料同化、卫星资料应用、数值模拟实验等。
BOREAS	1993~1996 年	加拿大北部森林 1 000 × 1 000	生物气象,遥感资料在模式中的应用。
EFEDA	1991~1995 年	西班牙东南部 85 × 130	人类活动影响,生物气象,遥感
FIFE	首次试验 1987~1989 年 附加试验 1990~1993 年	美国 Kansas 15 × 15	水碳循环,遥感。
GAME - Siberia GAME - Tibet, GAME - HUBEX GAME - Tropics	1996 年开始 野外试验 1998 年	西伯利亚,青藏高原, 淮河流域,南海	亚洲季风在全球能量和水分循环中的作用。
GAPP	1995 年开始	美国密西西比河谷,美国 中部及加拿大南部	大陆水热时空变化、大尺度水文模式和高分辨率大气模式、卫星资料应用。
HAPEX - MOBILHY	1986 年	法国西南部 100 × 100	水热交换,遥感,水文和陆面过程模式。
HAPEX - Sahel	1991~1993 年 野外试验 1992 年	尼日尔西部 100 × 100	生物气象,遥感。
LBA	1996~2003 年	巴西亚马逊河流域 2 000 × 2 000	水热循环、生物地球化学、大气化学、土地覆盖、遥感应用。
MAGS	第一阶段 1996~2000 年 第二阶段 2000~2005 年	加拿大北部 1.8 × 10 ⁶	寒带水热循环、大气和水文模式耦合、遥感应用。
MDB		澳大利亚墨累河盆地 1 × 10 ⁶	水分收支监测、土壤湿度模拟、陆面过程在天气气候模式中的作用。
NOPEX	第一阶段 1993~1997 年 第二阶段 2000~2002 年	瑞典斯堪的纳维亚 50 × 100	提高水热碳的参数化方案,遥感资料应用。

1.2 试验结果

1.2.1 FIFE 试验

地表能量平衡监测结果表明,潜热(L_E)占净辐射(R_n)比例的年变化范围为 0.22~0.83R_n,在牧草生长旺盛期,潜热最大可达 460w/m²(0.83R_n),当土壤水分供应不足时,减小到 210w/m²(0.

45R_n),在牧草衰落以后,减小到最小值 98w/m²(0.22R_n)。其值与加拿大草原的结果(0.5 R_n)基本相一致,小于下垫面是冬小麦、大麦及大豆等农作物的潜热消耗(0.7~0.9R_n);土壤热通量(G)的变化范围为 0.27~0.39R_n,感热(H)为 0.1~0.78R_n^[31]。

此外,应用陆气交换和大气边界层模式进一步

认识了观测结果的动力学特性。利用试验结果验证了能模拟水分和能量空间变化的土壤-植被-大气传输方案,发展和改进了欧洲中心中尺度天气预报模式(ECMWF)的陆面过程参数化方案;在用遥感资料确定地表能量收支、土壤湿度和植被参数、地气通量及大气特性等方面取得了突破性进展^[4~6]。

1.2.2 LBA 试验

用涡度相关法和微气象法得到的各能量项表明,无论是湿季还是干季,净辐射主要消耗于潜热,日总量达到 $6.6 \pm 1.8 \text{ MJ/m}^2$;森林(28~30m)与林草过渡带的潜热占净辐射的(50%~90%),在干季、干湿转换季和湿季,潜热平均日总量分别为 6.0 MJ/m^2 、 7.5 和 13.0 MJ/m^2 ;干季林草过渡带的最大潜热为 260 w/m^2 ,介于雨林区(最大潜热 400 w/m^2)和热带稀疏草原区(最大潜热 150 w/m^2),在湿季三个不同下垫面基本相同,最大潜热 $300 \sim 400 \text{ w/m}^2$;感热日总量为 $3.8 \pm 1.7 \text{ MJ/m}^2$;在湿季,森林和草地的土壤热通量分别是 10 w/m^2 和 50 w/m^2 ,而在干季,分别为 20 w/m^2 和 120 w/m^2 。对太阳辐射的研究发现由于“云附加效应”,使有云遮盖的地面反而比无云遮挡的地面接受到更多的太阳辐射^[7]。

