

黄土高原典型塬区冬小麦地表辐射和能量平衡特征

李振朝 韦志刚 文 军 张堂堂 刘远永

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部气候环境与灾害实验室, 兰州 730000

摘 要 利用2006年4~7月黄土高原陆气相互作用试验实际观测资料, 分析了黄土高原典型塬区冬小麦生长过程中不同天气条件下的地表通量特征。发现在不同天气条件下辐射平衡和能量平衡特征有很大变化。地面向上长波辐射在晴天、阴天、降水天时依次减小, 到达峰值时间约滞后总辐射峰值到达时间1 h左右。大气向下长波辐射与地表向上长波恰恰相反, 晴天量值最小, 基本稳定在 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右, 阴天和降水天依次增大。潜热是能量通量的主要消耗项, 在夜间也大于零, 夜间感热则为负值。土壤热通量达到峰值时间滞后于净辐射峰值到达时间约1.5 h, 其日平均值晴天为正, 阴天约为零, 降水天则为负值。日平均波文比阴天大于晴天和降水天。植被覆盖度高时, 土壤植被系统截留的总辐射也高。

关键词 黄土高原 冬小麦 辐射平衡 能量平衡

文章编号 1006-9585 (2008) 06-0751-08 **中图分类号** P422.4 **文献标识码** A

Study of Land Surface Radiation and Energy Balance at Winter Wheat Fields over Typical Mesa of Chinese Loess Plateau

LI Zhen-Chao, WEI Zhi-Gang, WEN Jun, ZHANG Tang-Tang, and LIU Yuan-Yong

Laboratory for Climate Environment and Disasters of Western China, Cold and Arid Regions

Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

Abstract Based on the observations of Loess Plateau Experiments from April—July in 2007, characteristics of land surface flux of the growing winter wheat in different weather conditions over the typical mesa of Chinese Loess Plateau are analyzed. The results indicate that there is large variation in the energy balance in different weather conditions. The value of the upward long-wave radiance is the largest in sunny and decreases in turn in a cloudy and rainy day. The time of the upward long-wave radiance reaches the maximum is 1 hour later than that of the total radiance. The condition of the downward long-wave radiance is just contrary to the upward long-wave radiance, and it reaches a minimum of about $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in a sunny day and successive increases in a cloudy and rainy day. The latent heat flux is a main consumption part, which is positive in the night. However, the sensible heat flux is negative in the night. The time of the soil heat flux reaches the maximum is 90 minutes later than that of the total radiance. The daily average of the soil heat flux is positive in a sunny day; it is about zero in a cloudy day and negative in a rainy day. Daily average Bowen ratio in a cloudy day is larger than that in a sunny and rainy day. When the vegetation cover is larger, the total radiance intercepted by the vegetation and soil is larger too.

Key words Loess plateau, winter wheat, radiation balance, energy balance

收稿日期 2007-10-09 收到, 2008-09-28 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-220、中国科学院百人计划项目 2004406 和中国科学院野外台站基金项目“黄土高原陆—气相互作用的初步观测试验研究”

作者简介 李振朝, 男, 1975年出生, 助理研究员, 主要从事西北干旱气候及陆面过程研究。E-mail: zhenchaoli@lzb.ac.cn

1 引言

当前对陆气相互作用的观测和陆气相互作用对季风 and 气候影响的研究, 已成为国际气候变化及其可预测性研究计划 (CLIVAR) 以及全球能量和水分循环研究计划 (GEWEX) 的重点内容。我国自 20 世纪 80 年代末开始也相继开展了“黑河地区地气相互作用观测试验研究” (HEIFE)、“内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用” (IMGRASS)、“第二次青藏高原大气科学试验 (TIPEX)”、亚洲季风实验-青藏高原实验 (GAME-Tibet) 及“干旱区陆气相互作用的观测试验研究”等。特别是干旱、半干旱区陆气相互作用的研究不仅为亚非国家所重视, 而且受到许多欧美学者的重视。已有的研究结果证明, 青藏高原、西北干旱区等不同下垫面的陆面过程有很大的差异, 李家伦等^[1]利用西藏西部改则地区大气边界层的湍流观测资料发现该地区太阳总辐射很大, 瞬时值可以超过 $1\,370\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; 布和朝鲁等^[2]利用 NCEP 资料分析得出, 夏季我国干旱、半干旱区在整个欧亚大陆上是陆面感热通量最强的地方, 与此对应的陆面潜热通量则最弱。陆面所接收的太阳短波辐射主要以感热和长波辐射的能量形式释放。朱德琴等^[3]比较分析了我国典型干旱区敦煌戈壁、临泽沙漠和藏北高原五道梁地区地表辐射能量的收支特征, 发现三地有很大的不同。黄土高原横跨干旱、半干旱及半湿润地区, 且黄土高原西连祁连山, 东至吕梁山, 南界秦岭, 北达河套, 为我国第二大高原。其幅员辽阔, 复杂下垫面上的陆气相互作用不仅直接影响到黄土高原地区的气候和环境变化, 而且对东亚、乃至全球的气候和环境变化可能产生重要影响。黄土高原陆气相互作用的重要性已经引起有关专家的重视, 国家气象局兰州干旱气象研究所在甘肃省定西市架设了一套涡动相关系统, 做了部分有关能量平衡特征的工作^[4~7]。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所依托平凉雷电与雹暴试验站, 于 2004 年 7 月启动了黄土高原陆气相互作用的预实验 LOPEX04 (Loess Plateau Experiments), 2005 年正式进行了大型的陆气相互作用试验 (LOPEX05), 继而又于 2006 年 4 月开始进行了补充试验。利用

