文章编号:1006-7639(2004)-02-0038-07

甘肃中部旱作农田地表能量收支特征分析

杨启国[1,2],杨兴国[1,2],张旭东[3]

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃 兰州 730020;2. 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730020;
3. 兰州中心气象台,甘肃 兰州 730020)

摘 要:利用在甘肃中部旱作农田多年积累的波文比能量平衡及辐射观测资料,分析了平均气候状态及不同天气状况下旱作春小麦农田不同生育期的辐射能量变化特征。结果表明:1)在晴天状况下的旱作春小麦农田,能量平衡各分量、总辐射、直接辐射、大气透明度系数 P_2 等项中,每个要素在不同生育期的日变化趋势都是相同的,但是在量值上却存在差别,一般都是随着春小麦生育进程的变化而逐渐增大;2)在春小麦各生育期内,晴天波文比的日变化趋势相同。波文比值夜间大于白天,白天上午又相对大于下午,一日中波文比的最小值出现在下午 3~4 时左右。从整个生育期来说,波文比随生育进程的变化而逐渐增大,但是潜热交换一直居于主导地位,而感热输送只是处于从属地位,白天波文比总是<1;3)晴阴天不同天气状况下,农田地表获得的能量在量值上存在差别,阴天时总辐射、净辐射的日总量值一般为晴天时的 30%~40%,可利用能量的分配规律在不同天气状况下不同,晴阴天潜热与感热的变幅约在 15%。

关键词:甘肃中部;旱作农田;能量收支;辐射
中图分类号:P422.9 文献标识码:A

引 言

农田地表的能量收支状况直接影响着地气间的能量转换与水分循环,开展农田地表能量特征的研究是地气相互作用研究的核心内容之一[1],是实现陆面过程参数化方案、分析天气气候形成的基础性工作[2~3];从农业生态学的角度来说,开展此研究对于弄清土壤—植物—大气连续体(SPAC)系统内复杂的水热传输及分配问题无疑是有益的[4]。农田作物生长发育过程所形成的干物质和最终产量,需要消耗大量的水分和能量。农田地表能量的唯一来源是太阳辐射,在水分条件一定的情况下,农田蒸散量的大小及其变化规律又基本上取决于到达农田的能量状况。而农田能量的支出部分主要用于潜热蒸发[5~7],其过程在消耗能量的同时也消耗了大量的水分,并且造成了很多无效耗水[8~11]。而减少无效耗水,提高有限水分的利用效率是制定相应农业节水措施的关键所在,这一切又必须建立在对农田能量收支过程全面了解的基础之上[12]。甘肃中部属典型的半干旱旱作农业区,干旱缺水严重制约着该地区农业生产力水平的提高。因此开展这一地区旱作农田的能量收支特征研究,无疑可以加深对农田水分运动、作物生长规律及其干旱形成机制的了解,从而为旱作农业高效节水用水提供科学依据。

1 资料的获取

1.1 试验地点

观测在中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地进行,其位于 35°35′N,104°37′E,海拔高度 1 896.7m,属草原灰钙土,土层深厚,地下水位>7m,近 30a 平均降雨量 386.6mm,平均温度 6.3℃,≥0℃ 积温 2 782.5℃,≥10℃ 积温 1 281.9℃,属典型的黄土高原半干旱旱作农业区。试验地周围地势平坦,在主导偏南、偏北风向上的上风方向均是农田,无高层建筑物和树木,观测点来流路径(fetch)与传感器翻转最大高度比>100:1,使其有足够的风浪区[13]。观测仪器安装于试验基地的试验大田内,种植作物为春小麦,观测点位于大田

收稿日期:2004-04-27;改回日期:2004-06-22
基金项目:中国气象局青年基金项目《甘肃中部半干旱区水分能量平衡与转换规律的试验研究》(19)资助.
作者简介:杨启国(1973—),男(汉族),甘肃白银人,助理研究员,主要从事干旱气象观测试验研究工作.