大气化学研究小组的结果显示,人类活动使亚马逊流域及周边地区的气溶胶和云凝结核密度增加。连续观测表明在湿季,气溶胶浓度基本维持在 $10 \sim 20 \text{ ug/m}^3$ 左右($300 \sim 500$ 个/CC),主要由自然生物粒子和尘土组成;在干季,由于生物量的燃烧,使其浓度增加到 400 ug/m^3 ($13\ 000$ 个/CC),其光学厚度在夏季为 $0.05 \sim 0.15$,而在干季能达到 $3 \sim 4$ 。对降雨形成机制的研究表明,在湿季植被是云凝结核的主要来源,有 $30\% \sim 60\%$ 的气溶胶粒子能成为云凝结核;而在干季,由于生物量燃烧导致气溶胶密度远高于大气中云凝结核密度,由此影响了该流域云的形成和降雨。对碳通量的观测表明,无论是热带还是温带森林生态系统都具有吸收 CO_2 的能力,亚马逊流域生态系统是碳汇。由于飚线引起的下沉气流可以将对流中层臭氧带到地面,引起地面臭氧浓度增加。

模式的发展和验证也是 LBA 的重要内容。以考虑了陆面生物物理过程、生态系统生理机能和碳平衡过程、植被生物气候、植物长势和植被动力学、营养物循环和土壤生物地球化学等因素在内的生态模式 IBIS 和包含水从陆面流向海洋及存储在湖泊和湿地等动态过程的高分辨率(10 km 格点)水文模式 HYDRA 为基础,发展了一个耦合模式系统,该系

统可以更好地模拟由于环境条件改变和人类活动对亚马逊流域水资源的影响。用在森林和草地下垫面观测到的地气之间水汽、能量和碳通量结果验证了 SiB2 模拟的结果,两者比较一致,同时还将 SiB2 与中尺度模式 CSU-RAMS 耦合,模拟了 CO_2 的年演变趋势。用 NCEP 区域模式 Eta 与生物模式 SSiB 耦合,模拟了年内不同时期的降雨及降雨的年内变化,(Eta/SSiB)模式能再现降雨的月变化、蒸发和表面温度。结果表明 Eta/SSiB 模式可以用于气候研究。此外,通过在单点和用 GOES 卫星获取的资料验证了碳通量模式模拟的结果。

此外,HAPEX/MOBIUMY 取得了湿润地区陆面过程特征,并在大、中、小三种尺度关系方面有进展;EFEDA 计划的完成对欧洲半干旱地区陆面过程特征有了新的认识;为期 4a 的 BOREAS 计划对加拿大北部森林与大气之间的相互影响及气候变化对其影响进行了深入的研究;在 GEWEX 计划协调下的 GAPP、BALTEX、GAME、LBA、MAGS、MDB 等项目几乎遍布在全球各地,代表了各类气候类型区不同下垫面状况,研究内容囊括了陆面过程所有研究内容,野外观测试验动用了国际上最先进的探测工具,取得了一批可喜的科研成果。在北半球高纬度森林区开展的 NOPEX 计划更强调了观测试验的连续性,同时在使用遥感资料在区域尺度上估算 CO_2 通量和热量通量、用卫星资料和辅助资料估算森林生物量等方面亦有大量研究成果。与此同时,伴随着观测试验的实施,陆面过程模式也得到了进一步发展^[8]。

2 我国陆面过程试验

我国在陆面过程试验和地气相互作用研究方面几乎与世界同步。比较经典的试验首推 20 世纪 80 年代末实施的“黑河地区地气相互作用野外观测实验研究”(HEIFE),由此拉开了我国陆面过程外场试验的序幕,其后又相继进行了“亚洲季风试验-青藏高原试验”(GAME-Tibet)、“亚洲季风试验-淮河试验”(GAME-HUBEX)、“第二次青藏高原科学试验”(TIPEX)、“内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用”(IMGRASS)、“我国西北干旱区陆气相互作用野外观测试验(敦煌试验)”(DLSPE)等项目。

