第 20 卷第 1 期
2000 年 1 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol. 20, No. 1
Jan., 2000

河西走廊沙漠和绿洲下垫面生态条件下能量交换若干特征

郑海雷[1]，王介民[2]，米谷俊颜[3]，大龙英治[4]，黄子琛[5]，赵松岭[6]

(1. 厦门大学生物系，厦门 361005；2. 中国科学院兰州高原大气物理研究所，兰州 730000；3. 日本冈山大学资源生物科学研究所，仓敷，710；4. 日本冈山大学文理学院，冈山，700；5. 中国科学院兰州沙漠研究所，兰州 730000；6. 兰州大学干旱农业生态国家重点实验室，兰州 730000)

摘要：在河西走廊黑河地区沙漠和绿洲下垫面生态条件下，用涡旋相关法研究了能量输送的不同模式和日变化进程；以及两种生态条件下能量输送间可能存在的相互关系。在沙漠生态条件下，大部分净辐射用于显热散失，另一部分用于向地下传输，较少部分则用于潜热输送，其方向在白天向下，在夜间向上；其 Bowen 比为 13.16。在绿洲的麦田生态条件下，能量输送的基本模式为：大部分净辐射用于潜热散失，其输送方向与沙漠相反，另一部分用于显热散失，其输送方向一般在午后约 3h 即由上传转为下传。土壤热通量在最大时一般不超过 40W/m^2。冠层光合作用固定的能量则更小，其数量级维持在 10W/m^2 以下，小麦不同生长阶段各能量分量占净辐射的比例有所变化。麦田的 Bowen 比从分蘖期的 0.33 降到拔节期末的 0.095。当有干热大风自沙漠吹向绿洲时观测了典型的绿洲效应，其能量输送模式发生很大变化，显热显著下传，地热流量减弱，潜热散失强烈，起风后约 2h 潜热甚至高于净辐射。表明沙漠的能量组分参与了麦田的能量平衡过程。

关键词：沙漠；绿洲生态系统；能量通量；湍流交换；绿洲效应；鲍恩比

Some characteristics of energy exchange at the underlying surface of desert and oasis in Hexi Corridor

ZHENG Hai-Lei[1], WANG Jie-Min[2], MAITANI Toshihiko[3], OHTAKI Eiji[4], HUANG Zi-Chen[5], ZHAO Song-Ling[6] (1. *Department of Biology Xiamen University, Xiamen* 361005, *China*; 2. *Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. Lanzhou* 730000, *China*; 3. *Research Institute for Bioresources, Okayama University, Kurashiki, Japan.* 710; 4. *College of Liberal Arts and Sciences, Okayama University, Okayama, Japan*, 700; 5. *Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou*, 730000, *China*; 6. *National Key Laboratory of Arid Agroecology, Lanzhou University, Lanzhou* 73000, *China*)

Abstract: With eddy correlation, we studied the pattern and dinurnal variation course of energy transfer for the underlying surface of desert and wheat field in oasis and their possible relationship between two ecological conditions at Heihe River region in Hexi Corridor during the HEIFE project. In the desert, the most net radiation (Rn) was consumed by sensible heat (H) transfer, another part of Rn conducted into desert surface, and a small part of Rn was dissipated by latent heat (LE) transfer on a fine day. We observed that the LE transfered downward in day and upward at night. The Bowen's ratio was 13.16 in desert. At the wheat field in oasis, the basic pattern of energy budget was following. The energy was partitioned by large mount of upward LE, little H which transfer direction was generally from upward to downward after 3h from noon, little heat flux into the soil (G) with the maximum in a day of less than 40 W/m^2 and much little canopy photosynthesis fixed energy (Hp) of less than 10 W/m^2. The ratio of energy component in Rn changed with the growth of spring wheat and the development of canopy. At the wheat field in oasis, the

基金项目：中国科学院、国家自然科学基金委和日本文部省联合资助项目
感谢在 HEIFE **中所有观测期间的所有观测人员**
收稿日期：1996-10-30；**修订日期**：1999-01-30

Bowen's ratio declined from 0.33 to 0.095 in the growth stage of wheat and it varied from tillering to the end of elongation. A typical oasis effect was clearly observed over the wheat field when a dry and warm air blew from the desert. At this moment, the energy transfer pattern changed greatly. We obsrved, more obvious downward H, more less G, and stronger LE dissipation even higher than Rn after 2h from blowing. It is shown that a mount of energy advected from the desert contributed to the energy transfer and balance in the oasis.

