

黑河实验(HEIFE) ——对干旱地区陆面过程的一些新认识*

胡隐樵 高由禧

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州, 730000)

提 要

综合介绍“黑河地区地气相互作用野外观测实验研究(HEIFE)”的概况。系统分析干旱地区陆面过程的一些基本问题,它们是:(1)干旱地区地表面热量平衡的基本特征:干旱地区蒸发量很小,地表热量平衡中以感热为主,潜热可以忽略不计。(2)干旱地区陆面过程参数化问题:干旱地区能量和物质湍流输送的参数化必须考虑层结影响,否则将造成严重误差。(3)干旱地区一种特殊现象——绿洲与沙漠环境的相互作用:绿洲的“冷岛效应”和临近绿洲沙漠或戈壁的“逆湿现象”是这种相互作用的结果。这些研究结果将加深我们对干旱地区陆面过程的认识。

关键词: 干旱地区, 地表热量平衡, 陆面过程参数化, 冷岛效应, 逆湿现象。

1 前 言

大气环流模式(GCM)只能再现大尺度气象场,无法得到小尺度的细节^[1]。目前由于陆面过程参数化方案仍不成熟,致使利用大气环流模式难于预报其局地影响^[2]。为了加深对大气环流的理解并改善其预报能力,陆面过程的参数化是其关键问题之一。陆面过程野外实验研究是陆面过程参数化的基础。

为了开展各类有代表性地表的陆面过程研究,法、美等国首先于 1986 年在法国西南部 Toulouse 附近进行了一次“水文大气先行性实验(HAPEX-MOBILHY)”^[3]。接着又在美国 Kansas 进行了“第一次国际卫星陆面气候学计划野外实验(FIFE)”^[4]。HAPEX-MOBILHY 实验区是典型的海洋性气候农业区,代表湿润区,而 FIFE 实验区却是在半干旱区草原上进行的,继后世界各地进行了一系列陆面过程的野外观测实验。例如欧洲研究委员会组织的“全欧沙漠化威胁地区野外实验(EFEDA)”^[5]和澳大利亚进行的“半干旱区陆气相互作用实验”^[6]。这两次实验都是在半干旱地区进行的。

在叶笃正和陶诗言教授的倡导、谢义炳等许多老前辈气象学家的热情关怀和积极支持下,经许多气象学家的共同努力,我国组织了一次“黑河地区地气相互作用野外观测实验(HEIFE)”^[7,8]。该项目得到国家自然科学基金委员会、中国科学院和甘肃科学技术委员

* 1994 年 4 月 13 日收到原稿,1994 年 5 月 19 日收到修改稿。本文是国家自然科学基金重大项目和日本国文部省支持的中日合作项目,并得到国家自然科学基金 49275228 课题支持。

会的联合资助,并列为国家自然科学基金“七五”重大项目。通过日本著名气象学家 R. Yamamoto 教授和叶笃正教授以及其他许多中日两国科学家的共同努力,在日本国文部省的资助下,本项目成为中日合作研究项目。这是亚洲第一次国际合作进行的大型陆面过程实验研究。黑河实验(HEIFE)计划已列入“世界气候研究计划(WCRP)”和“国际地圈-生物圈计划(IGBP)”的一部分。

2 黑河实验(HEIFE)概况

黑河实验同其它几次陆面过程实验不同,其实验区选择在青藏高原与其北部巴丹吉林沙漠之间黑河流域的 $70 \times 90 \text{ km}^2$ 区域内,属于亚洲内陆腹地典型的干旱地区。

一般来说,湿润地区大气同陆面之间能量和物质交换过程中,潜热通量和水汽通量占据重要地位。但在干旱地区都是感热通量占主导地位,潜热通量和水汽通量占次要地位。由于本次实验选择在黑河地区,包括戈壁、沙漠和绿洲等不同下垫面,所以复杂下垫面边

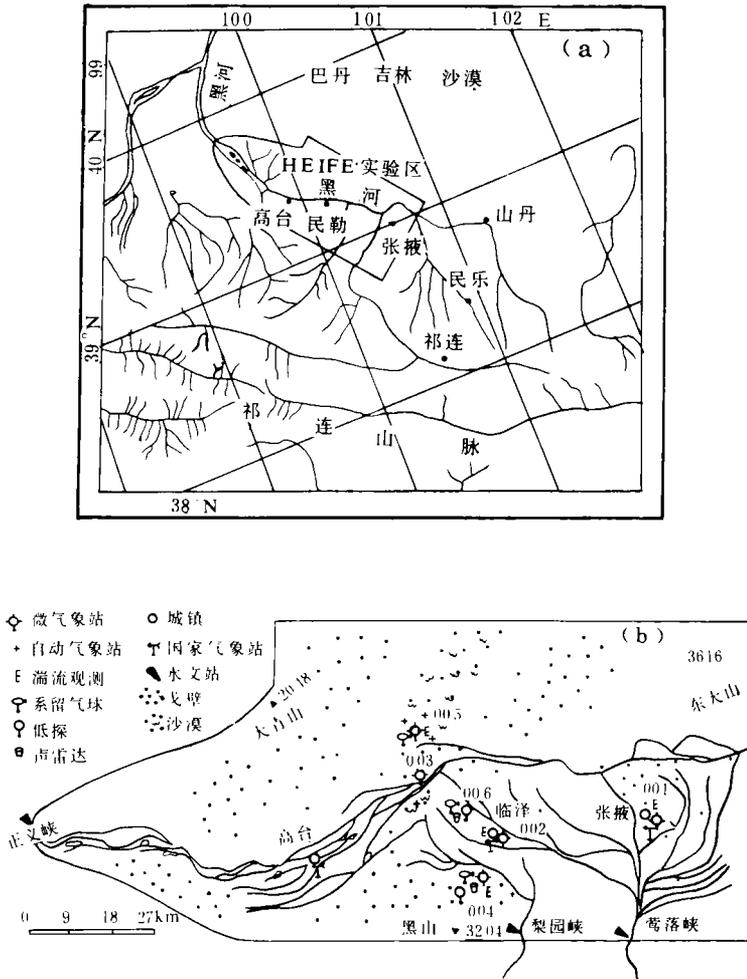


图1 HEIFE 实验区的地理位置(a)及观测站的布局(b)