LOPEX 资料, Wen 等^[8]对黄土高原塬区夏季地表水热交换特征进行了研究, 认为该地区的能量不平衡很明显; 韦志刚等^[9]初步分析了黄土高原塬上裸地、塬上和塬下玉米地的地表净辐射各分量、感热、潜热和地热流的特征。由于作物 (玉米) 的存在, 降低了地表反射率, 使白天地面向上短波减少, 同时向上长波也减少, 增大了地表净辐射, 地表潜热明显增大, 玉米地白天向下的地热流和夜晚向上的地热流都比裸地小。刘远永等^[10]发现对于地气能量交换各个分量而言, 黄土高原塬上和塬下在相同下垫面下的差别不大, 但裸地和有植被的下垫面差别很明显。白天, 潜热在净辐射中所占的比重较大, 其次是感热, 再次是土壤热通量。对能量平衡中的储存项如热通量板上层土壤的热存储和植被冠层存储进行估算, 发现土壤的热存储项在 $-30\sim 70\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 而植被的热存储项在 $-10\sim 25\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。冬小麦作为黄土高原塬区的主要农作物, 其下垫面是黄土高原塬区的主要特征下垫面之一, 在冬小麦由返青到成熟过程中, 冠层对地表的覆盖程度变化很大, 因此有必要探讨在冬小麦生长过程中, 辐射收支、能量平衡的特征。

2 观测试验简介

研究区域以平凉白庙塬为主, 白庙塬位于甘肃省东部的黄土高原腹地, 是平凉北塬的主要组成部分。塬上比较平坦, 平均海拔高度 $1\,600\text{ m}$, 宽度从几千米到十几千米, 长度则达 40 余千米, 年降水约 500 mm , 属温带半湿润区, 是平凉地区典型的黄土塬。图 1^[11]给出了黄土高原塬区土地利用和站点设置情况。本次试验塬区所在区域为耕种区, 土壤属于垆土和黄绵土, 沟壑纵横, 森林植被稀少, 仅在居住区有少量树木。该区除农田外主要植被为大针茅、短花针茅、长芒草等, 邻近的崆峒山、崇信县南部和六盘山区有部分林地。主要农作物为玉米和小麦, 也种植诸如谷、糜、胡麻、苜蓿和洋芋等作物, 但种植面积较小。虽然建立了提灌系统, 但由于塬下泾河水量不足, 不能提水, 水利设施形同虚设, 塬上农业生产仍然依赖自然降水。该地区由于海拔较高, 受气候

