

作物干旱指标对西北半干旱区春小麦 缺水特征的反映

张 杰, 张 强, 赵建华, 王 胜, 赵 宏, 王 静

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开发实验室, 甘肃兰州 730020)

摘要: 针对作物水分胁迫较为严重的西北半干旱区, 应用 CI301-PS 光合作用仪对春小麦开花到乳熟期间的生理特征和环境因子进行了近 1 个月的观测, 并研究分析了 3 种作物干旱指标叶水势、作物水分胁迫指数以及气孔导度随时间变化和对气象因子的响应。发现干旱胁迫增加时, 叶片水分减少, 作物水分胁迫指数增大, 叶水势降低, 气孔导度有所减小。因此, 气孔下腔的 CO₂ 浓度降低, 作物净光合速率有所减小, 不利于半干旱区小麦生物量的累积; 三者相比, 叶水势是反应西北半干旱区作物干旱最敏感的指标; 受半干旱区逆湿现象的影响, 9:00 或之后一段时间观测叶水势和气孔导度对小麦等作物缺水状况反映得更客观。

关键词: 作物水分胁迫指数; 气孔导度; 叶水势; 干旱; 蒸腾速率

文章编号: 1000-0933(2008)04-1646-09 中图分类号: Q948 文献标识码: A

The response of three crop drought indices to spring wheat water stress over semi-arid region in northwest China

ZHANG Jie, ZHANG Qiang, ZHAO Jian-Hua, WANG Shen, ZHAO Hong, WANG Jing

Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climatic Changing and Disaster Reduction of CMA. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1646 ~ 1654.

Abstract: Aimed at severe crop water stress over semi-arid region in Northwest China, Some physiological and environmental parameters are observed during the Spring wheat's flowering and ripe period by CI301-PS photosynthesis instrument, the observation lasts for 1 month. based on the observed value, crop water stress index (CWSI) is calculated, and leaf water potential (LWP) is evaluated. The variations of CWSI, LWP and stomatic conduction with the time and climate change are analyzed. The results show that with the increase of water stress, leaf water will decrease, and CWSI will increase, and leaf water potential will decrease, and stomatic conduction will decrease. As a result, CO₂ concentration entering stomata will reduce, and the crop net photosynthesis ratio will decrease, and all of these go against biomass accumulation. By Comparison with these three indexes, it is found that CWSI is the worst index responding to climate change and crop drought, leaf water potential is better than the stomatic conduction. Because of the reverse humidity in the arid regions, it is the most suitable time to observe leaf water potential and stomatic conduction at 9:00 AM. or after 9:00 AM.

基金项目: 国家科技部科研院所社会公益研究资助项目(2004DIB5J192)

收稿日期: 2006-12-26; 修订日期: 2007-10-22

作者简介: 张杰(1975), 女, 甘肃民勤人, 博士生, 主要从事陆面过程和气候变化研究. E-mail: gs-zhangjie@163.com

致谢: 赵红和刘宏宜对实验数据进行采集和处理, 在此一并致谢。

Foundation item: The project was financially supported by Science and Technology Ministry Commonweal Item (No. 2004DIB5J192)

Received date: 2006-12-26; **Accepted date:** 2007-10-22

Biography: ZHANG Jie, Ph. D. candidate, mainly engaged in land process and climate change. E-mail: gs-zhangjie@163.com

Key Words: crop water stress index; stomatic conduction; leaf water potential; drought ; transpiration rate

干旱是全球最严重的自然灾害之一^[1],随时危及人们的生存环境。从气候角度讲,干旱问题可归结为热力作用下降水和蒸发的收支平衡问题^[2]。因此,提出了很多反映气候干旱的指标,如:湿润指数^[2]、水热积指数以及单因子降水量指标等^[3,4],依据这些指标将全球气候划分为4~6个区域。气候干旱指标反映了全球大尺度的气候干湿分布特征,其变化不会因人为因素而很快产生影响,并且目前的气候干旱指标也不能很好地反映小区域范围的干旱状况,特别对于复杂地区或有流域或地下水灌溉的区域。

与气候干旱相比,作物干旱的发生和发展有着复杂的机理,它不可避免地受到各种自然或人为因素的影响,如气象条件、水文条件、作物布局、作物特点、生长状况、耕作制度等都可能影响作物干旱^[5,6]。作物干旱的指标也比较丰富,主要可分为气象指标、作物指标以及综合指标^[7~9]等。在众多的作物干旱指标中,土壤含水量和作物水分胁迫指数是目前研究最成熟的干旱指标,但是,以土壤含水量评价作物干旱有其不确定性存在:首先,目前土壤含水量的测站相对较少;其次,作物缺水受大气干旱和土壤干旱两个因素的共同影响,主要是土壤供水不足,土壤水势较小,使得土壤对植物的供水不足;另外,在供水状况一定的条件下,大气蒸发力强弱也影响作物的蒸腾量和叶水势状况,因此,目前还不能根据土壤含水量很好地评估大尺度的作物干旱问题。作物水分胁迫指数相对比较常用,它直接以作物本身的生长状况为依据,并已经开始被遥感技术应用到大面积干旱评估方面^[7]。除此之外,叶水势是直接反映作物水分状况重要指标之一^[10~12],气孔导度和冠气温差也是反映作物干旱的重要指标^[13]。但是,目前还不能确定哪一种指标更适用于干旱半干旱区,并且可以被大面积推广应用。西北半干旱区很多地方的作物生育期降水不到250mm,作物受水分胁迫十分严重,本研究应用光合作用测定仪CI301-PS,对西北半干旱区春小麦开花到乳熟期间(6月17至7月8号)的生理生态参数进行了近1个月的观测,包括蒸腾速率、气孔导度、胞间CO₂浓度、出气孔CO₂浓度和相对湿度、叶片温度。光合作用参数净光合速率、光合有效辐射和大气环境参数等,应用观测资料计算了作物水分胁迫指数,并估算了叶水势,通过分析作物水分胁迫指数、叶水势和气孔导度3个指标对作物缺水状况的反映能力,找出反映西北半干旱区作物干旱的最适指标,目的是将其应用到遥感干旱监测中,以便进行大面积的定期的作物水分状况的监测。

