

不同灌水量对黄淮海地区冬小麦叶绿素荧光 及光保护特性的影响

徐心志, 马 超, 孙 倩, 孙会娜, 王志强, 林同保

(河南农业大学农学院/河南省粮食作物生理生态与遗传改良重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘 要:以黄淮海地区 5 个主栽冬小麦品种为材料,在田间条件下分析了不同灌水次数对冬小麦叶绿素荧光特性的影响。结果表明,随着灌水次数的减少,叶绿素 $a+b$ (Chla + b) 含量,叶绿素 a/b ,类胡萝卜素 (Car) 含量,PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m),光化学猝灭系数 (qP) 以及光能利用率 (LUE) 都呈降低趋势,而初始荧光 (F_0) 呈增加趋势,非光化学猝灭系数 (NPQ) 呈先增后降的趋势。不同冬小麦品种对灌水次数的生理响应不同,在各个灌水处理中光能利用效率较高的冬小麦品种矮抗 58 和郑麦 366 适宜种植的范围较广,在灌三次水处理(越冬水 + 拔节水 + 灌浆水)中光能利用效率较高而在灌两次水(越冬水 + 拔节水)或一次水(越冬水)光能利用率较低的冬小麦品种周麦 18、豫麦 49 应该区划种植在水分条件较好或者有灌溉条件的地区才能发挥其品种的丰产优势。在干旱条件下矮抗 58 和郑麦 366 具有较高光能利用率的原因可能是有较强的光保护能力。

关键词: 冬小麦; 灌水量; 叶绿素; 荧光特性; 光保护

中图分类号: S512.1⁺1 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)01-0183-08

Effect of irrigation amount on chlorophyll fluorescence and photo-protection characteristics of flag leaf of winter wheat in Huang – Huai – Hai region

XU Xin-zhi, MA Chao, SUN Qian, SUN Hui-na, WANG Zhi-qiang, LIN Tong-bao

(College of Agronomy, Key Laboratory of Physiology, Ecology and Genetic Improvement of Food Crops, Henan Agricultural University, Zhengzhou, 450002, China)

Abstract: A field experiment with five varieties of winter wheat in Huang – Huai – Hai region was carried out to evaluate the effect of irrigation amount on the chlorophyll fluorescence characteristics of flag leaf. The results showed that the reduction of the irrigation frequency resulted in lower chlorophyll $a+b$ (Chla + b) content, chlorophyll a/b , carotenoids (Car) content, PS II maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), photochemical quenching (qP), and light use efficiency (LUE), while it increased the initial fluorescence (F_0). The non-photochemical quenching (NPQ) first increased and then decreased. Physiological responses of winter wheat varied with irrigation frequency. Aikang 58 and Zhengmai 366 were more adaptive to a broader range of environments than Zhoumai 18 and Yumai 49 were, partially due to their high light use efficiency under different irrigation conditions.

Keywords: winter wheat; irrigation; chlorophyll; fluorescence characteristics; photo-protection

小麦生育期内遭受干旱胁迫导致光合器官功能受阻或完全丧失,最终使产量下降^[1-3]。小麦生长发育过程中,功能叶片的叶绿素含量直接影响光合作用速率和光合产物形成^[4],当植株受到干旱等逆境胁迫时,叶绿素含量下降,导致光合能力降低,蒸腾作用受阻,进而影响生长发育和产量。因而叶片叶绿素含量是作物在生育期内延缓衰老的重要组成

因子^[5-7]和作物产量潜势的决定因素^[8-10]。在干旱胁迫条件下,作物保持较多的绿叶面积有利于改善自身辐射,提高蒸腾利用效率^[11],延长光合作用时间,获得较高产量^[12]。

叶绿素荧光动力学参数分析是一种以光合作用理论为基础的生物物理学实验技术,具有便捷、灵敏、快速、无损伤等特点,其参数中包含着非常丰富

收稿日期: 2013-11-09

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203077, 200903007)资助

作者简介: 徐心志(1986—),男,河南商丘人,在读硕士,研究方向为小麦生理生态。E-mail: 925110968@qq.com。

通信作者: 林同保(1962—),男,博士,教授,主要从事作物节水理论与技术研究。E-mail: llinlab@163.com。

的信息^[13],成为近年来研究小麦光合生理与干旱胁迫关系的另一热点^[14]。干旱胁迫导致小麦光系统 II(PSII)的光化学过程发生紊乱,叶绿素荧光动力学参数变化灵敏,其变化程度可以用来鉴别小麦忍耐干旱的能力^[15-16],即抗旱能力愈强,叶绿素荧光动力学参数的变化程度愈小^[17]。叶绿素含量及叶绿素荧光动力学参数能够灵敏反映光合作用的变化情况,为植物抗逆生理、作物增产潜力预测等方面的研究提供了极大方便,因而被视为揭示植物光合作用与环境关系的内在探针^[18-20],成为研究作物光合生理与干旱胁迫关系的有力工具。近年来,叶绿素含量及叶绿素荧光动力学参数作为植物抗旱相关的重要光合生理性状,已经受到广泛关注,对于其遗传^[21]、生理^[22]和育种^[23]等都有研究报道。植物在强光、低温、干旱等胁迫条件下易发生光合作用的光抑制,甚至光氧化破坏。光合电子传递系统是活性氧产生的主要来源^[24]。光诱导的 PSI 失活被认为是由活性氧引起的^[25]。叶绿体中活性氧的清除有酶促系统和非酶促系统^[26]。非酶促系统包括抗坏血酸、谷胱甘肽、生育酚、类胡萝卜素等^[27-28]。此外,依赖叶黄素循环的非辐射能量耗散(用 NPQ 表示)在避免活性氧伤害中起主要的光保护作用^[29]。Mehler 反应产生的超氧离子是首先生成的具有毒性的活性氧。由超氧化物歧化酶(SOD)催化生成 H₂O₂,然后在抗坏血酸过氧化物酶(APX)催化下生成 H₂O。较高的 SOD 和 APX 活性通常与植物对氧化胁迫的抗性有关。利用叶绿素荧光动力学参数揭示光合作用的生理机制,在小麦上已有较多报道,但有关黄淮海主栽冬小麦品种的叶绿素荧光特性少见报道,特别是干旱胁迫条件下的光保护特性也鲜见报道。本试验选取 5 个黄淮海地区冬小麦主栽品种为材料,研究了不同灌水条件下小麦品种间叶绿素及荧光特性,旨在明确高产节水小麦品种的光保护机制及其对灌水的响应,为小麦高产节水栽培及育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2009—2010 年在河南农业大学科教园区(113°38'39"E,34°47'51"N)进行。试验地土质为壤土,前茬作物为玉米,收获后秸秆直接还田。土壤 0~20 cm 有机质含量为 11.3 g·kg⁻¹、全氮为 0.81 g·kg⁻¹、速效氮为 93.74 mg·kg⁻¹、速效磷为 57.62 mg·kg⁻¹、速效钾为 84.58 mg·kg⁻¹,pH 值为 7.19,田间持水量 18.23%,整个生育期内有效降水量 113