条件限制, 农作物为一年一熟。一般 8 月中下旬小麦播种, 次年 6 月中下旬收割, 玉米在 3 月播种, 8 月下旬或 9 月上旬收成。其余时段除苜蓿地外土地闲置, 下垫面为裸地。本文所用资料为 2006 年黄土高原陆气相互作用观测试验的补充试验 (LOPEX06) 期间所得到的资料, 试验共设柴寺和塔站两个站点, 所处位置见图 1。两站直线距离约为 2 km 左右, 其中, 柴寺 ($35^{\circ}35'33.2''\text{N}$, $106^{\circ}41'10.1''\text{E}$) 为冬小麦的下垫面, 而塔站 ($35^{\circ}34'36''\text{N}$, $106^{\circ}42'6.1''\text{E}$) 为稀疏的胡麻地, 可视为裸地。试验所用仪器为荷兰 Kipp & Zonen 公司生产的 CNR-1 四分量净辐射仪。向上和向下的 CM3 分别测量太阳总辐射和地表反射辐射, 向上和向下的 CG3 分别测量大气长波辐射和地表长波辐射, 净辐射由数据采集器程序根据观测的短波和长波辐射计算得到。仪器架高 2 m, csat3 在 3 m 高处。土壤湿度埋深分别是 5、10、20 和 40 cm, 土壤热通量分别是 5 和 10 cm。数据采集器采用美国 Campbell 公司生产的 CR5000, 每 30 min 取一次资料, 所取通量资料均已利用 WPL 变换和坐标旋转法进行了订正。试验时段为 2006 年 4 月 13 日~7 月 15 日, 覆盖了冬小麦由返青到收割的全部生长过程。

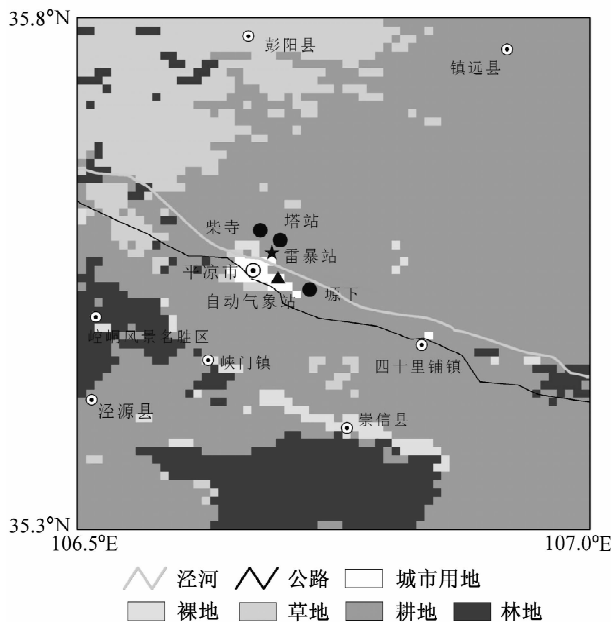


图 1 站点分布及土地利用

Fig. 1 Distribution of stations and land use

3 不同天气条件下能量和辐射平衡

本文选择典型晴天 (太阳辐射完全不受云的影响)、阴天 (总云量 >8 成) 和降水天气个例, 比较它们的地表辐射平衡和热量平衡特征。其中, 晴天选 4 月 29~30 日, 阴天选 5 月 2~3 日, 降水天选择 6 月 20~21 日。

图 2 为平凉白庙塬冬小麦下垫面条件下典型晴天、阴天和降水天气地表辐射平衡的日变化比较。从图中可以看出, 晴天时, 除大气向下长波辐射 (R_{al}) 外, 辐射各分量具有明显的日变化特征, 总辐射在日出后随时间推移逐渐增大。在本个例的两天中, 总辐射在 13:30 (北京时间, 下同) 分别达到最大值 983 和 1 008 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 反射太阳辐射、净辐射 (R_{u}) 日间变化趋势和总辐射的变化趋势一致, 出现最大值的时间和总辐射出现最大值的时间也是一致的。大气向下长波辐射全天变化不大, 基本稳定在 300 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。地面向上长波辐射 (R_{ul}) 夜间略低于 400 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 白天峰值约 550 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 全天变幅约 150 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。因其值大小和地面温度关系密切, 而地面吸收辐射能量温度升高, 有一个相对滞后的过程, 地面向上长波辐射达到最大值的时间比总辐射达到最大值的时间约滞后 1 h 左右。晴天 (以 4 月 29 日为例) 地表反照率从 08:00~20:00, 呈规则的抛物线型 (图略), 其早晚大, 中午小, 早晚最大都超过 0.28, 中午只有不到 0.19。出现最小值的时间是 14:00。从 08:00~20:00 全天平均的地表反照率为 0.21。

阴天时, 总辐射及辐射各分量日变化规律和晴天的相比有很大的不同, 远没有晴天时的日变化规则, 总辐射以及辐射各分量的变化明显受到云量的影响, 变化呈无规则型。中午应该是总辐射、反射太阳辐射以及净辐射最大的时刻, 但是在 5 月 2 日的个例中, 可能是受云量的影响, 反而低于上午和下午的辐射值, 总辐射日最大值为 570 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 5 月 3 日的最大总辐射值也仅略大于 600 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 远低于晴天的总辐射值。大气向下长波辐射与晴天相比略有增加, 平均约增加 30 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 且随云量的变化, 白天增加较为明显。地面向上长波辐射也有日变化, 但变化幅度远小

