

黑河实验(HEIFE)研究获重大成果^{*}

胡隐樵 左洪超

(兰州高原大气物理研究所 兰州 730000)

关键词 黑河流域, 陆面过程, 干旱地区, 沙漠化

当前人类面临着一系列重大而紧迫的全球环境问题,如温室效应与全球变暖,植被破坏与土地退化,淡水资源短缺等。全世界人类居住的陆地有 32% 为干旱和半干旱地区,我国的干旱和半干旱地区占国土面积的 44%。沙漠化的威胁,造成人类生存空间的萎缩,它已成为人类面临的全球性问题之一。面对全球环境问题,国际科学联合理事会(ICSC)于 1986 年组织了以全球变化为核心的国际地圈-生物圈计划(IGBP)。为了对 IGBP 的响应,并加强对大气环流的理解和增强气候的预测能力,1983 年以来,国际上分别组织了各类陆面过程观测研究计划,至今达 43 个之多,其中参加 WCRP/IGBP 的有 13 个。由于国际社会对沙漠化问题的关注,陆面过程观测研究中有 11 个是在干旱和半干旱地区进行的。

“中日合作黑河地区地-气相互作用野外观测实验研究”(HEIFE)简称“黑河实验”,是在我国著名气象学家叶笃正教授和日本著名气象学家山元龙三郎教授的创议下,基于中日两国科学家对全球气候变化研究必要性的共同认识,为了对世界气候研究计划(WCRP)作出贡献,两国科学家进行的一项合作研究。本项目被列入中日两国政府间文化交流协定。由于它在全球变化监测和研究中的意义和地位,一开始就受到国际科学界的关注,被列为 WCRP 关于水文大气先行性实验(HAPEX)的第三个较大的国际性实验项目,同时被列为“国际地圈-生物圈研究计划(IGBP)”的组成部分。

经过参加项目的中日科学家共同努力,该项目已经完成,并获重大成果。本文仅就主要研究结果作一简要介绍。

1 黑河实验概况

黑河实验区选择在河西走廊黑河流域中段一个 70×90 平方公里范围内,进行以水份和热量交换为中心的地气相互作用综合观测实验,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和半干旱地带水份和能量收支的参数化提供观测依据,以提高气候预报能力。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。

黑河实验野外观测从 1990 年 6 月正式开始,1992 年 10 月全部结束。实验期包括先行性观测实验(POP:1986 年 9 月);基本观测实验(FOP:1990 年 6 月至 1992 年 10 月);四次加强

^{*} 收稿日期:1996 年 6 月 13 日

观测实验(IOP:1991 年春、夏、秋、冬各 10 天左右),增加边界层和湍流等观测;以及补充观测实验,主要增补了生物气象观测(BOP:1992 年),远离绿洲的沙漠上的观测(IOP-DA)。

为了获取实验区内不同下垫面水热平衡的有关各项要素,为陆面物理过程的研究提供野外观测资料,在实验区内设置了气象和水文观测网,同时收集观测实验期间实验区内 3 个高空气象站和 3 个地面气象站以及 4 个水文站的常规气象和水文资料。观测网包括 5 个微气象基本站,这是本项目野外观测的基本场所,以及 5 个自动天气站。它们分布于不同下垫面,包括绿洲、戈壁、沙漠以及沙漠与绿洲交界区。

每个基本站包括一座微气象塔,观测风、温、湿梯度,向上和向下的短波与长波辐射,地热流量和地温,以及土壤含水量和 Lysimeter 直测蒸散量。在基本观测期(FOP)全部连续运转。而在部分加强观测期(IOP)内,各课题组根据需要在绿洲、戈壁和沙漠各基本站的不同下垫面增加风、温(超声风温仪)和水汽(红外湿度仪)的湍流脉动观测以及系留气球、多普勒声雷达和低空探空的边界层结构观测,以及大气气溶胶尺度谱,太阳直接光谱和华盖辐射计观测。水文站,包括实验区内 4 个水文基本站,12 个径流巡测站,18 个雨量站和多个地下水水井观测站,进行径流、降水、蒸发、地下水位等观测。此外还增加尘埃、臭氧等观测项目。作为黑河实验的应用研究,张掖站开展了需水量、需水规律和节水灌溉技术的田间试验。