mm。供试品种为耐旱耐渍的周麦 18、抗旱性较弱的豫农 202 和豫麦 49、抗旱性较强的郑麦 366 和矮抗 58。设置 3 个灌水处理:重度干旱,只浇越冬水(W1);中度干旱,浇越冬水+拔节水(W2);正常灌水,浇越冬水+拔节水+灌浆水(W3);每次灌水 60 mm,换算为以立方米表示的小区灌水量,用水表计量灌水。试验设计为随机区组排列,小区面积 12 m²(5 m×2.4 m),小区之间设置 1 m 的隔离区。10 月 17 日播种,基本苗均为 225 万·hm⁻²,每小区 12 行,行距 20 cm,重复 3 次。播种前造墒并深翻 30 cm,施尿素 150 kg·hm⁻²、磷酸二铵 150 kg·hm⁻²、氯化钾 150 kg·hm⁻²,深耕细耙。小麦拔节期追施尿素 150 kg·hm⁻²。田间除草和植保措施等按超高产管理要求进行。

1.2 测定指标

旗叶光合色素的测定:采用乙醇提取法^[17],将叶片剪成长约 5 mm 的碎片,称取 0.15 g 于 25 ml 棕色容量瓶中,用 95%乙醇定容,暗处保存 5d 后振荡混匀后于 665、649、470 nm 下测定吸光度,换算为叶绿素含量。

荧光参数的测定:用英国 Hansatech 公司的 FMS-2 脉冲调制式荧光仪测定经过暗适应 15 min 的最大荧光(F_m)、初始荧光(F_o)、光照条件下最大荧光(F_m),挑选晴朗天气进行测定,测定时间为上午 9:00—11:00。选取有代表性并且旗叶朝向一致的 5 株小麦进行测定,取平均值。计算 PS II 量子效率、PS II 最大光能转换效率(F_v/F_m)、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)。分别按下列公式计算: $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$, $\Phi PS II = (F_m' - F_s)/F_m'$, $qP = (F_m - F_s)/(F_m - F_o)$, $NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$ 。

光能利用率(LUE)的测定:采用 LI-6400(LI-COR Inc.,美国)便携式光合作用测定系统测定,选择生长一致且受光良好的小麦旗叶,于晴天 9:00—11:00 进行测定。测定包括净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), $LUE = P_n/PPFD$, PPFD(Incident photosynthetic photon flux density)代表冠层截获的光合有效辐射。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel2003 和 DPS6.55 软件进行统计分析,用 LSD 法检验差异显著水平。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对不同基因型冬小麦旗叶光合色素组分的影响

2.1.1 叶绿素 a+b 含量

由图 1 可知,叶绿素 a+

b 含量随着灌水次数的减少而降低,差异达到显著水平($P < 0.05$);在 W3 和 W2 处理中呈先增加后降低的趋势,在 W1 处理中呈逐渐降低的趋势,并随着灌水次数的减少呈减少趋势。在 W3 处理中,周麦 18、郑麦 366 和矮抗 58 叶绿素 a + b 含量较高,且郑麦 366 和矮抗 58 下降速度慢于周麦 18,豫麦 49 在灌浆中期有较高的叶绿素 a + b 含量且下降较慢,而豫农 202 在整个灌浆期叶绿素 a + b 含量都较低;在

W2 处理中,郑麦 366 和矮抗 58 在整个灌浆期间都保持较高的叶绿素 a + b 含量,其他三个品种表现为豫麦 49 > 周麦 18 > 豫农 202;在 W1 处理中,叶绿素 a + b 含量表现为矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫农 202 > 豫麦 49 > 周麦 18;灌水量对不同冬小麦品种叶绿素含量的影响不同,随着灌水次数的减少,矮抗 58 和郑麦 366 下降较慢,其次为豫农 202 和豫麦 49,周麦 18 受灌水量影响最大。