Key words: desert; oasis ecosystem; energy flux; turbulence exchange; oasis effect; Bowen's ratio

文章编号:1000-0933(2000)01-0088-05　**中图分类号**:Q149,S181 **文献标识码**:A

不同生态环境下垫面条件下的能量输送特征有着很大差异[1]。对它的研究是陆地-大气间相互作用过程研究的重要组成部分,也是国际地圈生物圈计划(IGBP)中水循环的生物学过程研究(BAHC)的主要内容[2]。"黑河地区地气相互作用的观测试验(HEIFE)"是继国际上 HAPEX 和 FIFE[3]之后的一次大规模陆地生态系统地气相互作用的野外观测试验,是 IGBP 的核心计划 BAHC 的一项重要实施项目之一[4],其主要内容就是研究不同下垫面生态条件下能量和物质的输送过程。观测研究黑河地区沙漠和绿洲麦田的能量输送特征,其内容是 HEIFE 项目中生物气象观测(BOP)计划的中心内容。

1　自然概况与研究方法

1.1　自然概况　HEIFE 试验区的总体概况参见前文[5]。本项研究完成于 HEIFE 的沙漠观测站和绿洲观测站。沙漠观测站位于河西走廊临泽绿洲以北 2km 处,其地理位置为 100°06′E,39°09′N,1480mMSL,下垫面为沙质均匀但沙丘有起伏(<5m)的沙漠,地表无植被分布。绿洲观测站位于河西走廊中部甘肃省农业科学院张掖实验农场,在张掖市西南部 9km 处,距沙漠观测站约 40km,其地理位置为 38°50′N,100°22′E,1565mMSL,是 HEIFE 计划的中心观测站。试验场南北宽 55m,东西长 110m,与观测场相邻的仍是大片的小麦种植区,下垫面为均匀 10m 的农田防护林分布。该地区的气候类型属典型的温带干旱区。年降水量约 100mm,约 60%的降水集中在 7 月到 9 月,只有 3%集中在冬季,降水强度很弱。年潜在蒸发量超过 2000mm,约为年雨量的 20 余倍,年平均气温为 7.6℃;最高达 39.1℃;最低为 −27.3℃,无霜期 168d。在春季多有大风和沙尘暴活动。供试作物为春小麦 W11(*Triticum aestivum* L. cv W11)。于 3 月 25 日播种,7 月 22 日收割。小麦大田密度为 54.5 万株/66.7m^2,灌水和施肥同周围大田。麦田的两次能量输送观测分别在 5 月和 6 月初进行,分别对应春小麦生长的分蘖期和拔节期末,其相对应的作物高度和叶面积指数(LAI)分别为 14.4cm 与 0.5(分蘖期)和 70cm 与 4(拔节期末)。

1.2　研究方法　①净辐射(Rn),由 EKO 辐射观测系统(英弘精械株式会社)测定,系统由上下安装的 MS-801 型全天辐射仪组成,信号通过 MI-010S-6 型转换器将数据贮存在 DL-100M 型磁卡(TEAC Inc.)上,采样间隔为 1h 或 15min(6 月 3～6 日)。②土壤热通量(G),由安装在地下 10cm 处(麦田)和 5cm 处(沙漠)的 W3983 型热流板完成(Vaisala, Finland)。③显热通量(H)和潜热通量(LE),用涡旋相关法原理测定。观测系统(KaijoDenki, Japan)离地面 1.5m 高,主要部分有 DAT-300 型超声风速温度计(声程 20cm,温度探头为直径 12μm 的铼钨丝,其时间常数<0.1s,测定范围分别为 0～30m/s 和 −10～40℃,分辨率为 0.005m/s 和 0.025℃),AH-300 型标准红外湿度计(光程 20cm,波长 2.61μm,测定范围在 0%～100% RH,脉动在 0%～50gH_2O/m^3)以及 E009 型红外 CO_2/H_2O 分析仪(Advanet, Inc., Japan)组成。以上几部分分别直接观测三维风速、湿度、温度和 CO_2 浓度的平均值和瞬时脉动值。另外还有几部分辅助设施有 CM-100 型倾斜仪(测定范围 ±5°)和 502MSA 型回转台(测定范围 0～360°)以及数据采集计算机(NEC9801)。该系统采样频率为 10Hz,每隔 2h 采集一次数据,每次采集持续 30min。再通过下式求出 H、LE 和 CO_2 垂直通量(Fc)[6,7]:

