

沙依然·外力,李晨,葛道阔,等. 干旱胁迫下水稻光合特性、冠层-空气温差及水分利用效率的变化[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):86-89.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.01.022

# 干旱胁迫下水稻光合特性、冠层-空气温差及水分利用效率的变化

沙依然·外力<sup>1,2,3</sup>, 李晨<sup>4</sup>, 葛道阔<sup>2</sup>, 李秉柏<sup>2</sup>, 张佳华<sup>5</sup>

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏南京 210044; 2. 江苏省农业科学院农业经济与信息研究所/数字农业工程技术研究中心, 江苏南京 210014; 3. 新疆维吾尔自治区气候中心, 新疆乌鲁木齐 830002;

4. 江苏省镇江高等职业技术学校, 江苏镇江 212016; 5. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:**通过设计不同水分处理进行 2 个水稻品种不同生育期干旱胁迫试验, 采用 Li-6400 光合作用测定仪, 对水稻拔节期和抽穗期的 2 个生长阶段不同时间尺度(10、20 d)的干旱处理与对照(CK)进行同步测定, 并对比研究了干旱胁迫下水稻冠层光合特性变化的响应。结果表明:随土壤含水率的减少, 叶片净光合速率和蒸腾速率均明显下降; 叶片气孔导度降低, 但胞间  $\text{CO}_2$  浓度明显上升; 冠层-空气温差( $T_c - T_a$ )增大; 光合有效辐射(PAR)明显降低。“镇稻 9424”的叶片净光合速率和蒸腾速率、气孔导度、光合有效辐射下降幅度比“淮稻 5 号”明显; 胞间  $\text{CO}_2$  浓度与冠层-空气温差的上升幅度比“淮稻 5 号”明显。与对照相比, 水分利用效率随不同时间尺度干旱胁迫程度的加重而整体明显上升, “镇稻 9424”的水分利用效率明显高于“淮稻 5 号”。

**关键词:**水稻; 干旱胁迫; 光合速率; 蒸腾速率; 冠层-空气温差; 水分利用效率

**中图分类号:** S511.01

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-1302(2016)01-0086-04

水分是植物生长的必要条件。水分亏缺直接影响植物的生理生化过程、光合作用和形态结构, 从而影响植物生长<sup>[1-3]</sup>。同时, 干旱不仅影响作物的生长和产量<sup>[4]</sup>, 也影响作物籽粒的品质, 使作物从内到外发生一系列生理生态、生化及形态上的影响<sup>[5]</sup>。水分是影响水稻光合特性的重要因素之一, 水分胁迫可引起水稻叶片光合作用降低<sup>[6]</sup>。

从土壤水分和作物生理指标研究作物干旱程度, 主要集中在土壤含水率与作物的叶水势、叶片含水率的关系研究<sup>[7-11]</sup>。有研究表明, 冠层温度是指示作物受干旱胁迫的敏感因子<sup>[12-13]</sup>。孙存华等在不同程度的土壤水分条件下对杨树的耗水特性和水分利用特征进行了研究, 随着土壤含水量的下降, 杨树叶水势、相对含水量、生长速率、光合速率及单叶水分利用效率显著下降<sup>[14-15]</sup>。尹贇鹏等对不同干旱胁迫下欧李光合及叶绿素荧光参数的响应进行研究, 干旱胁迫下欧李叶片净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率(water use efficiency, WUE)、气孔导度显著下降, 但胞间  $\text{CO}_2$  浓度升高<sup>[16]</sup>。严重的干旱限制了植物的生长, 导致光合速率降低, 水分利用效率(WUE)升高<sup>[17]</sup>。