2.1 试验概述

国内观测试验除 GAME-HUBEX 在东亚副热带半湿润地区实施以外,主要集中在我国北方干旱

半干旱及青藏高原地区。下垫面类型包括戈壁、绿洲、天然草原及青藏高原的湿润河谷、半干旱过渡带和高寒荒漠等。比较有代表性的试验有 HEIFE、TIPEX、GAME - Tibet 及 IMGRASS 等。HEIFE 试验是继 HAPEX/MOBILHY 和 FIFE 之后的国际第三个大型陆面过程试验研究项目,同时被列为 IGBP 的组成部分。试验区域位于甘肃省河西走廊黑河流域中段一个 $70 \times 90 \text{ km}^2$ 范围内,下垫面主要包括沙漠、戈壁和绿洲,旨在研究干旱气候形成和变化的陆面物理过程,为气候模式的中纬度干旱半干旱地带水分和能量收支的参数化方案提供观测依据,同时研究本地区作物需水规律和节水灌溉技术,为河西农业发展提供节水和合理用水方案。在不同下垫面上,设置了 5 个包括大气、植被和土壤的多学科综合观测站,5 个自动气象站,以及加密的水文站(雨量、地下水位等)。在野外观测期(1990 年~1992 年),收集到的资料包括加强观测期资料(湍流、系留气球、声雷达、激光雷达、土壤含水量等)、特殊观测期资料(生物气象观测、干旱地区降水机制观测、湍流对比观测和远离绿洲的沙漠补充观测等)及 NOAA/AVHRR、LANDSAT TM 和 ERS ATSR 等试验期的大量卫星遥感资料^[2,9]。

TIPEX 和中日合作项目 GAME - Tibet 是两个相互独立又密切配合的重大项目。是继 1979 年第一次综合性的“青藏高原气象科学实验(QXP-MEX)”以后的又一次高原大型综合性科学计划。其重点科学目标是在有代表性的地点开展大气边界层特殊观测,以增进对青藏高原地气相互作用的定量理解;通过卫星遥感资料的同步收集,改进反演算法,使卫星遥感资料能应用于高原及周边地区的气象资料同化方案中;发展陆面过程模式与方法,并用于更大的空间尺度。其观测系统包括常规观测系统、大气边界层观测系统和卫星资料收集系统。试验区东起四川西部的甘孜,西至阿里地区的狮泉河,北起青海的五道梁,南到定日($80^\circ \sim 100^\circ \text{ E}$, $28^\circ \sim 35^\circ \text{ N}$);加密观测及特殊观测的站点基本上沿东西向和北东北-南西南方向呈十字形排列,分别在代表湿润河谷、半干旱过渡带和高寒荒漠三个不同下垫面建立了边界层综合观测基地。在长达 120d(1998 年 5~8 月)的加密观测中投入了风廓线仪,6~7 层(20 m)梯度观测塔、波文比系统,超声风速仪、脉动温湿仪、红外辐射温度计、多普勒声雷达、系留气艇、低空探空仪、光学雨量计以及各种辐射(短波、长波、直

接、散射)仪等国际比较先进的探测设备,成功地获取了大量宝贵的大气边界层资料和探空、地面及辐射资料,为促进青藏高原对东亚地区的天气影响研究提供了优良的气象数据^[2,10,11]。

IMGRASS 是在温带半干旱草原地区开展的一项属于 BAHC 框架内的中尺度综合性研究项目。旨在通过开展野外综合试验,并结合有关草原生态-气候参数的长期监测,发展卫星遥感陆气相互作用有关参数的原理和方法,用以支持模式的发展、应用和验证;定量了解中纬度半干旱草原土壤、植被、大气相互作用的中、小尺度特征,发展和检验一维的 SVAT(土壤植被大气输送)模式及典型的局地陆面过程参数化方案;分析草原温室气体、碳氮循环及其源汇特征,加深理解半干旱草原生态对气候变化与人类活动的响应及其在全球变化中的作用;同时为半干旱草原地区农牧业的持续发展和环境保护对策提供科学依据。试验区位于内蒙东部锡林郭勒草原锡林河流域,范围约 $100 \times 150 \text{ km}^2$ ($43^\circ 26' \sim 44^\circ 39' \text{ N}$, $115^\circ 32' \sim 117^\circ 12' \text{ E}$),其下垫面主要是草甸草原和退化(荒漠)草原。在试验区设有 4 个边界层综合测量点和自动气象站,3 个探空点,25 个自记雨量点和一部测雨雷达。在综合观测期(1998 年 5 月~9 月)进行了包括土壤要素(土壤理化特性、土壤温度及水分、土壤微生物等)、植被要素(盖度、群落结构、生物量等)和大气要素(近地层平均场、湍流通量、边界层结构等)的综合观测;考虑到沙地草原地貌和生态的不均一性,还在试验期采用无人飞机对大气边界层结构进行了观测,收集了综合试验期 NOAA/AVHRR 资料及 Landsat TM 等卫星资料。与 HEIFE、TIPEX 和 GAME - Tibet 相比,IMGRASS 更强调了生态方面的观测^[2,12]。

