

不同品种冬小麦苗期叶绿素荧光参数与抗旱性关系研究

吴姗姗¹, 徐学欣¹, 张霞¹, 盖红梅², 赵长星¹, 王维华¹, 石岩¹, 战园¹

(1. 山东省旱作农业技术重点实验室, 青岛农业大学 农学院, 山东 青岛 266109; 2. 青岛市农业科学研究院, 山东 青岛 266100)

摘要:为了探寻快速高效筛选冬小麦抗旱品种的方法, 给冬小麦抗旱品种筛选提供参考依据, 以烟农 999、泰麦 1918、济麦 22 号、济麦 23 号、泰山 27 和师栾 02-1 6 个冬小麦品种为供试材料, 设置正常水分处理(土壤相对含水量 75%)、轻微干旱处理(土壤相对含水量 55%)和中度干旱处理(土壤相对含水量 40%), 研究了苗期叶绿素荧光参数、生物量、根冠比、SPAD、超氧化物歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)含量及其之间相关关系。结果表明:与其他冬小麦品种相比, 干旱胁迫下, 泰麦 1918 的抗旱系数(DTC)最大, 根冠比降低程度最小, SPAD 值、光系统 II 最大光合效率(Fv/Fm)、光系统 II 实际光合效率(ϕ PS II)和相对电子传递速率(ETR)的降低程度最小, SOD 活性的降低程度最小, 非光化学淬灭(NPQ)升高程度最大, 丙二醛含量升高程度最小。6 个供试冬小麦品种的抗旱性强弱依次为泰麦 1918 > 烟农 999 > 济麦 22 号 > 济麦 23 号 > 泰山 27 > 师栾 02-1。通过相关性分析发现, 叶绿素荧光参数与抗旱系数、SOD 活性以及 MDA 含量的相关性均达到极显著水平。综上, 供试材料中泰麦 1918 的抗旱性最强, 叶绿素荧光参数可作为在苗期筛选冬小麦抗旱性品种的重要依据。

关键词:冬小麦; 抗旱性; 叶绿素荧光; 苗期; 品种筛选

中图分类号: S512.01 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2020)06-0090-10

doi: 10.7668/hbxb.20191258



Relationship Analysis of Chlorophyll Fluorescence Parameters and Drought Resistance in Different Winter Wheat Varieties at Seedling Stage

WU Shanshan¹, XU Xuexin¹, ZHANG Xia¹, GE Hongmei², ZHAO Changxing¹,
WANG Weihua¹, SHI Yan¹, ZHAN Yuan¹

(1. Shandong Province Key Laboratory of Rainfed Agriculture Technology, College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. Qingdao Agricultural Scientific Research Institute, Qingdao 266100, China)

Abstract: In order to explore a fast and efficient way to screen drought-resistant varieties of winter wheat, and to select drought-resistant winter wheat varieties. Six winter wheat varieties, Yannong 999, Taimai 1918, Jimai 22, Jimai 23, Taishan 27 and Shiluan 02-1 were used in this study. Normal water treatment (75% relative soil water content), mild drought treatment (55% relative soil water content) and moderate drought treatment (40% relative soil water content) were arranged to explore the chlorophyll fluorescence parameters, biomass, root-shoot ratio, SPAD, superoxide dismutase (SOD) activity, malondialdehyde (MDA) content and their correlations. Results showed that, compared with other varieties, under drought stress, Taimai 1918 obtained the highest drought resistance coefficient (DTC). The smallest reduction of root to shoot ratio, SPAD value, photosystem II maximum photosynthetic efficiency (Fv/Fm), photosystem II actual photosynthesis efficiency (ϕ PS II), relative electron transfer rate (ETR), SOD, and the largest increasing in non-photochemical quenching (NPQ) and minimal increasing in MDA content were observed in Taimai 1918. The order of drought resistance of 6 winter wheat varieties was Taimai

收稿日期: 2020-08-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0300604; 2016YFD0300403); 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010716); 青岛市现代农业产业技术体系小麦创新推广团队项目(6622316104)

作者简介: 吴姗姗(1995-), 女, 山东滨州人, 在读硕士, 主要从事小麦节水高产栽培生理研究。

通讯作者: 赵长星(1976-), 男, 山东曹县人, 教授, 博士, 主要从事小麦节水高产栽培生理生态研究。

1918 > Yannong 999 > Jimai 22 > Jimai 23 > Taishan 27 > Shiluan 02-1. The chlorophyll fluorescence parameters were significantly correlated with drought resistance coefficient, SOD activity and MDA content. Sum up, the drought resistance in Taimai 1918 was strongest, and chlorophyll fluorescence parameters can be used for screening drought-resistant winter wheat varieties at seedling stage.