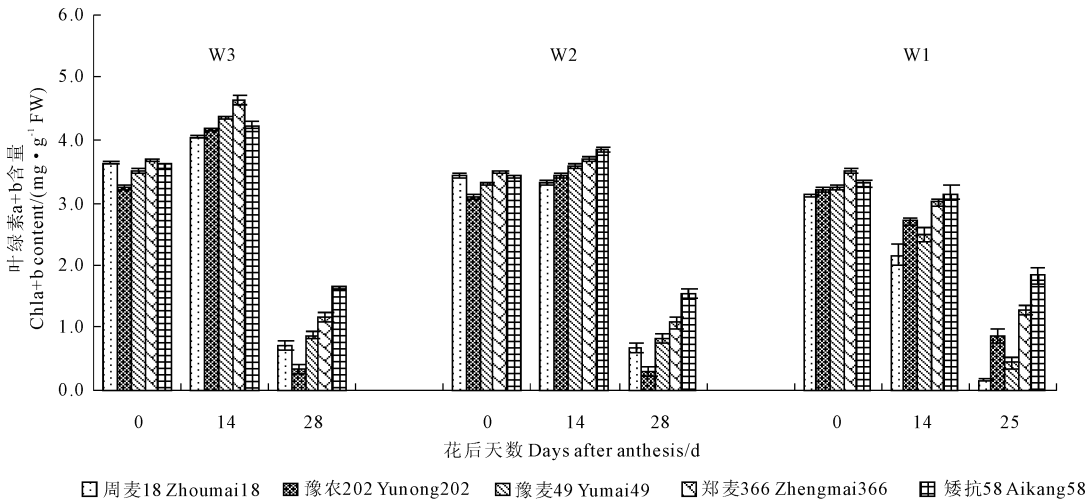


图 1 不同灌水量对不同基因型冬小麦旗叶叶绿素 a + b 含量的影响

Fig.1 Effect of irrigation amount on flag leaf Chl a + b content of different genotypes of winter wheat

2.1.2 叶绿素 a/b 由图 2 可知,叶绿素 a/b 随着灌水次数的减少而降低,差异达到显著水平($P < 0.05$);不同灌水次数条件下,叶绿素 a/b 随着灌浆进程的推进逐渐降低。不同冬小麦品种在 W3 处理中于花后 14 d 前表现为:周麦 18 > 豫麦 49 > 矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫农 202,花后 28 d 表现为:矮抗 58 > 豫麦 49 > 周麦 18 > 郑麦 366 > 豫农 202。在 W2 处

理中开花期具体表现为:周麦 18 > 郑麦 366 > 矮抗 58 > 豫麦 49 > 豫农 202,花后 14 天表现为:矮抗 58 > 郑麦 366 > 周麦 18 > 豫麦 49 = 豫农 202;W1 各时期均表现为:矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫麦 49 > 周麦 18 > 豫农 202;灌水量对不同品种叶绿素 a/b 影响表现为,随着灌水量的减少,矮抗 58 和郑麦 366 下降较慢,其次是豫麦 49 和周麦 18,豫农 202 下降较快。

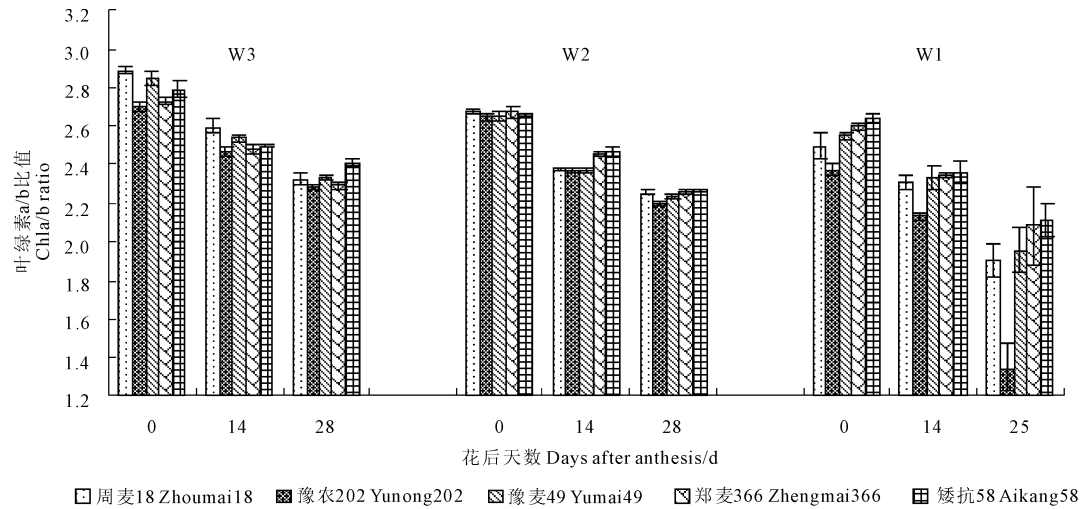


图 2 不同灌水量对不同基因型冬小麦旗叶叶绿素 a/b 的影响

Fig.2 Effect of irrigation amount on flag leaf chlorophyll a/b of different genotypes of winter wheat

2.1.3 类胡萝卜素含量 由图 3 可知,光合色素中类胡萝卜素(Car)含量随着灌水次数的减少呈降低趋势,随着灌浆进程的推进呈降低趋势。不同冬小麦品种在 W3 处理中于花后 0 d 前表现为:周麦 18 > 矮抗 58 > 豫麦 49 > 郑麦 366 > 豫农 202,花后 14 d 表现为:矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫麦 49 = 周麦 18 > 豫农 202,于花后 28 d 表现为:矮抗 58 > 郑麦 366 > 周

麦 18 > 豫麦 49 > 豫农 202。在 W2 处理中花后 0 d 表现为:周麦 18 > 矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫麦 49 > 豫农 202,于花后 14 d 以后和 W1 的 14 d、25 d 均表现为矮抗 58 > 郑麦 366 > 周麦 18 > 豫麦 49 > 豫农 202;灌水量对周麦 18 类胡萝卜素含量影响较大,其次是豫麦 49 和豫农 202,矮抗 58 和郑麦 366 受影响最小。

