第54卷第3期　　气　象　学　报　　Vol. 54, No. 3
1996年6月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　Jun., 1996

旱作春小麦农田蒸散与能量平衡*

柯晓新　张旭东　彭素琴　杨兴国

（兰州干旱气象研究所，兰州，730020）

摘　要

利用蒸渗计等仪器设备的观测资料，分析了旱作春小麦农田的蒸散耗水状况。得在降水基本正常的年份，农田水分收支基本平衡，农田休闲期蒸发耗水约占期间降水的70%。旱作小麦的实际蒸散耗水峰值期与小麦生理需水峰值期并不一定吻合。与有灌溉条件的春小麦相比，平均日蒸散量偏小。各生育期的平均叶面积系数与平均日蒸散强度存在较好的线性关系。小麦主要生育期的地表能量平衡分析表明：潜热耗能占主导地位，乳熟-黄熟生育时段以感热、潜热耗能为主的出现几率各为50%。由于旱作春小麦株冠不能完全覆盖棵间裸地，地表向下的热量传输耗能也占有一定的比重。

关键词：蒸散，旱作农田，能量平衡。

1　引　言

水分始终是发展旱作农业所关注的主要问题，内陆半干旱旱作农业区尤甚。蒸发或蒸散作为半干旱旱作农田的主要水分消耗项，在年内不同时期的耗水状况及作为地表能量平衡的一个分量，在小麦不同生育期能量平衡中的作用。以往由于受探测手段的限制，国内对这方面的分析研究较少，本文利用兰州干旱气象研究所定西综合试验站大型称重式蒸渗计等仪器设备所得观测资料，对其进行了分析研究。

2　试　验

2.1　观测地点

观测在兰州干旱气象研究所定西综合试验站农田内进行，其海拔高度为1896.7m，经纬度分别为104°37′E，35°35′N。种植小麦品种是当地流行的旱作春小麦品种，种植密度为2.8万株/亩，麦行走向为东西向，耕种方式与当地旱作农田相同。试验田周围地势平坦，在主导偏南、偏北风向的上风方均是农田，无高层建筑物和树木，其下垫面过渡区(fetch)，在观测点东南、南南东方向约有