边界层过程是这次实验研究的显著特点。黑河地区是甘肃省商品粮基地,这项实验还包括干旱地区农作物需水量研究,这是本实验的又一特点。

实验区的地理位置如图 1a 所示。实验区内设置 5 个微气象站和 5 个自动天气站。在“正常观测期(FOP)”内进行长时间连续观测。在 FOP 期间还收集 3 个常规气象站和 31 个水文站的气象水文资料。这些观测站的布局如图 1b 所示。

5 个微气象站分别设于张掖(001)、临泽(002)、平川(003)、化音(004)和沙漠(005)。它们分别位于绿洲(001,002)、戈壁(004)、沙漠(005)以及绿洲与沙漠交界区(003)。5 个微气象站在 FOP 期间进行近地面层风、温、湿廓线观测和辐射、地温、地热流量观测。利用梯度廓线法以及能量平衡法确定不同季节和不同下垫面条件下近地面层感热、潜热和动量通量。

黑河实验(HEIFE)野外观测已于 1992 年 10 月 15 日全部结束。先后进行了“先行性实验(POP)”(1988 年 9 月 4—19 日)、“正常观测实验(FOP)”(1990 年 6 月—1991 年 12 月 15 日,其中,日方负责的 001 和 005 微气象站以及 5 个自动气象站观测,延续到 1992 年 10 月 15 日)。1990 年 8 月 10—24 日进行了一次“先行性加强观测(PIOP)”。1991 年进行了 4 次“加强观测(IOP)”:IOP-1(4 月 10—30 日,5 月 2—10 日)、IOP-2(8 月 6—20 日)、IOP-3(10 月 4—12 日)、IOP-4(12 月 6—12 日)。IOP-1 加强期是黄沙过程观测。IOP-2,3 着重加强边界层结构和湍流观测,为此在 004 站(戈壁)、005 站(沙漠)和 006 站(小屯,绿洲)增加系留气球探测,而 004 和 006 站增加多普勒声雷达探测,001,004 和 005 增加湍流脉动观测,IOP-4 观测冬季特征。1992 年进行了“生物气象观测(BOP)”(4—7 月),其中有两个加强期 BIOP-1(5 月 2—13 日)和 BIOP-2(6 月 2—14 日)。此外这一年还进行了“干旱地区降水云观测(IOP-C)”(8 月 7—17 日)和远离绿洲的“沙漠行动(IOP-DA)”(6 月 5—17 日)。

经过历时 2 年零 4 个月的野外观测,包括各种类型的加强观测,黑河实验(HEIFE)取得了欧亚大陆腹地典型干旱地区黑河流域沙漠、戈壁、绿洲不同下垫面的太阳辐射、大气边界层气象资料、绿洲的生物气象和干旱地区降水云资料以及远离绿洲沙漠中的近地面层气象资料。并掌握了该地区能量和水汽输送的基本特征。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实验基础。为了便于黑河实验观测资料的综合分析和国内外科学家的使用,建立了“HEIFE 资料库(HDB)”。资料库除以上资料外还收集了加强观测期(IOPs)的 3 个常规气象地面站(张掖、高台和临泽),3 个常规高空站(张掖、酒泉和民勤)和正常观测期(FOP)的梨园峡、莺落峡和正义峡等 31 个水文站的资料。

3 干旱地区地表面的热量平衡和参数化问题

3.1 地表热量平衡

干旱地区的边界层气候和地表面热量平衡特征同湿润地区有很大差异^[9,10]。研究干旱地区热量平衡和各种湍流通量特征是 HEIFE 的主要目标之一。无疑,这些研究对于干旱地区陆面过程参数化和大气环流及数值模拟研究是重要的。

HEIFE 的戈壁(004 化音站)和沙漠(005 沙漠站)两种下垫面观测站就是为了研究干旱地区热量平衡而设置的。不失一般性,以 1990 年 8 月 30 日戈壁站(图 2a)和沙漠站

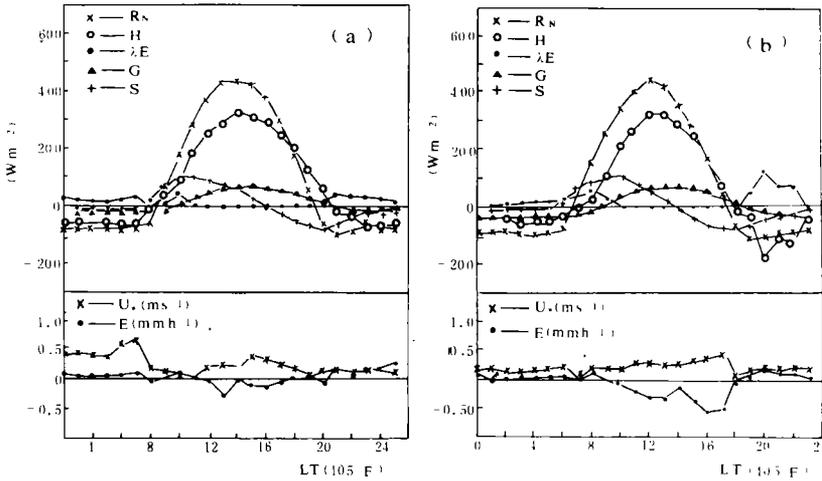


图2 戈壁站(a)及沙漠站(b)的能量平衡和湍流通量。

(\times — R_N 净辐射, \circ — H 感热, \bullet — λE 潜热, \blacktriangle — G 地热流量, $+$ — S 土壤储热,
 \times — U 摩擦速度, \bullet — E 水汽通量)