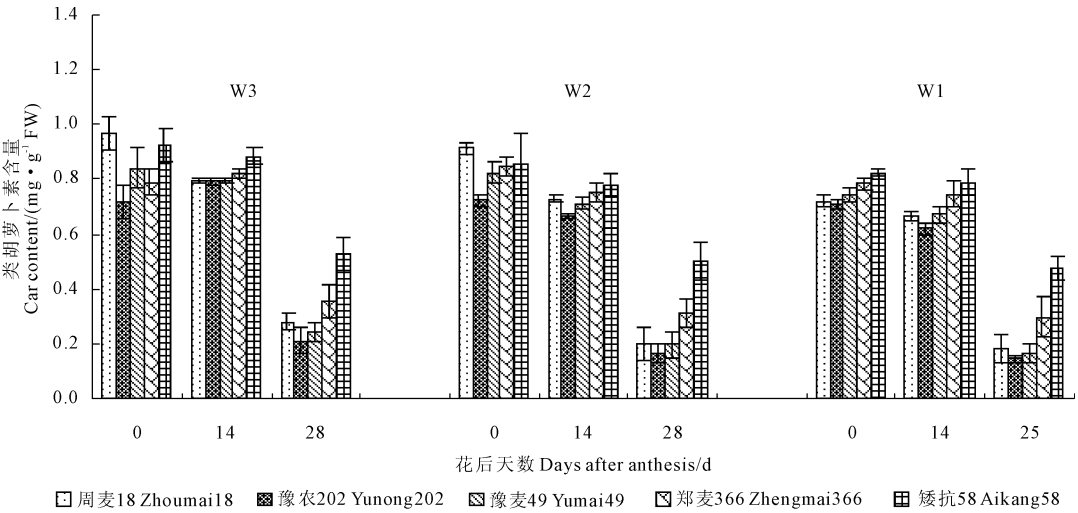


图 3 不同灌水量对不同基因型冬小麦旗叶类胡萝卜素含量的影响

Fig.3 Effect of irrigation amount on flag leaf carotenoids content of different genotypes of winter wheat

2.2 干旱胁迫对不同基因型冬小麦旗叶荧光参数的影响

2.2.1 初始荧光(F_0) 分析荧光参数的变化有助于探明光合机构受影响的部位^[24]。初始荧光(F_0)随着灌水次数的增加呈降低的趋势,并随着灌浆进程的推进呈升高的趋势。不同冬小麦品种在 W3 处理中花后 0 d 具体表现为:周麦 18 > 郑麦 366 > 矮抗 58 > 豫麦 49 > 豫农 202,花后 14 d 表现为:郑麦 366 > 矮抗 58 > 豫麦 49 > 周麦 18 > 豫农 202,花后 28 d 表现为:矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫麦 49 > 周麦 18 > 豫农 202。在 W2 处理中花后 0 d 表现为:郑麦 366 > 矮抗 58 > 周麦 18 > 豫麦 49 > 豫农 202,花后 14 d 表现为:矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫麦 49 > 豫农 202 > 周麦 18,花后 28 d 表现为:矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫麦 49 > 周麦 18 > 豫农 202;在 W1 处理中花后 0 d 表现为:郑麦 366 > 矮抗 58 > 豫麦 49 > 豫农 202 > 周麦 18,于花后 14 d 以后表现为:矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫农 202 > 豫麦 49 > 周麦 18。灌水量对不同品种的初始荧光影响不同,对周麦 18 影响较小,其次是豫麦 49、矮抗 58,对豫农 202 和郑麦 366 影响较大。

2.2.2 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m) 如图 5 所示,PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)随着灌水量的减

少呈下降趋势,并随着灌浆期的推进呈下降的趋势。不同冬小麦品种在 W3 处理中花后 0 d 表现为:矮抗 58 > 周麦 18 > 郑麦 366 = 豫麦 49 > 豫农 202,花后 14 d 以后表现为:矮抗 58 最大,豫农 202 最小。在 W2 处理中花后 0 d 表现为:矮抗 58 > 郑麦 366 > 周麦 18 > 豫麦 49 > 豫农 202;花后 14 d 和 W1 各时期均表现为:矮抗 58 较大,豫农 202 和周麦 18 较小。灌水量对不同品种间 PS II 最大光化学效率影响表现为:周麦 18 > 豫农 202 > 豫麦 49 > 郑麦 366 > 矮抗 58。

2.2.3 光化学猝灭系数(qP) 叶绿素荧光光化学猝灭系数(qP)是对 PS II 原初电子受体 QA 氧化态的一种量度,代表 PS II 反应中心开放数目的比例,反映了 PS II 天线色素捕获的光能转化为化学能的效率^[24]。 qP 愈大,QA⁻重新氧化形成 QA⁺ 的量愈大,即 PS II 的电子传递活性越大^[25]。灌水次数的增加使 qP 值升高,各灌水处理间表现为:W3 > W2 > W1,表明灌水能够促进 PS II 反应中心开放部分的比例增加,促进了 PS II 反应中心的电荷分离,从而提高了 PS II 的电子传递能力,最终有利于 PS II 量子产额的提高。随着灌浆进程的推进, qP 逐渐降低。灌水量对不同品种的光化学猝灭系数的影响差

别不大,矮抗 58 在三个灌水处理中都表现出较大的 qP ,其次是郑麦 366,而豫麦 49 和周麦 18 则在 W3 和 W2 处理前期表现较好,豫农 202 最低,周麦 18 受干旱影响下降最多。