表1　观测时段及小麦生长状况

观测时间	天数	生育期
21/4—28/4	8	三叶
16/5—25/5	8	拔节
9/6—17/6	9	抽穗-开花
6/7—11/7	6	乳熟-黄熟

* 初稿时间：1994年3月25日；修改稿时间：1994年11月21日。

400m,西北、北北西方向有几公里(见图 1),基本符合小气候观测的环境要求。

2.2　观测项目、时间

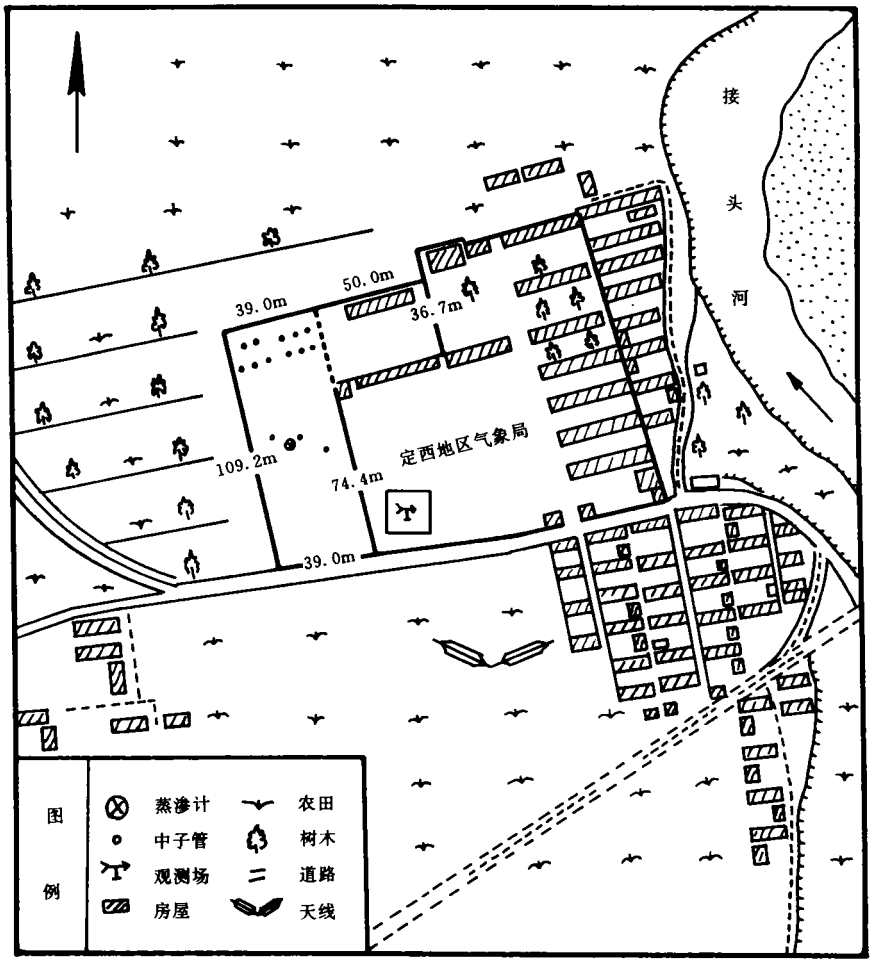

图 1　试验场周围环境图

从 1992 年 7 月至 1993 年 7 月,进行了为期一年的逐日实际蒸发蒸散量观测,所用仪器是兰州干旱气象研究所研制的大型称重式蒸渗计[1]。并于 1993 年小麦主要生育期进行了 4 次加强观测(见表 1),观测项目有蒸散量、净辐量、地中热流量。净辐射和地中热流量的观测采用日本 EKO 公司生产的 CN-40 型净辐射仪和 CN-81 型地中热流板。净辐射仪感应头架设在距地面 1.6m 具有代表性的麦田上方。地中热流板以 3 块串联相接,取有代表性的地块,水平埋在地表下 2—3cm 处,位置为麦行中间、麦株下。加强观测期间的净辐射,地中热流均由 PC-1500 计算机自动采集,采样时间为 20min,每个参数的采样量为 48 个。蒸散量为人工观测。

表 1 中所列的 4 次加强观测,每天观测时段从北京时 06 点到 20 点。4 月份观测为每 2 小时一次;5 月份前 3 天为每小时一次,后几天为每 2 小时一次;6 月、7 月均为每小时