中央,周围无障碍物,为观测高质量有效数据提供了必要的保障。

1.2　观测项目及仪器

测量项目包括净辐射、总辐射及直接辐射、土壤热通量、2m 高度处和冠层顶以上 0.5m 高度处的干、湿球温度以及基本气象要素观测。观测仪器中辐射采用锦州三二二研究所的 TBQ－2 型总辐射仪、DFY－3 型直接辐射表以及日本 EKO 公司的 CN－40 型净辐射仪,各仪器均架设在距地面 1.6m 的麦田上方。土壤热通量采用日本 EKO 公司的 CN－81 型地中热流板,以 3 块串联相接,分别埋在麦行中间和麦株下距地表 2～3cm 处。干球和湿球温度采用换位式波文比仪测定,该观测仪由中国气象局兰州干旱气象研究所和北京大学地球物理系共同研制,其中两温湿度感应头上下相距 1.5m,下面感应头始终与小麦冠层保持在 0.5m 的距离。上下感应头每 3min 左右更换一次位置,以消除系统误差。同时为避免随机误差的影响,观测时取正点前后各 10min 内 48 次瞬时观测的平均值作为该时次的"观测值",观测期间的数据采集由计算机自动完成。

1.3　观测时间

试验分别于 1993、1994、1996、1997、2001 和 2003 年在春小麦生长的不同生育阶段进行加强观测,每次加强观测时段平均为 8d 左右。每天观测时间主要是从北京时 06 时～22 时进行每小时(或 2h)一次的观测,有个别观测时段是 24h 连续进行的。为保证观测精度,每次观测前都对仪器进行了严格的标定。

2　资料的处理方法

首先从所有资料中找出观测完整,有代表性、连续性的资料,接着选择典型天气状况下的资料。其中晴天天气,其日光状况至少为⊙[1],天空总云量不超过 3 成;而阴天则选择了日光状况为 η,全天为 10 成云的情况。在作物的各个生育期内选取连续 3d 的晴天资料,求其平均作为该生长阶段的值。如无连续 3d 资料,就以相邻晴天代替。然后把不同年份处于同一生育期观测的资料再求平均,以最终反映一种平均气候状态下的结果。考虑到观测得到的阴天资料较少,因此对阴天天气状况的分析只能采用某几天的资料。

由于观测得到的辐射及土壤热通量资料为通量密度瞬时值,单位为 W/m^2,而要取得以日为时间尺度的值(单位为 MJ/(m^2.d)),就必须对资料进行处理。首先对观测资料应用面积积分公式积分得到每小时值,其次求和得到每天的值,其中每天 22 时至次日 06 时的值由 22 时的通量密度到次日 06 时的通量密度直接积分求得。

研究农田地表层感热、潜热输送变化特征的通用公式是地表能量平衡方程和感热、潜热的垂直输送方程[14～15]

$$R - G = H + LE$$
$$H = \rho C p K_h \frac{\partial T}{\partial z} \tag{1}$$
$$LE = \rho \frac{1}{v} C p K_w \frac{\partial e}{\partial z}$$

式中 R 为净辐射;H 为感热通量;LE 为农田蒸散潜热通量;G 为土壤热通量;ρ 为空气密度;Cp 为空气定压比热;K_h 和 K_w 分别为热量和水气交换系数;v 为干湿球常数;$\frac{\partial T}{\partial z}$和$\frac{\partial e}{\partial z}$分别为空气温度和水气压梯度。引入波文比,即感热和潜热之比 β,$\beta = H/LE$,则 β、H、LE 的计算式可表达如下:

$$\beta = v \frac{\triangle T}{\triangle e}$$
$$LE = \frac{R - G}{1 + \beta} \qquad H = \frac{\beta(R - G)}{1 + \beta} \tag{2}$$

波文比 β 的计算依据两个高度间的干、湿球温度差$\triangle T_d$、$\triangle Tw$ 来计算$\triangle e$ 以及饱和水汽压—温度曲线斜率;干湿球常数 $v = 06455 + 0.00064t$,t 取观测时段平均干球温度。上述(1)、(2)式中 R、H、G、LE 等量的单位都为 W/m^2,β 为无量纲量。

3　结果与分析

3.1　辐射特征

水平地表面上接收到的太阳直接辐射和散射辐射之和称为总辐射 Q。总辐射的大小受太阳高度角的大小、大气透明程度和云量等因素的影响。由图 1 可见,在春小麦的各生育期内,晴天到达农田下垫面的总辐射其日变化规律是一致的,都呈标准的抛物线形态,符合总辐射晴天日变化的一般规律[14]。但是也看出各生育期内总辐射的日变化在量值上是不同的,在三叶期最小,乳熟期最大,拔节、孕穗、开花等生育期介于上述两者之间,并随着春小麦生育进程而逐渐增大。各生育期总辐射的日峰值及日总量也呈以上规律变化,三叶期日峰值为 835.3 W/m^2,日总量为 24.4 MJ/(m^2.d),乳熟期日峰值