1 原理和方法

1.1 作物水势的估算原理

目前,作物水势的研究基本都是对单一点上的观测研究,观测方法有等压法,热电偶温湿计法和压力室法。在土壤-植被-大气连续体系(soil-plant-atmosphere continuum,简称SPAC)中,水流是植物与环境间的联结物。在植物体内,水分运输同电流一样,象是在一个既有并联又有串联的十分复杂的系统内进行的。水流量与不同部位的水势变化和水流阻力有关,类似导线中电压变化与电阻大小成正比一样。根据欧姆定律 $\Omega = \Delta U/I$,则水流阻力 $R = \Delta(\psi q)$ 。蒸腾速率的大小反映了SPAC中的水流通量,因此,叶气系统的水流阻力 R_{la} 由下列公式计算^[14]:

$$R_{la} = \frac{(\psi_l - \psi_a)}{T_r} \quad (1)$$

式中, ψ_l, ψ_a 分别是叶水势(Pa)和大气水势(Pa); R_{la} 为叶气系统的水流阻力($s \cdot m^{-1}$), $R_{la} = r_l + r_a$; r_l 为叶面阻力, r_a 为空气阻力; T_r 为蒸腾速率($\mu g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)。

将(1)式变形得叶水势 ψ_l 的估算公式:

$$\psi_l = \psi_a + T_r R_{la} \quad (2)$$

大气水势 ψ_a 由水势的定义出发,可由大气相对湿度计算,即:

$$\psi_a = \frac{RT}{V_w} \ln RH = 4.6182 \times 10^5 T \ln RH \quad (3)$$

式中, R 为普适气体常数, $8.3127 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; V_w 为水偏摩尔体积 ($\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$); T 为大气绝对温度 (K), RH 为相对湿度 (%), 二者由仪器直接观测得到。

公式(2)中, 叶面阻抗 r_l 和蒸腾速率 T_r 由仪器观测得到, 只要求得空气动力学阻力 r_a ; 即可估算出叶水势。空气动力学阻力通过下式计算得到:

$$r_s = r_a(e^* - e_s)/(e_s - e_a) \quad (4)$$

式中, e^* 为饱和水汽压, 采用 WMO1996 年第五版公布的最新公式^[15]:

$$e^* = e_0 \cdot \exp[17.62t/(24.3 + t)] \quad (5)$$

叶面水汽压和空气水汽压 e_s 和 e_a 由仪器观测的相对湿度计算得到, $e_0 = 6.11 \text{ hPa}$, 空气温度和叶面气孔阻力由光合作用仪器 CI301-PS 观测得到。

1.2 作物水分胁迫指数估算

作物水分胁迫指数 $CWSI$ 最初被 Idso 提出, 随后 Jackson 定义为实际蒸散量与潜在蒸散量的比值^[16], 后来 Moran 等将其表达式推算得到了考虑土壤影响的冠(地)气温差 ($T_s - T_a$) 的关系^[17], 即:

$$CWSI = \frac{(T_s - T_a) - (T_s - T_a)_{\min}}{(T_s - T_a)_{\max} - (T_s - T_a)_{\min}}$$

式中, $(T_s - T_a)_{\min}$, $(T_s - T_a)_{\max}$ 分别为冠(地)气温差 ($T_s - T_a$) 的上下限, 本研究中研究对象是小麦叶片, 在这里只考虑冠气温差及上下限。根据 Moran 的思路, 假设冠气温差与植被指数成梯形关系, 其 4 个顶点分别代表水分充分供给的完全植被、完全水分胁迫的完全植被、完全湿润的裸露土壤以及完全干燥的裸露土壤。裸土温度用 0cm 地表温度观测得到, 湿润裸土温度为下雨后的同一时段温度。为满足观测需求, 选择 4 个试验样地进行观测, 4 个样地分别代表了充分供水、完全水分胁迫、垄上积水以及无垄耕作区域。应用小麦开花到乳熟期所有观测资料, 根据前两种耕作方式可以得到完全植被的冠气温差上下限, 这样就可以估算出自然条件下垄作小麦的冠气温差。