$$\begin{cases} H = \rho C pd\,\overline{W'T'} + \rho T(Cpv - Cpd)\,\overline{W'q'} \\ LE = \lambda\rho\,\overline{W'q'} \\ Fc = \overline{W'C'} \end{cases}$$

上式中 ρ 是空气密度，λ 为水的汽化潜热，Cpd 和 Cpv 分别为常压下干空气和水蒸汽的比热，W' 为风速在垂直方向分量的脉动值，T 为气温，T'、q' 和 C' 分别为温度、比湿及 CO_2 浓度的瞬时脉动量。经 Brook[8] 及 Kaimal 和 Gaynor[9] 的方法，通过对风速和水汽影响的校正后可得出 H、LE 和 Fc。④冠层光合作用固定能量（Hp），根据测出的 Fc，用 $Hp=\alpha Fc$ 式可求出 Hp。式中 α 为辐射能转化为生物能的转化因子，根据 Jones[10] 取 α 为 10.91W/mgCO_2/s。⑤风温湿的测定，与湍流测定系统同时进行了风速、气温和相对湿度的测定，测定由 MILOS-200 型自动气象站（Vaisala，Finland）进行，自动气象站高 20m，观测前各探头和整个系统都进行了全面校正。风速由 WAA15 型风速仪测定，测定范围 0～75m/s，起风速度 0.4m/s，精度±0.1m/s。气温由 DTS12 型铂电阻温度探头（最大直径 15mm）测定，灵敏度 0.385Ω/℃；精度为 0.08℃（0℃时）。湿度由 HMP30u 型湿度探头测定，测定范围 0～100%RH，温度系数±0.05%RH/℃，精度为 2%（20℃时）。各探头获得信号后将信息贮存在 27C512 型固态贮存介质 EPROM 上，采样间隔为 1h 整个系统由太阳能电池供电。本文所采用的时间均为 105°E 的地方时。

2 结果与讨论

2.1 沙漠下垫面条件下的能量交换特征

图 1 给出了在一典型夏季晴天沙漠生态条件下近地表的能量平衡各组分输送的日变化。可以看出 Rn 中的大部分能量用于显热散失，一部分能量用于向地下传输。Rn、H 和 G 的变化模式和 Panofsky 与 Dutton[11] 所描述的在裸露地表的日变化模式极为相似。然而所不同的是 LE 在白天的时间里始终向下，表明白天不仅地表蒸发为零，反而有水汽向下输送。其 LE 的最大值可达 50W/m^2，而水汽在白天向下传输的平均速度也有 10g/m^2·h。与白天相反，夜间的 Rn、H 和 G 接近与零或呈负值，LE 却呈正值，表明潜热开始向大气传送，即夜间有自地表向大气的水汽蒸发过程，其数量级与白天的下传过程相同。可以认为这一特殊现象是特定沙漠生态条件下近地面能量输送的特有模式。通过自动气象站和系留气球的观测[12]，白天在沙漠上方自地表 1.5m 到 450m 空气中的比湿呈明显的逆湿分布。这一现象的发生和沙漠-绿洲的局地相互作用有密切的关系，在白天，绿洲上传的 LE 通过平移作用将大量由绿洲植被蒸腾散失的水汽带到沙漠上空，通过强烈的湍流交换过程将一部分水汽下传，造成 LE 的负值，由于在白天沙漠地表温度很高和非常干燥，向下输送的水汽没有条件在地表出现凝结现象。水汽的下传和地表的低蒸发对于生长在特定戈壁沙漠环境条件下（即沙漠和绿洲之间要有水汽的水平移动）的植物具有特殊的生态学作用和意义。