Key words: Winter wheat; Drought resistance; Chlorophyll fluorescence; Seedling stage; Variety screening

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是我国主要的粮食作物, 约有 50% 以上的中国人口依赖小麦食品^[1]。华北平原是我国冬小麦的主产区, 耕地面积占全国的 25%, 为全国提供了约 71% 的小麦产量, 但该地区的水资源占有量仅为全国的 6%, 且农用水资源逐年减少, 季节性干旱频发, 严重制约了农业安全可持续发展^[2-4], 未来干旱缺水仍是制约华北地区冬小麦生产的主要因素^[5-6]。抗旱稳产品种的筛选与推广是冬小麦抗旱节水生产中的重要途径, 因此, 研究冬小麦抗旱稳产高产的生理特性, 为培育和筛选抗旱性冬小麦品种提供理论依据, 对保证粮食安全及可持续生产具有重要意义。

传统上, 小麦抗旱性品种选育筛选等工作繁琐费时、效率较低, 为加速抗逆作物的筛选与鉴定, 亟须快速高效的筛选技术来鉴定逆境下作物的生长^[7-8], 评估品种对环境的适应性, 从而降低有潜质品种的淘汰率^[9]。Reynolds 等^[10]研究表明, 探索高效的抗旱品种筛选新方法, 在短时间内筛选出大量符合要求的品种, 为挑选优良亲本提供理论依据, 可以提高小麦抗旱品种选育和筛选的效率。较多学者分别从小麦农艺性状^[11-13] (穗数、穗粒数和植株形态等)、生理指标^[14-16] (光合、酶活性、丙二醛含量等物质和能量代谢) 和遗传机制^[17-18] 等方面对小麦抗旱性品种筛选与鉴定做了大量研究。前人研究表明, 归一化植被指数 (NDVI) 可作为评价抗旱性的重要指标, 预测干旱胁迫中的小麦产量^[6, 19]。Aparicio 等^[20] 和 Royo 等^[21] 利用光谱反射率 (SR) 的方法评估了干旱胁迫下硬粒小麦的抗旱性; Crain 等^[22] 的研究表明, 使用高通量法 (HTP) 可以通过植物表型特征快速辨别优劣品种, 减少资源浪费; 刘秉焱等^[23] 通过转录因子基因的表达量来评估小麦的抗旱性。近几年, 叶绿素荧光分析技术在植物光合特性的研究中兴起, 得益于它对植物的无损性, 被广泛应用于植物光合性能的评估。叶绿素荧光参数能够在生物胁迫和非生物胁迫中有效地反应植物体的受损程度及光合性能。Yadav 等^[24] 的研究表明, 通过叶绿素荧光参数可以在早期监测植物受到环境胁迫的情况; Pereira 等^[25] 利用叶绿素荧光参数筛选出了豇豆的抗旱品系。但在小麦苗期利用叶绿素荧光

参数来评估小麦品种抗旱性的研究鲜见, 且叶绿素荧光参数与传统抗旱指标 (如抗旱系数、酶活性等) 之间的关系尚不明朗。为此本研究采用 6 个冬小麦品种为供试材料, 设置 3 种水分处理, 正常水分处理 (土壤相对含水量 75%)、轻微干旱处理 (土壤相对含水量 55%) 和中度干旱处理 (土壤相对含水量 40%), 通过对叶绿素荧光参数、生物量、根冠比、SPAD、抗氧化酶活性和丙二醛含量及其之间相关关系的研究, 探讨了叶绿素荧光参数与冬小麦品种抗旱性间的关系, 以及利用叶绿素荧光参数从苗期鉴定冬小麦品种抗旱性的可行性, 为快速筛选抗旱性冬小麦品种提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料与设计

本试验采用 6 个适宜黄淮地区种植冬小麦品种, 烟农 999 (国审麦 2016012) 半冬性, 多抗、超高产、优质品种, 泰麦 1918 (鲁审麦 20160056) 冬性, 高产优质、抗病耐旱品种, 济麦 22 号 (国审麦 2006018) 半冬性, 超高产、中抗、优质品种, 济麦 23 号半冬性, 高产优质品种, 泰山 27 (鲁农审 2012050) 偏冬性, 高产、优质、抗病品种, 师栾 02-1 (国审麦 2007016) 半冬性, 优质小麦品种, 高肥水地较高产。试验设置 3 种水分处理^[26], 正常水分处理 (土壤相对含水量 75%)、轻微干旱处理 (土壤相对含水量 55%) 和中度干旱处理 (土壤相对含水量 40%), 共计 18 个处理, 每处理 6 次重复。播种前, 用 30% (V/V) H₂O₂ 浸泡供试材料种子 10 min, 再用蒸馏水冲洗 5~6 遍, 随后催芽萌发至露白, 并选取萌发程度一致的种子转移至培养盆中, 每盆 8 粒种子, 盆内径 14.4 cm, 高 11 cm, 底部有小孔, 每盆盛有 1 000 g 过筛干土 (绝对含水量 8.6%)。将试验盆放置在光照培养箱中, 光/暗循环为 14 h/10 h, 温度为 25 °C/20 °C (光/暗), 湿度为 75%, 光合通量密度 (PPFD) 为 20 000 lx。培养至三叶一心期, 用称质量法^[27] 控水。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 冬小麦苗期干物质质量测定 将处理结束后小麦幼苗分成地上部器官和根系, 放入烘箱, 105 °C 杀青 30 min 后 75 °C 烘干至恒质量, 分别称质