于晴天的变化幅度, 峰值只有 $450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。地表反照率的变化趋势和晴天相同, 只是平均略有减小, 变化略有波动。

降水天时, 辐射平衡与平时有很大的区别, 总辐射、净辐射和地表反射辐射都变的很小。以降水比较连续的 5 月 9 日为例 (图略), 总辐射全

天最大值只有 $163 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 不足晴天最大值的 $1/5$, 且变化没有规律性, 向下长波辐射和地表向上长波辐射日变化不明显。大气向下长波辐射日平均值在降水天时高于阴天, 更高于晴天, 其值分别是 336 、 323 和 $302 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。而地表向上长波辐射则恰恰相反, 其日平均值雨天低于阴天, 更低于晴天, 这是因为同一下垫面地表向上长波辐射只与温度有关。在降水天、阴天和晴天时日平均值分别是 355 、 403 和 $429 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由 6 月 20~21 日连续两个降水日的地表辐射平衡图中 (图 2c) 可见, 虽然辐射各分量量值和 5 月 9 日不同, 但其变化特征是一致的, 地表反照率的变化趋势和晴天、阴天相同, 只是平均值又有减小, 变化比阴天时波动更大一些。

图 3 为冬小麦生长旺盛时期典型晴天和阴天地表能量平衡的日变化比较, 由于降水天的通量测量不可信, 故这里不予分析。由图可见晴天时, 净辐射在夜间为负值, 日出后转为正值, 之后随太阳辐射的加强而逐渐增大, 13:30 达到最大值。潜热 (L_E) 在夜间也大于零。感热 (H_s) 白天为正值, 表示地表向大气输送能量, 夜间为负值, 即感热由大气向地表输送。感热、潜热和土壤热通量 (G) 的日变化规律和净辐射日变化规律一致。晴天以 4 月 29 日为例, 潜热、感热和土壤热通量的日平均值分别是 69 、 29 、 $19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 说明能量主要消耗于农田蒸散, 其次是大气运动引起的感热交换, 仅在太阳活动最强烈的中午时分, 感热大于潜热。其日平均波文比为 0.41 , 日最大波文比为 1.46 , 这主要是因为夜间感热为负值, 而潜热为正值, 虽然白天感热和潜热量值接近, 但日平均波文比却较小。用于土壤热交换的能量也较小, 日最大值不足 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 日平均土壤热通量仅占日平均净辐射的 15% 左右, 土壤热通量达到峰值的时间比净辐射达到峰值的时间约滞后 1.5 h 。能量不平衡率在日出和日落附近较大, 可以达到 0.6 以上, 这主要因为在日出和日落前后, 是净辐射转变符号的时刻, 净辐射的绝对值很小。下午的能量不平衡率最小, 最小值只有 0.1 左右。全天的能量不平衡率为 0.38 。本文中所用的地热流量是 5 cm 埋深值, 上面有 5 cm 土壤储存能量, 显然加大了能量不平衡率。