一次。与此同时，还进行了小麦不同生育期株高、叶面积系数，0—2m 土壤湿度等观测，降水等常规气象资料取自试验站旁甘肃省定西地区气象局正规地面气象观测站。

3 水分状况

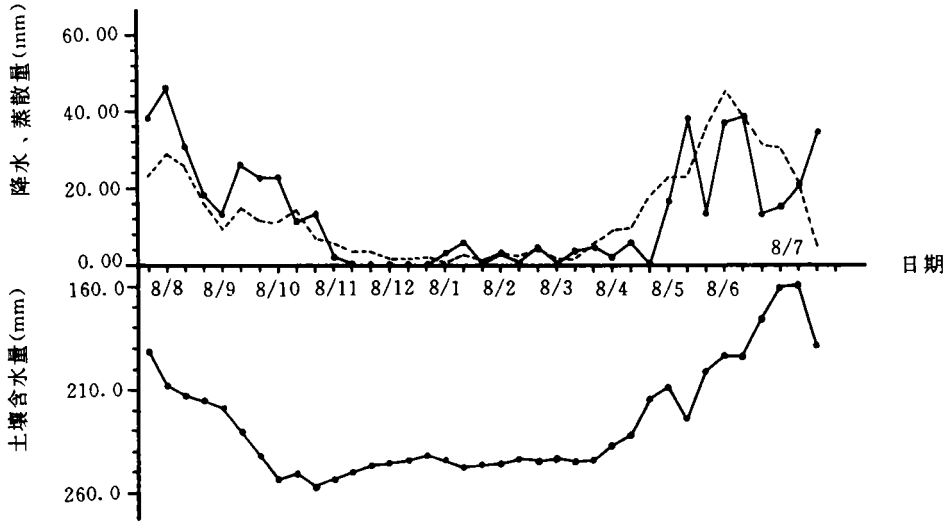

图 2 降水、0—2m 土壤含水量及蒸散量(虚线)年内状况图

影响旱作农田蒸发或蒸散的主要因子之一是农田的水分供应情况，即自然降水的多少及土壤中的蓄水量。图 2 给出了观测试验点 1992 年 7 月 28 日至 1993 年 7 月 28 日逐旬的降水、0—2m 深土壤水分含量及蒸散状况，取每月带 8 的日期为旬界是为了与土壤水分观测日期相一致。由图 2 可见，每年麦黄收割至封冻这一时期，为土壤蓄水期，时间上与内陆半干旱区雨季的后半期相吻合；冬季为土壤水分相对稳定期；来年 3 月中旬前后小麦播种至 7 月中旬前后麦熟是土壤水的消耗期。因此，从当年 7 月下旬至来年 7 月中旬可认为是土壤水分演变的一个周期。

1992 年麦收至土壤封冻这一时期的降水量与多年平均值相比偏多 1 成不到。土壤蓄水量比多年平均值约多 12mm。入冬后降水减少，共降水 19.6mm，比多年平均约多4.4 mm，至来年开春土壤蓄水量略有减少但变化不大。小麦播种时，0—2m 土壤蓄水量与历年平均值大致相同。之后的小麦生长期，降水量比多年平均值偏多不足 1 成。因此，从降水和土壤水的状况看，基本属正常年份略偏多。

4 农田蒸发蒸散及能量平衡

4.1 农田的蒸散

根据地表水平衡方程

$$P = LE + \Delta W + R + S \tag{1}$$

式中 P 为降水量，ΔW 为蒸渗计的测值，R 为地表径流量，S 为土壤渗漏水。对半干旱区平

坦农田,方程(1)可简化为:

$$P = LE + \Delta W \tag{2}$$

由此得到农田每日的蒸发或蒸散量。统计分析表明,小麦收割后的蓄墒阶段也是蒸发耗水的主要阶段,期间共降水 243.4mm,但蒸发耗水却高达 171.7mm,自然降水真正作为土壤水蓄存起来的只有 71.7mm,占降水量的 30%左右,约有 70% 的降水被无效的蒸发消耗。入冬至来年开春播种,由于气温下降土壤冻结,大大抵制了土壤水分的蒸发耗水。期间降水 19.6mm,蒸发耗水为 21.2mm。小麦播种到小麦收割是蒸散耗水量最大时段,期间共降水 203.8mm,而蒸散耗水竟高达 294.1mm,它不仅消耗掉期间的全部降水,还用去土壤蓄水 90.3mm。

由此可知,蒸发或蒸散耗水有 2 个主要时期(见图 2),一是小麦收割后的农田休闲期,蒸发耗水约占上述土壤水分变化周期内总降水量的 36.8%。另一是小麦生长期,蒸散耗水约占周期内总降水量的 63.0%。它们分别对应内陆雨季的后半期和前半期。受气候条件的影响,冬季蒸发耗水较少,约占周期内总降水量的 4.5%。土壤水分的收支基本平衡,仅差 4.3%。

以往研究认为[2,3],年降水量 350— 500mm 的温带半干旱区属土壤水分年循环补偿亏缺区,农田休闲期的蒸发耗水约为同期降水的 40%。据此结果看,在年降水量基本属正常偏多的半干旱区,农田水分收入略小于支出,基本是平衡的。而农田休闲期蒸发耗水约占同期降水的 70%左右。因此,减小小麦收割后休闲期土壤水分的无效蒸发,增加深层土壤蓄水是有效利用天然降水的关键所在。麦收后的蓄水过程,首先由降水打通浅层墒,之后的降水才能逐步向深层土壤渗透。而土壤蒸发耗水也是先消耗浅层土壤水分。由于西北内陆半干旱区大气干燥,每次降水后,陆气水汽梯度大,土壤浅层水分蒸发消耗较大,若这一层土壤水分得不到保存,下次降水向深层土壤蓄水,又要先湿润这一层土壤,才能向下渗透,因此,若每次降水过程的降水量较大,一次可渗透的土壤深度深,下次降水需打通的浅层墒就浅,有利于水分下渗。反之,降水量小,水分下渗深度浅,不能被深层土壤有效保存,而以浅层土壤蒸发的形式无效浪费,从而导致农田休闲期无效耗水增大。