2 实验设计和说明

本项目观测在西北半干旱区实验基地进行, 该基地是中国气象局兰州干旱气象研究所的地-气相互作用定点观测基地。站点中心位置位于 104.6°E , 35.53°N , 占地 3 km^2 , 其中小麦种植面积占总面积的 $1/3$, 本观测试验区全部是以自然降水条件下垄作方式播种区, 以便尽可能多地利用垄上积水量, 研究区代表了西北半干旱区的典型下垫面和典型耕作方式。为满足多个试验的观测需求, 还设计了 4 种试验样地。4 个样地分别为: (1) 靠外来积水进行灌溉的垄作试验区, 代表了充分灌溉的试验区, (2) 不考虑垄作积水的试验区, 代表极端干旱的区域, (3) 垄上积水耕作区, 代表正常的田间耕作区, (4) 有水分灌溉的无垄试验区。本试验对 4 个样地进行了同步观测, 用于进行冠气温差上下限的估算。

作物生理和气象要素采用美国的 CI301-PS 便携式光合作用仪观测, 观测项目包括作物生理生态参数蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、出气孔 CO_2 浓度和相对湿度、叶片温度等, 光合作用参数有净光合速率、光合有效辐射等, 大气环境参数有空气温度、湿度和 CO_2 浓度等。观测对象为开花到乳熟期间的春小麦。观测时间从 6 月 17 日到 7 月 8 日, 每天从 7:00 到 20:00 每小时观测 1 次, 每次观测 4 个样地, 每个样地观测 5 次, 每次间隔时间约 0.5min。

3 结果分析

3.1 干旱指标的时间变化规律

自 2004 年 6 月 17 日至 24 日的连续 8d 里, 在 6 月 22 ~ 23 日有一次天气过程, 降水量为 5mm。在连续 8d 里, 各参数有明显的日变化规律。从图 1(a) 可以看出, 叶水势的日变化特征非常明显: 在日间, 白天叶水势相对较低, 早晚比较大, 随着时间的推移, 叶水势的日平均状况和最大、最小值都表现为逐渐减小的趋势, 水势的日较差增大, 到 21 日达到最小值, 之后又有所增加。原因是: 在没有其他水分供给的条件下, 随着时间的推移, 作物失去水分的累积量逐渐增多, 供给作物生长的土壤水分逐渐减少, 在大气蒸发力的作用下, 叶片越来

越缺水,叶片水势也因此逐渐降低;自 21 日之后,由于有天气过程出现,空气湿度增加,同时因为云的出现,大气蒸发力降低,因此叶水势相对增加,并且叶水势的日较差也减小。

图 1(b) 为作物水分胁迫指数 CWSI 连续 8d 的变化,可见 CWSI 的日变化特征相对比较复杂。在日间,白天 CWSI 相对较大,早晚比较小,随着时间的推移,CWSI 的平均状况和最大、最小值变化的规律性不强,到第 5 天之后,CWSI 逐渐减小,并且呈现出比较有规律的变化。图 1(c) 为叶片气孔导度的变化特征,可见,平均气孔导度的日变化也是逐渐降低的,最大值变化较复杂,从第 5 天开始有所增加,其变化趋势和叶水势变化正好相反。每日气孔导度基本是早上最大,然后呈递减的趋势,原因是气孔有前馈式反应和反馈反应两种调节功能,随着太阳光照增强,大气湿度下降,为了确保作物正常生长,气孔发生前馈式调节而关闭。当作物已经处于缺水状态时,由于叶水势降低,气孔出现反馈反应调节,气孔也会趋于关闭。图 1(d) 给出了连续 8d 的空气相对湿度,可见,空气湿度很好地反映了 8d 的天气状况,前 4d 里,没有降水时,空气变得越来越干燥,当有天气过程时,空气湿度逐渐增加。

对比图 1(a) ~ (c),可以看出:叶水势反映作物干旱的程度最有规律性,作物水分胁迫指数反映作物的干旱程度最差,气孔导度是比较好的反映作物干旱的指标,但是,由于它具有双重的调节功能,有时候变化比较复杂。对比 3 个参数和空气湿度的变化,可以看出,3 个干旱指标总体都能反映出空气干旱的特征。其时间变化表明,在半干旱区,如果一段时间没有降水产生,那么植被会逐渐缺水并且缺水会逐日严重起来,如果没有水分的补给,叶内细胞中的水势会逐渐接近或低于萎蔫临界值,致使植株萎蔫或停止生长。