为 973.1 W/m²，日总量为 27.6 MJ/(m².d)。总辐射在春小麦生育期内的这种变化和它的年变化密切相关，并非受作物生长过程的影响。在北半球，一年中总辐射的最小值出现在 12 月，之后随时间逐渐增大，至 6 月底出现最大值，此时恰就是春小麦的乳熟期，可见作物生长过程与物候的准确配合正反映了沿用至今的农时观念。把 6 月底乳熟期总辐射和青藏高原与河西绿洲及沙漠地区同期总辐射进行比较，发现其略高于河西绿洲区，略小于河西沙漠地区，更小于青藏高原地区[15~18]。

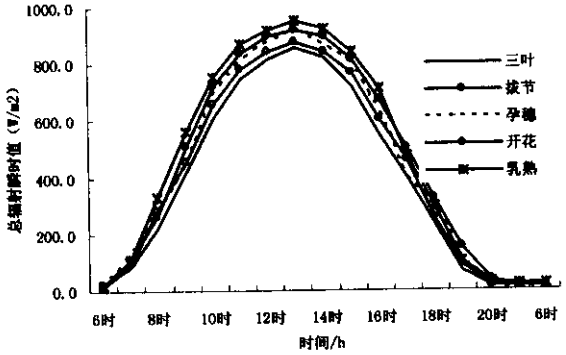

图 1 春小麦各生育期晴天总辐射日变化

Fig. 1 The daily variation of global radiation in different growth stages of spring wheat under a clear day condition

为了说明大气对太阳辐射的衰减程度，根据直接辐射观测资料，通过计算订正到绝对大气质量 $M=2$ 时的晴天中午（北京时间 13 时）大气透明度 P_2。具体计算方法如下[19]：

$$P_2=\left[\frac{\frac{m}{2}P_M^m}{1-(1-\frac{m}{2}P_M^m)}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$P_M=\left(\frac{D}{D_0}\right)^{\frac{1}{M}} \quad (4)$$

$$M=\frac{B}{B_0}m \quad (5)$$

式中 P_M 为绝对大气质量 M 时的复合大气透明度系数；D 为实测的直接辐射值；D_0 为经过日地订正后的太阳常数，取 1 367W/m²[20]；M 为绝对大气质量；B 为地面气压；B_0 为标准大气压，取 1 000hPa。从表 1 中可看出，大气透明度系数 P_2 随着春小麦发育进程的变化而在逐渐增加，在三叶、拔节时期，也即在 4、5 月份，P_2 较小，主要是春季多风，加之降水稀少，浮尘等天气加深了大气浑浊程度。而随着夏季来临，降水增多，浮尘等天气现象的逐渐减少以及太阳直接辐射的加强，大气透明度也逐渐增加，表现为开花、乳熟等生育期 P_2 值增大。分析各生育期直接辐射的日最大值及日总量，发现两者都随生育进程而逐渐增大，至乳熟时期达到最大，这也与太阳总辐射的年变化是相关的。

表 1 春小麦不同生育期晴天太阳直接辐射及大气透明度系数

Tab. 1 The direct radiation and the atmosphere diaphaneity coefficient(P_2) in the different growth stages of spring wheat under a clear day condition

生育期	三叶	拔节	孕穗	开花	乳熟
直接辐射日最大值（W/m²）	760.0	834.4	876.4	914.5	920.8
直接辐射日总量(MJ/m².d)	20.1	22.5	22.9	24.6	24.9
大气透明度系数 P_2	0.7553	0.7715	0.7925	0.8056	0.8094

下垫面通过辐射交换，收入与支出部分的差额称为净辐射。净辐射的大小决定着地表能量平衡中各分量的可分配额，其大小和下垫面状况是密切相关的。从图 2 看，晴天状况下春小麦各生育期净辐射日变化特征是一致的，符合净辐射典型晴天抛物线的变化规律。但在净辐射的量值上，春小麦的 5 个主要生育期中，三叶期最小，乳熟期最大，其它生育期介于这两者之间，并随生育进程而逐渐增大。分析其主要原因是在三叶等生育期，对半干旱地区的旱作春小麦而言，土壤裸露严重，降水稀少，土壤湿度小，因而反射辐射较大，加之总辐射 Q 相对较小，致使此阶段净辐射值小；在此之后随着这一地区雨季的逐渐来临，降水增多，植株生长逐渐旺盛，土地覆盖度与土壤湿润程度明显加大，地表反射率下降，反射辐射随之下降，总辐射也随着太阳天文周期的变化而逐渐增大，从而造成了净辐射随着生育进程而逐渐增大的现象。