阴天时, 潜热、感热和地热流量的日平均值

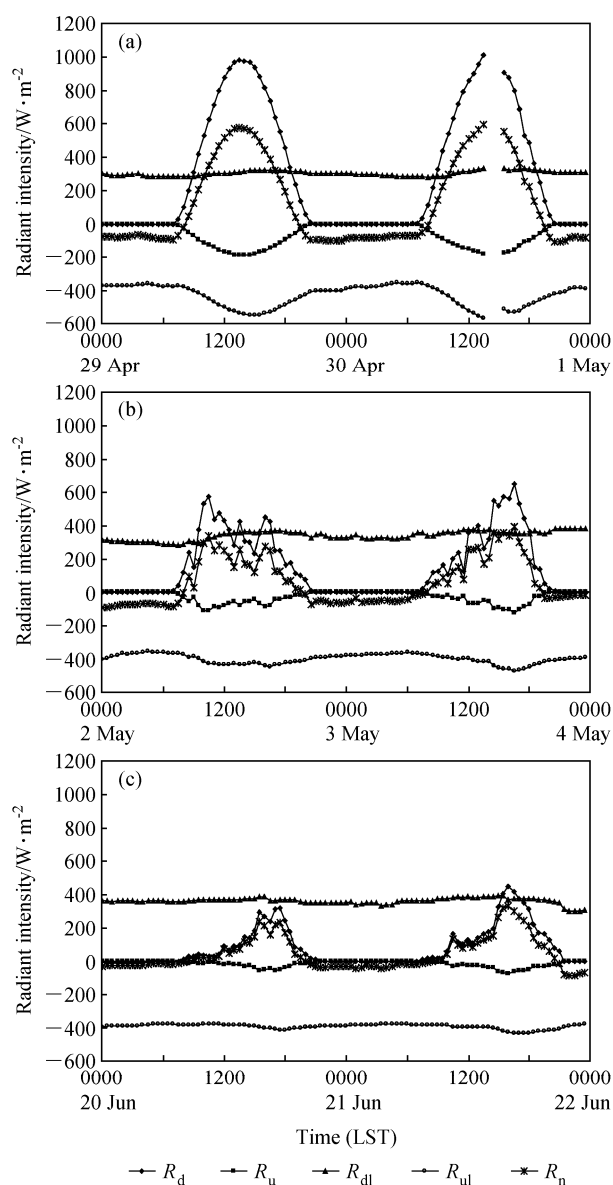


图 2 冬小麦下垫面型天气条件下地表辐射平衡的日变化比较: (a) 晴天; (b) 阴天; (c) 降水天 (R_d 为向下短波辐射, R_u 为地表向上短波辐射)

Fig. 2 The diurnal variation of radiation under different types of weather conditions over winter wheat field: (a) clear; (b) cloudy (c) rain (R_d is the downward short-wave radiation, R_u is the outgoing short-wave radiation)

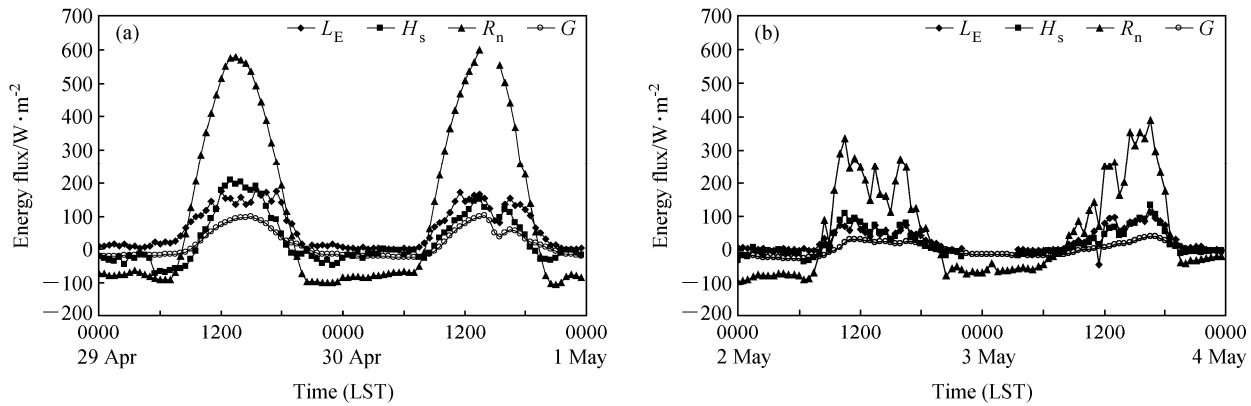


图3 冬小麦下垫面典型天气条件下地表能量平衡的日变化比较: (a) 晴天; (b) 阴天

Fig. 3 The diurnal variation of energy under different types of weather conditions over winter wheat field: (a) clear; (b) cloudy

比晴天有较大幅度的减小, 日平均波文比大于 0.7, 较晴天反而有所增加。这是因为云量大, 到达地面的辐射能量减少, 同时抑制了田间蒸散(发)和感热交换的发生, 而潜热由于空气相对湿度增加较大, 量值减少更多, 导致波文比较晴天时还大。土壤热通量因土壤夜间释放的热储存量与白天吸收的热通量相当, 日平均值接近于零。降水天时, 土壤热通量一直是负值, 表明土壤一直在向大气释放热储存量。