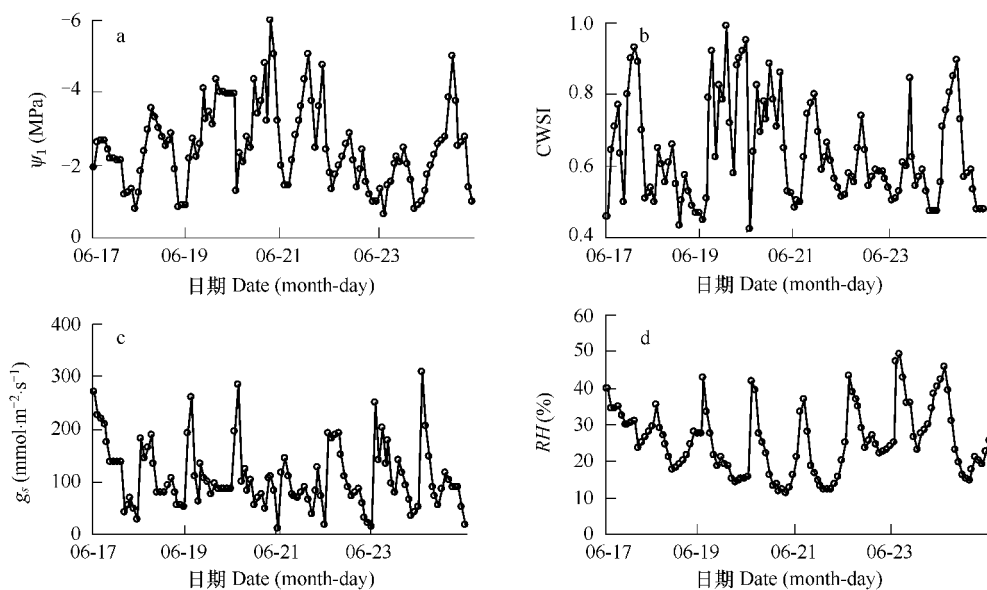


图 1 作物干旱指标(a-c)和空气湿度(d)的逐日变化特征

Fig. 1 day variety of three drought indices(a-c) and air relative humidity(d)

3.2 作物干旱指标对气象要素变化的响应

应用小麦开花期的观测资料(6 月 17 日至 7 月 8 日),分析了同一生育期内作物干旱指标对气候因子变化的响应程度。图 2 上(a)为叶水势随空气温度的变化($R^2 = 0.65$),可见,在干旱区,随着空气温度的增加,叶水势有所减小,因为空气温度增加了大气的蒸发力,作物水势受大气蒸发力和土壤水势的影响,当土壤水势不变、大气蒸发力增加时,叶水势将会减小;随温度的增加,作物水分胁迫指数也有所增加(b) ($R^2 = 0.47$),原因是,温度增加了大气的蒸发力,作物因蒸腾失去水分更多,所以 CWSI 增加;叶片气孔导度随温度的增加有所降低(c) ($R^2 = 0.45$),因为温度增加时,作物因蒸腾失去水分也增加,又因在半干旱区,作物本身的水分相对亏缺,叶水势降低,气孔因此出现反馈反应,通过关闭气孔减小气孔导度,以调节自身的水分状况。

图 2 下为湿度与诸参数的关系,图下(a)为叶水势与空气湿度的关系($R^2 = 0.66$)。随着空气湿度的增

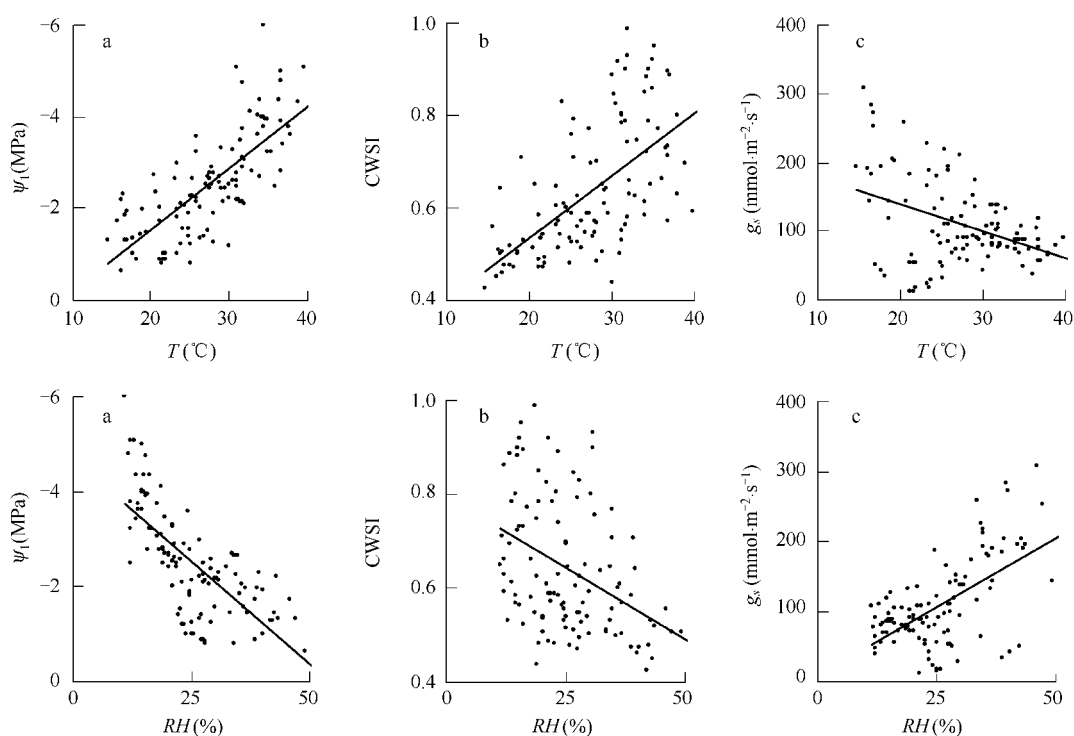


图2 干旱指标与空气温度和湿度的关系

Fig. 2 The relations of drought index with air temperature and relative humidity

加,叶水势有所增加,因为空气湿度在一定程度上反映了气候的干燥程度,当空气湿度较大时,该地区气候也相对湿润,大气蒸发力相对于空气条件下有所减小,因此,叶水势有所增加。图下(b)为CWSI与空气湿度的关系($R^2=0.26$),随空气湿度的增加,作物水分胁迫指数减小,因为在相对湿润的环境中,作物蒸腾失去的水分相对较少,因此作物水分胁迫指数减小。图(c)为气孔导度与空气湿度的关系($R^2=0.46$),湿度越大,作物蒸腾失去的水分越少,作物水势增加,气孔反馈反应作用较小,气孔导度增加。另外,因空气湿度大,作物前馈式反应也相对较少。