2.2 主要研究进展

以 HEIFE、TIPEX、GAME - Tibet 及 IMGRASS 等为典型的一系列陆面过程试验的实施,使对不同气候区和不同下垫面的地表能量平衡和传输、各类参数的获得、卫星遥感资料的应用及陆面过程模式的验证和发展等方面均取得了实质性进展。

HEIFE 首次揭示了干旱地区陆面过程的基本特征和物理机理。观测结果表明,沙漠和戈壁的净辐射主要消耗于感热和土壤热通量,其值分别为 60%和 30%~40%,而潜热只占 0%~10%,各分量占净辐射比例的趋势与在极端干旱的敦煌(年平均降雨量 50mm)戈壁和地处半干旱地区的内蒙古流

动沙丘下垫面的结果相一致,但在数值上稍有差别,敦煌戈壁感热、土壤热通量和潜热分别占净辐射的 85.7%、9.6% 和 3.8%,而在内蒙古流动沙丘则分别为 42.5%、25% 和 12.5%;相反在绿洲内感热、土壤热通量和潜热分别是净辐射的 14%、28% 和 58%;根据在临近绿洲沙漠中观测到的逆湿现象(沙漠效应)和绿洲中得到的逆位温现象(绿洲效应),提出了绿洲与沙漠环境相互作用的新模型:“绿洲效应”造成的稳定层结可以抑制绿洲内水分的蒸发和蒸散,形成有利于植物生长的绿洲小气候,而“沙漠效应”使微量水汽输送到干热的沙漠,又有利于临近绿洲沙漠边缘地带的沙生植物生长,从而形成绿洲与干热沙漠间的缓冲带,这种良性的正反馈,维持了绿洲生态系统^[2,9,13,14]。

而 TIPEX 和 GAME - Tibet 的观测揭示出高原上存在较强的太阳辐射,总辐射经常超过太阳常数,分析认为造成这一现象的原因是云的散射辐射所致,该结果与 LBA 的研究结果相一致;但 5~8 月

平均净辐射仅为 61~120 w/m²;在干季高原感热占主导地位,最大值为 150~300w/m²,潜热通量(50~60w/m²)远小于感热通量,湿季感热通量与潜热通量相当,最大值维持在 150~200w/m² 之间;在干季和湿季土壤热通量只占净辐射的 6.1% 和 3.5%;此外,感热、潜热和土壤热通量与净辐射不平衡,存在明显的差值,这一现象在内蒙古草原和流动沙丘、国外的森林及农田下垫面等近地层观测中也存在,具体原因尚在探讨中;高原存在深厚的热力混合层,在低层有较强的中小尺度湍流和强对流活动,边界层内还存在明显逆湿现象^[11,15,16]。

根据观测资料用不同方法计算总体输送系数 CD、CH 及地面反照率和粗糙度等地表参数也是陆面过程试验的主要内容,表 2 中列出了近 20a 来国内在不同下垫面开展试验所获取的参数值。大量研究表明地面阻曳系数 C_D 和感热通量整体输送系数 C_H 随着地表粗糙度和近地层空气稳定度而变化,在沙漠戈壁、草地等不同下垫面均有明显的差值^[9,11,16~25]。