4 多日平均的能量平衡和辐射平衡特征

黄土高原典型塬区冬小麦生长季节平均地表能量和辐射平衡特征与典型天气相比有多大差别? 云和降水对其产生的扰动影响有多大? 是值得继续深入研究的问题, 也是众多研究者关心的问题。这里给出平凉白庙塬冬小麦下垫面条件下 4 月 27 日~7 月 14 日多日平均的能量平衡和辐射平衡日变化, 如图 4。可以看出平均的地表能量和辐射日变化与晴天的日变化特征基本一致, 这说明在该地区、该时段内晴天的地表能量平衡和辐射平衡特征有一定的代表性。但是由于云和降水天气的扰动, 使平均地表总辐射、反射太阳辐射和净辐射明显削弱, 总辐射峰值削弱了 $250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右, 反射辐射、净辐射和地表向上长波辐射也分别削弱了 50、70 和 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上, 向下长波辐射比晴天略有增长。平均地表向上长波到达峰值时间仍比总辐射滞后 1 h 左右。平均地表反照率

比晴天略有减小, 最小值为 0.17 左右, 日平均值不到 0.2。感热通量也比晴天明显减弱, 峰值减弱幅度约为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 地热流量减弱幅度比感热略小, 但大于潜热减弱的幅度。多日平均的地表净辐射、感热、潜热和地表热通量日平均值分别为 117、37、58、和 $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 能量不平衡部分约为净辐射的 15% 左右。

图 5 是 4 月 27 日~7 月 14 日的平均波文比日变化, 表明夜间波文比均为负值, 且波动较大。这主要是夜间湍流较小, 同时仪器存在测量误差所致。日出以后, 波文比逐渐增大, 到 14:00 左右达到最大值 1.12, 这和张强等^[12]分析的敦煌戈壁地区日平均波文比有很大的区别。敦煌的日平均波文比全天基本大于 1, 且变化剧烈, 在 12:00 最大在 100 以上。平凉白庙塬冬小麦下垫面上的波文比最大值也仅仅略大于 1。说明下垫面的差异造成的能量分配也有很大的不同。

整个冬小麦生长过程的感热、潜热日平均变化表明(图 6), 在冬小麦返青初期, 由于植被覆盖度较低, 日平均感热值大于潜热值, 随着冬小麦的生长, 植被覆盖度加大, 地表能量通量中潜热逐渐占据主导地位, 呈逐渐上升的趋势, 感热略有减小, 这种变化一直维持到 5 月中旬小麦的乳熟期以后。在小麦含水量逐渐变小, 植株变干变黄时, 感热量值逐渐升高, 潜热通量迅速减小。在 6 月中旬小麦收割完毕后, 感热通量明显高于潜热通量。从冬小麦生长过程中日平均地表反照率变化的趋势线(图略)可以看出反照率在植被生长旺盛、植被覆盖度高的时期, 明显低于植株

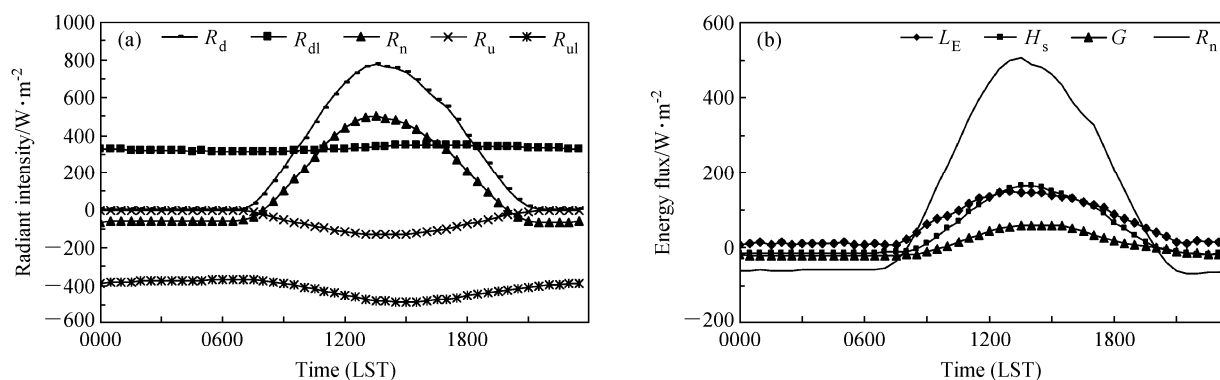


图4 冬小麦下垫面4月27日~7月14日 (a) 地表辐射平衡和 (b) 能量平衡的平均日变化

Fig. 4 Diurnal variation of the (a) mean radiation and (b) energy flux from 27 Apr to 14 Jul