近年来我国南方地区呈现出季节性干旱和高温干旱并发的态势, 对南方主要作物产生了重大影响<sup>[18-19]</sup>。而国内在干

旱控制试验对我国南方水稻光合生理、冠层-空气温度和水分利用效率(WUE)研究较缺乏, 本研究通过 2 个水稻品种控制生育期间水分条件形成不同程度的干旱胁迫, 探讨干旱胁迫条件下水稻不同生育期冠层及叶片的光合特性的变化规律, 以及可表征受干旱胁迫下冠层温度微气象特征参数及水分利用效率(WUE), 为大面积快速分析诊断水稻干旱程度对水稻的光合和产量影响提供理论依据与方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本试验 2011 年在江苏省兴化市昌荣镇水稻田进行, 水稻品种为淮稻 5 号和镇稻 9424, 6 月 9—12 日播种, 6 月 14—19 日出苗, 7 月 22 日至 8 月 25 日为拔节孕穗期, 8 月 27 日至 9 月 2 日为抽穗开花期。水稻在拔节期和抽穗始期排水, 将其分为对照(CK, 正常灌溉)和拔节期处理(JST1: 连续 10 d 干旱; JST2: 连续 20 d 干旱)、抽穗期处理(HST1: 连续 10 d 干旱; HST2: 连续 20 d 干旱)5 类, 每个处理设 1 个重复和对照区。每小区面积 3 m × 10 m, 按顺序排列, 周围有保护区。试验区用田埂(宽 40 cm, 高 30 cm)分隔, 并埋下 60 cm 深不透水的塑料薄膜作隔离层, 防止水分水平方向渗透。所谓连续干旱是指处理试验小区在排水落干后连续无雨、不灌溉而造成土壤水分亏缺的状况。遇雨时, 处理小区加盖防雨棚遮雨, 雨后及时撤下。

### 1.2 光合生理参数的测定

使用 Li-6400 便携式光合测定系统(美国, LI-COR 公司生产)2011 年 9 月 16 日对各处理的水稻进行观测。试验时选取健康植株, 选取充分伸展、无病虫害的健康叶, 且保持叶片自然生长角度不变。测定参数主要包括叶片净光合速率

收稿日期: 2015-01-06

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(编号: GYHY201106027、GYHY20100627); 江苏省普通高校研究生培养计划(编号: 10300); 国家重点基础研究发展计划(编号: 2010CB951302)。

作者简介: 沙依然·外力(1966—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为生态与农业气象遥感。E-mail: sayranDR@126.com。

通信作者: 李秉柏, 研究员, 主要从事农业遥感研究。E-mail: bbl88@163.com。

[ $P_n, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、蒸腾速率[ $T_r, \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i, \mu\text{mol}/\text{mol}$ )、气孔导度[ $G_s, \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]及环境因子光合有效辐射[ $\text{PAR}, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、大气相对湿度(RH,%)、大气温度( $T_a, ^\circ\text{C}$ )、叶温( $T_{lr}, ^\circ\text{C}$ )等。测定时间从 10:30 至 12:00,每个处理区选 3 植株,每植株选 2 张叶,每个指标测 3 个重复,每个重复记录 18 个数据,最后取平均值。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下水稻光合生理特性参数变化

获取 2 个水稻品种拔节期和抽穗期不同时间尺度的干旱胁迫下冠层净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )、光合有效辐射(PAR)、冠层-空气温差( $T_c - T_a$ )和水分利用率( $\text{WUE} = P_n/T_r$ )等光合生理指标,并与对照(正常处理)进行对比分析,得到光合特性变化差异(表 1)。