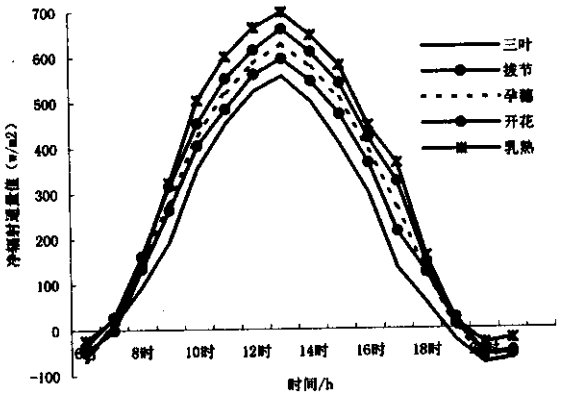

图 2 春小麦各生育期晴天净辐射的日变化规律

Fig. 2 The daily varitey of net radiation in different growth stages of spring wheat under a clear day condition

为了更好地了解春小麦各生育期所获得的净辐射能相对值的差别,我们计算了晴天状况下净辐射与总辐射比值(R/Q)的日变化(表 2)。从表 2 可以看出,各生育期每日内 R/Q 值都随着太阳高度角的增加而增大,在中午前后达到最大值(乳熟期可达 0.75),之后逐渐减小,并且 R/Q 值有正负变化。这种变化与各生育期地表净辐射的日变化趋势一致。比较不同生育期相同时段 R/Q 值发现,三叶期的比值相对最小,乳熟期的比值相对最大,并且 R/Q 值随着生育进程而逐渐增大。

表 2　晴天状况下春小麦各生育期净辐射与总辐射比率的日变化

Tab. 2　The daily variety of the ratio between net radiation and global radiation in the different growth stages of spring wheat under a clear day condition

时间生育期	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
三叶	0.15	0.36	0.43	0.48	0.54	0.55	0.63	0.58	0.51	0.46	0.32	0.29	-0.39
拔节	-0.02	0.48	0.58	0.63	0.61	0.65	0.68	0.66	0.67	0.62	0.50	0.48	0.12
抽穗	0.13	0.54	0.59	0.61	0.60	0.62	0.67	0.64	0.59	0.54	0.48	0.38	-0.39
开花	0.26	0.62	0.68	0.62	0.59	0.65	0.69	0.66	0.59	0.60	0.64	0.58	0.19
乳熟	0.21	0.56	0.67	0.73	0.74	0.74	0.75	0.73	0.73	0.68	0.66	0.58	0.15

对净辐射的日总量分析,计算了各生育期净辐射与总辐射日总量的比值,得到从三叶期到乳熟期,其比值从 0.36 增至 0.65,并且是逐渐增大的。这种变化趋势与邹基玲等对干旱地区灌溉春小麦净辐射的研究结果一致[7,21]。

3.2　地表能量平衡特征

从能量收支过程来说,地表面的土壤层中的能量交换大小及交换过程对小气候特点及其形成规律具有重要作用。从数量上来说,土壤热通量 G 是能量平衡各分量中日际变差最小也是比重最小的量。分析春小麦生育期内土壤热通量的日变化,发现在各生育期内,土壤热通量的日变化量都很小,变化范围一般在 $-12.8\sim72.5$ W/m^2 之间,并且各生育期之间相差不大。晴天土壤热通量变化也具有标准的抛物线形态。土壤热通量日总量也很有限,一般在 0.14～0.87 MJ/(m^2.d)之间变化,约占净辐射的 4%～8%。

潜热通量的大小主要取决于净辐射、湍流交换条件和湿度铅直梯度,其日变化规律与净辐射的日变化规律基本一致。由图 3 可见,晴天春小麦各生育期的潜热通量日变化过程基本上是相似的。上午,随着太阳辐射的不断增强,下垫面受热使得近地面层出现不稳定层结,湍流交换不断增强,湿度梯度增大,从而导致潜热通量随时间不断增加,并在中午前后达到一天的最大值;下午,随太阳辐射和湍流交换的不断减弱,大气层结趋于稳定,潜热通量又逐渐减小,夜间甚至出现负值(即出现凝结而释放热量)。但是各生育期潜热通量的日变化在量上却有显著的差异,三叶期最小,日最大值为 192.12 W/m^2,拔节、孕穗、乳熟依次增大,开花期最大,日最大值为 428.3 W/m^2。三叶、拔节、孕穗、开花、乳熟各生育期潜热日总量依次 5.41,7.01,7.94,9.48,8.78MJ/(m^2.d)。