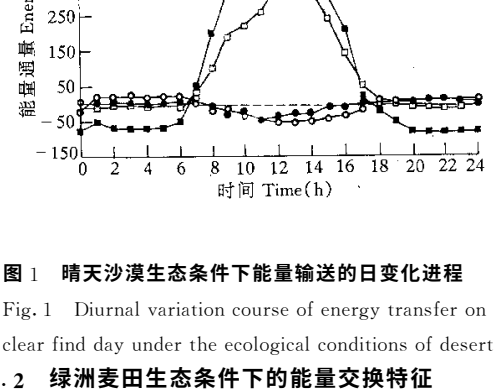

图 1 晴天沙漠生态条件下能量输送的日变化进程

Fig. 1 Diurnal variation course of energy transfer on a clear find day under the ecological conditions of desert

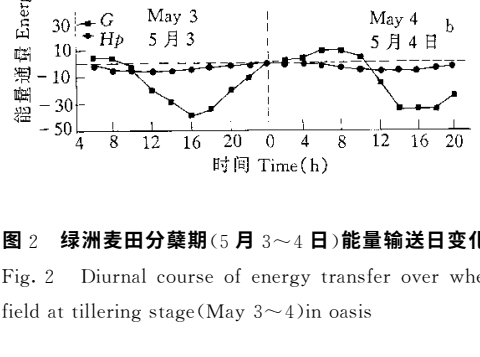

图 2 绿洲麦田分蘖期（5 月 3～4 日）能量输送日变化

Fig. 2 Diurnal course of energy transfer over wheat field at tillering stage(May 3～4)in oasis

2.2 绿洲麦田生态条件下的能量交换特征

与沙漠不同，由于绿洲中生长有植物，所以其能量输送模式有很大差别。对比图 1 和图 3 中的 6 月 3 日（典型晴天，麦田），可以看出：在绿洲的麦田，LE 在白天占 Rn 的很大部分，表明麦田蒸腾强烈，H 占 Rn 很小部分，其峰值一般出现在午前，午后显热交换减弱，到午后 3～4h 时 H 甚至变成负值，即意向下输送。Rn

中的另一部分能量用于向地下传输，然而与沙漠相比，此分量值相对较小，在午时最大值也不超过 20W/m^2。另一个与沙漠不同的特征是植物冠层通过光合作用固定了一部分能量，其值在午时约达 10W/m^2。虽然此分量与 Rn 相比相对很小，但其生态学意义是重大的。正因为这很小的能量被固定，才使植物完成生长发育，从而反过来改变了潜热和显热的输送模式。不仅如此，植物不同生长期的能量输送特征也有所区别。图 2 和图 3 是绿洲生态条件下春小麦麦田在分蘖期和拔节期末的能量平衡各组分输送过程日变化的连续观测结果。在分蘖期，植株矮小，叶面积指数(LAI)很低，CO_2 向冠层输送的强度也相对较弱，所以 Hp 也较小，其最大值约只有 5W/m^2。由于 LAI 低，小麦冠层没有达到充分郁闭，此时 G 较大，最大值达近 40W/m^2，比沙漠稍小，而较拔节期末要大。在拔节期末，冠层 LAI 增大，生长旺盛，Hp 最大值达 10W/m^2，远高于分蘖期的 Hp，而此时冠层充分郁闭，Rn 中用于向地下传送的能量变得很弱。与分蘖期相比，拔节期末冠层上方的 LE 和 H 的日变化模式基本相似。