表 1 2 个品种水稻不同生长期不同时间尺度的干旱处理与对照测定参数相对误差

%

参数	淮稻 5 号相对误差				镇稻 9424 相对误差			
	拔节期		抽穗期		拔节期		抽穗期	
	10 d	20 d	10 d	20 d	10 d	20 d	10 d	20 d
光合速率 $P_n$	-5.24	-18.62	-8.14	-8.23	-12.21	-26.34	-35.97	-19.00
气孔导度 $G_s$	-42.29	-60.95	-83.80	-98.31	-44.31	-73.08	-93.22	-107.07
胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$	31.60	51.20	35.80	66.30	72.30	88.30	67.40	56.40
蒸腾速率 $T_r$	-42.36	-60.26	-83.70	-98.44	-44.56	-71.89	-92.70	-107.40
光合有效辐射 PAR	-15.80	-28.84	-34.76	-53.36	-37.49	-38.48	-22.25	-37.85
冠层-空气温差 ( $T_c - T_a$ )	4.27	10.55	5.97	12.46	2.39	11.29	5.88	15.83
水分利用率 WUE	64.40	104.80	463.40	757.10	58.40	162.10	776.80	901.30

由图 1 可知,随着干旱程度的增加,光合速率下降的程度越大。干旱胁迫达到较高水平(干旱处理 20 d)时,水稻光合速率下降的程度明显大于干旱较低水平(干旱处理 10 d),这和干旱胁迫对其他植物品种的影响结果<sup>[20]</sup>基本一致。水分亏缺时光合速率的降低是由水分亏缺造成的气孔或非气孔限制<sup>[21]</sup>。Farquhar 等认为,如果胁迫使  $G_s$  减小而叶肉细胞仍在活跃地进行光合作用,胞间  $\text{CO}_2$  浓度明显下降,这种情况是典型的气孔限制所致;反之则为典型的非气孔限制所致<sup>[22]</sup>。

2.3 干旱胁迫下水稻气孔导度与胞间  $\text{CO}_2$  浓度变化

由表 1 和图 2 可知,2 个水稻品种不同生长期不同时间的干旱胁迫下叶片气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度与对照之间差异均明显。其中,拔节期淮稻 5 号连续干旱处理 10、20 d 叶片气孔导度与对照相比分别显著下降了 42.3%、70.0%,叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度与对照相比均明显上升,上升幅度分别为 31.6%、51.2%;镇稻 9424 叶片气孔导度与对照相比分别下降了 44.3%、73.1%,胞间  $\text{CO}_2$  浓度分别上升了 72.3%、88.3%。抽穗期不同时间干旱胁迫处理后 2 个水稻品种的叶片气孔导度与对照相比均差异明显,干旱处理 10、20 d 分别下降了 83.8%、98.3%和 93.2%、107.1%;细胞  $\text{CO}_2$  浓度分别上升了 35.8%、66.3%和 67.4%、56.4%。干旱胁迫显著降低叶片的气孔导度,但胞间  $\text{CO}_2$  浓度明显上升。镇稻 9424 的气孔导度下降幅度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度上升幅度比淮稻 5 号明显。

2.4 干旱胁迫下水稻光合有效辐射和冠层温度变化

光合有效辐射是植物生长发育的能量基础<sup>[20]</sup>,是绿色植

2.2 干旱胁迫下水稻净光合速率与蒸腾速率变化

由表 1 可知,2 个水稻品种在拔节期和抽穗期的 2 个时间尺度干旱胁迫条件下,叶片净光合速率和蒸腾速率均随着土壤水分含量和叶片水势的下降而明显下降。其中,淮稻 5 号在拔节期 10、20 d 的干旱处理下叶片净光合速率和蒸腾速率与对照相比分别下降了 5.2%、18.6%和 42.4%、60.3%;抽穗期同样的处理下分别下降了 8.1%、8.2%和 83.7%、98.4%。镇稻 9424 在拔节期 10、20 d 的处理下叶片净光合速率和蒸腾速率下降了 12.2%、26.3%和 44.6%、71.9%;抽穗期 2 个处理时间下分别下降了 36%、19%和 92.7%、107.4%。2 个品种对比来看,镇稻 8424 下降幅度比淮稻 5 号明显。蒸腾速率是反映水稻水分状况最重要的生理指标,不同生长期 2 个时间尺度的干旱胁迫下,水稻叶片净光合速率和蒸腾速率明显下降,蒸腾速率的下降比光合作用明显。