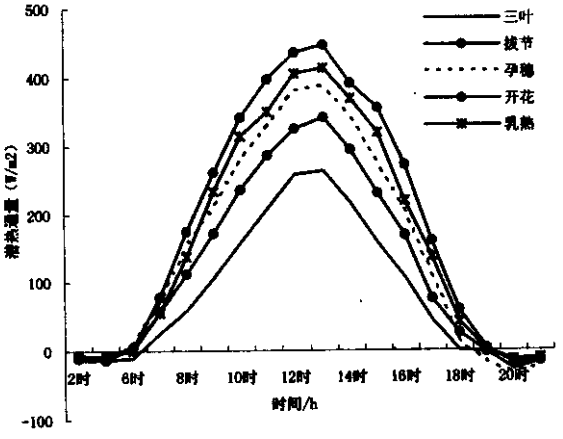

图 3　春小麦各生育期晴天潜热通量日变化

Fig. 3　The daily variation of latent heat flux in the different growth stages of spring wheat under a clear day condition

在地表层获得的可利用能量中,除一部分用于潜热交换外,另一部分则用于感热输送。感热通量的变化主要取决于净辐射量以及下垫面热力状况等因素,其日变化规律也基本与净辐射的日变化规律相一致,即日出后,随着太阳辐射的增强,近地层温度逐渐升高,湍流活动开始加强,感热输送量逐渐变大,至中午前后达到极值,而后随着太阳辐射的逐渐减弱,感热输送量又趋于变小,夜间也出现了负值(图 4)。对比各生育期感热通量的日变化,发现其差异并不明显,这主要是在整个春小麦的生育期内,农田活动层获得的可利用能量主要是用来进行潜热交换,从而使得感热输送量变为相对较小的量,各生育期之间的变化幅度因而相差不大。三叶、拔节、孕穗、开花、乳熟各生育期感热日总量依次为 2.76,3.84,3.30,4.32,4.84MJ/(m^2.d)。

3.3　波文比

波文比的大小反映的是地表吸收的净辐射能分

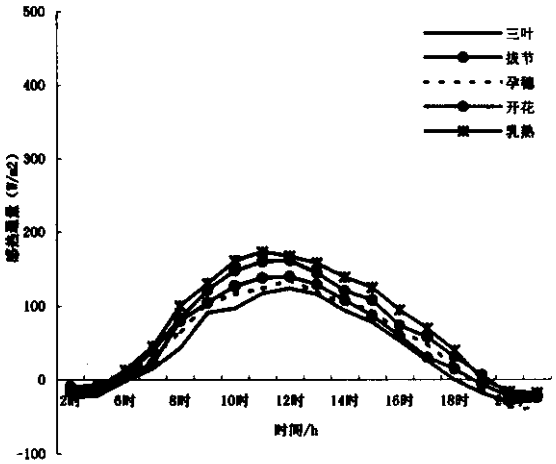

图4 春小麦各生育期晴天感热通量日变化

Fig.4 The daily variation of sensible heat flux in the different growth stages of spring wheat under a clear day condition

配给潜热和感热的比例，蒸散大，感热小，则波文比小，反之波文比则大。如图5，在春小麦各生育期，

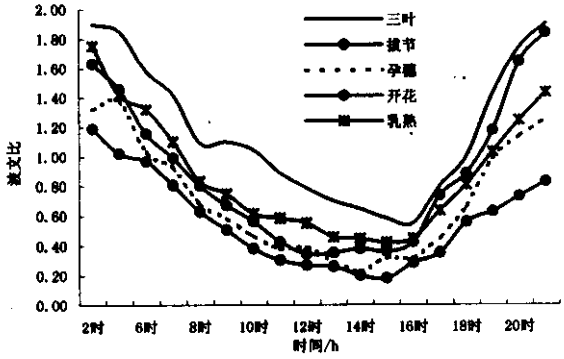

图5 春小麦各生育期晴天波文比日变化

Fig.5 The daily variation of the Bowm ratio in different growth stages of spring wheat under a clear day condition