(图 2b)作为夏季热量平衡的典型个例。戈壁站和沙漠站的观测场地、仪器精度以及湍流通量计算方法详见文献[10]。

从图 2 不难得出如下结论：

(1)夏季无云的白天,由于沙漠或戈壁处于超绝热不稳定状态使感热通量较大,而比湿却是正梯度即逆湿,从而造成负水汽通量。地表热量平衡中以感热为主,而潜热可以忽略不计,土壤热通量约占净辐射的 25%。

(2)夏季无云的晚上同白天相反,大气处于稳定层结。造成负的感热通量。但是水汽呈现弱的正梯度,仅有很小蒸发和潜热,热量平衡中的有效辐射主要由感热和地热流量补充。

(3)图 2a 与图 2b 比较,两站的净辐射相近,其极大值约为 430Wm^{-2} 。HAPEX 实验区位于 44°N 附近,而 HEIFE 位于 39°N 附近,它们都属于中纬度。但是 HAPEX 的净辐射^[11]却达到 510Wm^{-2} ,比 HEIFE 大得多。说明沙漠或戈壁的反照率比 HAPEX 实验的湿润地区反照率大。沈志宝等^[12,13]的分析表明夏季沙漠站平均反照率达 0.26,而 HAPEX 实验区仅约为 0.15^[11]。戈壁或沙漠地表热量平衡同湿润地区的 HAPEX 实验区也不同,HAPEX 实验区夏季无云的白天地表热量平衡中以潜热为主,感热次之,地热流量约占净辐射的 25%,而夜间有弱的负潜热,意味着有露水凝结,但感热却近于零。

3.2 湍流通量的参数化

陆面过程的核心问题是下垫面同大气之间的能量以及物质的输送和交换。在利用常规气象观测资料确定下垫面与大气之间的能量和物质交换时,通常采用总体输送系数(C_D, C_H 和 C_E)表示参数化公式^[15]。大气环流模式(GCM)中常用阻尼系数 $r_{D,H,E}$ ^[27],它们同 $C_{D,H,E}$ 成反比关系。所以,陆面过程参数化的一个关键问题是求取表征陆面能量和物质输送的总体输送系数。迄今为止,在海气相互作用中,人们对总体输送系数进行了大量研

究,并得到了许多重要结论^[15],而陆气相互作用中对总体输送系数的研究较少,至于干旱地区更是贫乏。在以往许多气候和大气环流模式的陆面过程参数化中,因受观测资料的限制,通常忽略大气稳定度对总体输送系数的影响,以中性总体输送系数代替总体输送系数,或仅作一些简单的经验层结订正。在海洋上,大气稳定度动态范围小,这样做不会有太大影响^[16]。但在陆面上,大气稳定度动态范围大,特别是干旱地区戈壁或沙漠上空大气稳定度动态范围很宽^[9,10],忽略稳定度对总体输送系数的影响必将引入很大误差。

事实上总体输送系数是地表粗糙度 Z_0 和稳定度 Z/L 的函数

$$C_{D,H,E}\left(\frac{Z}{Z_0}, \frac{Z}{L}\right) = C_{DN,HN,EN}\left(\frac{Z}{Z_0}\right) / F_{D,H,E}\left(\frac{Z}{Z_0}, \frac{Z}{L}\right) \quad (1)$$

其中 $C_{D,H,E}$ 分别为动量、热量和水汽的总体输送系数;而 $C_{DN,HN,EN}$ 则分别为中性条件下相应的输送系数,它们仅是粗糙度 Z_0 的函数; $F_{D,H,E}$ 则为相应量输送系数的层结稳定度影响函数;面 Z 为高度, L 为 Monin-Obukhov 长度。根据 Monin-Obukhov 相似性理论可以得到^[17]:

$$\left. \begin{aligned} C_N = C_{DN} = C_{HN} = C_{EN} = \kappa^2 / \left[\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \right]^2 \\ F_{D,H,E} = \left[1 - \frac{\Psi_M(Z/L)}{\ln(Z/Z_0)} \right] \left[1 - \frac{\Psi_{M,H,W}(Z/L)}{\ln(Z/Z_0)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 κ 为 Karman 常数; $\Psi_{M,H,W}$ 分别为风、温、湿廓线的层结稳定度修正函数

$$\Psi_{M,H,W} \frac{Z}{L} = \int_{z_0}^Z \frac{1 - \varphi_{M,H,W}(Z/L)}{Z} dZ \quad (3)$$

$\varphi_{M,H,W}$ 分别为 Monin-Obukhov 相似性普适函数。公式(1)–(3)表明了总体输送系数同中性总体输送系数和大气稳定度的关系。根据风、温、湿梯度即可求出粗糙度和总体输送系数。因为用常规气象资料很难确定大气稳定度特征量 Z/L ,所以陆面过程参数化中通常用总体理查逊数 R_{iB} 来表征大气稳定度,其定义为

$$R_{iB} = gZ(\theta - \theta_s) / \bar{T}u^2 \quad (4)$$

所以

$$C_{D,H,E} = D_{D,H,E}(Z/Z_0, R_{iB}) \quad (5)$$

其中 g 为重力加速度, θ 和 θ_s 为气温和地表温度, \bar{T} 为平均绝对温度, u 为风速。

下面是利用 HEIFE 1990 年 8 月 16 日—9 月 15 日戈壁和沙漠站观测资料得到的总体输送系数。结果表明戈壁和沙漠中性层结的总体输送系数分别为 1.6×10^{-3} 和 2.2×10^{-3} 。而总体输送系数同总体理查逊数的拟合曲线为

$$\left. \begin{aligned} C_D = C_N \left[1.0 - \left(\frac{30.0}{\ln(10.0/Z_0)} - 1.3 \right) R_{iB} \right]^{1/2} \\ C_H = C_N \left[1.0 - \left(\frac{62.3}{\ln(10.0/Z_0)} - 4.1 \right) R_{iB} \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} R_{iB} \leq 0 \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} C_D = C_N [1.0 - 8.7R_{iB} + 21.1R_{iB}^2] \\ C_H = C_N [1.0 - 9.8R_{iB} + 21.1R_{iB}^2] \end{aligned} \right\} R_{iB} \geq 0 \quad (7)$$