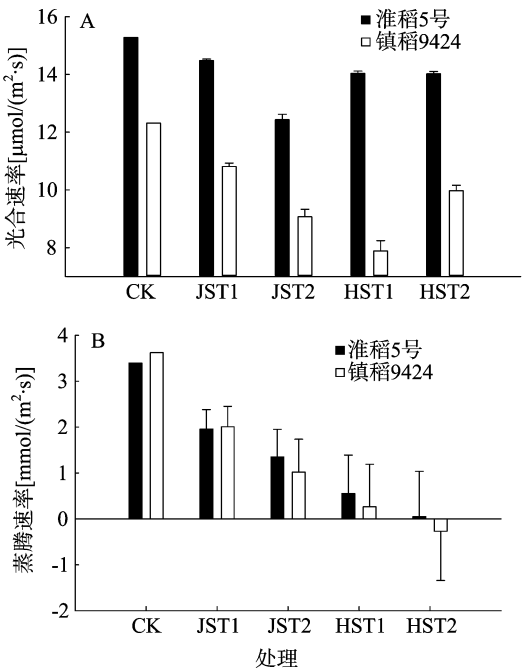


图 1 干旱胁迫下水稻净光合速率(A)与蒸腾速率(B)变化

物进行光合作用过程中,吸收的太阳辐射中使叶绿素分子呈激发状态的那部分光谱能量。植物的光合产物和累积生物量与冠层截获光合有效辐射量有密切关系<sup>[23]</sup>。由图 3 - A 可知,2 个水稻品种拔节期和抽穗期不同时间尺度干旱胁迫下与对照相比明显减少,其中,淮稻 5 号拔节期干旱处理 10、

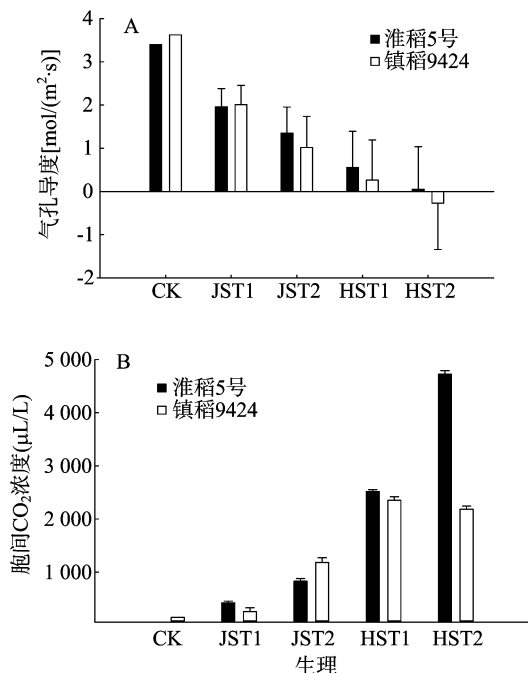


图2 干旱胁迫下水稻气孔导度(A)与胞间 $\text{CO}_2$ 浓度(B)变化

20 d 分别下降 15.8%、28.8%，抽穗期下降 34.8%、53.4%；镇稻 9424 拔节期干旱胁迫 10、20 d 分别下降 37.5%、38.5%，抽穗期持续干旱 10、20 d 下降 22.3%、37.9%。表明不同时间尺度干旱胁迫明显降低了水稻植株的生长，叶绿素含量明显降低，光合作用受到明显抑制<sup>[24]</sup>，从而明显降低光合有效辐射。