波文比的日变化总体趋势是一致的。波文比值夜间大于白天，白天上午又相对大于下午，一日中波文比的最小值出现在下午3～4时左右。波文比夜间大于白天主要是白天农田下垫面吸收太阳辐射，温度升高，麦田蒸散加强，净辐射能中用于蒸散的潜热能的分配额增大，导致波文比变小；在夜间，由于地表冷却，蒸散减弱，潜热交换作用减小，而感热交换作用显著加强，净辐射能中用于感热能的分配额增大，波文比值相对增大。白天波文比上午大于下午是由于日出后，随着时间变化，农田地表获得的太阳净辐射能逐渐增多，温度逐渐升高，潜热交换得到加强，农田的蒸散活动开始活跃，与此同时随着地表层温度的升高，湍流活动也开始变得活跃，感热交换也逐渐在加强，但是感热交换增加的量值不及潜热交换所增加的量值，致使波文比逐渐减小，至下午3～4时左右，感热交换增加的量值才逐渐大于潜热交换所增加的量值，波文比又表现为逐渐增加的趋势，这就是整体上显得上午波文比要比下午大的原因。

对春小麦各生育期波文比的变化量值进行对比，可看出在三叶期，波文比值大于其它生育期，这主要是因为在此期间小麦植株个体小，覆盖度低，地表裸露严重，接受太阳辐射强烈，农田作用层升温明显，湍流活动较强，感热交换量大，同时春季降水稀少，土壤干燥，蒸发受到限制，潜热在净辐射中所占份额比湿润时要小[12]，加之此时作物耗水量也最小，波文比因而变大。进入拔节、孕穗、开花期后，植株生长旺盛，叶面积系数增大，作物耗水量也逐渐增大，随着雨季的来临，土壤湿度也相对增加，蒸散量增加，潜热耗能占净辐射的份额增大，同时由于作物冠层的蒸腾及遮荫作用，使得农田地表层的感热活动相对减弱，因而波文比相对变小，表现为开花期波文比最小，这主要是此阶段作物耗水量为最大所致。综观整个生育期，潜热交换一直居于主导地位，而感热输送只是处于从属地位，晴天天气下白天波文比总是<1。

3.4 不同天气状况下的能量收支特征

为分析不同天气状况对农田地表辐射和能量平衡的影响，选择了典型晴天与阴天个例，来比较它们之间日变化特征的不同。图6是典型晴天、阴天天气下农田地表辐射能量日变化特征的比较。从图中看，晴天天气状况下农田地表的辐射各分量都表现为各自标准的日循环形态。总辐射最大，其次是直接辐射、净辐射。在阴天天气状况下，辐射各量仍具有明显的日循环形态。但是在量上比晴天时显著减小，总辐射依然最大，其次为净辐射，而直接辐射最小。阴天时总辐射、净辐射的日总量一般约为晴天时的30%～40%，依次为9.87，6.65MJ/(m^2.d)。而直接辐射在晴阴天时的差距比较大，阴天时日总量值约为晴天时的1%。日净辐射量占日总辐射量的比例，阴天比晴天时有所下降，但幅度不大。

典型晴阴天天气状况下农田地表的能量平衡各分量都表现出各自标准的日循环形态，并且都是净辐射最大，依次是潜热、感热和土壤热通量。但是在量上阴天比晴天时显著减小，而且能量平衡中潜热、感热所占净辐射日总量的比例也有变化，阴天时潜