4.2　麦田蒸散和主要生育期的能量平衡

4.2.1　麦田蒸散

图 3 是 1993 年小麦整个生育期的日蒸散量、日降水量变化图,其横坐标是自小麦播种到收割的天数,纵坐标是以 mm 为单位的日蒸散量和日降水量。图中波动实线是日蒸散量连线,波动虚线是日降水量的连线,平滑实线是用多项式拟合每日蒸散量变化状况得到的小麦整个生长期日蒸散量变化的平均状况,其拟合式为:

$$LE = a - bX + cX^2 - \mathrm{d}X^3 \tag{3}$$

$$a = 0.687, b = 0.025, c = 1.78 \times 10^{-3}, d = 1.23 \times 10^{-5}$$

式中 X 为小麦播种后的日数,LE 是该日的日蒸散量(mm)。式(3)与龚绍先[4]给出的小麦生育期耗水曲线形状大致相同,但具体每日的蒸散耗水大小及峰值的陡峭程度有较大差异。

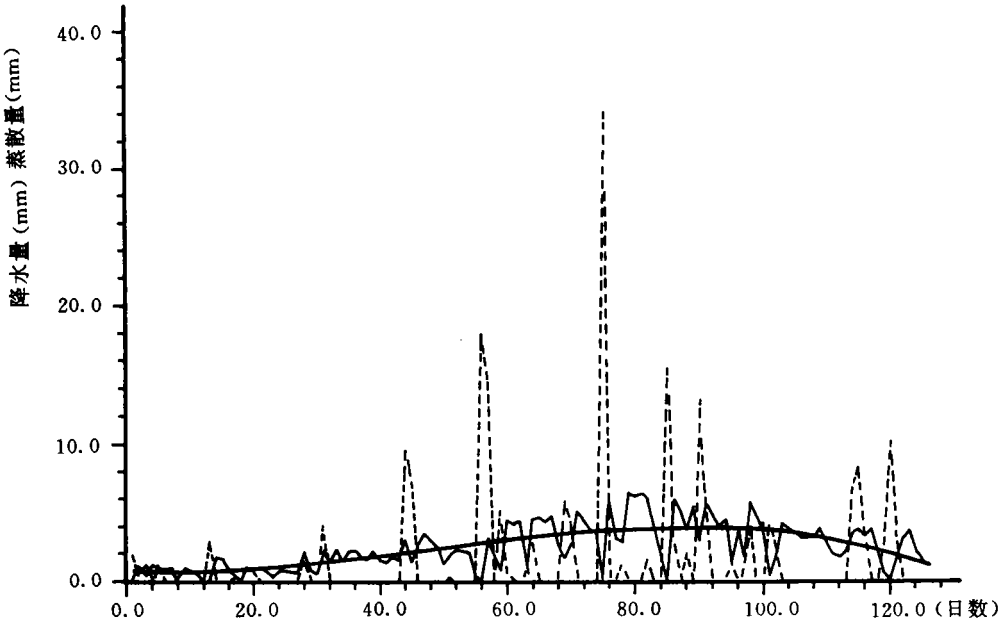

图3 小麦生长期日蒸散量变化图

每日蒸散量结合小麦不同生育普遍期时间的统计分析表明(见表2)，小麦孕穗—抽穗时段平均日蒸散强度最大，为4.5mm/d；其次是抽穗—开花时段，为4.0mm/d；出苗—三叶时段平均日蒸散强度最小，为1.4mm/d。与有灌溉条件的春小麦相比，播种—拨节各生育时段平均日蒸散强度大致相同相差较小，而小麦生长旺期的拨节—抽穗、抽穗—乳熟期平均日蒸散强度分别要小1.1mm/d和3.3mm/d，而且最大平均日蒸散强度的出现时段与灌溉春小麦的出现时段不吻合，如，表2孕穗—抽穗时段平均日蒸散强度最大，而水分供应良好的春小麦最大平均日蒸散强度出现在抽穗—乳熟时段，为6.8mm/d。分析认为这与麦田的水分供应状况有关。如图3所示，每一次较大降水过程后的晴天均对应着较大日蒸散强度值。如播种后的第77天小麦孕穗期前后有一次34.1mm的降水过程，之后的几天无雨天气持续6mm多的日蒸散强度，这与甘肃河西灌溉春小麦同期晴天的日蒸散强度相当。另小麦三叶期前后第44天的夜间降雨9.5mm，第2天晴天日蒸散强度达3mm，与小麦拨节—孕穗期某些晴天的日蒸散强度相当。这表明半干旱旱作农田的蒸散耗水，不仅与小麦不同时期生长状况及维持蒸散耗水所需的能量状况有关，而且与水分供应状况关系密切。这是因为内陆半干旱区旱作小麦在整个生长期中水分供应状况均处于程度不同的亏缺状态，而晴天用于麦田蒸散的能量基本是保证的，故每次具有一定量的降水过后，下渗到土壤中的水分改善了作物根系层的土壤水分条件，麦叶气孔阻力减小，作物的蒸腾耗水增加。