冠层-空气温差( $T_c - T_a$ )是利用冠层温度评价作物水分状况的重要方法<sup>[25-28]</sup>。作物冠层温度是由土壤-植物-大气系统中水的循环和热的输送 2 个基本过程来决定的，它反映了作物和大气之间的能量交换，作物冠层温度与其能量的吸收和释放过程有关<sup>[29-30]</sup>。由表 1 和图 3-B 可以看出，干旱胁迫处理的水稻叶气温差值高于对照，使 2 个品种拔节期 10、20 d 干旱处理分别偏高出 4.3%~10.6% 和 2.4%~11.3%；抽穗期 10、20 d 的干旱处理  $T_c - T_a$  值与对照相比，相对误差均偏高，分别为 6.0%~12.5% 和 5.9%~15.8%。镇稻 9424 的光合有效辐射下降幅度和冠层-空气温差上升幅度比淮稻 5 号明显。说明土壤含水量越低，土壤水分亏缺使植物气孔阻力增大，冠层温度升高。在其他条件不变的情况下， $T_c - T_a$  将随土壤含水率的减少而增大。因此，水稻冠层-空气温差( $T_c - T_a$ )与干旱胁迫密切相关，是监测水稻土壤水分亏缺程度的重要指标。

## 2.5 干旱胁迫下水稻水分利用效率变化

水分利用效率(WUE)是植物水分生理的一个重要指标，水分利用率指植物或叶片每蒸腾一定量的水分所同化的  $\text{CO}_2$  的量，有效水分利用效率在生理意义上定义为净光合速率与蒸腾速率的比值<sup>[31]</sup>。水分利用效率反映植物生长过程中的能量转化效率，也是评价水分亏缺条件下植物生长适宜程度的一个综合生理生态指标，它反映了植物对水分的利用情况<sup>[32-33]</sup>。

图 4 表明，2 个水稻品种水分利用效率(WUE)与对照相比，随着不同时间尺度的干旱胁迫程度加重而整体明显上升，

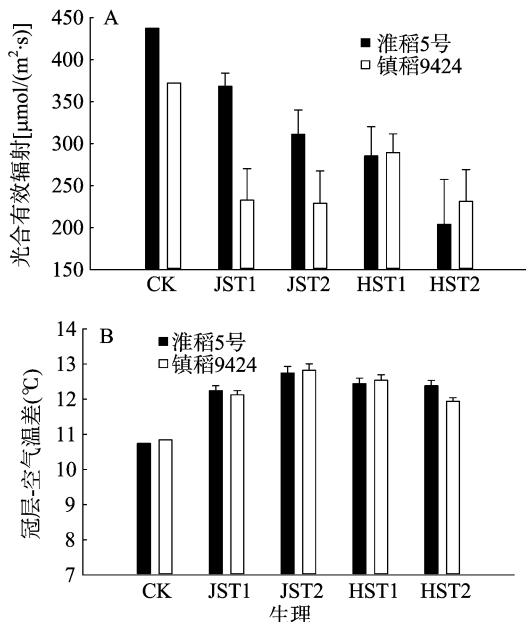


图3 干旱胁迫下水稻光合有效辐射(A)和冠层-空气温度差(B)变化

其中拔节期干旱 10、20 d 2 个水稻品种分别上升 64%~105% 和 58%~162%；抽穗期分别明显上升 463%~757% 和 776%~901%。镇稻 9424 的水分利用效率明显高于淮稻 5 号。水稻在拔节期、抽穗期干旱胁迫时间尺度越长，水分利用效率越高，这主要是由于气孔导度比光合作用对土壤水分变化更敏感，同时蒸腾耗水对气孔的依赖程度大于光合，蒸腾速率比净光合速率下降的幅度大(表 1)，说明其在干旱胁迫下通过降低蒸腾速率以减少水分消耗，从而提高水分利用效率。