热所占比例有所下降,而感热所占比例则在增大,变

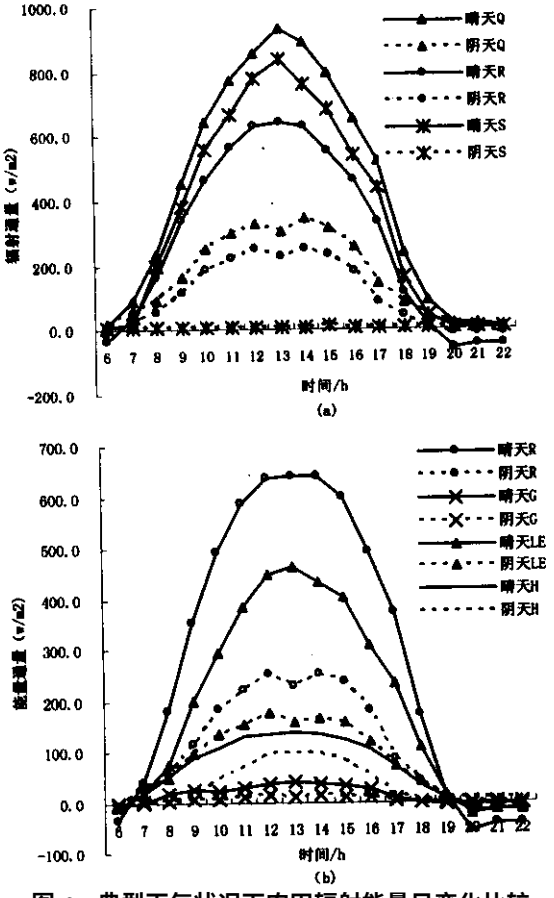

图 6　典型天气状况下农田辐射能量日变化比较
(a)辐射　　(b)能量

Fig. 6　The daily variation's compare of radiation and energy under typical weather conditions
(a) raditaion　　(b) energy

幅约在 15%左右,其日总量依次为 3.78,2.36MJ/(m^2.d)。阴天时土壤热通量占净辐射日总量的比例比晴天时略有增大,约占 10%左右。最后对比了晴阴天时波文比日变化的差异,发现阴天时波文比值比晴天时要大(图略),这主要是由于阴天时感热通量增大,而潜热减小的缘故。

总的来说,晴阴天不同的天气状况,使农田地表获得的辐射及可利用能量在量值上存在差别,同时改变了辐射及可利用能量的分配规律。

4　结　论

(1)在春小麦的整个生长期内,太阳辐射的天文周期变化与作物生育进程的相互配合,使晴天状况下的太阳总辐射、太阳直接辐射、大气透明度系数 P_2、净辐射以及净辐射与总辐射的比值等量的日峰值及日总量都随着春小麦发育进程的变化而在逐渐增加,至乳熟时期达到最大。这种作物生长过程与物候的密切配合从一定程度上反映了沿用至今的农时观念的正确性。

(2)在春小麦各生育期内,晴天土壤热通量的日变化量都很小,并且量值相差不大,一般在 1.04～1.54 MJ/(m^2.d)之间变化,约占净辐射的 4%～8%。春小麦各生育期潜热通量的日变化规律是一致的,三叶期最小,开花期最大。三叶、拔节、孕穗、开花、乳熟各生育期潜热日总量依次 5.41,7.01,7.94,9.48,8.78MJ/(m^2.d)。各生育期感热通量的日变化规律也是一致的,并且各生育期之间的变化幅度相差不大。三叶、拔节、孕穗、开花、乳熟各生育期感热日总量依次为 2.76,3.84,3.30,4.32,4.84MJ/(m^2.d)。

(3)在春小麦各生育期内,晴天波文比的日变化趋势是相同的。波文比值夜间大于白天,白天上午又相对大于下午,一日中波文比的最小值出现在下午 3～4 时左右。从整个生育期来说,三叶期波文比值最大,开花期最小;潜热交换一直居于主导地位,而感热输送只是处于从属地位,晴天天气下白天波文比总是<1,阴天时感热交换较强,因而波文比值要大于晴天。

(4)在典型晴阴天天气状况下,农田地表获得的辐射及可利用能量在量值上存在差别,同时改变了辐射及可利用能量的分配规律。阴天时总辐射、净辐射的日总量值一般为晴天时的 30%～40%,直接辐射日总量值约为晴天时的 1%;阴天时能量平衡中潜热所占净辐射日总量比例相对下降,而感热所占比例则在增大,变幅约在 15%左右,阴天时土壤热通量占净辐射日总量的比例比晴天时略有增大,约占到 10%左右。

参考文献:

[1]　胡隐樵. 黑河实验(HEIFE)能量平衡和水气输送研究进展[J]. 地球科学进展,1994,9(4):31－34.
[2]　胡隐樵,高由禧. 黑河实验(HEIFE)—对干旱地区陆面过程的一些新认识[J]. 气象学报,1994,52(3):285－296.
[3]　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):245－253.
[4]　刘昌明. 水循环生态学方面:土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展[J]. 水科学进展,1999,10(3):251－258.
[5]　苏从先,胡隐樵. 河西地区热量平衡和蒸散的初步观测研究[J]. 高原气象,1987,6(3):217－224.
[6]　柯晓新,张旭东,彭素琴,等. 旱作春小麦农田蒸散与能量平衡[J]. 气象学报,1996,54(3):348－355.
[7]　李胜功. 内蒙古奈曼麦田生长期的微气象变化[J]. 中国沙漠,