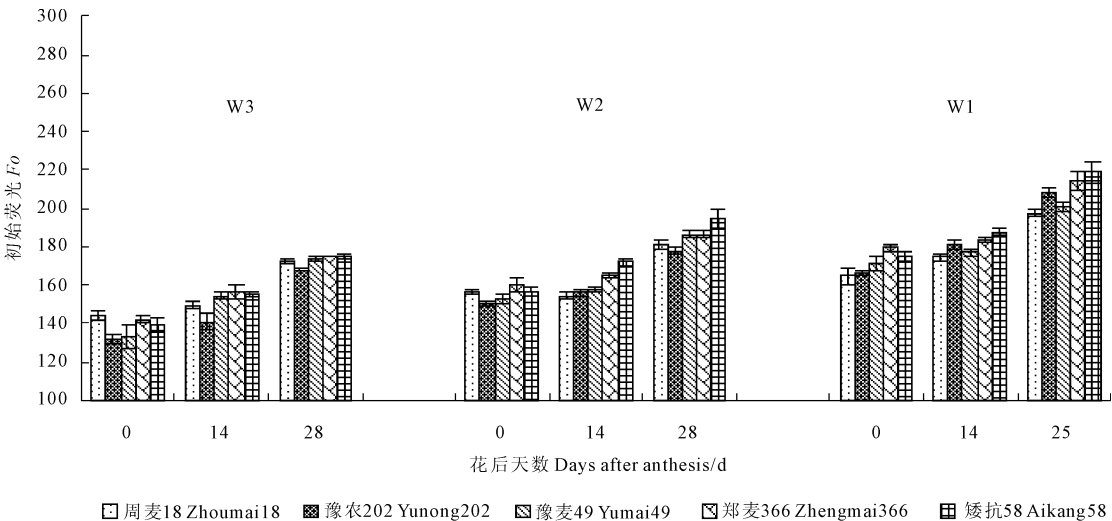


图 4 不同灌水量对不同基因型冬小麦旗叶初始荧光 (F_o) 的影响
Fig.4 Effect of irrigation amount on flag leaf initial fluorescence (F_o) of different genotypes of winter wheat

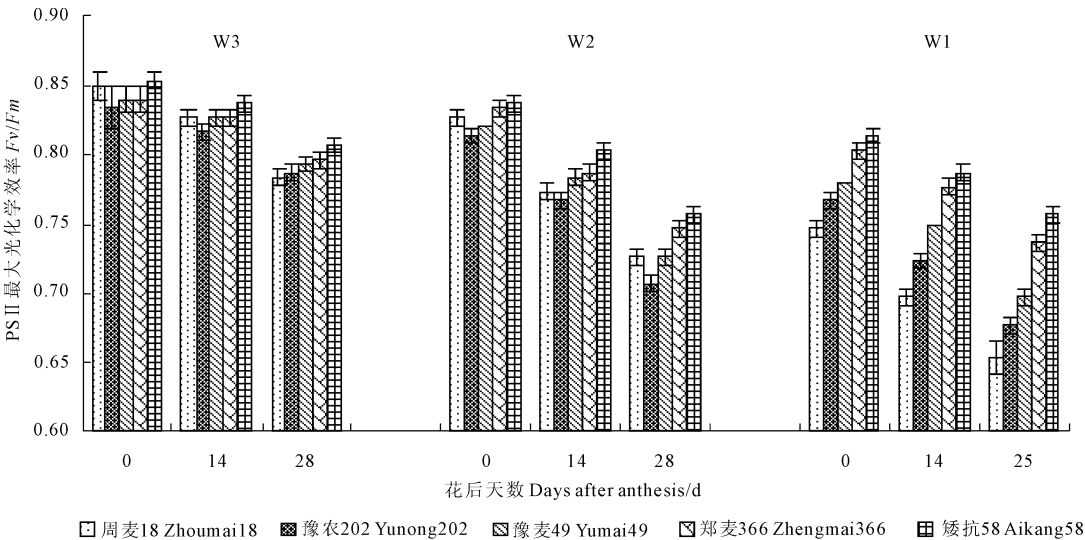


图 5 不同灌水量对不同基因型冬小麦旗叶 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 的影响

Fig.5 Effect of irrigation amount on flag leaf PS II maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) of different genotypes of winter wheat

2.2.2.4 非光化学猝灭系数 (NPQ) 依赖叶黄素循环的非辐射能量耗散(用 NPQ 表示)在避免活性氧伤害中起主要的光保护作用^[26]。如图 7 所示,非光化学猝灭系数 (NPQ) 变化规律较为复杂,在 W3 处理中随着灌浆进程的推进呈逐渐升高的趋势,花后 0 d 表现为:豫农 202 > 郑麦 366 > 豫麦 49 > 矮抗 58 > 周麦 18,花后 14 d 以后不同品种表现为:豫农 202 最高,矮抗 58 最低。在 W2 处理中周麦 18、豫农 202 和豫麦 49 表现为先增加后降低的趋势,郑麦 366 和

矮抗 58 表现为逐渐上升的趋势,不同品种在花后 0 d 具体表现为:豫农 202 > 豫麦 49 > 郑麦 366 > 矮抗 58 > 周麦 18,花后 14 d 表现为:豫农 202 > 豫麦 49 > 郑麦 366 = 周麦 18 > 矮抗 58,花后 28 d 表现为:郑麦 366 > 矮抗 58 > 豫农 202 > 豫麦 49 > 周麦 18。在 W1 处理中不同品种周麦 18、豫农 202 和豫麦 49 表现为逐渐降低的趋势,郑麦 366 表现为先增高后降低的趋势,而矮抗 58 表现为逐渐升高的趋势。灌水量对不同品种非光化学猝灭系数影响不同且差异较大。