从图2可以看出:叶水势与气候因子的关系较好,其次是气孔导度,作物水分胁迫指数与气候参数的关系的复相关系数最小,说明叶水势和气孔导度对于干旱气候的响应比较敏感,而作物水分胁迫指数对于干旱气候的变化不太敏感,或关系较为复杂。在没有灌水的条件下,首先由于气候干旱造成了土壤干旱,土壤干旱又直接导致了作物干旱;另外,气候干旱意味着空气相对比较干燥,增加了大气的蒸发力,又直接地影响作物,因此,气候干旱直接或间接地促使作物干旱。因此,如果对气候干旱不敏感,那么也不能很及时准确地评估作物干旱的状况。在这方面,作物水分胁迫指数相对其它两个参数的作用较差。

气象因子影响了大气的蒸发力,不同的土壤水分状况和不同的大气蒸发力条件下,水势的分布是不一样的。对于某生育期的作物,当供水充足时,作物将保持正常的蒸腾,叶片中的水流是稳定的,经过叶片的同一部位的水流量是一常数,同一部位的叶水势地是一常数;当作物受到水分胁迫时,土壤中水分也会随气象因子的影响而相对不足,土壤水势有所减小,当大气蒸发力变化不大时,经过叶片的水流量会减小,叶水势也会因此而降低。对于不同作物在不同生育期,因作物叶面积、根长等生理特征存在差异,即使在供水充足的状况下,叶水势也有一定的差异。

3.3 作物干旱指标日变化特征

叶水势的日变化表现为抛物线型(图3a),7:00最大,然后逐渐减小,到14:00左右达到最小,之后随着光照减弱,水势有所增加,到20:00,叶水势与早上相接近。研究表明^[18],在20:00以后,叶水势继续增加,并且还会在夜间某时刻达到峰值。作物水分胁迫指数的日变化表现为单峰型(图3b),7:00最小,然后逐渐增大,

到 13:00 左右达到最大,之后随着光照减弱,作物水分胁迫指数有所减小,到 18:00,作物水分胁迫指数达到稳定状态,之后,变化的幅度很小,但其数值较 7:00 大。气孔导度的日变化基本为递减趋势(图 3c),7:00 最大,然后逐渐减小,到 13:00 左右出现一个小的波动,之后随着光照减弱,气孔导度又有所减小,到 20:00,达到最小。

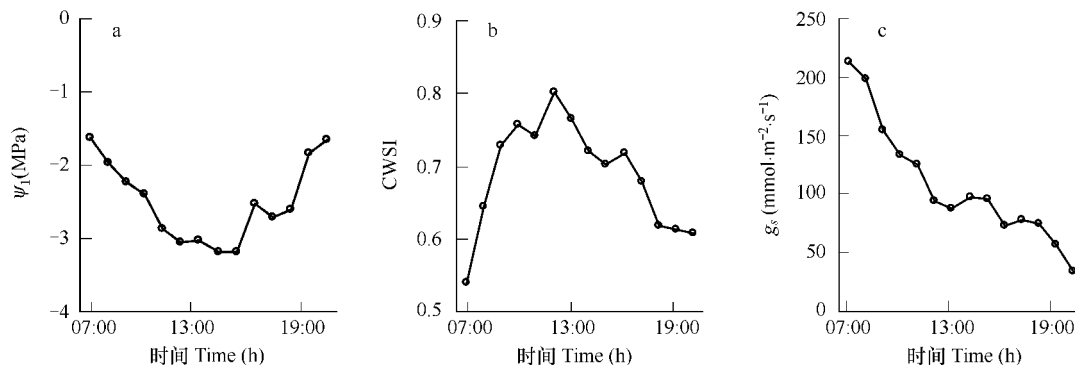


图 3 叶水势(a)作物水分胁迫指数(b)气孔导度(c)的日变化特征

Fig. 3 day variety of leaf water potential(a) Crop water stress index(b) and stomatic conduction

造成 3 个指标日变化的原因主要是太阳辐射和温度的日变化,在正午前后,太阳辐射最强,温度最高。根据上述分析,3 个指标对气象因子的响应,出现了水势的最小值,作物水分胁迫指数的最大值。研究表明^[19],在西北干旱区,夜间常出现逆湿现象,使得作物叶片表面有结露产生,因此,夜间水势较高。由于在西北干旱区,土壤水分也相对较少,所以,在午后,尽管太阳辐射有所减弱,但是作物不能及时地从土壤中吸收所需的水分,在干燥的大气作用下,气孔导度仍然很低。

3.4 蒸腾速率与气孔导度和叶水势的关系

根据上述分析,叶水势和气孔导度在反映作物水分胁迫时更为敏感。图 4(a)给出了蒸腾速率与叶水势的关系($R^2 = 0.58$),可见,随着叶水势的减小,蒸腾速率线性增加,这种变化趋势与干旱区胡杨林的蒸腾速率与叶水势的关系一致^[20],而与冬小麦的变化趋势相反^[21]。原因是小麦在开花到乳熟期间,叶面积达到最大,并且也是干物质积累时期,蒸腾速率比较大。一方面是由于气温升高或者大气湿度降低造成蒸腾作用增强,另外,由于土壤(特别是表层)的水分减少,造成叶片水势降低。