量,并计算根冠比(RSR), $RSR = Br/Bs$, 式中 Br 根系干物质质量; Bs 为地上部干物质质量。抗旱系数参照胡标林等^[28]的方法进行计算(Drought tolerance coefficient, DTC), $DTC = Bd/Bp$, 式中 Bd 为干旱胁迫下的地上部干物质质量; Bp 为充分灌水下的地上部干物质质量。

1.2.2 冬小麦苗期 SPAD 测定 干旱处理 7 d 后,用日本美能达 SPAD-502 叶绿素快速分析仪测定各处理冬小麦最新展开叶的 SPAD 值。

1.2.3 冬小麦苗期叶绿素荧光特性测定 干旱处理 7 d 后,使用德国 WALZ IMAG-K7 叶绿素荧光成像仪测定各处理冬小麦最新的展开叶的 F_v/F_m 、 $\phi PS II$ 、 NPQ 和 ETR 。

1.2.4 冬小麦苗期生理指标测定 干旱处理 7 d 后测定苗期生理指标,各处理分别称取 0.5 g 新鲜冬小麦叶片,进行冰浴研磨,加入 pH 值 7.8 的磷酸盐缓冲液提取酶液,测定超氧化物歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)含量,重复 3 次。分别参照 Beauchamp 等^[29]和 Quan 等^[30]的方法,用美国 GE Ultrospec 7000 分光光度计测定 SOD 活性和 MDA 含量。

1.3 数据分析

数据的处理与图表的绘制分别采用 Excel 2007 和 Origin 2016 进行,采用 SPSS 18.0 进行数据差异显著性检验(Turkey, $P < 0.05$)和 Pearson 相关分析。

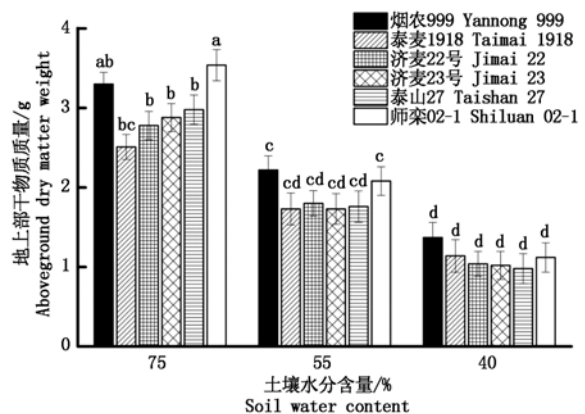
2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对不同品种冬小麦干物质质量的影响及其抗旱系数

2.1.1 干旱胁迫对不同冬小麦品种地上部干物质质量的影响 如图 1 所示,各品种的地上部干物质质量均随着干旱程度的增加呈下降趋势,轻微干旱胁迫下,泰麦 1918 的干物质质量与正常水分处理的差异不显著,其余各品种的干物质质量均显著低于正常水分处理,泰麦 1918 的干物质质量降低程度最小,降低了 31.1%,烟农 999、济麦 22 号、济麦 23 号和泰山 27 的干物质质量分别降低 32.7%、35.3%、39.9%、40.9%,师栾 02-1 的干物质质量降低程度最大,降低了 41.2%;中度干旱胁迫下,各品种的干物质质量显著低于正常水分处理,泰麦 1918 的干物质质量降低程度最小,降低了 54.6%,烟农 999、济麦 22 号、济麦 23 号和泰山 27 分别降低了 58.5%、62.6%、64.6%、67.1%,师栾 02-1 干物质质量降低程度最大,降低了 68.4%。

2.1.2 干旱胁迫对不同冬小麦品种地下部干物质质量的影响 图 2 表明,各品种的地下部干物质质

量(根质量)均随着干旱程度的增加均呈下降趋势,轻微干旱胁迫下泰麦 1918 的根质量降低程度最小,降低了 35.4%,烟农 999、济麦 22 号、济麦 23 号和泰山 27 的根质量分别降低 38.0%、42.3%、56.1%、59.3%,师栾 02-1 的根质量降低程度最大,降低了 67.3%;中度干旱胁迫下,各品种的根质量均显著低于正常水分处理,泰麦 1918 根质量降低程度最小,降低了 63.3%,烟农 999、济麦 22 号、济麦 23 号和泰山 27 分别降低 68.0%、74.6%、78.0%、81.3%,师栾 02-1 的根质量降低程度最大,降低了 85.4%。



不同字母表示不同处理下差异达 5% 显著水平 ($P < 0.05$)。图 2-10 同。

Different letters indicate significant difference between different treatments ($P < 0.05$). The same as Fig. 2-10.