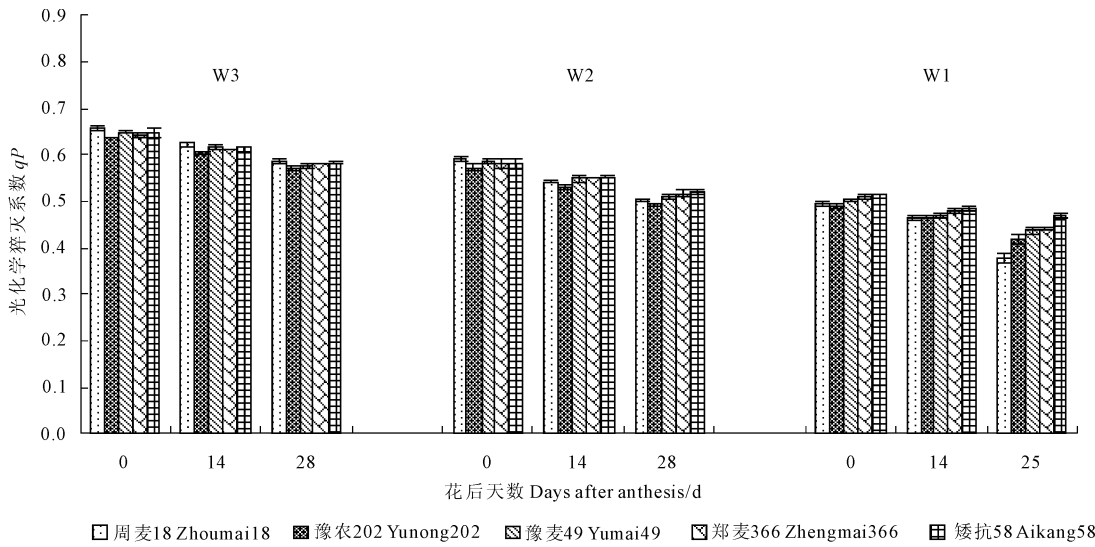


图 6 不同灌水量对不同基因型冬小麦旗叶光化学猝灭系数 (qP) 的影响

Fig.6 Effect of irrigation amount on flag leaf photochemical quenching (qP) of different genotypes of winter wheat

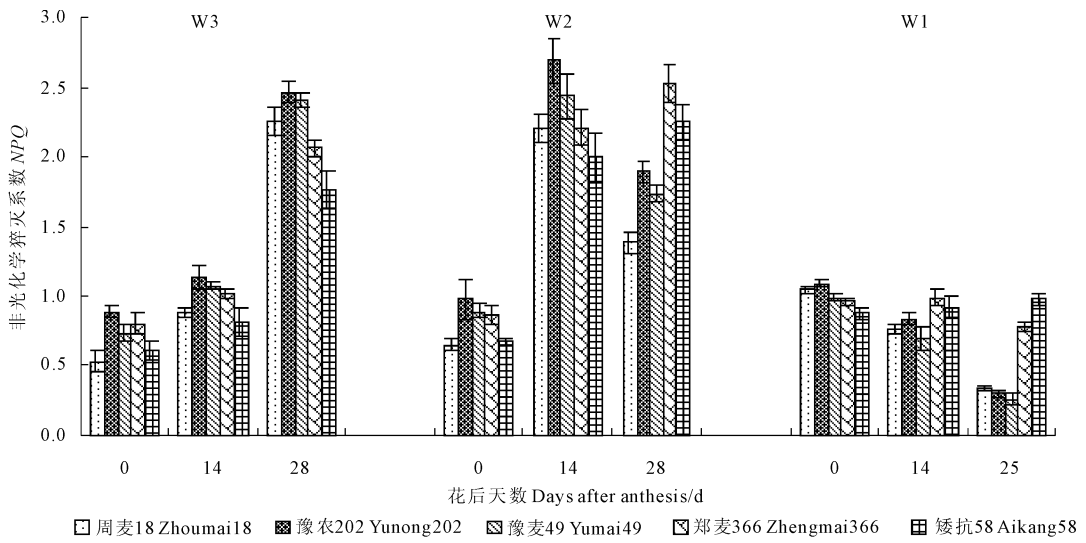


图 7 不同灌水量对不同基因型冬小麦旗叶非光化学猝灭系数 (NPQ) 的影响

Fig.7 Effect of irrigation amount on flag leaf non-photochemical quenching (NPQ) of different genotypes of winter wheat

2.3 干旱胁迫对不同基因型冬小麦旗叶光能利用率 (LUE) 的影响

光合速率与光合有效辐射 (PAR) 的比值代表光合同化能量占总光合有效辐射能量的比例,这一比值又称为表观量子产额、光能转化效率 (LUE),它是揭示光合机构运转调节规律的探针,也是植物生产力和产量高低的决定因素^[27]。由图 8 可知,三个灌水处理的光能利用率 (LUE) 表现为 $W3 > W2 > W1$,且差异达到显著水平 ($P < 0.05$);在各处理中周麦 18、豫麦 49 和郑麦 366 三个小麦品种 LUE 在整个灌浆期间呈逐渐降低的趋势,豫农 202 在 $W1$ 和 $W2$ 处理中呈逐渐降低趋势,在 $W3$ 处理下呈先升高后下

