

南京冬小麦农田水分耗散特点分析

周 英 申双和 刘文泉

(南京气象学院应用气象系, 南京, 210044)

摘要 根据田间试验观测资料,从 SPAC(土壤—植物—大气连续统一体)系统出发,分析了南京地区冬小麦抽穗至黄熟阶段农田水分的能量耗散和物质耗散特点,找出了影响作物蒸腾的主要生理、生态因子以及它们之间的关系。

关键词 小麦,农田土壤水分,SPAC 系统,水分耗散,水势,作物蒸腾

分类号 S152.75,S512.1

农田土壤水分耗散过程是在一个连续的动态系统中进行的^[1,2],即经土壤到植物的根、茎,再由叶片的气孔通过蒸腾作用扩散到大气中去。因此必须从 SPAC 系统出发,分析、探讨作物的水分耗散规律。本文根据势能观点,分析了农田土壤水分在 SPAC 系统中的耗散规律,探讨了影响蒸散的主要生态因子对冬小麦气孔开闭的生理控制机制,找出了两者之间的关系以及蒸腾随时间的变化规律。

1 试验方法及资料来源

试验设在南京气象学院农试站冬小麦田,小麦品种为扬麦 5 号。试验地土壤为粘壤土,平均土壤容重为 $1.53\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。播种期为 1990 年 10 月 26 日,观测时段为 1991 年 4 月 27 日~5 月 28 日,正值冬小麦生殖生长的主要时期。主要气象资料(如降水、蒸发、天气状况等)均取自站内地面常规观测月报表。作物生物学数据(如叶面积和干物重)每隔 5 日观测一次;叶水势采用小液流法每天早上 8 时观测;其他项目采用 Li-6200 光合作用系统仪测定(详见表 1)。

表 1 扬麦 5 号田间观测一览表

观测项目	部位(深度)	时间(月/日)	仪器方法
叶水势 ψ LAI			
叶温	旗	五	Li-6200
气孔阻力		月	光合作
光合强度	叶	逐	用系统仪
光强		日	
蒸腾			
土壤湿度		5/1,11,21,29	土钻法
土壤容重	5,10,20,	5/28	环刀法
土壤水势 ψ_s	30,40,50cm	每日 08,20 时	计算法

注: $\psi_s = (h_1 + h_2) \times 13.6 - (h_1 + H)$

大气水势 φ_a 的计算式为^[2]

$$\varphi_a = \frac{R \cdot T}{V_w} \ln\left(\frac{e}{e_s}\right) = \frac{R \cdot T}{V_w} \ln(RH)$$

式中, φ_a 为大气水势(Pa); $V_w=0.018 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$, 为水的偏克分子体积, $R=8.312073 \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 为气体常数; T 为空气绝对温度(K); e, e_s 分别为空气水汽压和饱和水汽压; RH 为空气的相对湿度。

农田潜在蒸散 ET , 采用旱地自动供水蒸散仪测定。

2 SPAC 系统水分势能的分布

土壤水分之所以能在 SPAC 系统中连续不断地由土壤经植物根、茎、叶传输到大气, 是因为系统中存在水分的驱动力——水势, 水势克服阻力做功就产生了水流。在 SPAC 系统中各个环节的势能分配有很大差异, 因而存在水势梯度, 由土壤到叶片、大气, 水势是递减的(表 2), 水分在水势梯度的作用下由高水势向低水势流动。

表 2 SPAC 系统能量分布及天气状况(4/30~5/28)单位: -Pa

项目/日期	4/38	5/2	5/4	5/6	5/8	1/10	5/13	5/15	5/17	5/20	5/25	5/28
土水势 φ_s	0.07	0.12	0.38	0.27	0.29	0.21	0.42	0.49	0.53	0.10	0.31	0.34
叶水势 φ_l	15.6	14.7	13.1	13.1	11.6	10.1	13.8	13.8	13.8	13.8	7.8	10.8
大气水势 φ_a	476.6	453.4	454.8	81.5	169.9	521.6	301.3	289.0	886.2	143.1	328.2	425.6
天气状况	晴	晴	阴	阴	阴	晴	晴	晴	晴	阴	阴	阴