研究表明^[17],蒸腾速率随气孔导度的变化而变化,并且在水分胁迫的状态下,变化更敏感。图 4(b)给出蒸腾速率 λE 和气孔导度 g_s 的散点关系($R^2 = 0.62$),可见,蒸腾速率和气孔导度之间存在抛物线关系,并不是随气孔导度的增大而一直增大。在气孔导度达到 $120 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,蒸腾速率达到最大值,之后虽然气孔导度在增大,但蒸腾速率有所减小。原因可能是作物水分相对不足,当气孔导度增大到一定程度时,作物在

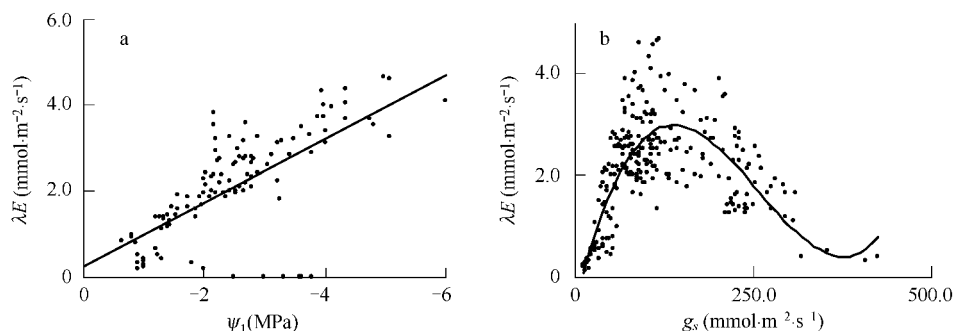


图 4 蒸腾速率 λE 与叶水势 ψ_L (a) 和气孔导度 g_s (b) 的关系

Fig. 4 the relations of transpiration rate λE with ψ_L (a) and g_s (b)

此之前由于蒸腾而失去水分太多,没有太多水分供给作物蒸腾,所以蒸腾速率有所减小。

3.5 干旱指标与作物净光合速率的关系

根据上述分析,叶水势和气孔导度在反映作物水分胁迫时更为敏感。图 5 给出了叶水势和气孔导度与净光合速率的关系,图 5(a)为作物净光合速率与叶水势关系。净光合速率随叶水势的增加而呈抛物线型,当叶水势在 -2MPa 附近时,净光合速率达到最大值,复相关系数 R^2 达到 0.66。(通常 -2MPa 左右被认为是小麦萎蔫的临界值)。图 5(a)表明,当叶水势大于此临界值时,叶水势越小,净光合速率越大,当小于此临界值时,叶水势越小,净光合速率越大。关于这一现象的原因还有待进一步讨论。图 5(a)也说明干旱对作物净光合速率的影响很明显,当干旱胁迫增加时,叶水势降低,作物净光合速率有所减小,不利于作物生物量累积。反之,当干旱被缓减时,作物的叶水势有所增加,作物的净光合速率增加,有利于作物生物量累积,产量增加。原因是干旱对作物生长的胁迫通过对作物水分的影响而调节,从而影响作物气孔导度和对 CO_2 的同化能力,影响作物的净光合速率。净光合速率低,说明作物的物质积累效率低,因此,受水分胁迫的作物产量相对较低。

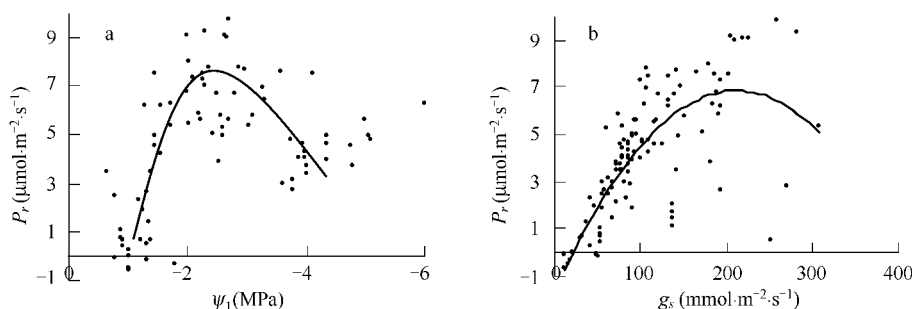


图 5 叶水势和气孔导度对作物净光合速率的影响

Fig. 5 The influence of leaf water potential and stomatic conduction on net photosynthesis rate

作物净光合速率与气孔导度成抛物线型分布见图 5(b) ($R^2 = 0.49$)。当气孔导度相对较小时,净光合速率随气孔导度增加有所增加,在气孔导度达到 $230\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,净光合速率达到最大,之后,随气孔导度增加而降低。原因是作物蒸腾速率随气孔导度的增加而增加,当气孔导度增大到一定程度,作物因蒸腾失去的水分太多,影响作物的光合作用,净光合速率有降低趋势。因此,气孔导度决定了作物水分的利用率和对 CO_2 的同化能力,从而影响作物净光合速率。