2 微气象观测系统的研制

研究大气和陆地表面之间相互作用的物理过程,必须测量近地层中的气象要素。微气象观测的基本特点是,空间和时间采样密度大,并且在空间的采样同步性要求高,用人工观测不可能实现,因而为黑河实验研制了微气象自动观测系统。该系统设计采用了单板机采样,无线电传输数据,微机集中处理。整套观测系统由一个中心站和多个子站组成微气象自动观测网。每个子站对气象要素风、温、湿、辐射各分量、地温和地热流量等观测量进行自动连续采样,再进行 30 分钟平均之后以无线电传输到中心站,中心站的微机对传输数据进行收集和实时处理,处理结果以图的形式在屏幕上显示,同时将观测的数据打印出来。这样可在中心站及时监测各子站观测仪器的运行状况。

在黑河实验的 FOP 期间,利用该观测网取得了黑河实验区基本观测站绿洲、戈壁和沙漠等不同下垫面的微气象资料,为黑河实验理论研究奠定了物质基础。经分院组织的专家鉴定认为,该微气象观测系统设计合理,可靠性优良,为黑河实验提供了大量宝贵资料,为项目的开展作出了贡献。

3 数据库的建设

黑河实验历时 2 年零 4 个月,是目前国际上野外连续观测时间最长的一次陆面过程实验。这次实验取得了欧亚大陆腹地典型干旱区黑河流域沙漠、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等方面的大量观测资料,同时也收集了 3 个国家高空气象站、3 个地面气象站、4 个水文站和一些雨量站及井下水位的气象水文资料。黑河实验的观测时间长,规模大,参加单位多。收集的资料不仅种类多,数据量大,而且这些资料的采集方式、处理方法、数据的记录格式和介质等差异相当大。为了开展综合研究,必须建立一个格式统一、规范化的数据库(HDB)供国内外有关科学家使用。HDB 的建立和质量的高低,直接影响到黑河实验的国际交流和综合研究水平。HDB 的建立为黑河实验陆面过程的学科交叉综合研究奠定了物质基础。由于黑河实验直接列入 WCRP 和 IGBP 的计划,又是我国第一次大型陆面过程

实验,所以 HDB 为 WCRP 和 IGBP 以及我国气象事业留下一份宝贵资料。HDB 中的资料按观测性质和目的分为三类:

第一类 正常观测期(FOP)资料,包括:(1)微气象站和自动气象站的观测资料;(2)实验区内 3 个国家高空气象站、3 个地面气象站、4 个水文站和一些雨量站及井下水位的气象水文资料;(3)吹沙、沙尘分布及臭氧的观测资料。

第二类 加强观测期(IOP)资料,包括各个加强观测期(IOP—1, IOP—2, IOP—3, IOP—4)中湍流、系留气球、声雷达等大气边界层的观测资料以及土壤含水量和成分的观测资料。

第三类 特殊观测期资料,包括生物气象观测(BOP),远离绿洲的沙漠上的观测(IOP—DA),干旱区降水观测(IOP—R),超声脉动仪对比观测(IOP—C)及沙样实验的观测资料。

4 综合研究成果

研究结果表明,干旱地区陆面过程的基本特征和物理机理,都有别于湿润地区。

4.1 干旱地区地表的水热平衡特征

地表辐射能收支是地表水热平衡的基础。地表收入的净辐射由向上和向下的短波、长波辐射分量组成。夏季晴天沙漠与绿洲的总辐射和向下的长波辐射十分接近。无论是地面观测和卫星资料的反演都表明,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(如 HAPEX-MOBILHY)的结果相当,致使绿洲吸收的短波辐射比沙漠约大 16%。地表向上长波辐射日平均值沙漠比绿洲(以沙漠站和张掖站为例)高 28%,尤其是白天向上长波辐射沙漠比绿洲要大 40%。以上两个因素导致沙漠亏损过多辐射能量,其净辐射只有绿洲的 43%左右。湿润地区辐射平衡的特征应该同绿洲类似,所以这个结论也反映了干旱地区的净辐射比湿润地区小的机理。

绿洲或湿润地区地表水平衡,一般是由降水量、径流、地表蒸发和植被蒸腾以及地下水补给等分量组成。但干旱地区的沙漠或戈壁没有灌溉径流,也无植被蒸腾,地表水平衡仅有地表蒸发和地下水补给。干旱地区的沙漠和戈壁如果地下水位很低,地下水补给可以忽略,那么地表蒸发就等于降水量。黑河实验区年降水量在 150 毫米以下,可见沙漠和戈壁的蒸发量是很微小的;甚至由于绿洲水汽平流作用而存在逆湿现象(即水汽向下输送的负水汽通量),这些已被微气象站的风、温、湿梯度观测计算的月平均蒸发量以及涡旋相关法直接测量的蒸发量所证实。