由表 2 可见各部分水势变化范围有很大差异: 土壤水势 φ_s 为 $0 \sim -1 \text{Pa}$, 叶水势 φ_l 为 $-7 \sim -16 \text{Pa}$, 大气水势 φ_a 为 $-100 \sim -1000 \text{Pa}$ 。水分由土壤到叶片, 能量损失为 10Pa , 而从叶片扩散到大气则需消耗 900Pa 的能量。由于水分在植物体内的流动路径是经叶肉组织分别到气孔和角质层(两者并联), 再扩散到大气(图 1)。因角质层阻力比气孔阻力大得多^[2], 因而水分从叶片扩散到大气的主要通道是气孔, 故影响水分传输的叶-气阻力主要为气孔阻力和边界层阻力。据邵明安的研究, 根系吸收阻力平均值为 $3.35 \times 10^9 \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, 而水汽由叶内逸到叶表面再扩散到大气中的阻力为 $3.0 \times 10^{11} \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。可见水分由土壤进入根系与由叶内扩散到大气的阻力之间相差两个量级。除了要克服阻力, 水分消耗的能量还用于水分从液相到汽相的相变, 以及水汽分子逸散到大气所必需的足够的动能。这一物理过程也是以付出水分势能为代价, 通过能量转换的方式来实现。因此, 水分通过叶片到大气所需能量最多。

进一步分析各部分水势随时间的变化规律(图 2)可看出, 从 4 月 30 日~5 月 28 日土壤水势是逐渐下降的, 即说明其湿度总趋势是逐渐增大; 叶水势的时间变化趋势相反, 是递增的, 即说明作物因叶龄增加、叶色由绿变黄导致叶片含水量下降。大气水势因受外界环境条件的影响而呈现起伏变化。将整个观测时段按其发育期分段可分为灌浆-乳熟期(5 月 1~13 日)和乳熟

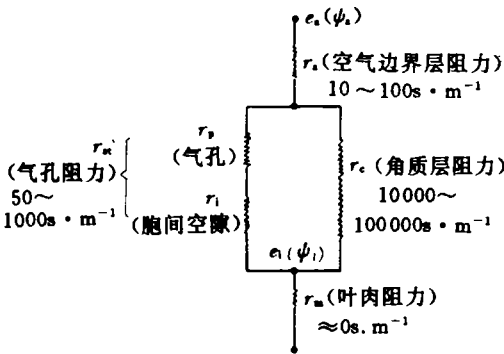


图 1 水分在植物体内流动路径

-收割期(5月14~28日)。水势梯度的大小可以反映作物的耗水能力和土壤的供水能力。灌浆-乳熟期 $\varphi_s-\varphi_r$ 较大,表明土壤供水能力强, $\varphi_s-\varphi_r$ 较小,表明作物的蒸腾耗水能力弱,故此期土壤水分基本能满足作物蒸腾需要,乳熟-收割期则相反, $\varphi_s-\varphi_r$ 较小, $\varphi_s-\varphi_r$ 较大,尤其是在乳熟-黄熟期(5月14~23日) φ_s 有一很深的谷值,使 $\varphi_s-\varphi_r$ 达最大,土壤水分远不能满足作物蒸腾耗水的要求。此时的气象条件和作物生物学特性均需要土壤提供较多的水分。

3 冬小麦耗水特点分析

在SPAC系统中,水分的能量耗散和物质耗散是相互依存的,能量依附一定的物质形态,而物质形态的转化又要依靠能量来驱动。水分物质耗散的主要表现形式是农田蒸散。根据水量平衡方程即可得出实际蒸散的计算公式 $ET=(R-r-p)-\Delta W+G=R_e-\Delta W+G$ 。式中, R 为大气降水, r 为地表迳流, p 为深层渗漏, ΔW 为土壤水分的变化量, G 为地下水补给量, R_e 为有效降水量。

根据南京地区的降水分布规律,冬小麦各生长期降水较少,且分布较均匀,其降水有效率为80%^[5]。另外,地下水的补给量较小, G 取0,这样上式可简化为 $ET=0.8R-\Delta W$ 。

由于蒸散由蒸腾和蒸发两部分组成 $ET=E+E_p$,而 $E_p=ET_p \cdot \exp(-0.6LAI)^{[6]}$,所以 $E=ET-E_p=ET-ET_p \exp(-0.6LAI)$,式中 E 为叶面蒸腾, E_p 为土壤蒸发, LAI 为叶面积指数, ET_p 为农田潜在蒸散。