3.6 干旱指标的应用

有研究结果表明^[13]:清晨叶水势比较稳定,能够反映作物水分的状况。这些研究主要针对不同的作物或不同地区。由于干旱地区在夜间存在逆湿现象,使得清晨叶水势变化不稳定,而在什么时候逆湿现象消失,作物受外界气象因素的影响较小,并且表现出正常的水分状况,这一点研究相对较少。图 6(a)给出了 7:00 至 10:00 每小时观测的叶水势在连续 6d 的变化,可以看出,随着时间的推移,7:00 和 8:00 的叶水势有所增加,而 9:00 观测的叶水势基本维持平衡状态,随时间的变化较小;10:00 观测的叶水势随时间的变化有所降低,说明在干旱区,9:00 叶水势基本不受逆湿现象的影响,而 9:00 之前受逆湿现象的影响较大,并且随着时间的推移,在作物缺水越严重时,受逆湿的影响越大,因此,9:00 的叶水势状况能够反映作物本身的水分状况。目前,关于气孔导度观测时间的研究较少,图 6(b)给出 7:00 至 10:00 每小时观测的气孔导度在连续 6d 的变化,可以看出,随着时间的推移,7:00 气孔导度基本没有变化,8:00 的气孔导度变化没有规律,而 9:00 和 10:00 观测的气孔导度随时间的推移逐渐递减,并且比较有规律,说明 9:00 或以后一段时间观测的气孔导度才能反映作物的水分状况。7:00 气孔导度没有变化的原因也可能与逆湿现象有关。

通过上述分析可以得出:不同地区,叶水势和气孔导度的观测时间有一定差别,如果用此两个指标定量地评估作物受干旱胁迫而缺水的程度,首先应该考虑观测时间的问题。

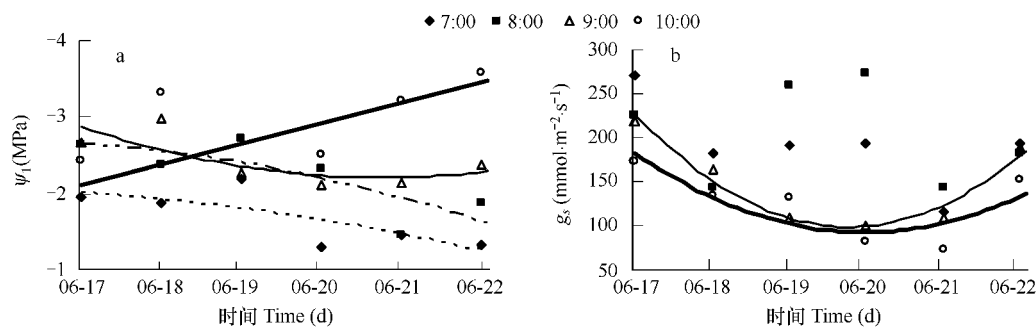


图6 清晨干旱指标的变化

Fig.6 Variety of drought index in early morning

4 结果与讨论

本研究通过分析3个主要的作物干旱指标在中国西北半干旱区的应用,试图找到一种对作物干旱响应比较敏感、并且适宜应用于干旱区的指标参数,得出如下结论:

在中国西北半干旱区,3个作物干旱的指标具有明显的单峰型日变化特征,如果持续一段时间没有降水和其它水分补给,随着时间的推移,3个指标基本都能反映出作物逐渐缺水的特征:叶水势和气孔导度有所减小,而作物水分胁迫指数有所增加;水分胁迫对作物生理特征的影响很大,当干旱胁迫增加时,叶片水分减少,叶水势降低,气孔导度有所减小,因此进入叶气孔的 CO_2 浓度降低,作物净光合速率有所减小,不利于作物生物量累计。3种干旱指标相比,作物水分胁迫指数对气候等反映干旱的因子响应的敏感性最差,而叶水势在反映作物干旱时优于气孔导度。

在西北半干旱区,9:00或之后一段时间观测叶水势和气孔导度对小麦等作物缺水状况的评估更客观,不受逆湿现象的影响。

目前,对遥感反演的蒸腾量已经可以大面积推广^[22,23],在此基础上可以估算出蒸腾速率。根据上述叶水势的估算原理,可以进一步估算叶水势和气孔导度,下一步将结合大量的地面观测和遥感资料进行估算,并尝试推广到大面积的干旱评估中。

References:

- [1] Ye D Z, Huang R H. The law research of drought and waterlogging in Yangze and Yellow river. Ji Nan: Shan Dong Science and Technological Press, 1996. 387.
- [2] Ma Z G, Hua L J, Ren X B. The Extreme Dry/Wet Events in Northern China During Recent 100 Year. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58:69—74.
- [3] Li J, Zhang X S. Estimation of water and thermal product index and its application to the study of the study of vegetation climate interaction in China. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(12):1147—1159.
- [4] Liu Y Z, Li Q X, Shun W R, *et al.* Dry target System of the Climate and the crop. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2005, 33(3):50—53.
- [5] Chen W Q, Xin N Q. Countermeasure and Development of Dry Land Agriculture in China. Beijing: China Agriculture and Science Press, 1994. 57.
- [6] Kang S Z, Xun Y Z. Estimation method of crop water stress status and irrigation index research. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, 22(1):34—39.
- [7] Zhang R H. New model of estimating crop water stress basing on infrared information. *Science in China (series B)*, 1986, 16(7):776—784.
- [8] Zhang R H. The inertia model and application of Water content of soil. *Science Bulletin*, 1991, 36(12):924—927.
- [9] Zhang R H, Song X M, Liu J Y, *et al.* Regional separating of evapor-transpiration and utilizing rate of soil water using remote sensing. *Science in China (series D)*, 2001, 31(11):959—968.
- [10] Zeng F J, Andrea Foetzi, Li X Y. A preliminary study on the effect of irrigation on water physiology of *Tamarix ramosissima* in Cele oasis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7):849—853.