图 3 为戈壁和沙漠总体输送系数与总体理查逊数的关系,图 4a, b, c, d 分别为其同

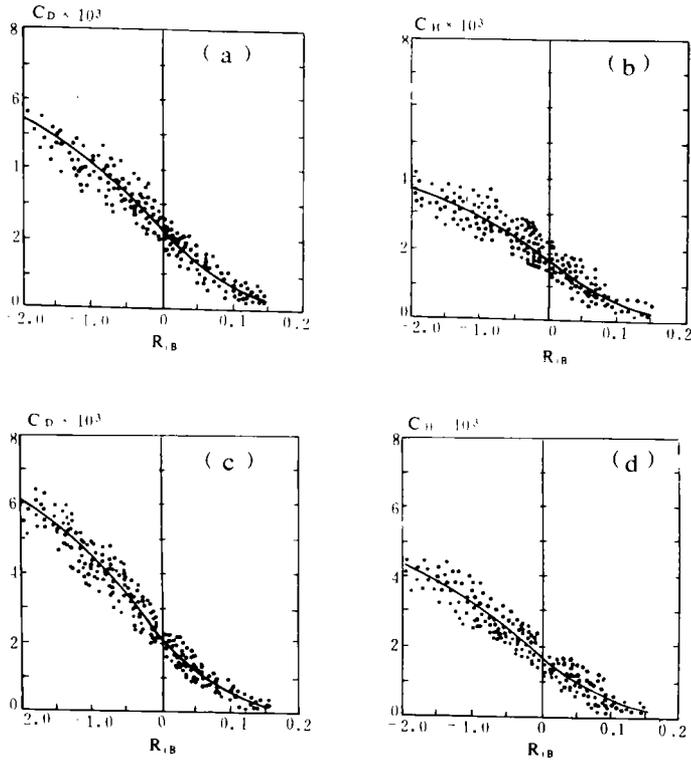


图3 戈壁和沙漠总体输送系数与总体理查逊数的关系

(a)沙漠上 C_D 与 R_B ; (b)戈壁上 C_D 与 R_B ; (c)沙漠上 C_H 与 R_B ; (d)戈壁上 C_H 与 R_B

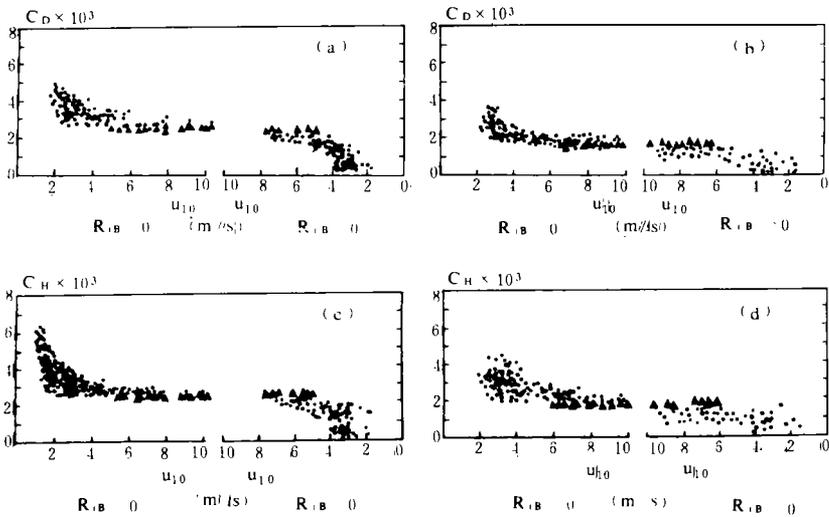


图4 总体输送系数与10m高处风速 u_{10} 的关系 (▲表示中性总体输送系数)

(a)沙漠上 C_D 与 u_{10} ; (b)戈壁上 C_D 与 u_{10} ; (c)沙漠上 C_H 与 u_{10} ; (d)戈壁上 C_H 与 u_{10}

10m 高处风速 u_{10} 的关系。图 3 表明：(1)在沙漠或戈壁上空总体输送系数对层结稳定度是很敏感的。而且从下面的图 5 将看到，干旱地区层结稳定度动态范围很大，陆面过程忽略层结影响而简单地以中性总体输送系数代替，必将造成严重误差。(2)图 3a 同图 3c 以及图 3b 同 3d 比较，沙漠或戈壁上空感热总体输送系数随总体理查逊数变化比动量总体输送系数随总体理查逊数的变化大。这意味着感热输送对层结稳定度更为敏感。从图 4 看出：(1)无论沙漠或戈壁，中性总体输送系数不随风速变化为常数，而海面上中性总体输送系数却随风速增大而增大^[15]。这是由于两种下垫面属性不同所致。在海洋上海浪高低随风速变化，导致粗糙度随风速增大而增大。所以中性总体输送系数随风速增大而增大。而沙漠或戈壁这种裸露地表上，由于粗糙度随风速没有明显变化，所以中性总体输送系数也不随风速变化。(2)不稳定层结时($R_B < 0$)，风速越小输送系数越大，这时有可能趋于自由对流状态而湍流输送增加。但稳定层结时($R_B > 0$)却是风速越小，输送系数越小。这时可能趋于静风的稳定状态，湍流输送很小。无论是稳定层结还是不稳定层结，随风速增大其输送系数趋于中性总体输送系数。事实上随着风速增加，大气也就趋于中性条件。