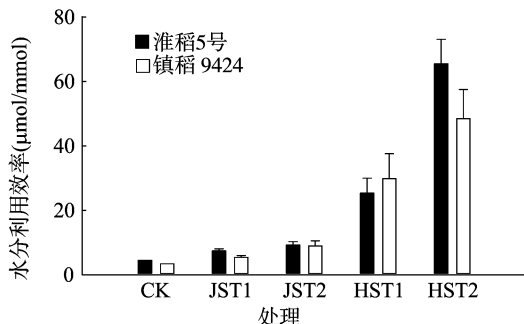


图4 干旱胁迫下水稻叶片水分利用效率变化

## 3 结论与讨论

本研究通过 2 个水稻品种控制生育期间水分条件形成不同程度的干旱胁迫，探讨了干旱胁迫条件下水稻光合特性的变化规律。

干旱胁迫显著影响水稻植株的生长，叶绿素含量显著降低，光合作用受到明显抑制。2 个水稻品种在拔节期和抽穗期不同时间尺度的干旱胁迫下：(1) 叶片净光合速率和蒸腾速率均随着土壤水分含量和叶片水势的下降而明显下降，镇稻 9424 下降幅度比淮稻 5 号明显。(2) 干旱胁迫明显降低叶片的气孔导度，胞间  $\text{CO}_2$  浓度明显上升。镇稻 9424 的气孔导度下降幅度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度上升幅度比淮稻 5 号明显。说明非气孔限制是水稻叶片净光合速率下降的主要原因，在

严重水分胁迫条件下,水稻叶片光合活性降低,胞间  $\text{CO}_2$  大部分没有被光合固定,从而导致  $C_i$  增大<sup>[34]</sup>。(3)干旱胁迫明显抑制了水稻植株的生长,叶绿素含量明显降低,光合作用受到明显抑制,从而明显降低光合有效辐射;在其他条件不变的情况下, $T_c - T_a$ 将随土壤含水率的减少而增大。因此,水稻冠层-空气温差( $T_c - T_a$ )与干旱胁迫密切相关,是监测水稻土壤水分亏缺程度的重要指标。镇稻 9424 的光合有效辐射下降幅度和冠层-空气温差上升幅度比淮稻 5 号明显。(4)与对照相比,水分利用效率随不同时间尺度干旱胁迫程度的加重而整体明显上升。镇稻 9424 的水分利用效率明显高于淮稻 5 号。

通过控制水稻生育期间水分条件形成不同时间尺度的干旱胁迫试验,获取相同时间的光合作用数据及与干旱相关的水稻冠层-空气温差和水分利用效率特征而得到以上结论,探讨了干旱胁迫条件下的水稻不同生育期光合特性的变化规律,以及干旱影响下的水稻冠层-空气温差和水分利用效率特征变化。但这些定量描述干旱胁迫下光合特性参数和干旱特征参数的响应,需要更多的物理意义的解释。因此,通过多样本、多点试验的验证和校准是这类结果应用的前提条件。