根据零通量面的位置确定实际发生蒸散的深度^[7,8],从而计算各观测时段的冬小麦耗水量(表3)。

表3 农田蒸腾、蒸散计算表

	灌浆-乳熟		乳熟-黄熟		黄熟-收割		累 计	
	5/1~5/13		5/14~5/23		5/24~5/28		5/1~5/28	
	总量(mm)	日平均	总量(mm)	日平均	总量(mm)	日平均	总量(mm)	日平均
ET_p	36.5	2.81	38.2	3.82	8.80	1.76	83.5	2.98
ET	26.51	2.04	19.35	1.94	8.80	1.76	54.66	1.95
E_p	2.89	0.22	3.20	0.32	0.65	0.13	6.74	0.24
E	23.60	1.82	16.10	1.61	8.10	1.62	47.80	1.71
ET_p-ET	9.99	0.77	18.85	1.89	0.00	0.00	28.84	1.03
R_e	14.00	1.08	40.80	4.08	8.00	1.60	62.80	/

由表3可见,1990年降水最多的时期是乳熟-黄熟期,日均有效降水量达4.08mm,但仍不能满足作物耗水需要,实际蒸散仅为潜在蒸散的一半。此时若及时灌水,满足小麦灌浆需要,将有利于干物质积累和增加粒重。灌浆-乳熟期,小麦也存在一定的缺水现象,主要影响干物质的日增长量,应适时浇“灌浆水”。黄熟-收割期,水分能完全满足需要,实际蒸散与潜在蒸散相等。潜在蒸散以乳熟-黄熟最大,灌浆-乳熟次之,黄熟-收割最小。分析整个观测时段蒸

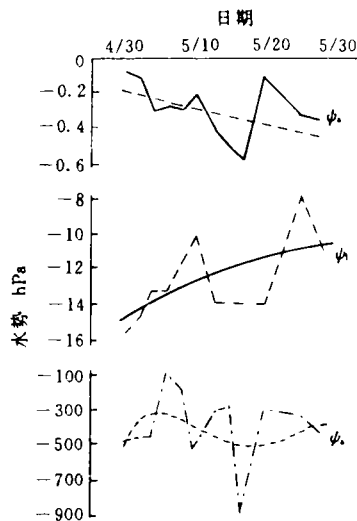


图2 各部分水势随时间的变化规律

腾和蒸发的时间变化(图 3)可以发现,土壤蒸发变化比较平稳,日蒸发量均小于 $1\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,说明作物发育后期即生殖生长阶段株高和叶面积均相对稳定,蒸发不是主要耗水项。相比而言,叶面蒸腾则是农田蒸散的主要贡献项($1.7\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),其变化也很显著,在很大程度上取决于外界天气条件和作物内部生理特性。5 月份降水分布(图 4)是下半月降水明显多于上半月,日照情况正好相反,故其日蒸腾量在灌浆—乳熟(5.1~13)期为 1.82mm ,乳熟—收割(5.14~28)期为 1.62mm 。造成这种结果的另一原因是灌浆—乳熟期的叶片生理机能优于乳熟之后,光合作用和蒸腾作用均较强。

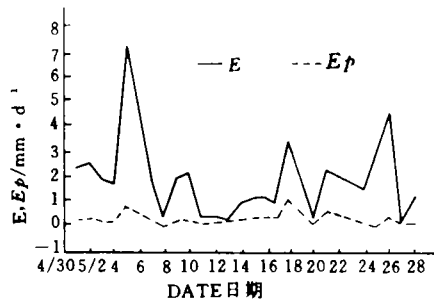


图 3 观测时段蒸腾和蒸发的时间变化

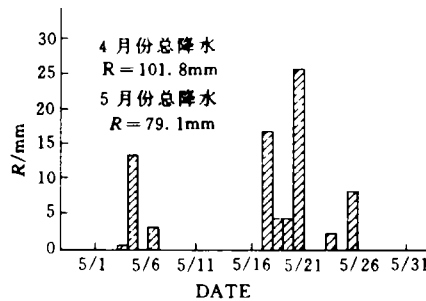


图 4 5 月份降水分布

4 影响水分耗散的主要生理、生态因子

4.1 影响水分耗散的生态因子

外界环境因子对蒸腾作用影响很大,其影响方式都是通过改变气孔开张度来实现的。通常我们采用气孔阻力来表征作物气孔开张度。影响蒸腾的因子很多,如光、温、湿、风等。因仪器所限,本文主要分析光强和饱和差与气孔阻力之间的关系。