4 绿洲同沙漠的相互作用——冷岛效应和逆湿现象

4.1 冷岛效应和逆湿现象

作者曾研究过沙漠包围的绿洲^[18]或湖泊^[19]会产生“冷岛效应”的现象(这又称为“绿洲效应”，只不过这种现象不仅绿洲存在，沙漠包围的湖泊或城市内的大型公园绿地等下垫面条件下也会出现这类现象。类似于广大乡村包围的“城市热岛效应”而称为“冷岛效应”)，还系统地从理论上研究过其形成机制^[20,21]。但是由于当时观测实验条件的限制，许多结论仅为理论上的推测，而这次黑河实验(HEIFE)是在典型干旱地区绿洲内及其边缘地区进行的，取得了丰富的绿洲和沙漠相互作用的观测资料。这次 HEIFE 以充分的观测事实证明绿洲存在的冷岛效应^[22,23]。观测事实还表明临近绿洲的沙漠或戈壁经常出现“逆湿现象”^[9,10,24]。作者深入分析了其物理机制^[25]。这些事实证明，绿洲的冷岛效应和临近绿洲的沙漠上空的逆湿现象是沙漠与绿洲相互作用的结果。

我们系统地对比分析了 1990 年 8 月 16 日—9 月 30 日和 1990 年 12 月 1 日—1991 年 1 月 30 日临泽(002 站)绿洲与化音(004 站)戈壁的晴天微气象资料。这两段时间分别代表夏季和冬季。图 5 是绿洲和戈壁大气层结稳定度(1/L)在夏季以及冬季平均值的日变化。为了便于比较，这里

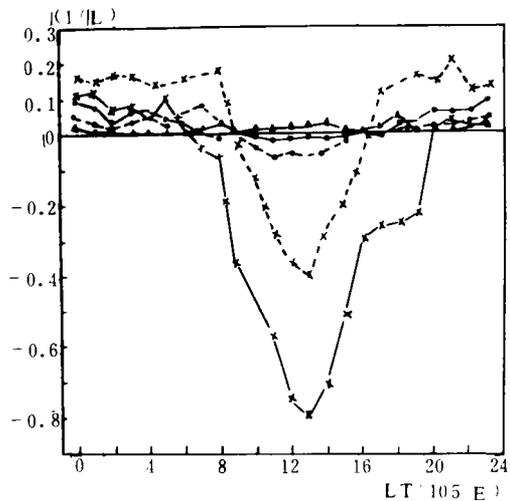


图 5 绿洲和戈壁的稳定度(1/L)日变化
 (● - 夏季绿洲低层; ▲ - 夏季绿洲上层; × - 夏季戈壁; ● - 冬季绿洲; × - 冬季戈壁)

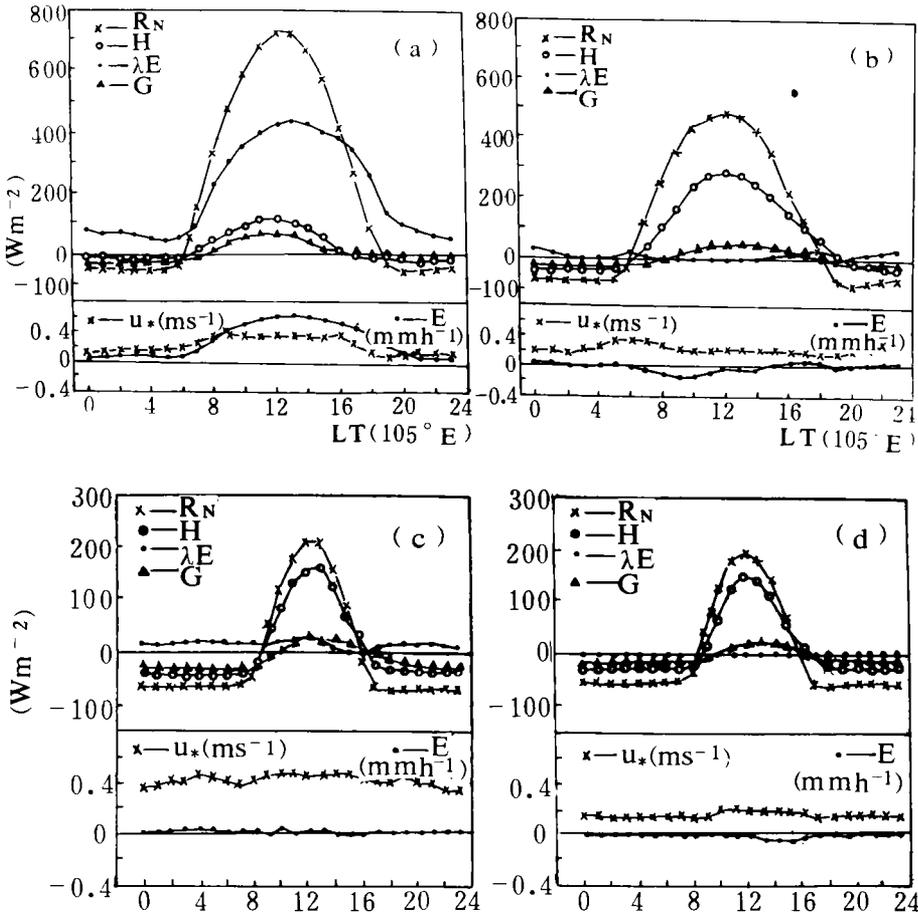


图6 夏季绿洲(a)和戈壁(b)以及冬季绿洲(c)和戈壁(d)地表热量平衡
 (\times — R_n 净辐射, \circ — H 感热, \bullet — λE 潜热, \blacktriangle — G 地热流量)