降趋势,矮抗 58 在 $W1$ 和 $W3$ 处理下呈先升高后下降趋势,在 $W2$ 处理下呈下降趋势;在 $W3$ 处理中,灌浆前中期表现为:周麦 18 > 豫麦 49 > 矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫农 202,其中周麦 18 在灌浆前中期均保持最大值;在 $W2$ 处理中,矮抗 58 利用率最高;在 $W1$ 处理中,灌浆中后期表现为:矮抗 58 > 郑麦 366 > 豫麦 49 > 周麦 18 > 豫农 202。说明灌水能促进叶片利用光能,显著提高光能的转化效率及其量子产额,进而为光合碳同化提供充足的还原力。灌水量对不同品种光能利用率的影响表现为:豫农 202 > 周麦 18 > 豫麦 49 > 矮抗 58 > 郑麦 366。

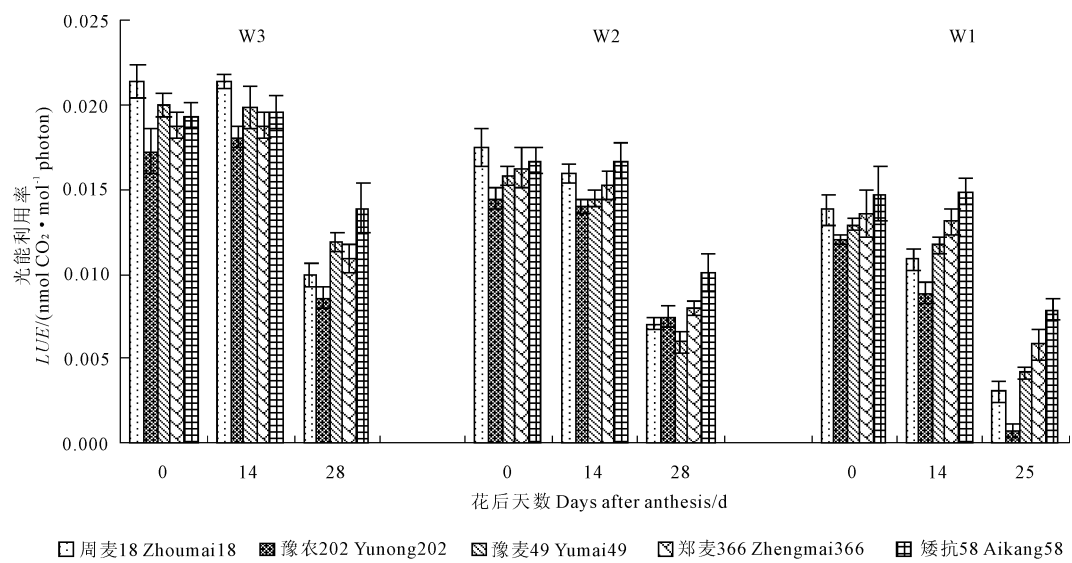


图 8 不同灌水量对不同基因型冬小麦旗叶光能利用率 (LUE) 的影响

Fig.8 Effect of irrigation amount on flag leaf light use efficiency (LUE) of different genotypes of winter wheat

3 讨 论

叶绿素荧光参数的变化与光合作用的各过程密切相关。 F_o 代表的是色素所吸收的光能中不参与光化学反应的能量。它的升高说明色素吸收的能量中流向光化学作用的部分减少,热和荧光形式的能量增多^[17]。初始荧光 F_o 与色素含量及 PSII 的受损状况有关,色素含量降低, F_o 降低;PSII 受到损伤, F_o 明显升高^[28]。本研究表明,灌水提高了冬小麦旗叶叶绿素 a + b 含量,与此同时初始荧光 F_o 也增加了。说明灌水次数的减少产生的干旱胁迫造成了光抑制,冬小麦叶片的 PSII 失活或光合机构受到破坏,减弱了将捕获的光能送到化学能的途径,削弱了其光合性能,相对增加了光能耗散, LUE 降低。所以叶绿素 a + b 含量升高的同时, F_o 也升高了。叶绿素 b(chl b)作为天线色素,是捕光色素蛋白复合体(LHCP)的重要组成部分,其含量增加有利于形成更多的 LHCP,提高叶绿体的捕光能力,增强烟株的光能利用率^[25]。遮荫处理的 chl b 含量明显高于对照,干旱导致叶绿素 a 的降解加快,光合功能减弱。叶绿素 a、b 含量的消长必然引起叶绿素 a + b、a/b 比值的变化。表明叶绿素 a 含量变化时 b 也相应发生变化;叶绿素 a + b 含量和 a/b 值的变化是由 a、b 共同变化引起的。正常情况下,植物叶片吸收的光能主要通过光合电子传递、叶绿素荧光发射和热耗散三种途径消耗。较高的 Car 含量,有利于提高冬小麦的抗逆性,延缓叶片衰老。因为 Car 尤其是 β - Car 能猝灭不稳定的三线态 Chl 和具有强氧化作

用及对光合膜有潜在破坏作用的单线态氧,从而保护受光激发的 Chl 免遭后期强光氧化的破坏,降低光合膜受损的程度,使光合作用得以进行^[28]。此外, F_o 值的上升可以缓解叶片在自然光照条件下由于光强上升造成的活性氧激增和 D1 蛋白降解加剧,从而避免 PS II 活性中心发生不可逆的破坏造成更大的损伤,这可能是植物在长期进化过程中形成的一种自我保护机制。WANG 等^[29-30]对小麦的研究表明,水分胁迫使得 qP 变小,证明 PSI 氧化侧和 PS II 反应中心间的电子流动受到抑制。非光化学猝灭系数 NPQ 反映的是 PS II 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分。当 PS II 反应中心天线色素吸收了过量的光能时,如不能及时地耗散,将对光合机构造成失活或破坏,非光化学猝灭是一种自我保护机制,对光合机构起一定的保护作用。非光化学能量耗散的提高,有助于耗散过剩的激发能,缓解环境对光合作用的影响和过剩光能对 PS II 反应中心的损伤,本试验也得到类似的结果。在本试验条件下,矮抗 58 和郑麦 366 在干旱胁迫下拥有较强的自我保护能力,是耐旱冬小麦品种,在黄淮海干旱地区可以推广种植。

参 考 文 献:

[1] Lu C M, Zhang J H. Effects of water stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and photoinhibition in wheat plants[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1998, 25: 883-892.