表 2 不同下垫面地表参数一览表

Table 2 The surface parameters of underlying surface

试验名称 (下垫面)	C _D (* 10 ⁻³)	C _H (* 10 ⁻³)	地表 反照率	粗糙度(* 10 ⁻³ m)
HEIFE 沙漠	1.6 (中性)	1.6(中性)	0.25~0.26	4.5
HEIFE 戈壁	2.2(中性)	2.2(中性)	0.25~0.26	1.2
HEIFE 绿洲			0.15	
那曲 (草甸)	3.12~2.23 (稳定) 3.60~2.36 (不稳定)	3.12~2.23 (稳定) 3.60~2.36 (不稳定)		2.78 (春季), 3.21(夏季), 3.31(秋季), 2.58(冬季)
改则 (稀疏草地)	1.05 (稳定), 3.0 (不稳定), 2.31(中性), 2.32(平均)	1.59 (稳定), 4.0 (不稳定), 2.15(中性), 3.01(平均)	0.31	2.6(夏季)
TIPEX 当雄	1.8(中性)	1.5(中性)		2.2(夏季)
GAME 昌都	4.4(中性)	4.7(中性)		1.4(夏季)
- Tibet 狮泉河	3.9 (稳定), 5.03 (不稳定), 4. 65(中性)	5.15 (稳定), 6.88 (不稳定), 6. 27(中性)		
拉萨	4.43(平均)	5.90(平均)		3.02(春季), 7.11(夏季), 4.67(秋季), 1.10(冬季)
日喀则	3.53(平均)	4.67(平均)		2.22(春季), 4.23(夏季), 2.44(秋季), 2.00(冬季)
林芝	4.07(平均)	5.51(平均)		1.80(春季), 2.57(夏季), 1.69(秋季), 1.12(冬季)
DLSPFE 戈壁	2.50 ±1.87	2.23 ±1.12	0.255	1.9 ±0.71

地面观测只得到点上的结果,由于下垫面的不均匀性和复杂性,将点上的结果应用到面上往往会造成不可避免的误差。由于卫星资料具有获取资料范围广、图像直观等特点,因此用卫星遥感结合地面观测资料估算区域内的陆面过程参数成为解决这一问题的的重要途径。经过近 10 多年的发展,用 NOAA 卫星 AVHRR 资料, LANDSAT TM 资料与地面观测的“真值”相接合估算地表动量粗糙度、地表特征参数(地表反照率、地表温度)、植被参数(NDVI、植

被覆盖、叶面积指数)及地表能量通量(净辐射、土壤热通量、感热、潜热)等方面取得了较大进展,提出了基于卫星遥感和地面观测相结合的参数化方案,并在 HEIFE 和 DLSPFE 试验区得到了应用^[26~29]。

大量陆面过程试验获得的资料为发展、改进和验证陆面过程模式起到了积极的推动作用,促进了我国地气相互作用的数值模拟研究。殷达中等在法国陆面过程模式的基础上,在植被覆盖部分引入了遮盖因子,并将其与 MM5 耦合模拟了内蒙古半干

旱草原中尺度区域的气象场,模拟结果和 IM-GRASS 预观测结果基本相符;牛国跃等在改进 SiB 系统主要过程的参化后,模拟了黑河实验区各种能量交换过程;张强等用发展的二维中尺度土壤-植被-大气连续体数值模式模拟了黑河流域绿洲及其临近荒漠大气的湿度廓线结构,再显了荒漠大气的逆湿,初步解释了荒漠大气逆湿形成的物理过程和机制;曹晓彦等利用 DLSPFE 获得的西北干旱区荒漠戈壁的陆面过程参数改进了已有的陆面过程模式,用改进模式模拟的荒漠戈壁大气感热和潜热通量、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与观测值非常接近^[30~33]。

3 小结

综上所述,陆面过程外场试验的共同特点是采用各种探测手段,选取具有代表性的下垫面或生态区,开展不同时空尺度的观测试验研究,全面理解各主要地表类型的陆气相互作用特征,揭示在不同尺度下对天气气候的影响,发展和改进具有代表性的地理、生物和气候区域的陆面过程及参数化方案与精度,从而为不同尺度的大气模式提供服务;同时通过“空基”和“陆基”方法,利用地面观测的真值和遥感资料相结合,发展和检验用遥感资料提取地表有关参数。经过 20 多年的发展,无论是探测手段提高、观测内容充实和资料积累等方面,还是研究方法方面均取得了令人瞩目的成绩,对推动地球科学的发展起到了积极的作用。

但同时也应该看到,随着全球气候系统概念和地球系统科学的提出,大气科学的研究已从气圈、水圈、生物圈、冰雪圈和岩石圈的相互作用来理解全球气候的变化。陆面过程模式与 GCM 模式相耦合进行的敏感性试验表明,气候对不同的陆地下垫面特性十分敏感,而许多试验在空间尺度、时间尺度及观测内容等方面尚存在一定的局限性。由于下垫面的非均匀性和复杂性,使陆面与大气之间能量、水分及 CO₂ 等交换过程非常复杂,不仅随下垫面不同而变化,还随时间和空间而变化,因此,至今尚没有很好的理论去解决由点到面的三通量集合问题,已有的卫星遥感结合地面观测获取通量值的方案仍有许多方面依赖于经验;分布范围较广的冻土其内部物理过程十分复杂,但目前对它的水力学和热力学特征了解不多;植物的生物化学过程和下垫面的物理过