以 Monin-Obukhov 长度的倒数表征大气层结稳定度, $1/L$ 相当于 $Z-d=1m$ (d 为位移高度) 时的 Monin-Obukhov 稳定度参数 ζ 值。该图表明, 夏季白天绿洲低层(约 10m 以下) 呈现弱不稳定状态, 晚上呈稳定状态。而绿洲上层(10—40m) 一直处于稳定状态。白天绿洲低层的不稳定状态是太阳辐射加热地表造成的, 而上层的稳定状态是上层气流从戈壁环境向绿洲输送的干热空气与绿洲地表附近的凉湿空气而形成的。夏季白天绿洲上空出现稳定层结, 这是冷岛效应最基本的特征, 这时感热应向下输送^[18-21]。夏季戈壁上空稳定度变化范围很大, 但较单调。白天呈强不稳定状态, 晚上呈稳定状态。而冬季, 绿洲和戈壁大气稳定度日变化形式相似, 白天呈不稳定状态, 晚上呈稳定状态。但冬季白天绿洲的不稳定仍比戈壁弱, 而戈壁的不稳定度冬季比夏季弱, 但动态范围仍较大。

图 6 是绿洲和戈壁热量平衡图。图中是夏冬季各段时间的时间平均值。夏季绿洲地表热量平衡以潜热为主而感热很小, 同湿润地区类似。这是绿洲有较大蒸散所致。但夏季戈壁热量输送却以感热为主, 潜热很小, 并在白天常出现逆湿造成的负水汽通量。冬季, 绿

洲和戈壁热量平衡相似,热量输送都以感热为主,潜热很小。事实上冬季绿洲植被枯萎,绿洲地表热力特性已接近戈壁,它们之间的相互作用也很小。这时冷岛效应或逆湿现象也相应减小或消失。一些研究表明,夏季当绿洲的冷岛效应很强时,绿洲低层大气也呈现稳定层结。这时地表热量平衡中白天晴空就出现负感热通量,同临近绿洲的负水汽通量相似。图 7 是 1992 年 6 月 23 日张

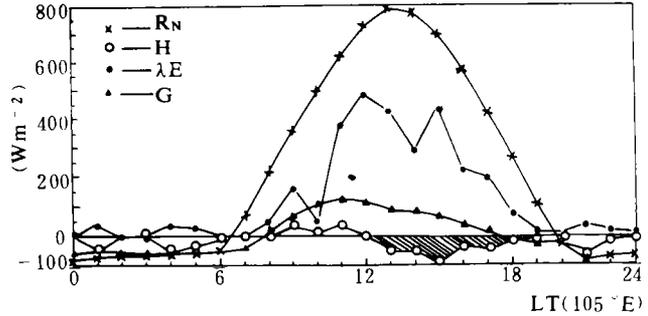


图 7 1992 年 6 月 23 日观测到的张掖绿洲地表热量平衡
(\times — R_n 净辐射, \circ — H 感热, \bullet — λE 潜热, \blacktriangle — G 地热流量)

掖(001 站)绿洲观测到的地表热量平衡^[26]。阴影部分是白天的负感热通量,呈现强冷岛效应。这些事实说明正是由于绿洲和沙漠环境的相互作用形成内边界层,从而造成绿洲与沙漠之间平流和水平湍流扩散输送的能量和水汽交换。致使夏季白天沙漠环境的热量输送到凉湿地表的绿洲上空从而出现稳定层结,热量向下输送,即冷岛效应。相反,绿洲的水汽输送到干热地表的沙漠形成逆湿现象,水汽向下输送。

4.2 沙漠和戈壁站对于干旱地区的代表性问题

HEIFE 设置沙漠和戈壁微气象观测站,以便得到干旱地区地气相互作用能量和水汽交换的特点。但是由于绿洲与沙漠的相互作用,导致绿洲的冷岛效应,临近绿洲沙漠的逆湿现象。显然这种绿洲与沙漠相互作用对于沙漠和戈壁站干旱地区陆面过程观测是一种干扰。这就提出了沙漠与戈壁站对于干旱地区代表性的问题。为了估计这种干扰的大小,特别于 1992 年 6 月 6—16 日进行了一次“沙漠行动”的补充加强观测(IOP-DA)*。

观测点设于 HEIFE 实验区北侧远离绿洲约 59km 处巴丹吉林沙漠边缘。该观测点基本上避免了绿洲的干扰。也远离祁连山,所以受祁连山局地环流影响也较小。IOP-DA 期间,临近绿洲的沙漠站(005 站)仍在运转,并与之对比。

这次实验结果如下:(1)远离绿洲的沙漠观测同 HEIFE 临近绿洲的沙漠站相比较,两个站的净辐射、地表温度、大气层结稳定性和感热通量无论是日变化趋势还是绝对值大小都相近。地表热量平衡中感热通量占主导地位。(2)两个站不同的仅是比湿廓线和水汽通量。远离绿洲的沙漠站近地面层比湿廓线白天基本上为等比湿状态,很少有逆湿出现。由于水汽廓线为等比湿状态,虽然白天大气层结很不稳定,但水汽通量即地表蒸发仍很小。从而潜热通量同感热通量相比可以忽略不计。

以 1992 年 6 月 15 日的晴天为例,两个站夜间都有较弱的负感热通量,最大值为 -20 Wm^{-2} ,白天感热通量都较大,最大值约 300 Wm^{-2} 。而该日远离绿洲的沙漠站总感热通量为 6452 kJm^{-2} ,总潜热通量仅为 1.0 kJm^{-2} ,相当于日蒸发量仅 0.41 mm ,是很小的。