图 1 干旱胁迫对不同冬小麦品种地上部干物质质量的影响

Fig. 1 Effects of drought stress on aboveground dry matter weight of different winter wheat varieties

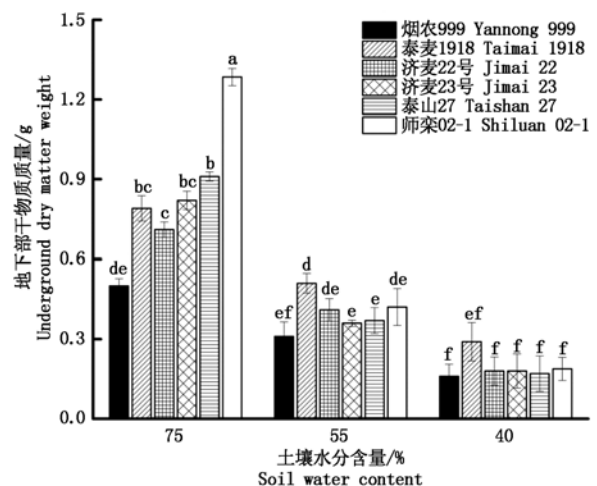


图 2 干旱胁迫对不同冬小麦品种地下部干物质质量的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on underground dry matter weight of different winter wheat varieties

2.1.3 干旱胁迫对不同冬小麦品种根冠比的影响

如图 3 所示,各品种的根冠比均随着干旱程度的增加呈下降趋势,轻微干旱胁迫下,烟农 999 和泰麦 1918 的根冠比与正常水分处理相比差异不显著,济麦 22 号、济麦 23 号、泰山 27 和师栾 02-1 的根冠比

均显著低于正常水分处理,烟农 999、泰麦 1918、济麦 22 号、济麦 23 号、泰山 27 和师栾 02-1 的根冠比分别降低了 7.8%、6.3%、10.8%、26.9%、31.2%、44.3%,泰麦 1918 的根冠比降低程度最小;中度干旱胁迫下,各品种的根冠比均显著低于正常水分处理,烟农 999、泰麦 1918、济麦 22 号、济麦 23 号、泰山 27 和师栾 02-1 的根冠比分别降低了 22.9%、19.2%、32.2%、38.0%、43.2%、53.8%,泰麦 1918 的根冠比降低程度最小。

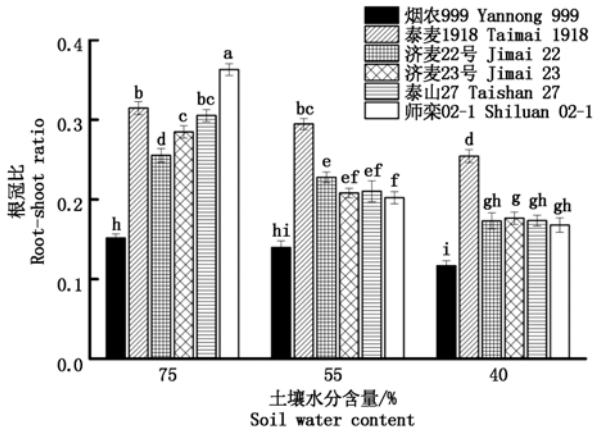


图 3 干旱胁迫对不同冬小麦品种根冠比的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on root-shoot ratio of different winter wheat varieties

2.1.4 不同冬小麦品种在不同干旱程度下抗旱系数的比较 表 1 表明,泰麦 1918 的轻微抗旱系数和中度抗旱系数均高于其他 5 个品种,抗旱性最好。轻微干旱胁迫下,烟农 999 和济麦 22 号的抗旱系数均低于泰麦 1918,但无显著差异,济麦 23 号、泰山 27 号和师栾 02-1 的抗旱系数则显著低于泰麦 1918,其中师栾 02-1 的轻微抗旱系数最低;中度干旱下,泰麦 1918 的抗旱系数显著高于其他 5 个品种,烟农 999 次之,济麦 22 号和济麦 23 号的中度抗旱系数无显著差异,泰山 27 和师栾 02-1 的显著低于济麦 22 号,师栾 02-1 的中度抗旱系数最低。综合抗旱结果表明,6 个冬小麦品种的抗旱性强弱依次为泰麦 1918 > 烟农 999 > 济麦 22 号 > 济麦 23 号 > 泰山 27 > 师栾 02-1。