同时，降水也增加了植株棵间裸地的表层土壤含水量，使降水后一段时间内，裸地蒸发相应增加，但随蒸发裸地表层含水量逐步减少，其蒸发也逐步减弱。上述结果中最大日蒸散量出现时段与灌溉春小麦的不吻合，也是因为抽穗—乳熟降水较少，土壤水分补充不足。

表 2　旱作春小麦各生育期蒸散耗水状况

生育期	时段	耗水量 (mm)	平均日蒸散量 (mm/d)	占总耗水量 (%)	叶面积系数
播种—出苗	15/3—8/4	16.5	0.7	5.6	
出苗—三叶	9/4—24/4	21.6	1.4	7.3	
三叶—拨节	25/4—20/5	58.7	2.3	20.0	0.42—0.87
拨节—孕穗	21/5—30/5	37.6	3.8	12.8	1.10—1.55
孕穗—抽穗	31/5—8/6	40.3	4.5	13.7	1.55—1.76
抽穗—开花	9/6—17/6	35.5	4.0	12.1	1.76—1.42
开花—乳熟	18/6—2/7	49.5	3.3	16.8	1.42—1.12
乳熟—黄熟	3/7—15/7	30.3	2.3	10.3	1.12—0.29
黄熟—成熟	16/7—17/7	4.1	2.1	1.4	
全生育期	124	294.1		100.0	

分析各生育期平均叶面积系数值与平均日蒸散强度发现，它们之间存在很好的线性相关(见图 4)，其回归方程为：

$$E = 0.28LAI + 0.87 \qquad (4)$$

式中 E 为某一生育期的平均日蒸散强度(mm)，LAI 为某一生育期的平均叶面积系数。

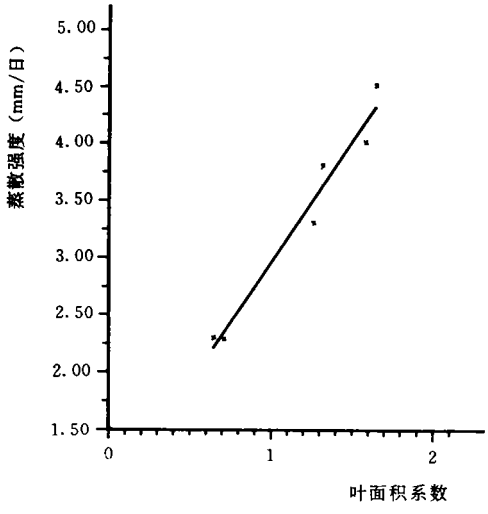

图 4　各生育期平均叶面积系数与平均日蒸散强度的关系

4.2.2 能量平衡

忽略植物光合作用及热贮存的能量消耗，则地表能量平衡方程可表示为：

$$R_n = LE + H + G \qquad (5)$$

式中 R_n 为太阳净辐射，LE 为潜热耗能，H 为感热耗能，G 为由地表向下的热量传输耗能。测出 R_n、LE、G 便可由(5)式算出 H，从而得到地表能量平衡方程中的各参量。实际中，因蒸渗计只能测出某一时段如 1h、2h 的蒸散量，而净辐射表和地中热流板测出的是某一时间的平均热通量，因此需对其积分算出与蒸渗计测试时间间隔相同的单位面积接受或消耗的热量，再算出式(5)中的 H。