以上事实说明,戈壁站(004)和沙漠站(005)作为干旱地区陆面过程的观测点仍有一

* 毋抗、胡隐樵,远离绿洲沙漠近地面观测实验,待高原气象(1994 年, Vol. 13, No. 3)发表。

定的代表性。绿洲对其干扰主要是水汽和潜热通量。但是对于戈壁和沙漠这类极干旱的地表来说,蒸发量很小,相对于感热通量而言,潜热通量几乎可以忽略不计。故而绿洲对戈壁站和沙漠站作为陆面过程观测的热量平衡干扰相对而言较小,但是水汽通量的干扰应予以考虑。

5 讨论

(1)到目前为止,海气相互作用已有相当丰富的研究,对地气相互作用特别是湿润地区的地气相互作用也有一定的认识。水循环在海气和地气相互作用中起重要作用,地气相互作用中,土壤、植被和大气三种介质两个界面之间的能量和物质交换过程中水和 CO_2 的循环是至关重要的。植被对地表的能量平衡起控制作用,也就是对地表感热、潜热、水汽和 CO_2 的输送起着控制作用。在大气边界层过程的能量交换中,感热主要是大气边界层过程的强迫因子,它加热局地的边界层大气,发展对流边界层;与此相反,潜热并不加热边界层大气,大量向自由大气输送热量却是在水汽输送过程中以潜热的形式实现的^[27]。但干旱地区植被稀少,地表很干燥。黑河实验结果还显示,地表蒸发很小,地表能量平衡中潜热几乎可以忽略不计。而边界层过程中,层结稳定度动态范围很大,感热在地表能量平衡中占绝对优势。这些事实表明,干旱地区陆面过程的机理同湿润地区的显然不一样。干旱地区地气相互作用中能量和物质(特别是水汽)交换是如何实现的?干旱地区对流边界层顶没有水汽和潜热输送到自由大气,是否有水汽和潜热从自由大气夹卷输入边界层呢?这种情况下,对流边界层顶既有夹卷的感热从自由大气输送到边界层内,又有水汽和潜热夹卷输入。在全球或区域气候中,干旱地区是否可能为一个“热汇”,从而补偿辐射平衡中由于地表反射率过大而造成的辐射能亏损?干旱地区植被不可能是地表能量平衡的关键控制因子,那么地下水是否可能是干旱地区地表能量平衡的主要控制因子呢?这些问题以及干旱地区陆面过程模式和参数化方案也都值得深入研究。

(2)干旱地区陆面过程还有一个绿洲与沙漠相互作用的特殊问题。黑河实验区绿洲一般尺度只不过 10km 左右,对于整个干旱地区的陆面过程来说,这种小范围的绿洲只是对地气间能量和物质交换起到一种调节作用。从黑河实验结果来看,首先是在边界层内形成内边界层,在内边界层内绿洲与沙漠之间进行能量和物质(特别是水汽)的交换,但这种交换对于 $10-10^2\text{km}$ 的中尺度,进而对于大于 10^3km 的大尺度的陆面过程又起什么作用,如何起调节作用也是值得进一步研究的。

(3)目前国际上一系列陆面过程实验,都以飞机对边界层的观测及卫星观测作为重要手段。这些方法是将点上观测结果推广到面上的重要桥梁。由于实际条件的限制,黑河实验未能采用这些先进手段。这是本实验的不足,致使将点上观测结果推广到面上有一定的困难,但是可以通过卫星资料的反演和数值模拟在一定程度上弥补。这也是“黑河实验(HEIFE)”要深入研究的重要课题。但要强调指出的一点是,目前卫星遥感估算地表潜热通量和蒸发的基本原理应用在稀少植被的干旱地区可能遇到困难。因为它的基本原理是^[27]:首先从卫星遥感反演净辐射 R_n 和地表温度 T_s ;然后用地面观测得到空气温度 T_a 和热量的空气动力学阻尼 r_H 或总体输送系数 C_H ,从而计算感热通量 H ;最后用地表热量平衡 $R_n = H + \lambda E + G$ 的残余估计潜热通量 λE 。上面的研究指出,潜热通量在热量平衡中

是微小的分量。干旱地区由于 Bowen 比很大,用这种方法估算潜热和蒸发的误差是很大的^[28],甚至是不现实的。我们可以得到潜热通量误差估计公式 $\frac{\Delta\lambda E}{\lambda E} = B \frac{\Delta H}{H} + (1 + B) \frac{\Delta(R_n + G)}{R_n + G}$,其中 B 为 Bowen 比。目前卫星遥感估算感热的误差^[29]约 100Wm^{-2} ,相对误差约 40%;而净辐射的误差为 $\pm 50\text{Wm}^{-2}$,相对误差约为 10%。像黑河地区这类干旱地表, Bowen 比 $B > 5$ 。若以 $B = 5$ 计算,那么利用卫星遥感估算潜热通量相对误差达 260%!因此利用卫星遥感反演潜热通量和蒸发必须发展新方法。