地表热量平衡主要由净辐射、感热和潜热通量以及地热流量等分量构成。沙漠和戈壁的蒸发量极其微小,热量平衡中潜热几乎可以不计(通常是在目前仪器测量误差范围内),净辐射主要同感热和地热流量平衡。梯度观测和涡旋相关法观测得到的湍流通量都证实这一点。平均而言,夏季戈壁的感热占净辐射的 60%,地热流量占 30%—40%,潜热仅占 10%,也就是说 Bowen 比大于 6.0。但绿洲内感热仅占 14%,地热流量占 28%,潜热占 58%,Bowen 比只有 0.24。同处于中纬度的 HAPEX-MOBILHY 实验所属湿润地区的夏季热量平衡是感热、潜热和地热流量分别占净辐射的 24%、43%和 34%,其 Bowen 比约 1.4。由于“冷岛效应”(或称“绿洲效应”),绿洲的热量平衡中感热比例较湿润地区低,所以其 Bowen 比也比湿润地区低,甚至在白天出现负值,有较明显的负感热通量。

冬季由于绿洲植被枯萎,绿洲同沙漠地表状态差异减小,所以无论是辐射平衡还是热量平衡的差异也相应减小。

4.2 干旱地区陆面过程的参数化

干旱地区陆面过程的参数化是本项目的重要目标之一。从卫星遥感反演得到的比值植被指数,对于沙漠没有明显季节变化,其值接近或略小于 1.0;而绿洲的 RVI 从冬季的 1.04 变化到夏季的 1.90。观测表明,沙漠和戈壁的地表空气动力学粗糙度分别约为 4.5×10^{-3} 米和 $1.2-1.7 \times 10^{-3}$ 米。中性层结条件下沙漠和戈壁的总体输送系数分别为 1.6×10^{-3} 和 2.2×10^{-3} ,它们的阻尼系数 r_N 同 C_N 成反比,即 r_N 分别为 6.3×10^2 和 4.5×10^2 。但是沙漠和戈壁夏季层结稳定度动态范围很大,总体理查逊数可以从午夜的 0.15 变化到白天正午的 -2.0。从而使沙漠的动量总体输送系数 C_D 从 0.3×10^{-3} 变化到 5.5×10^{-3} ;感热输送系数 C_H 从 0.3×10^{-3} 变化到 6.1×10^{-3} 。动态范围分别变化 8.3 和 26.3 倍。所以如果象有些大中尺度模式或气候模式中那样,总体输送系数忽略层结影响将造成严重误差。

4.3 绿洲与沙漠环境的相互作用

黑河实验的观测点设置在绿洲内以及临近绿洲的沙漠或戈壁。这次实验观测到绿洲与沙漠相互作用较为完整的图象。

(1) 临近绿洲的沙漠逆湿现象和水汽输送过程

先行性实验(POP)中,梯度观测发现临近绿洲的戈壁夏季白天近地面层内水汽廓线存在逆湿现象,水汽是向下输送的。与此同时涡旋相关法也以直接的湍流通量观测得到负的向下水汽通量。两种完全独立的观测同时得到向下水汽通量,证实了观测结果的真实性。以后 FOP 期间大量事实证明夏季白天无论是戈壁还是沙漠都存在这类逆湿现象。观测还表明沙漠地表下 2 厘米处沙层空气中比湿高于地表附近大气空气比湿,意味着蒸发是在沙层中发生的,并以水汽形态向地表和大气中输送。风洞物理模拟也证实干燥沙层蒸发约发生在地表以下 10 厘米深处。

(2) 绿洲的逆位温现象——冷岛效应

绿洲和沙漠中湖泊的冷岛效应早在河西地区近地面层观测中就已注意到,即夏季白天晴空沙漠处于强不稳定层结状况时,绿洲内却处于逆位温的稳定状态,感热向下输送。这次黑河实验中以大量事实证实了这一现象。梯度观测还表明,绿洲内大气往往是上层逆位温,感热向下输送;由于地表被太阳辐射加热增温,地表附近的空气却处于不稳定层结,存在弱的向上的感热通量。1992 年 BOP 期间张掖站曾观测到,很强的逆位温和感热向下输送现象,负感热通量的贡献可达到净辐射的一半左右,负感热通量层可达地表。