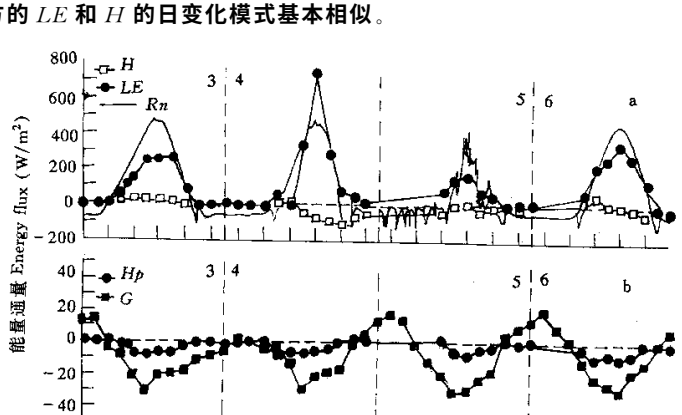

图 3　绿洲麦田拔节期末(6 月 3～6 日)能量输送日变化进程

Fig. 3　Diurnal course of energy transfer over wheat field at the end of elongation stage(June 3～6)in oasis

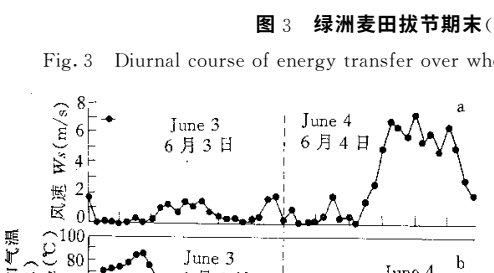

图 4　1992 年 6 月 3～4 日麦田上方 8m 高处风速(a，Ws)、气温(Ta)和相对湿度(RH)的日变化

Fig. 4　Diurnal course of $Ws(a)$, $Ta(b, — \cdot —)$ and $RH(b, —\circ—)$ at the height of 8m over wheat field on June 3～4, 1992

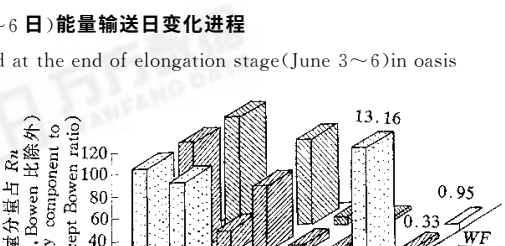

图 5　典型晴天沙漠和麦田能量平衡各组分占 Rn 的比例及 Bowen 比

Fig. 5　Ratio of energy budget components in Rn and Bowen's ratio over desert and wheat field surface on a typical fine day　D: 沙漠 Desert; WF-T: 麦田-分蘖期 Wheat Field-Tillering; WF-EE: 麦田-拔节期末 Wheat Field-End Elongation

当有干热大风自沙漠吹向绿洲时(图 4，6 月 4 日午后)，麦田的能量输送模式发生了巨大变化，潜热输送强烈，在午后 2h LE 甚至高出净辐射，显热明显下传，且最大值高达近 110W/m^2，相应地 G 也变得相对

很弱。午后，麦田上方 8m 处的温湿度状况与 6 月 3 日(典型晴天，风速＜2m/s)相比，温度维持在较高水平，而湿度则维持在较低水平，这些特征说明 6 月 4 日午后出现了明显的绿洲效应。表明伴随着来自沙漠的干热大风，有能量的平移现象发生。通过对 6 月 3 日和 6 月 4 日午后至子夜各时段各能量组分的对比分析，这一平移的能量约高达 4.2MJ/m^2，约为净辐射的一半。可见在沙漠-绿洲相间分布的绿洲生态系统，其能量来源不仅有 Rn，而且还有来自周围沙漠通过平移作用输送的能量。

对比沙漠近地表的能量输送特征，可以认为沙漠和绿洲的能量平衡和输送过程，在一定程度上是相互影响的，一个生态系统的能量通过水平移动对另一个生态系统的能量输送和能量平衡做出贡献。