#### 参考文献:

- [1] Boyer J S. Plant productivity and environment[J]. Science, 1982, 218(4571): 443 - 448.
- [2] 张佳华,符淙斌,王长耀. 遥感信息结合植物光合生理特性研究区域作物产量水分胁迫模型[J]. 大气科学, 2000, 24(5): 683 - 693.
- [3] Zhang J H, Fu C B, Hiroshi K. Simulating canopy stomatal conductance of winter wheat and its distribution using remote sensing information[J]. Journal of Environmental Sciences - China, 2001, 13(4): 439 - 443.
- [4] Ahmad R, Gadir S, Ahmad N, et al. Yield potential and stability of nine wheat varieties under water stress conditions[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2003(5): 7 - 9.
- [5] Chaves M M, Pereira J S, Maroco J, et al. How plants cope with water stress in the field: Photosynthesis and growth[J]. Annals of Botany, 2002, 89(7): 907 - 916.
- [6] Antolin M C, Sanchez - Díaz M. Effects of temporary droughts on photosynthesis of alfalfa plants[J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44(44): 1341 - 1349.
- [7] 朱庆森,邱泽森,姜长鉴,等. 水稻各生育期不同土壤水势对产量的影响[J]. 中国农业科学, 1994, 27(6): 15 - 22.
- [8] 张喜英. 叶水势反映冬小麦和夏玉米水分亏缺程度的试验(简报)[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 249 - 253.
- [9] 王绍华,曹卫星,王强盛,等. 水稻叶色分布特点与氮素营养诊断[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1461 - 1466.
- [10] 王绍华,刘胜环,王强盛,等. 水稻产量形成与叶片含氮量及叶色的关系[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 1 - 5.
- [11] 李亚龙,崔远来,李远华,等. 以土水势为灌溉指标的水稻节水灌溉研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(5): 14 - 16, 49.
- [12] Blum A, Shpiler L, Golan G, et al. Yield stability and canopy temperature of wheat genotypes under drought - stress[J]. Field Crops Research, 1989, 22(4): 289 - 296.
- [13] Stark J C, Pavek J J, Mccann I R. Using canopy temperature measurements to evaluate drought tolerance of potato genotypes[J]. Journal of the American Society for Horticulture, 1991, 116(3): 412 - 415.
- [14] 孙存华,李扬,杜伟,等. 干旱胁迫下藜的光合特性研究[J]. 植物研究, 2007, 27(6): 715 - 720.
- [15] Gimenez C, Mitchell V J, Lawlor D W. Regulation of photosynthetic rate of two sunflower hybrids under water stress[J]. Plant Physiology, 1992, 98(2): 516 - 524.
- [16] 尹贇鹏,刘雪梅,商志伟,等. 不同干旱胁迫下欧李光合及叶绿素荧光参数的响应[J]. 植物生理学报, 2011, 47(5): 452 - 458.
- [17] Givnish T J. Adaptation to sun and shade: a whole - plant perspective[J]. Functional Plant Biology, 1988, 15(2): 63 - 92.
- [18] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 130 - 265.
- [19] 王春乙. 中国重大农业气象灾害研究[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 23 - 60.
- [20] 张维强,沈秀瑛. 水分胁迫和复水对玉米叶片光合速率的影响[J]. 华北农学报, 1994, 9(3): 44 - 47.
- [21] 余叔文,汤章城. 植物生理与分子生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 262 - 276.
- [22] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Physiology, 1982, 33: 317 - 345.
- [23] 王之杰,郭天财,朱云集,等. 超高产小麦冠层光辐射特征的研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(10): 1657 - 1662.
- [24] Sauer T J, Singer J W, Prueger J H, et al. Hatfield radiation balance and evaporation partitioning in a narrow - row soybean canopy[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145(314): 206 - 214.
- [25] Tanner C B. Plant temperatures[J]. Agronomy Journal, 1963, 55(2): 210 - 211.
- [26] Jackson R D, Reginato R J, Idso S B, et al. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements[J]. Water Resource Research, 1977, 13: 651 - 656.
- [27] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water - stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133 - 1138.
- [28] Clawson K L, Jackson R D, Pinter P J. Evaluating plant water stress with canopy temperature differences[J]. Agronomy Journal, 1989, 81(6): 858 - 863.
- [29] Jackson, Idso R D, Reginato S B, et al. Crop temperature reveals stress[J]. Crops and Soils, 1977, 29(8): 10 - 13.
- [30] 李国臣,于海业,马成林. 基于叶温的作物水分亏缺诊断方法研究[J]. 农机化研究, 2006(7): 63 - 66.
- [31] 赵育民,牛树奎,王军邦,等. 植被光能利用率研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1471 - 1477.
- [32] 王颖,魏国印,张志强,等. 7种园林树种光合参数及水分利用效率的研究[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(6): 44 - 48.
- [33] Eamus D. The interaction of rising  $\text{CO}_2$  and temperatures with water - use efficiency[J]. Plant Cell and Environment, 1991, 14(8): 843 - 852.
- [34] Ebukanson G J. Retardation of chloroplast ATPase activity in maize seedlings by drought stress[J]. Journal of Plant Physiology, 1987, 129(1/2): 187 - 189.