- [11] Hu J C, Jiang D, Cao W X, *et al.* Effect of short term drought on leaf water potential photosynthesis and dry matter partitioning in paddy rice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 63–67.
- [12] Kramer P J. An Early Discussion of Cell Water Relation in Thermodynamic Terminology. *American: Newsletter of Amer Soc Plant Physiol*, 1984, 115.
- [13] Wang H. Research on crop water stress. *Experimental research on crop environment*. Beijing: Weather Stress, 1990. 170–185.
- [14] Zhang B, Ding X W, Zhang T L, *et al.* Variation of hydraulic resistances in red soil-crop air continuums in different farming systems in dry season. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 17–24.
- [15] Luo L, Wang X L, Yu P. The compare and research of the calculate formula of the saturation water steam pressure. *Instrument of Climate Hydrology and Ocean*, 2003, 4: 24–27.
- [16] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a Crop Water Stress Index. *Water Resources Research*, 1981, 17(4): 1133–1138.
- [17] Boegh E, Soegaard H, Thomsen A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 79: 329–343.
- [18] Jia X L, Ma R K, Zhang Q G. The relation of stomatal embolism with leaf water potencial. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(1): 50–54.
- [19] Zhang Q, Hu Y Q. Geography character of oasis and domino of climate. *Advances in Geoscience*, 2002, 17(4): 477–486.
- [20] Si J H, Feng Q, Zhang X Y. Leaf water potential of populus euphratica and influencing factors in extreme arid region. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(4): 505–510.
- [21] Zhang X Y, Pei D, You M Z. Response of leaf water potential photosynthesis and stomatal conductance to varying soil moisture in four crops: winter wheat, corn, sorghum and millet. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 280–283.
- [22] Inge Sandholt, Kjeld Rasmussen, Jens Andersen. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79: 213–224.
- [23] Zhang J, Yang X G, Li Y H, *et al.* Estimation of surface energy and day evapotranspiration in a dry-farming region of northwest china using satellite data. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(6): 1261–1269.

参考文献

- [1] 叶笃正, 黄荣辉. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 387.
- [2] 马柱国, 华丽娟, 任小波. 中国近代北方极端干湿事件的演变规律. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 69–74.
- [3] 倪健, 张新时. 水热积指数的估算及其在中国植被与气候关系研究中的应用. *植物学报*, 1997, 39(12): 1147–1159.
- [4] 刘永忠, 李齐霞, 孙万荣等. 气候干旱与作物干旱指标体系. *山西农业科学*, 2005, 33(3): 50–53.
- [5] 陈万金, 信乃诠. 中国北方旱地农业综合发展与对策. 北京: 中国农业科学出版社, 1997. 57.
- [6] 康绍忠, 熊运章. 作物缺水状况的判断方法与灌水指标研究. *水利学报*, 1991, (1): 33–39.
- [7] 张仁华. 以红外辐射信息为基础的估算作物缺水状况的新模式. *中国科学, B 辑*, 1986, 16(7): 776–784.
- [8] 张仁华. 土壤含水量的惯量模型及其应用. *科学通报*, 1991, 36(12): 924–927.
- [9] 张仁华, 孙晓敏, 刘纪远, 等. 定量遥感反演作物蒸腾和土壤水分利用率的区域分异. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(11): 959–968.
- [10] 曾凡江, Andrea Foetzi, 李向义, 等. 策乐绿洲多枝圣柳灌溉前后水分生理指标变化的初步研究. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 849–853.
- [11] 胡继超, 姜东, 曹卫星, 等. 短期干旱对水稻叶水势、光和作用及干物质分配的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 63–67.
- [13] 王宏. 作物水分亏缺诊断研究综述. *农田作物环境实验研究*. 北京: 气象出版社, 1990. 170–185.
- [14] 张斌, 丁献文, 张桃林, 等. 干旱季节不同耕作制度下红壤-作物-大气连续体水流阻力变化规律. *土壤学报*, 2001, 38(1): 17–24.
- [15] 罗丽, 王晓蕾, 余鹏. 饱和水汽压计算公式的比较研究. *气象水文海洋仪器*, 2003, 4: 24–27.
- [18] 贾秀领, 马瑞崑, 张全国. 冬小麦叶片气孔堵塞与叶水势日变化的关系. *麦类作物学报*, 2005, 25(1): 50–54.
- [19] 张强, 胡隐樵. 绿洲地理特征及其气候效应. *地球科学进展*, 2002, 17(4): 477–486.
- [20] 司建华, 冯起, 张小由. 极端干旱区胡杨水势及影响因子研究. *中国沙漠*, 2005, 25(4): 505–510.
- [21] 张喜英, 裴冬, 由懋正. 几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反应. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 280–283.