表 3　06 时—20 时(北京时)地表能量平衡各参量总量与净辐射总量的比值

生育期	各参量与净辐射的比值			鲍恩比 (BR)	平均			
	LE/R	H/R	G/R		LE/R	H/R	G/R	BR
三叶	0.31—0.45	0.25—0.38	0.24—0.30	0.65—1.48	0.39	0.34	0.27	0.87
拨节	0.55—0.71	0.07—0.29	0.16—0.22	0.11—0.52	0.64	0.17	0.19	0.27
抽穗—开花	0.64—0.73	0.16—0.25	0.11—0.13	0.22—0.40	0.69	0.19	0.12	0.28
乳熟—黄熟	0.27—0.52	0.39—0.61	0.06—0.12	0.77—2.29	0.42	0.49	0.09	1.17

计算统计小麦主要生育时段加强观测得到的地表能量平衡方程各参量06时—20时的总量占净辐射总量的比值和其它有关值(见表3)，得小麦三叶期与其它生育时段相比，潜热耗能所占比重最小，平均为39%；抽穗—开花时段潜热耗能占净辐射的比重最大，平均为69%，但要小于胡隐樵等[5]在甘肃河西灌溉春小麦农田测出的80%的结果。感热耗能所占比重以拔节生育期前后最小，平均为17%；而在乳熟—黄熟生育时段感热耗能所占比重最大，平均为49%；地表向下的热量传输耗能以小麦三叶期最大，平均为27%，Idso et al.[6]在裸地测出为22%—51%；乳熟—黄熟生育时段最小，平均为9%。纵观小麦生长前期至后期的地表能量平衡状况，潜热在地表能量平衡中的作用呈现两头小中间大；感热的作用与此正好相反；地表向下的热量传输耗能的作用呈逐渐递减的趋势。

小麦不同生育时段地表能量分配的不同，反应了作物生长状况、降水对净辐射能量的调配作用。小麦生长初期三叶期，因作物叶面积系数较小，大部分裸地直接接受太阳辐射，地表升温较明显，表现为感热、地中热流耗能占净辐射的比重较大，而此时作物需水和降水量相对较少，故潜热耗能比感热略大，差异较小。而拔节、抽穗—开花期小麦生理生长和生殖生长同时进行，生长旺盛，叶面积系数较大，又进入雨季降雨量逐渐增多，蒸散量增加，潜热耗能占净辐射的比重较大，叶面蒸腾降低了植冠温度，使感热耗能减小，同时相对茂盛的植冠的遮荫作用，减少地表与下层土壤温度的温差，地表向下的热量传输耗能减少。到小麦生长后期的乳熟—黄熟时段，植株和小麦叶面逐渐变黄衰老，蒸腾减弱，植冠温度容易升高表现为潜热耗能变小，感热耗能相应增加，而变黄衰老的叶片仍有较好的遮荫作用，使地表向下热量传输耗能仍然表现较小。

表4 上午下午地表能量平衡各参量总量与净辐射总量的比值

生育期	LE/R		平均		H/R		平均	
	上午	下午	上午	下午	上午	下午	上午	下午
三叶	0.14—0.21	0.16—0.25	0.16	0.23	0.24—0.32	0.02—0.15	0.27	0.07
拔节	0.24—0.35	0.31—0.37	0.30	0.34	0.08—0.17	0.03—0.13	0.12	0.05
抽穗—开花	0.27—0.36	0.34—0.40	0.32	0.37	0.10—0.17	0.03—0.08	0.14	0.05
乳熟—黄熟	0.12—0.24	0.15—0.28	0.20	0.23	0.24—0.31	0.13—0.30	0.27	0.21

同一生育时段能量平衡各参量比较，前三个生育时段，均以潜热耗能为主，尤以拔节和抽穗—开花生育时段表现最为明显；感热耗能在拔节生育时段略小于地表向下的热量传输耗能居第三位，拔节、抽穗—开花生育时段均为第二大耗能项。结合各生育时段鲍恩比的变化范围可以看到，在拔节、抽穗—开花生育时段潜热耗能总是大于感热耗能，而在三叶、乳熟—黄熟生育时段鲍恩比在1.00左右变化，说明潜热耗能大于或小于感热耗能的情况均有可能出现，以观测期间日数统计，三叶期、乳熟—黄熟期潜热耗能大于感热耗能的出现几率各约为70%和50%。潜热感热耗能占净辐射的比重，在同一生育时段的变化还是较大的，如潜热在抽穗—开花时段变化范围最小为9%，乳熟—黄熟时段最大为25%。感热耗能也是如此。而地表向下的热量传输耗能在同一生育期，受上述因素影响要小得多，变化范围最大为6%。