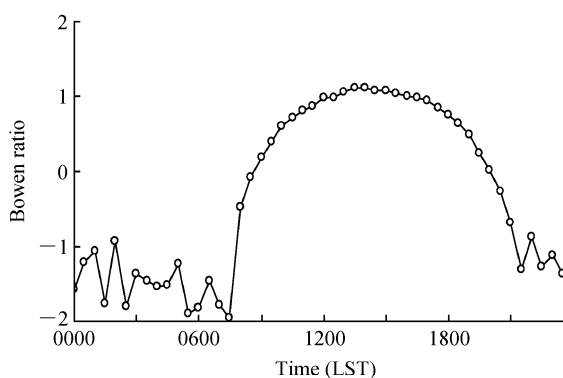


图5 冬小麦下垫面4月27日~7月14日 Bowen比日平均变化

Fig. 5 Diurnal variation of the mean bowen ratio from 27 Apr to 14 Jul

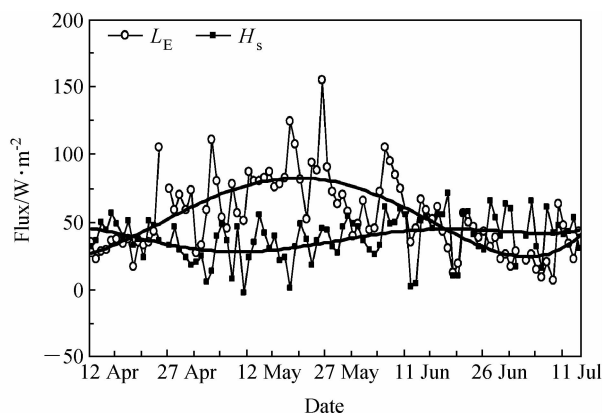


图6 冬小麦下垫面4月12日~7月14日感热、潜热日平均变化

Fig. 6 Daily variation of the mean sensible heat and latent heat flux from 12 Apr to 14 Jul

刚开始返青时期以及小麦成熟时期,更低于小麦收割完毕后的裸土时期。说明植被覆盖度高时,土壤植被系统截留的总辐射也高。

5 结论与讨论

(1) 不同天气条件下冬小麦下垫面辐射平衡规律不同。晴天,辐射通量变化规则,总辐射、净辐射、反射辐射的变化趋势一致,中午时达最大值。阴天和降水天,辐射通量变化规律远没有晴天规则,辐射各分量除大气向下长波辐射外都有不同程度的减小,降水天的总辐射大约只有晴天的1/5。地面向上长波辐射晴天、阴天、降水天依次减小,到达峰值时间约滞后总辐射峰值到达时间1 h左右。大气向下长波辐射与地表向上长波恰恰相反,晴天量值最小,基本稳定在 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,阴天和降水天依次增大。

(2) 不同天气条件下,冬小麦下垫面能量平衡规律也有不同,阴天、降水天的能量通量变化远没有晴天时规则。潜热是能量通量的主要消耗项,在夜间也大于零,说明夜间也存在蒸发现象,夜间感热则为负值。土壤热通量达到峰值时间滞后于净辐射峰值到达时间约1.5 h,其日平均值晴天为正,阴天约为零,降水天则为负值。日平均 Bowen比阴天大于晴天和降水天。

(3) 由于云和降水天气的扰动,使多日平均的地表总辐射、反射辐射和净辐射明显削弱,向下长波辐射比晴天时略有增长。平均地表反照率比晴天时略有减小,最小值为0.17左右,日平均值不到0.2。其感热通量也比晴天明显减弱,峰值减弱幅度约为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,地热流量减弱幅度比感热略小,但大于潜热减弱的幅度。能量不平衡部分约为净辐射的15%左右。4月27日~7月14

日的平均波文比夜间均为负值, 且波动较大, 日出以后, 波文比逐渐增大, 到 14:00 左右达到最大值 1.12, 和敦煌戈壁地区的日平均波文比有很大的区别。

(4) 在冬小麦返青初期, 日平均感热值大于潜热值, 随着冬小麦的生长, 植被覆盖度加大, 地表能量通量中潜热逐渐占据主导地位, 呈逐渐上升的趋势, 感热略有减小。当小麦含水量逐渐变小, 植株变干变黄, 感热量值逐渐升高, 潜热通量迅速减小。在小麦收割完毕后, 感热通量明显高于潜热通量。反照率在植被生长旺盛、植被覆盖度高的时期, 明显低于植株刚开始返青时期以及小麦成熟时期, 更低于小麦收割完毕后的裸土时期。说明植被覆盖度高时, 土壤植被系统截留的总辐射也高。