(1)光强与气孔阻力 尽管目前我们还无法弄清气孔运动的控制机理,但有一点可以肯定,即光强直接影响气孔开闭^[9]。随着光强的增大,在其他条件适宜的情况下,光合作用增强,势必导致 CO_2 浓度下降,从而使气孔开度增大,气孔阻力减小。分析光合有效辐射与气孔阻力关系,发现两者之间呈极好的负指数相关(图 5)。

(2)空气饱和差与气孔阻力 空气饱和差 d 对气孔阻力 r_s 的影响也很明显,两者呈线性相关(图 6)。空气饱和差是环境温度的一项综合指标,它与叶片内部湿度之间形成的梯度是水分蒸腾的主要驱动力。当饱和差上升时,空气湿度下降,叶片内外的水分梯度增大,叶片向外的水分散失量增加,蒸腾加剧,导致叶水势下降,为保持叶片体内的水分平衡,气孔必须通过减小开度即增大气孔阻力的方式予以控制。

由于光强和空气饱和差对气孔阻力的作用是反向的,因此在分析蒸腾的日变化规律时,必须分别讨论其作用。以 5 月 2 日的蒸腾日变化图为例(图 7),8~12 时气孔阻力逐渐下降,因为经过一整夜的气孔关闭,叶片水分较为充足,随着光强增大,光合作用增强,此时段光强作用大于空气饱和差的反作用,故气孔阻力的总趋势是下降;12~14 时气温继续上升,相对湿度逐渐下降,空气饱和差达最大,且光强达最大时蒸腾失水加剧,气孔只有通过短时关闭来调节体内水分平衡,两者的同向作用使气孔阻力增大;14~16 时饱和差作用大于光强,气孔阻力随饱和差减小而减小;16~22 时气孔阻力随光强减弱迅速增大;22 时至次日凌晨, r_s 呈下降趋势。总的看来,气孔阻力和蒸腾的日变化趋势基本相反,即阻力增大,蒸腾减小。

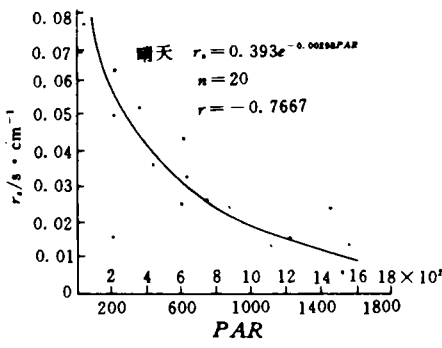


图5 光合有效辐射与气孔阻力关系

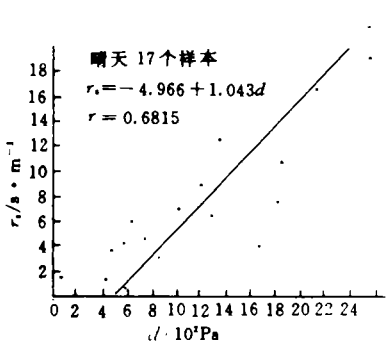


图6 空气饱和差与气孔阻力关系

4.2 影响水分耗散的生理因子

与生态因子不同的是,生理因子通过叶片内部的生理机制来控制气孔开张度。如光合作用对水分代谢的影响就是通过改变保卫细胞的水势来实现的,其控制机理可描述为^[10]

光强↑→光合作用↑→[CO₂]↓→PH值↑→淀粉转化为糖类→细胞液浓度升高
→渗透势下降→细胞周围的水分进入细胞→气孔开放

由此可见,若是从单因子角度分析光合作用和光强对叶片的气孔阻力的影响,两者是同向的,因而可以推得,光合作用越强,蒸腾作用也越强。但实际上作物的生长发育过程是许多生理、生态因子综合作用的结果,因此蒸腾作用并不简单地与光合作用保持一致(图8)。分析发现,在9时以前,13时以后,蒸腾和光合作用是完全一致的,9~13时则呈相反趋势。这说明此时段影响气孔阻力的因子主要是生态因子。由图可看出气孔阻力始终与蒸腾呈相反趋势,充分证明气孔阻力是表征作物水分耗散的一个极好指标,受生理和生态双重因子共同作用。