2.2 干旱胁迫对不同冬小麦品种叶片 SPAD 的影响

如图 4 所示,各冬小麦品种叶片的 SPAD 值均随着干旱程度的增加呈现下降趋势。轻微干旱胁迫下,烟农 999、泰麦 1918、济麦 22 号和泰山 27 的 SPAD 值与正常水分处理差异不显著,济麦 23 号和师栾 02-1 的 SPAD 值显著低于正常水分处理。其中,泰麦 1918 的 SPAD 值降低程度最小,降低了 3.5%,烟农 999、济麦 22 号、济麦 23 号、泰山 27 分别降低了 7.6%、8.6%、11.6%、12.3%,师栾 02-1

的 SPAD 值降低程度最大,降低了 16.7%;中度干旱胁迫下,各冬小麦品种的 SPAD 值均显著低于正常水分处理,其中泰麦 1918 的 SPAD 值降低程度最小,降低了 9.5%,烟农 999、济麦 22 号、济麦 23 号和泰山 27 分别降低了 16.5%、17.9%、19.3%、20.9%,师栾 02-1 的降低程度最大,降低了 35.9%。

表 1 不同冬小麦品种在不同干旱程度下的抗旱系数

Tab. 1 Drought tolerant coefficient of different winter wheat varieties under different drought levels

品种 Varieties	轻微抗旱系数 Slight drought resistance coefficient	中度抗旱系数 Moderate drought resistance coefficient
	烟农 999 Yannong 999	0.673 ± 0.029a
泰麦 1918 Taimai 1918	0.689 ± 0.031a	0.454 ± 0.017a
济麦 22 号 Jimai 22	0.647 ± 0.031ab	0.374 ± 0.020c
济麦 23 号 Jimai 23	0.601 ± 0.030b	0.354 ± 0.018cd
泰山 27 Taishan 27	0.591 ± 0.032b	0.329 ± 0.020d
师栾 02-1 Shiluan 02-1	0.588 ± 0.030b	0.316 ± 0.016d

注:不同字母表示不同处理下差异达 5% 显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant difference of 5% between different treatments ($P < 0.05$).

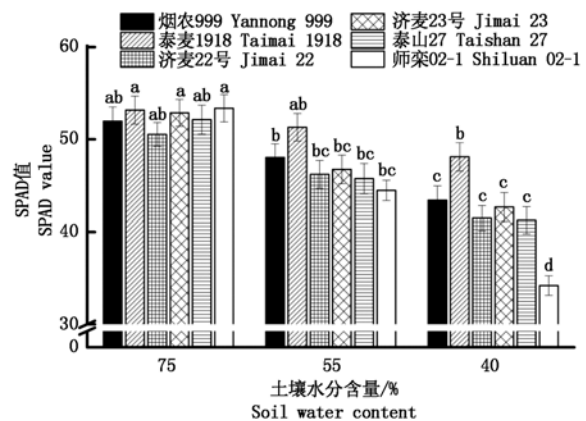


图 4 干旱胁迫对不同冬小麦品种 SPAD 的影响

Fig. 4 Effects of drought stress on SPAD in different winter wheat varieties

2.3 干旱胁迫对不同冬小麦品种叶片叶绿素荧光参数的影响

2.3.1 干旱胁迫对不同冬小麦品种叶片 F_v/F_m 的影响 图 5 表明,各冬小麦品种叶片的 F_v/F_m 均随着干旱胁迫程度的增加呈现下降趋势。轻微干旱胁迫下,各品种的 F_v/F_m 均显著低于对照,烟农 999、泰麦 1918、济麦 22 号、济麦 23 号、泰山 27 和师栾 02-1 的 F_v/F_m 分别降低了 9.7%、9.2%、11.4%、12.6%、12.9%、13.6%,泰麦 1918 的降低程度最小。中度干旱胁迫下,各品种的 F_v/F_m 均显著低于轻微干旱下的 F_v/F_m ,其中泰麦 1918 的降低程度最小,相比于正常水分处理降低了 22.2%,烟农 999、济麦 22 号、济麦 23 号和泰山 27 分别降低了 23.2%、25.5%、27.7%、31.9%,师栾 02-1 的下降程度最