因为仪器和试验方案等各种原因, 在冬小麦下垫面下的土壤温度没有资料, 不能同时分析不同天气条件下的土壤温度对辐射和能量平衡变化的响应, 未能对比分析小麦和其他下垫面下辐射和能量平衡特征的异同, 这是以后试验设计中需要补充的地方。另外在本文分析中, 由于所用土壤热通量为 5 cm 埋深值, 必然使得能量不平衡率加大, 如何解决这个问题, 是今后研究中的一个难点。

参考文献 (References)

- [1] 李家伦, 洪钟祥, 罗卫东, 等. 青藏高原改则地区近地层通量观研究. 大气科学, 1999, **23** (2): 142~151
Li Jialun, Hong Zhongxiang, Luo Weidong, et al. A study of surface fluxes in Gerze area, Qinghai-Xizang plateau. *Chinese Journal of Atmospheric sciences* (in Chinese), 1999, **23** (2): 142~151
- [2] 布和朝鲁, 纪立人, 崔茂常. 夏季我国干旱、半干旱区陆面过程能量平衡及其局地大气环流. 气候与环境研究, 2002, **7** (1): 61~73
Buch Cholaw, Ji Liren, Cui Maochang. Energy balance of land surface process in the arid and semi-arid regions of China and its relation to the regional atmospheric circulation in summer. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (1): 61~73
- [3] 朱德琴, 陈文, 刘辉志, 等. 我国西北典型干旱区和高原地区地表辐射能量收支特征的比较. 气候与环境研究, 2006, **11** (6): 683~690
- [4] 杨兴国, 张强, 王润元, 等. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究. 高原气象, 2004, **23** (6): 828~834
Yang Xingguo, Zhang Qiang, Wang Runyuan, et al. Experimental study on surface energy balance over Loess Plateau of middle part Gansu in summer. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (6): 828~834
- [5] 王润元, 杨兴国, 把多辉, 等. 半干旱雨养农田典型晴天感热、潜热的阶段差异. 干旱气象, 2004, **22** (4): 26~28
Wang Runyuan, Yang Xingguo, Ba Duohui, et al. Changes of sensible and latent heat on a typical clear day on dry-farming land in semi-arid region during different development phases of crop. *Arid Meteorology* (in Chinese), 2004, **22** (4): 26~28
- [6] 杨启国, 杨兴国, 马鹏里, 等. 陇中黄土高原冬季地表辐射和能量平衡特征. 地球科学进展, 2005, **20** (9): 1013~1021
Yang Qiguo, Yang Xingguo, Ma Pengli, et al. The characteristic of surface radiation and energy balance in Loess Plateau of middle part Gansu in winter. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2005, **20** (9): 1013~1021
- [7] 杨兴国, 马鹏里, 王润元, 等. 陇中黄土高原夏季地表辐射特征分析. 中国沙漠, 2005, **25** (1): 55~62
Yang Xingguo, Ma Pengli, Wang Runyuan, et al. Summer land-surface radiation characteristic over longzhong region of Loess Plateau, China. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2005, **25** (1): 55~62
- [8] Wen Jun, Wei Zhigang, Lü Shihua, et al. The characteristics of land surface energy and water exchange over the loess plateau mesa in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, **24** (2): 301~310
- [9] 韦志刚, 文军, 吕世华, 等. 黄土高原陆-气相互作用预试验及其地表能量平衡特征. 高原气象, 2005, **24** (4): 494~497
Wei Zhigang, Wen Jun, Lü Shihua, et al. A primary field experiment of land-atmosphere interaction over the Loess Plateau and its ground surface energy in clear day. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (4): 494~497
- [10] 刘远永, 文军, 韦志刚, 等. 黄土高原塬区地表辐射和热量平衡观测与分析. 高原气象, 2007, **26** (5): 928~937
Liu Yuanyong, Wen Jun, Wei Zhigang, et al. Observation and analysis of the land surface radiation and energy balance over the Loess Plateau mesa region. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007, **26** (5): 928~937
- [11] 刘蓉, 文军, 张堂堂, 等. 利用 MERIS 和 AATSR 资料估算黄土高原塬区蒸散发量研究. 高原气象, **27** (5):

949~955

Liu Rong, Wen Jun, Zhang Tangtang, et al. Study on e-vapotranspiration retrieval using MERIS and AATSR data over the Loess Plateau mesa region. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2008, **27** (5): 949~955

[12] 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. 大气科学, 2003, **27** (2): 245~254

Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or gobi. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (2): 245~254