1995，15(3)：216－221.
[8] 由懋正，王会肖. 农田土壤水资源评价[M]. 北京：气象出版社. 1996. 68－76.
[9] 张利. 作物棵间蒸发及叶面蒸腾量的研究[J]. 生态农业研究，1995，3(1)：76－78.
[10] 刘昌明，于沪宁. 土壤－作物－大气系统水分运动实验研究[M]. 北京：气象出版社，1997. 99－106.
[11] Li Fengrui，Zhao Songling，Geballe. Water use pattern and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi－arid environment of northwest China[J]. Agriculture Ecosystems and Environment，2000，79：129－142.
[12] 莫兴国，刘苏峡. 麦田能量转化和水分传输特征[J]. 地理学报，1997，5(1)：37－44.
[13] Thompson N. Turbulence measurements above a pine forst[J]. Boundary－Layer Meteor. 1979，16：293－310.
[14] 傅抱璞，翁笃鸣，虞静明，等. 小气候学[M]. 北京：气象出版社，1994. 126－127.
[15] 谢贤群，朱治林. 波文比—能量平衡法计算农田蒸发量的精度检验[A]. 左大康，谢贤群. 农田蒸发研究[C]. 北京：气象出版社，1991. 61－70.
[16] 季国良，邹基玲. 干旱地区绿洲和沙漠辐射收支的季节变化[J]. 高原气象，1994，13(3)：323－329.
[17] 陈有虞. 青藏高原那曲地区的辐射状况极其年变化特征[J]. 高原气象，1985，4(4，增刊)：50－66.
[18] 江灏，季国良，王军. 拉萨河谷辐射特征的研究[J]. 高原气象，1985，4(4，增刊)：67－79.
[19] 季国良. 青藏高原主体的大气透明度特征[J]. 高原气象，1985，4 (4，增刊)：122－123.
[20] 王炳忠. 太阳辐射能的测量与标准[M]. 北京：科学出版社，1988. 12.
[21] 邹基玲，季国良，侯旭宏. 张掖地区春小麦生长期的辐射平衡观测[J]. 高原气象，1994，13(3)：353－358.

An Analysis on the Surface Energy Budget of Dry Farmland in Central Gansu Province

YANG Qi－guo[1,2]，YANG Xing－guo[1,2]，ZHANG Xu－dong[3]

(1. Institute of Arid Meteorology，CMA，Lanzhou 730020，China；
2. Key laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster，Lanzhou 730020，China；
3. Lanzhou Central Meteorological Observatory，Lanzhou 730020，China)

Abstract：Based on the measured data of the Bowen ratio－energy balance method (BREB) and radiation in Dingxi Arid Meteorology and Ecological Environment Experimental Station，Institute of Arid Meteorology，CMA，this paper analyses the characteristics of surface energy budget and radiation under different types of synoptic conditions and averaged climatic conditions in spring wheat farmland. The results show that：(1) The characteristics of daily variations of the surface energy budget，the global radiation，the net radiation，the direct radiation and the atmosphere diaphaneity coefficient (P_2) are quite similar in the different growth stages of spring wheat under a clear day condition，but the magnitude of these values are distinct，these values increased gradually with growth stages of spring wheat；(2) The daily variation of the Bowen ratio is quite similar in different growth stages of spring wheat under a clear day condition. The Bowen ratio of night is bigger than that of daytime，and also the Bowen ratio of antemeridiem is bigger than that of afternoon. The Bown ratio is less than 1.0 in daytime. The biggest Bowen ratio occurs at 3～4 P.M. in a day. In the whole growth stages，the Bowen ratio is gradually increscent，the latent heat plays a leading role，and the sensible heat depends on the latent heat；(3) Under different types of synoptic conditions including a clear day and a cloud day，not only the farmland surface energy obtained is variable in magnitude，but the available energy admeasured is different. The daily－integral values of global radiation，net radation under a cloud day is about 30%～40% less than those under a clear day. The range of variation in sensible heat flux and latent heat flux is about 15% between a cloud day and a clear day.

Keywors：central Gansu province；dry farmland；energy budget；radiation