大,降低了35.6%。

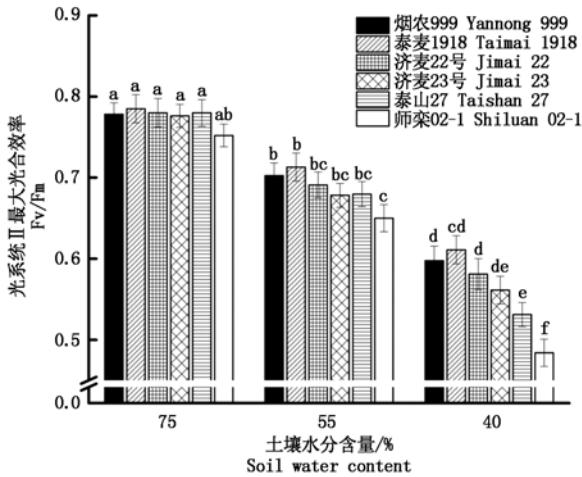


图5 干旱胁迫对不同冬小麦品种 Fv/Fm 的影响

Fig. 5 Effects of drought stress on Fv/Fm in different winter wheat varieties

2.3.2 干旱胁迫对不同冬小麦品种叶片 ϕ PS II 的影响 如图6所示,各品种叶片的 ϕ PS II 均随着干旱程度的增加呈现下降的趋势。轻微干旱胁迫下,烟农999和泰麦1918的 ϕ PS II 与正常水分处理相比差异不显著,济麦22号、济麦23号、泰山27和师栾02-1的 ϕ PS II 则显著低于正常水分处理,烟农999、泰麦1918、济麦22号、济麦23号、泰山27和师栾02-1的 ϕ PS II 分别降低了15.5%,10.6%,21.4%,31.8%,35.7%,47.6%,泰麦1918的降低程度最小降低了10.6%。中度干旱胁迫下,各品种的 ϕ PS II 均显著低于对照,其中泰麦1918的 ϕ PS II 降低程度最小,降低了34.1%,烟农999、济麦22号、济麦23号和泰山27分别降低了47.3%,52.8%,57.1%,62.9%,师栾02-1的降低程度最大,降低了66.0%。

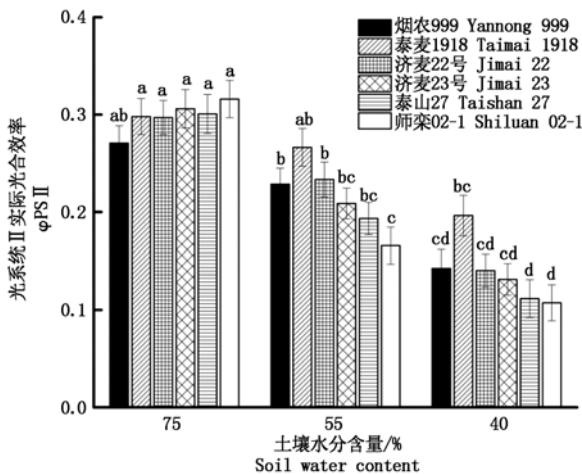


图6 干旱胁迫对不同冬小麦品种 ϕ PS II 的影响

Fig. 6 Effects of drought stress on ϕ PS II in different wheat varieties

2.3.3 干旱胁迫对不同冬小麦品种叶片 NPQ 的影响 图7表明,各冬小麦品种叶片的 NPQ 均随着干

旱胁迫程度的增加呈现上升的趋势。轻微干旱胁迫下,各品种的 NPQ 均显著高于正常水分处理的,其中,泰麦1918的升高程度最大,升高了32.0%,烟农999、济麦22号、济麦23号和泰山27分别升高了26.5%,26.2%,20.2%,19.3%,师栾02-1的 NPQ 升高程度最小,升高了12.4%;中度干旱胁迫下,各品种的 NPQ 均显著高于轻微干旱胁迫处理,与正常水分处理相比,烟农999、泰麦1918、济麦22号、济麦23号、泰山27和师栾02-1分别升高了49.4%,54.5%,48.9%,39.6%,38.9%,29.3%,泰麦1918的上升程度最大。

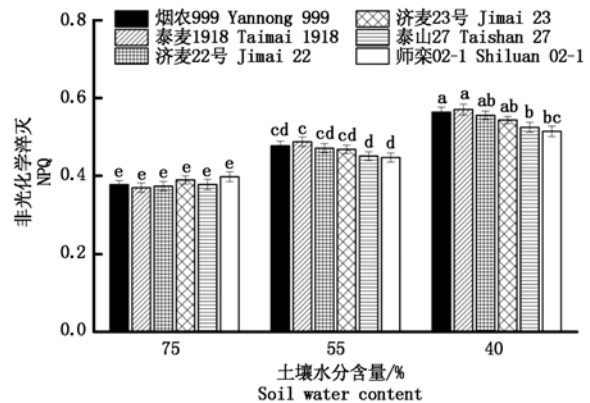


图7 干旱胁迫对不同冬小麦品种 NPQ 的影响

Fig. 7 Effects of drought stress on NPQ in different winter wheat varieties

2.3.4 干旱胁迫对不同冬小麦品种叶片 ETR 的影响 如图8所示,各品种叶片的 ETR 均随着干旱胁迫程度的增加呈现下降的趋势。轻微干旱胁迫下,各品种的 ETR 均显著低于正常水分处理,其中,泰麦1918的 ETR 降低程度最小,降低了10.0%,烟农999、济麦22号、济麦23号和泰山27分别降低了12.3%,12.7%,17.9%,21.5%,师栾02-1的降低程度最大,降低了28.2%;中度干旱胁迫下,各品种的 ETR 均显著低于轻微干旱胁迫下的 ETR,其中,泰麦1918的 ETR 下降程度最小,降低了19.65%,烟农999、济麦22号、济麦23号和泰山27分别降低了25.2%,27.3%,32.0%,36.7%,师栾02-1的降低程度最大,降低了43.9%。