若以当地地方正午时(北京时13:00)为界，分别统计06时—13时和13时—20时的

潜热感热耗能情况(见表 4)。发现除一日外，各主要生育时段下午潜热耗能总是大于上午潜热耗能，感热耗能的情况与潜热耗能正好相反，均表现为上午大，下午小。日内潜热、感热耗能的上述特征，决定了鲍恩比值上午大于下午。

5 结　论

(1)　在内陆半干旱区，降水基本正常的年份。农田水分收支基本平衡，小麦收割到土壤封冻时段，蒸发耗水约占该时段降水总量的 70%。因此，减少秋季农田蒸发耗水，增加土壤水分储备，以改善来年作物水分供应条件，是旱作农田提高水分利用率的关键。

(2)　主要受水分供应条件的制约，旱作春小麦的实际蒸散耗水峰值期与小麦生理需水峰值期并不一定吻合。与有灌溉条件的春小麦相比，平均日蒸散量偏小。

(3)　各生育期的平均叶面积系数与平均日蒸散强度存在较好的线性关系。

(4)　白天净辐射的能量分配。以潜热耗能为主，但有时也出现感热耗能大于潜热耗能。由于旱作春小麦在整个生长期均不能完全覆盖裸地，因此，地表向下的热量传输耗能也占有一定的比重，在旱作春小麦农田地表能量平衡中必须给予考虑。

上述结果是在半干旱区旱作春小麦农田，降水正常略偏多的年份得到的，干旱年份或降水分布不均匀年份其结果怎样？还有待今后进一步观测研究。

参考文献

[1]　柯晓新，林日暖，徐国昌等. 大型称重式蒸渗计研制. 应用气象学报，1994，5(2)：151－157.

[2]　董宏儒. 甘肃省中部地区农业生态位与气候工程对策. 干旱气象文献，北京：气象出版社，1987. 77－83.

[3]　黄文华. 从陇东农田水分平衡看干旱成因和降水资源开发. 干旱地区农业研究，1985，2：35－40.

[4]　龚绍先. 粮食作物与气象. 北京：北京农业大学出版社，1988. 64－71.

[5]　苏从先，胡隐樵等. 河西地区热量平衡和蒸散的初步观测研究. 高原气象，1987，6(3)：217－224.

[6]　Idso S B ，Aase J K and Jackson R D. Net radiation-soil heat flux relations as influenced by soil water content variations. BLM. ，1975，9：113－122.

EVEPOTRANSPIRATIONS AND ENERGY BALANCE ON THE RAINFED SPRING WHEAT FARM

Ke Xiaoxin Zhang Xudong Peng Suqin Yang Xingguo

(Lanzhou Institute of Arid Meteorology, Lanzhou, 730020)

Abstract

By using observational data of lysimeter and so on, the evapotranspiration consumption water on the rainfed spring wheat farm in semi-arid regions was analysed. It was obtained that: (1) under normal precipitation year input output water on rainfed farm is essentially balance, and evaporation in fallow farm duration amounts 70% to precipitation of that duration. (2) duration in which rainfed wheat evapotranspiration reachs its peak value is not agreement with duration in which the physiological consumption water of wheat reachs its peak value. Compared with irrigated spring wheat, averaged daily evapotranspiration of raindfed wheat is small. (3) there is good linear relations between averaged leaf index and averaged daily evapotranspiration intensity in respective grow duration. (4) in main grow duration of rainfed wheat the consumption energy of latent heat is dominant, but in sucking ripeness～sallow ripeness duration the consumption energy of latent or sensible heat which play a leading role is a half percentage respectivelly. (5) because conopies of rainfed spring wheat is not able to cover the bare soil between stems and stems, heat consumption from surface soil to deep soil also has a definite percentage.

Key words: Evapotranspiration, Rainfed farm, Energy balance.