程密切相关,而这方面的研究也非常薄弱;雪盖是一个对气候具有重要影响的下垫面,尤其是青藏高原积雪对亚洲季风及气候异常有重要的影响,目前对此开展的试验几乎是空白。上述问题都将是今后陆面过程试验中应该重视和探索的主要问题。

参考文献:

- [1] 牛国跃,洪钟祥,孙淑芬. 陆面过程研究的现状与发展趋势[J]. 地球科学进展,1997,12(1):20-25.
- [2] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究—从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/ TIPEX[J]. 高原气象,1999,18(3):280-294.
- [3] Kim J, Verma S B. Components of surface energy balance in a temperate grassland ecosystem[J]. Boundary - Layer Meteorology,1990,51(4):401-417.
- [4] Viterbo P, Beljaars A C M. An improved land - surface parameterization scheme in the ecmwf model and its validation[J]. Journal of Climate,1995,8(11):2716-2748.
- [5] Peters - Lidard C D, Zion M S, Wood E F. A soil - vegetation - atmosphere transfer scheme for modeling spatially variable water and energy balance processes[J]. Journal of Geophysical Research,1997,102(D4):4303-4324.
- [6] Hall F G, Huemmrich K F, Goetz S J. Satellite remote - sensing of surface - energy balance - success, failures, and unresolved issues in FIFE[J]. Journal of Geophysical Research - Atmospheres,1992,97(D17):19061-19089.
- [7] George L Vourlitis, Nicolau Priante Filho. Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil[J]. Water Resources Research, 2002,38(10):10-29.
- [8] Halldin, Gryning S - E, Gottschalk L. Energy water and carbon exchange in a boreal forest landscape - NOPEX experience[J]. Agric For Meteorol,1999,98-99,5-29.
- [9] 胡隐樵,高由禧,王介民,等. 黑河实验(HEIFE)的一些研究成果[J]. 高原气象,1994,13(3):225-236.
- [10] 王介民,邱华盛. 中日合作亚洲季风实验—青藏高原实验(GAME-Tibet)[J]. 中国科学院院刊,2000,5:386-388.
- [11] 周明煜,徐祥德,卞林根,等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究[M]. 北京:气象出版社,2000.
- [12] 吕达仁,陈左忠,王庚辰,等. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用科学问题与实验计划概述[J]. 气候与环境,1997,2(3):100-209.
- [13] 张强,曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究[J]. 大气科学,2003,27(2):245-254.
- [14] 刘辉志,洪钟祥,张宏升,等. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面湍流输送特征初步研究[J]. 大气科学,2003,27(3):389-398.
- [15] 卞林根,陆龙骅,逮昌贵,等. 1998 年夏季青藏高原辐射平衡分量特征[J]. 大气科学,2001,25(5):577-588.
- [16] 徐祥德,周明煜,陈家宜,等. 青藏高原地—气过程动力、热力结构综合物理图象[J]. 中国科学(D 辑),2001,37(5):428-