2.4 干旱胁迫对不同冬小麦品种生理特性的影响

2.4.1 干旱胁迫对不同冬小麦品种叶片 SOD 活性(以鲜质量计)的影响 如图9所示,各品种叶片的 SOD 活性均随干旱胁迫程度的增加呈现下降的趋势。轻微干旱胁迫下,各品种的 SOD 活性均显著低于正常水分处理的,烟农999、泰麦1918、济麦22号和济麦23号间的 SOD 活性差异不显著,泰山27和师栾02-1的 SOD 活性则显著低于泰麦1918,泰麦1918的降低程度最小,降低了14.4%;中度干旱胁迫

迫下,各冬小麦品种的 SOD 活性均显著低于轻微干旱胁迫处理,其中,泰麦 1918 的 SOD 活性降低程度

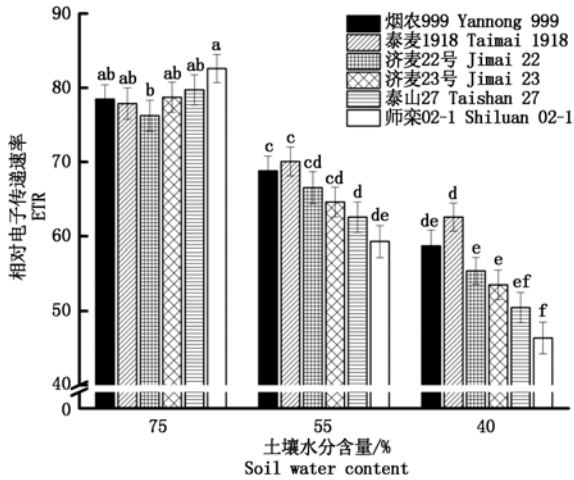


图 8 干旱胁迫对不同冬小麦品种 ETR 的影响

Fig. 8 Effects of drought stress on ETR in different winter wheat varieties

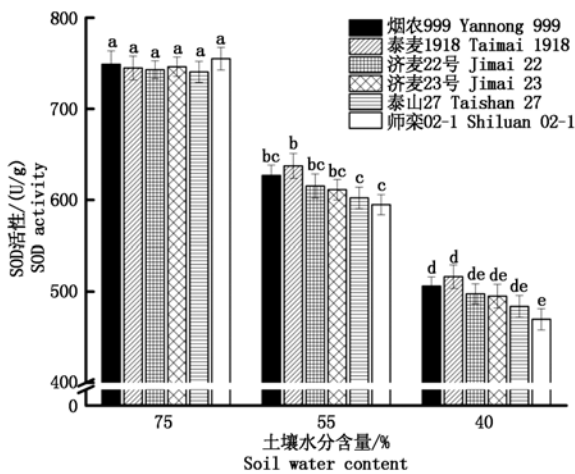


图 9 干旱胁迫对不同冬小麦品种 SOD 活性的影响

Fig. 9 Effects of drought stress on SOD activity in different winter wheat varieties

最小,降低了 30.6%,烟农 999、济麦 22 号、济麦 23 号和泰山 27 分别降低了 32.4%,33.0%,33.7%,34.7%,师栾 02-1 的降低程度最大,降低了 37.8%。
2.4.2 干旱胁迫对不同冬小麦品种叶片 MDA 含量(以鲜质量计)的影响 如图 10 所示,各冬小麦品种叶片的 MDA 含量均随干旱程度的增加呈现出了上升的趋势。轻微干旱胁迫下,烟农 999、泰麦 1918、济麦 22 号和济麦 23 号的 MDA 含量与正常水分处理相比差异不显著,泰山 27 和师栾 02-1 的 MDA 含量则显著高于正常水分处理,泰麦 1918 的升高程度最小,升高了 46.7%,烟农 999、济麦 22 号、济麦 23 号和泰山 27 分别升高了 49.8%,59.4%,86.3%,94.2%,师栾 02-1 的升高程度最大,升高了 102.6%;中度干旱胁迫下,各品种的 MDA 含量均显著高于正常水分处理,其中,泰麦 1918 的 MDA 含量升高程度最小,升高了 120.8%,烟农 999、济麦 22 号、济麦 23 号和泰山 27 分别升高了 143.0%,192.3%,206.3%,222.5%,师栾 02-1 的升高程度最大,升高了 224.5%。