[2] Inoue T, Inanaga S, Sugimoto Y, et al. Contribution of pre-anthesis assimilates and current photosynthesis to grain yield, and their relation-

- ships to drought resistance in wheat cultivars grown under different soil moisture[J]. *Photosynthetica*, 2004,42:99-104.
- [3] Wardlaw I F. Interaction between drought and chronic high temperature during kernel filling in wheat in a controlled environ-ment[J]. *Ann Bot*, 2002,90:469-476.
- [4] 曹卫东,贾继增,金继运.不同供氮水平下小麦苗期叶绿素含量的 QTL 及互作研究[J].*植物营养与肥料学报*,2004,10(5):473-478.
- [5] Walulu R S, Rosenow D T, Wester D B, et al. Inheritance of the stay-green trait in sorghum[J]. *Crop Sci*, 1994,34:970-972.
- [6] Van Oosterom E, Jayachandran R, Bidinger F R. Diallel analysis of the stay-green trait and its components in sorghum[J]. *Crop Sci*, 1996,36:540-555.
- [7] Borrell AK, Hammer GL, Douglas ACL. Does maintaining green leaf area in sorghum improve yield under drought? I. Leaf growth and senescence[J]. *Crop Sci*,2000,40:1026-1037.
- [8] Borrell A K, Hammer G L. Nitrogen dynamics and the physiological basis of stay-green in sorghum[J]. *Crop Sci*, 2000,40:1295-1307.
- [9] Verma V, Foulkes M J, Worland A J, et al. Mapping quantitative trait loci for leaf senescence as a yield determinant in winter wheat under optical and drought-stressed environments[J]. *Euphytica*, 2004, 135:255-263.
- [10] Hafsi M, Mechmeche W, Bouamama L, et al. Flag leaf senescence, as evaluated by numerical image analysis, and its relationship with yield under drought in durum wheat[J]. *Agron Crop Sci*, 2000,185: 275-280.
- [11] Richard R A. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments[J]. *Agricultural Water Management*, 2006,80(1/3):197-211.
- [12] Borrell A K, Hammer G L, van Oosterom E. Stay-green: a consequence of balance between supply and demand for nitrogen during grain filling[J]. *Ann Appl Biol*, 2001,138:91-95.
- [13] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence[J]. *Biochim Biophys Acta*, 1989,990:87-92.
- [14] Tambussi E A, Nogués S, Araus J L. Ear of durum wheat under water stress: water relations and photosynthetic metabolism[J]. *Planta*, 2005,221:446-458.
- [15] Lu C M, Zhang J H. Effects of water stress on photosystem II photochemistry and its thermostability in wheat plants[J]. *Exp Bot*, 1999, 50:1199-1206.
- [16] Zhang Y J, Zhao C J, Liu L Y, et al. Chlorophyll fluorescence detected passively by difference reflectancespectra of wheat (*Triticum aestivum* L.) leaf[J]. *Integr Plant Biol*, 2005,47:1228-1235.
- [17] 赵丽英,邓西平,山 仑.渗透胁迫对小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J].*应用生态学报*,2005,16(7):1261-1264.
- [18] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics[J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1991,42: 313-349.
- [19] 吴长艾,孟庆伟,邹 琦.小麦不同品种叶片对光氧化胁迫响应的比较研究[J].*作物学报*,2003,29(3):339-344.
- [20] XU Changcheng, Li Dequan, Zou Qi, et al. Effect of drought on chlorophyll fluorescence and xanthophyll cycle components in winter wheat leaves with different ages[J]. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1999,25(1):29-37.
- [21] 王正航,武仙仙,昌小平,等.小麦旗叶叶绿素含量及荧光动力学参数与产量的灰色关联度分析[J].*作物学报*,2008,48: 2245-2253.
- [22] 高三基,罗 俊,陈如凯,等.甘蔗品种抗旱性光合生理指标及其综合评价[J].*作物学报*,2002,28(1):94-98.
- [23] Grzesiak S, Grzesiak M T, Filek W, et al. Evaluation of physiological screening tests for breeding drought resistant triticale(*Triticosecale Wittmack*)[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2003,25:29-37.
- [24] 赵会杰,邹 琦,于振文.叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用[J].*河南农大学学报*,2000,34(3):248-251.
- [25] 张守仁.叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J].*植物学通报*,1999,16(4):444-448.
- [26] Asada K. Production and action of active oxygen species in photosynthetic tissues[C]//Christine H Foyer, Mullineaux. *Causes of Photooxidative Stress and Amelioration of Defense System in Plants*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1994:77-104.
- [27] 牟会荣,姜 东,戴廷波,等.遮荫对小麦旗叶光合及叶绿素荧光特性的影响[J].*中国农业科学*,2008,41(2):599-606.
- [28] 张其德,卢从明,刘丽娜,等.CO₂ 倍增对不同基因型大豆光合色素含量和荧光诱导动力学参数的影响[J].*植物学报*,1997, 39(10):946-950.
- [29] 王可玢,许春辉,赵福洪,等.水分胁迫对小麦旗叶某些体内叶绿素 a 荧光参数的影响[J].*生物物理学报*,1997,132:273-278.
- [30] 张雷明,上官周平,毛明策,等.长期施氮对旱地小麦灌浆期叶绿素荧光参数的影响[J].*应用生态学报*,2003,14(5):695-698.