2.3 两种生态条件下能量平衡各分量和 Bowen 比的差异

不同生态系统中由于下垫面条件不同造成了能量输送的差异进而使能量平衡各分量的在 Rn 中的比例不同，同时也造成了 Bowen 比(H/LE)的巨大差异。对典型晴天全天各时刻能量输送的观测值进行累加后的分析结果(图 5)，表明沙漠近地面的能量平衡各组分中 H 占了 Rn 的 88.1%；LE 只占有 6.7%；G 约 6.3%；Bowen 比为 13.16，这一数值要比 TsuRamoto 等[13]于沙漠不同季节观测到的 Bowen 比在 2.69～10 的范围要大。绿洲麦田的能量平衡各级分中，随着小麦的生长，冠层的发育，H 从分蘖期占 Rn 的 20.2%下降到拔节期末的 7.5%；LE 则从分蘖期的 60.3%上升到拔节期末的 78.9%；Bowen 比相应地从 0.33 降到 0.095. G 占 Rn 的比例在两个生育期基本保持稳定的 10%左右；Hp 则不然，其占 Rn 的比例从分蘖期的 1.8%上升到拔节期末的 2.5%，显示了小麦在拔节期末旺盛的 CO_2 代谢活动。

3 结 论

3.1 在河西走廊黑河地区沙漠下垫面生态条件下，能量输送模式和日变化进程，表明 Rn 中的大部分能量用于显热散失，另一部分用于向地下传输，较少部分则用于潜热输送，其方向在白天向下，在夜间向上；表明在白天有水汽自高空向地表输送，这对生长在沙漠生态条件下的植物具有重要的生态学意义。

3.2 在绿洲麦田生态条件下，能量输送的基本模式表现为，Rn 中的大部分能量用于潜热散失，其输送方向与沙漠相反，另一部分用于显热散失，其输送方向在午后约 3h 即由上传转为下传，向土壤中传输的能量在最大时一般不超过 40W/m^2。冠层光合作用固定的能量则更小，其数量级维持在 10W/m^2 以下。

3.3 由于不同下垫面生态条件下的能量输送不同，造成了能量平衡的差异，因此也造成了 Bowen 比的差异，沙漠的 Bowe 比高达 13.16；处于分蘖期麦田的 Bowen 比为 0.33；处于拔节期末麦田的 Bowen 比为 0.095。

参考文献

[1] Monteith J L. *Vegetation and the Atmosphere*. Vol 2. London: Academic Press. 1976.

[2] 林 海，殷显曦. 我国大气科学发展战略研究. 地球科学进展，1992，**7**(4)：39～46.

[3] 高由禧. 国家自然科学基金重大项目"HEIFE"专刊(1)前言. 高原气象，1990，**9**(2)：1～2.

[4] 陈家宜. 黑河地区地气相互作用观测试验研究. 地球科学进展，1992，**7**(4)：90～91

[5] Wang J M，Sahashi K and Mitsuta Y. Outline of HEIFE field observations. In: *Proceedings of International Symposium on HEIFE*. Mitsuta Y ed. Kyoto: Kyoto University. 1993. 22～29.

[6] Mitsuta Y. Sonic anemometer-thermometer for atmospheric turbulences measurements. *Flow*. Vol Ⅱ. Dowdell R B ed. Pittsburgh: Instrument Soc. America. 1974. 25～37.

[7] Ohtaki E. On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide，water vapor and temperature over vegetated fields. *Boundary-Layer Meteorol*. 1985，**32**：341～348.

[8] Brook R R. The influence of water vapor fluctuations on turbulent fluxes. *Boundary-Layer Meteorol*. 1978，**15**：481～487.

[9] Kaimal J C and Gaynor J E. Another Look at sonic thermometry. *Boundary-Layer Meteorol*. 1991，**56**：401～410.

[10] Jones H G. *Plants and Microclimate——A quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge: Cambridge University Press. 1983. 85～87.

[11] Panofsky H A and Dutton J A. *Atmospheric Turbulence*. New York: John Wiley & Sons. 1983.

[12] Wang J M and Mituta Y. Evaporation from the desert——A preliminary results of HEIFE. *HEIFE Report*，1991，(6)：37～48.

[13] Tsukamoto O，Sahashi K，Mistuta Y，*et al*. Variation of heat budget accompanied by plant growth. *International Symposium on HEIFE*(Mitsuta Y. ed.). Kyoto: Kyoto University. 1993. 458～465.