(3) 绿洲与沙漠环境的相互作用

梯度法和涡旋相关法两种独立的湍流通量观测都证实,绿洲内存在逆位温,临近绿洲的沙漠存在逆湿。而辐射的观测表明,由于绿洲与沙漠地表植被状况的差异,沙漠地表反射率远大于绿洲,白天晴空沙漠向上长波辐射明显大于绿洲。地表热量平衡的研究也表明,沙漠或戈壁吸收的太阳辐射热量主要用于加热大气和地表土壤;而绿洲吸收的太阳辐射热量却主要供植被蒸散使用。这样就造成绿洲的地表温度和近地面层大气温度明显低于沙漠或戈壁环境。系留气球的观测也进一步证实,在 200—300 米以下绿洲气温低于戈壁。而且观测证实绿洲内地表附近为弱不稳定层结,感热向上输送;但十至几十米的一定高度以上直至 100—150 米高度范围大气为稳定层结,感热向下输送。这些事实说明绿洲内的逆位温和临近绿洲的沙漠中逆湿现象是绿洲与沙漠环境相互作用的结果。事实上由于绿洲与沙漠地表热力性质的强烈差异,绿

洲与沙漠环境之间无论是温度还是湿度都造成强的水平梯度,使得绿洲与沙漠之间形成一种热力内边界层。这就是绿洲与沙漠相互作用较完整的图象。

酷热沙漠环境包围的绿洲或湖泊内冷岛效应造成的稳定层结可能抑制绿洲或湖泊的蒸发和蒸散,形成有利于绿洲生物生长和降低湖泊水资源损耗的凉湿小气候。而临近绿洲的逆湿现象,微量水汽输送到干热的沙漠也是有利于临近绿洲沙漠边缘地带的沙生植物生长的,从而形成绿洲至于热沙漠间的缓冲带。这些结论可能对绿洲的环境保护有实际意义。

5 对干旱地区陆面过程的一些新认识

5.1 干旱地区在全球气候系统中的作用

目前对陆面过程已有一定的认识,但这些结论主要是从湿润地区和半干旱地区观测结果得出的。目前普遍认为,地气相互作用中首先是地表能量和物质交换并通过边界层过程实现陆面同自由大气的能量和物质交换。而地表能量平衡过程中植被又起着控制作用,所以研究地表水平衡和植被过程对于陆面过程来说是关键问题。而在边界层过程中,感热主要是加热近地边界层大气,发展对流边界层,所以是大气边界层的强迫因子。与此相反,潜热并不直接加热大气边界层,陆面蒸发的水汽可以通过边界层顶输送到自由大气,然后通过凝结潜热的释放成为驱动大气环流一部分能量来源。所以陆面向自由大气输送热量是通过潜热形式实现的。

干旱地区地表水热平衡的事实表明,沙漠和戈壁植被稀少,地表很干燥,使得蒸发量微小,地表热量平衡中感热占绝对优势,潜热几乎可以忽略不计。由于干旱地区的地表反射率和向上长波辐射强,致使净辐射比湿润地区低,从而导致区域或全球辐射能的“亏损”。边界层过程中,很少或没有水汽和潜热输送到自由大气。所以地表能量平衡中研究感热输送是关键问题。这意味着干旱地区的陆面过程物理机制同湿润地区的不完全相同,湿润地区陆面过程参数化中许多重要量在干旱地区也可能成为难于测量和计算的小量。这一系列问题都是干旱地区陆面过程应予以着重研究的。

5.2 绿洲在干旱地区陆面过程中的作用

我国西北干旱地区的绿洲尺度,大者不过 10—20 公里,一般都小于这个尺度。Andre 的研究表明,非均匀陆面分为两类:小于 10 公里量级“无组织”的非均匀陆面,它对于中尺度过程只是一种干扰;而大于 10 公里尺度的“有组织”非均匀陆面,对中尺度过程有影响。所以我国西北张掖或武威这类绿洲,对中尺度过程是有影响的,更小尺度的绿洲影响可忽略。IOP-DA 实验中沙漠观测点远离绿洲 50 公里,在这里已无法观测到绿洲的影响。由此可推断,绿洲的影响过程是首先在绿洲与沙漠相互作用下形成热力内边界层,在内边界层内绿洲与沙漠之间交换能量和物质(水汽等),然后参与干旱地区大范围的地气之间的能量和物质交换。所以绿洲对于干旱地区陆面过程只起较小调节作用。

6 结束语

黑河实验(HEIFE)虽然已取得重大成果,但这些结果也只是使我们对于干旱地区非均匀下垫面陆面过程有了一定的了解,同时提出了一系列的科学问题有待更深入的研究解决。

致谢 本文参考了黑河实验(HEIFE)研究的许多论文,由于篇幅所限未能列出,作者在此一并感谢。