参考文献

- [1] Tiedtke M, Heckley W A and Slingo J. Tropical forecasting at ECMWF: The influence of physical parameterization on the mean structure of forecasts and analyses. *Quart J Roy Meteor Soc.* 1988. 114: 639—663.
- [2] Dickinson R E and Sellers H A. Modelling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parameterizations. *Quart J Roy Meteor Soc.* 1988. 114: 439—462.
- [3] Andre J C, Goutorke J P and Perrier A. HAPEX-MOBILHY. *Bull Amer Meteor Soc.* 1986. 268: 138—144.
- [4] Sellers P J, Hall F G, Asrar G, Strebel D E and Murphy R E. The first ISLSCP field experiment (FIFE). *Bull Amer Meteor Soc.* 1988. 269: 22—27.
- [5] Bolle H J et al. European field experiment in a desertification-threatened area. *Ann Geophys.* 1993. 11: 173—189.
- [6] Lyons T J, Schwerdtfeger P, Hacker J M, Foster I J, Smith R C G and Huang Xinmei. Land-Atmosphere interaction in a semiarid region: the bunny fence experiment. *Bull Amer Meteor Soc.* 1993. 74: 1327—1334.
- [7] 胡隐樵. 黑河地区地气相互作用观测实验研究. *地球科学进展.* 1991. 26: 34—38.
- [8] 胡隐樵. 陆面过程野外观测实验的进展. *地球科学进展.* 1992. 27: 37—42.
- [9] 胡隐樵, 奇跃进, 杨选利. 黑河戈壁(化音)小气候和热量平衡特征的初步分析. *高原气象.* 1990. 29: 113—119.
- [10] Hu Yinqiao, Yang Xuanli, Zhang Qiang and Zuo Hongchuo. The characters of energy budget on the Gobi and desert surface in Hexi region. *ACTA Meteor Sin.* 1992. 26: 82—91.
- [11] Andre A C et al. Evaporation over land-surface: First results from HAPEX-MOBILHY special observing period. *Annales Geophysicae.* 1988. 26(5): 477—492.
- [12] Shen Zhibao, Zou Jiling. The energy budget on the ground surface over desert and oasis in HEIFE area. *Proceedings of International Symposium on HEIFE.* Kyoto University, Kyoto, Japan. 1988.
- [13] Zuo Jiling, Hou Xuhong, Ji Guoliang. Preliminary study on surface radiation properties in HEIFE area in late summer. *Proceedings of International Symposium on HEIFE.* Kyoto University, Kyoto, Japan. 1988.
- [14] Egeleson P S. Land surface processes in atmospheric general circulation models. Cambridge. 1981. p. 67—111.
- [15] Garratt J R. Review of drag coefficients over oceans and continents. *Mon Wea Rev.* 1977. 105: 915—929.
- [16] Deardorff J W. Dependence of air-sea transfer coefficients on bulk stability. *J Geophys Res.* 1977. 73: 2549—2557.
- [17] 左洪超, 胡隐樵. 黑河实验区沙漠和戈壁的总体输送系数. *高原气象.* 1992. 11: 371—380.
- [18] 苏从先, 胡隐樵. 河西地区绿洲的小气候特征和“冷岛效应”. *大气科学.* 1987. 11: 390—396.
- [19] Hu Yinqiao, Su Congxian and Zhang Yongfeng. Research on the microclimate characteristics and cold island effect over a reservoir in the HEXI region. *Advances in Atmos Sci.* 1988. 5: 117—126.
- [20] Hu Yinqiao, Su Congxian and Ge Zhengmo. A two-dimensional and steady-state numerical model of the planetary boundary layer. *Advances in Atmos Sci.* 1988. 5: 523—534.
- [21] 苏从先, 胡隐樵. 绿洲冷岛的行星边界层结构. *气象学报.* 1987. 45: 322—328.
- [22] 张强, 胡隐樵, 王喜红. 黑河地区绿洲内农田微气象特征. *高原气象.* 1992. 211: 361—370.
- [23] Zuo Hongchao, Hu Yinqiao. The comparison and seasonal variation of microclimatic characteristics between oasis

- and Gobi in HEIFE. Proceedings of International Symposium on HEIFE. Kyoto University, Kyoto, Japan, 1993. 402—411.
- [24] 王介民, 刘晓虎, 祁永强. 应用涡旋相关方法确定戈壁地区湍流输送特征的初步研究. 高原气象, 1990, 29: 120—129.
- [25] 胡隐樵, 王俊勤, 左洪超. 临近绿洲的沙漠上空近地面层内水汽输送特征. 高原气象, 1993, 12: 125—132.
- [26] Kai Kenji, Matsuda Mayuni and Sato Ritsuko. Oasis effect observed at the Zhangye oasis in the HEXI Corridor, China. Proceedings of International Symposium on HEIFE. Kyoto University, Kyoto, Japan, 1993.
- [27] Sellers P J, Hall F G, Asrar G, Strebel D E and Murphy R E. An overview of the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE). J Geophys Res. 1992, 97: 18345—18371.
- [28] 胡隐樵. 近地面层湍流通量观测误差的比较. 大气科学, 1990, 14: 215—224.
- [29] Sellers P J and Hall F G. FIFE in 1992: Results, Scientific Gains, and Future Research Directions. J Geophys Res. 1992, 97: 19091—19101.

SOME NEW UNDERSTANDINGS OF PROCESSES AT THE LAND SURFACE IN ARID AREA FROM THE HEIFE

Hu Yinqiao Gao Youxi

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000)

Abstract

The survey for the HEIFE (Atmosphere-Land Surface Processes Experiment at Heihe River Basin, Western China) is given in this paper. Some basic subjects for land-surface processes in arid area are studied. They are: (i) The general characteristics about the energy budget on ground surface in arid area are analysed. The results show that the sensible heat flux on the surface energy budget is in majority, the latent heat flux may be neglected. (ii) The parameterizations of the land surface processes are studied. The influence of atmospheric stratification stability on the turbulent transfer of energy and matter must be considered in parameterizations of land surface processes in arid area. (iii) The interaction, which is a special phenomenon in arid area, between oasis and its desert circumstance is studied. The "cold island effect" phenomenon in oasis and the "inverse humidity" phenomenon in desert near oasis are a result of the interaction between them. The results should improve the understanding of processes at the land surface in arid area.

Key words: Arid area, Energy budget on surface, Parameterization of land-surface processis, Cold island effect, Inverse humidity.