- 441.
- [17] 苗曼倩,张雷鸣. 非正常天气海面通量特征[J]. 大气科学, 1990,14(4):464-473.
- [18] 张强,卫国安,黄荣辉. 西北干旱区荒漠戈壁动量和感热总体输送系数[J]. 中国科学(D辑),2001,31(9):783-792.
- [19] 马耀明,塚本修,吴晓鸣,等. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征[J]. 大气科学,2000,24(5):715-722.
- [20] 左洪超,胡隐樵. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数[J]. 高原气象,1992,11(4):371-379.
- [21] 熊康. 西太平洋热带海域湍流通量以及海面粗糙度 Z0 和曳力系数 CD 的观测研究[J]. 大气科学,1990,14(4):475-482.
- [22] 刘辉志,洪钟祥. 青藏高原改则地区近地层湍流特征[J]. 大气科学,2000,24(3):289-300.
- [23] 李家伦,洪钟祥,罗卫宗,等. 青藏高原改则地区近地层通量观测研究[J]. 大气科学,1999,23(2):142-151.
- [24] 李国平,段廷扬,巩远发. 青藏高原西部地区的总体输送系数和地面通量[J]. 科学通报,2000,45(8):865-869.
- [25] 李国平,赵邦杰,卢敬华. 青藏高原总体输送系数的特征[J]. 气象学报,2002,60(4):60-67.
- [26] 陈添宇,陈乾. 用 NOAA 卫星资料推算黑河地区地表特征参数[J]. 高原气象,1992,11(4):431-439.
- [27] 贾立,王介民. 卫星遥感结合地面资料对区域表面动量粗糙度的估算[J]. 大气科学,1999,23(5):632-640.
- [28] 马耀明,王介民. 结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量[J]. 气象学报,1999,57(2):180-190.
- [29] MA Yaoming, WANG Jiemin, HUANG Ronghui, et al. Remote Sensing Parameterization of Land Surface Heat Fluxes over Arid and Semi-arid Areas[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003,20(4):530-539.
- [30] 殷达中,陈家宜. 一个陆面过程参数化模式与 MM5 的耦合[J]. 大气科学,2000,24(2):177-186.
- [31] 牛国跃,王介民. 简易一维陆面过程的数值模拟[J]. 高原气象,1992,11(4):411-422.
- [32] 张强,赵鸣. 绿洲附近荒漠大气逆湿的外场观测和数值模拟[J]. 气象学报,1999,57(6):729-740.
- [33] 曹晓彦,张强. 西北干旱区荒漠戈壁陆面过程的数值模拟[J]. 气象学报,2003,61(2):219-225.
- BALTEX:波罗的海试验,http://www.gkss.de/baltex/baltex-frame-builder.html;
- BOREAS:北方生态系统—大气研究,http://blg.oce.orst.edu/boreas/;
- BAHC:水分循环中的生物圈作用计划;
- CCOS:中国气候观测系统;
- CLIVAR:气候变化与可预测性;
- EFEDA:荒漠化威胁区试验(欧洲共同体关于陆地—大气—植被系统中气候和水文之间相互影响项目),http://www.pik-potsdam.de/~bahc/links/lse.html;
- EOS:地球观测系统;
- FIFE:第一次国际卫星陆面气候学计划试验,http://www-eosdis.ornl.gov/FIFE/FIFE-Home.html;
- GAME-Siberia:亚洲季风试验—西伯利亚研究;GAME-Tibet:亚洲季风试验—青藏高原研究;
- GAME-HUBEX:亚洲季风试验—淮河流域研究;GAME-Tropics:亚洲季风试验—南海研究;http://www.ihas.nagoya-u.ac.jp/game/;
- GAPP:美国预报计划,http://www.ogp.noaa.gov/mpe/gapp/gapp/index.htm;
- GEWEX:全球水分和能量循环计划;
- GCOS:全球气候观测系统;
- HAPEX-MOBILHY:水文大气先行试验—法国试验,http://blg.oce.orst.edu/hapex/;
- HAPEX-Sahel:水文大气先行试验—尼日尔试验,http://blg.oce.orst.edu/hapex/;
- HEIFE:黑河地区地气相互作用野外观测实验研究;
- IGBP:国际地圈生物圈计划;
- IMGRASS:内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用;
- LBA:亚马逊河流域大尺度生物圈大气试验,http://lba.cptec.inpe.br/lba/index.html;
- LUCC:全球变化与陆地生态计划;
- MAGS:全球能量水分循环计划加拿大试验,http://www.usask.ca/geography/MAGS/index-e.htm;
- MDB:墨累河盆地水分收支项目,http://www.gewex.org/mdb.html;
- NOPEX:北半球气候变化过程陆面试验,http://www.hyd.uu.se/nopex/;
- TIPEX:第二次青藏高原科学实验;
- WCRP:世界气候研究计划;

缩写注解:

Advance in Land Surface Process Experimental Study

YANG Xing-guo^{1,2}, NIU Sheng-jie¹, ZHENG You-fei¹

(1. Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The science objectives and principal results of the representative land surface process experiments (LSPE) such as FIFE, LBA, HEIFE, IMGRASS, TIPEX and GAME-Tibet and so on, which have been carried out since 1980's, are introduced. Meanwhile, the weaknesses of LSPE are pointed out as well as what will be emphasized in the future.

Key words: land surface process; observational experiment; advance