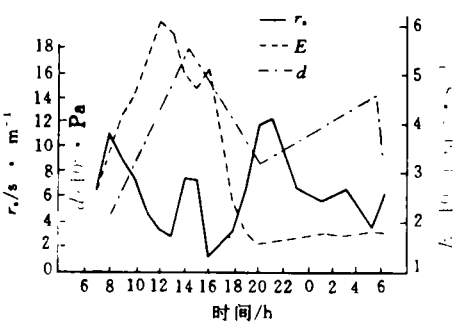


图7 5月2日蒸腾日变化图

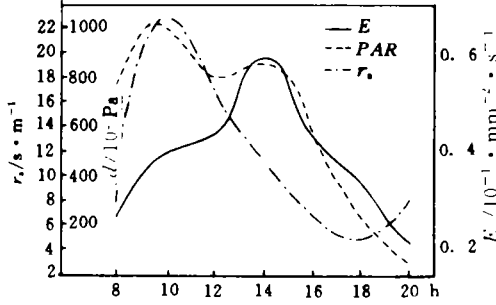


图8 蒸腾作用与光合作用关系

(4/30 12时光强为 $9.8 \times 10^5 \text{lx}$, 小麦光饱和点为 $24\,000 \sim 30\,000 \text{lx}$, 出现“午休”)

5 结论与讨论

(1)SPAC 系统中能量的铅直分布是自下而上递减的,其中土水势变化范围在 $0 \sim -1 \text{Pa}$, 叶水势在 $-1 \sim -15 \text{Pa}$, 大气水势在 $-100 \sim -1000 \text{Pa}$ 。SPAC 系统中水分的能量耗散主要用于叶—气环节。

(2)冬小麦水分的物质耗散在生殖生长阶段的特点是以乳熟—黄熟期需水量最大,灌浆—乳熟期次之,黄熟—收割期最小,其日均值均以相差 1mm 递减。

(3)影响水分耗散的主要生态因子是光强和空气饱和差,其中光强为负指数相关,空气饱和差为正相关。此外,温度、风速、土壤物理性质等都会影响农田蒸散。

(4)影响耗水的主要生理因子是光合作用,它的作用与光强同向,但由于受到生理、生态因子的综合作用,使蒸腾作用与光合作用的日变化并不完全一致,前者为单峰型,后者为双峰型。

由于试验仅进行了一个年度,观测时段又短,故存在偶然误差和观测误差。要消除这种误差,有待于多年重复试验。本文采用的运用能量观点分析水分的物质和能量耗散的方法具有理论价值和实际意义,相信随着植物生理学科对气孔运动机理研究的不断深入,我们对冬小麦的需水和耗水规律将会了解得更透彻。

参 考 文 献:

- 1 邵明安,杨文治,李玉山.植物根系吸收土壤水分的数学模型.土壤学报,1987,24(4):295~305
- 2 康绍忠,熊运章,王振铎.土壤-植物-大气连续水分运移力能关系的田间试验研究.水利学报,1990,(7):1~9
- 3 唐登银,程维新,洪嘉琦.我国蒸发研究的概况与展望.地理研究,1984,3(3):84~95
- 4 刘 滨,巫新民,李玉娥.根据土壤水分动态变化计算农田蒸散.中国农业气象,1991,12(1):26~30
- 5 单树模,王庭槐,金其铭.江苏省地理.南京:江苏教育出版社,1986.85~109
- 6 Ragab R. Beese F. Ehlers W. A Soil Water Balance and Dry Matter Production Model; I Soil Water Balance of Oat II Dry Matter Production of Oat. Agronomy J, 1990, 82(1):152-161
- 7 周 英,申双和.陕西泾阳冬小麦农田蒸散.中国农业气象,1992,13(3):6~9
- 8 施成熙,栗宗嵩.农业水文学.北京:农业出版社,1982.178~184
- 9 陈德兴,陶炳炎,周 英.大田小麦叶片气孔运动对环境反应的研究.南京气象学院学报,1989,12(1):99~106
- 10 潘瑞炽,董愚得.植物生理学.上册,第二版.北京:高等教育出版社,1987.17~21

A STUDY OF WATER LOSS CHARACTERISTICS FOR WINTER WHEAT FIELDS IN NANJING NEIGHBORHOOD

Zhou Ying Shen Shuanghe Liu Wenquan

(Department of Applied Meteorology, Nanjing Institute of Meteorology, 210044 Nanjing, PRC)

Abstract Based on field experiments and starting from the Soil-Plant-Atmosphere Continuum (SPAC) theory, analysis is done of the features of energy and substance consumption in relation to the water loss from winter wheat fields in the neighborhood of Nanjing spanning from heading to yellow ripening, with the crop transpiration affection physiological and ecological factors in the main acquired, together with their relation.

Keywords wheat, soil moisture, SPAC system, consumption, water potential, transpiration