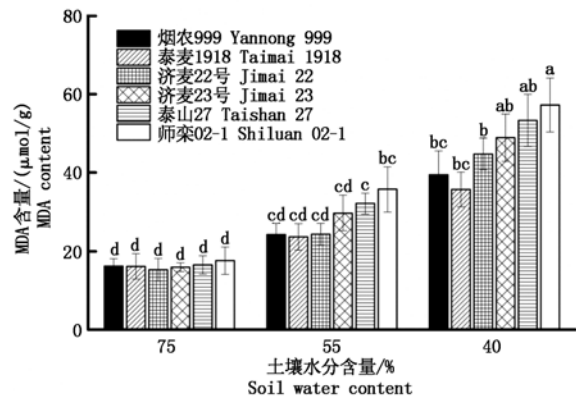


图 10 干旱胁迫对不同冬小麦品种 MDA 含量的影响

Fig. 10 Effects of drought stress on MDA content in different winter wheat varieties

表 2 冬小麦品种抗旱系数与叶绿素荧光参数和生理指标的相关关系 (Pearson)

Tab. 2 Correlation between drought resistance coefficient and chlorophyll fluorescence parameters and physiological indexes of winter wheat

指标 Index	最大光合效率 Fv/Fm	实际光合效率 φPS II	非光化学淬灭 NPQ	相对电子传递速率 ETR	超氧化物歧化酶 SOD	丙二醛 MDA
实际光合效率 φPS II	0.830 **					
非光化学淬灭 NPQ	-0.748 **	-0.786 **				
相对电子传递速率 ETR	0.918 **	0.858 **	-0.722 **			
超氧化物歧化酶 SOD	0.919 **	0.866 **	-0.868 **	0.961 **		
丙二醛 MDA	-0.743 **	-0.833 **	0.718 **	-0.865 **	-0.859 **	
抗旱系数 DTC	0.896 **	0.902 **	-0.908 **	0.931 **	0.979 **	-0.859 **

注: Fv/Fm. 最大光合效率; φPS II. 实际光合效率; NPQ. 非光化学淬灭; ETR. 相对电子传递速率; SOD. 超氧化物歧化酶; MDA. 丙二醛; DTC. 抗旱系数. ** . 极显著相关 ($P < 0.01$).

Note: Fv/Fm. Maximum photosynthetic efficiency; φPS II. Actual photosynthetic efficiency; NPQ. Non-photochemical quenching; ETR. Relative electron transfer rate; SOD. Superoxide dismutase; MDA. Malondialdehyde; DTC. Drought resistance coefficient. ** . Difference at $P < 0.01$.

2.5 相关性分析

如表 2 所示,抗旱系数与 F_v/F_m 、 $\phi PS II$ 、ETR 和 SOD 呈极显著正相关,与 NPQ 和 MDA 呈极显著的负相关; F_v/F_m 、 $\phi PS II$ 和 ETR 分别与 SOD 呈极显著正相关,与 MDA 呈极显著负相关;NPQ 与 SOD 呈极显著负相关,与 MDA 呈极显著正相关。

3 讨论与结论

抗旱系数作为一种典型、简便的评价品种抗旱性的方法,被广泛应用于植物品种抗旱性的评价^[11,28,31]。本研究通过比较不同干旱胁迫程度下各冬小麦品种的抗旱系数表明,泰麦 1918 的抗旱性最高。前人研究表明,干旱胁迫下,小麦幼苗地上部和根的干物质质量均低于正常水分处理,小麦可通过提高根冠比或者减少根冠比降低来应对干旱胁迫,前人大量研究利用聚乙二醇在水培条件下模拟干旱研究不同干旱条件对小麦苗期根冠比的影响,其研究表明,根冠比随干旱胁迫程度的增加升高,且抗旱性品种在干旱胁迫下的根冠比较大^[32-33],但亦有研究表明干旱胁迫下小麦苗期的根冠比降低^[34]。本研究试验条件为土培盆栽,各冬小麦品种的根冠比虽随干旱程度的增加而降低,但抗旱性较高的品种根冠比的降低程度较小,这与前人在大田条件下对水稻和玉米等苗期抗旱性鉴定试验以及在室内土培试验条件下对豌豆品种抗旱性鉴定研究结果一致^[35-38]。本试验综合各品种的干物质质量、根质量和根冠比研究表明,泰麦 1918 的抗旱性最好,烟农 999 次之,济麦 22 号、济麦 23 号和山农 27 再次,师栾 02-1 的抗旱性最差,响应干旱最敏感。

干旱胁迫下植物体内产生过量的活性氧使细胞膜脂过氧化,产生大量的 MDA,破坏细胞膜,毒害植物细胞,为保证植物正常的代谢平衡,植物细胞内的 SOD 会通过酶促反应来清除过量活性氧,从而保证代谢平衡来抵御逆境,因此,植物品种对活性氧的清除能力与抗旱性的强弱有着紧密的联系;植物细胞受到逆境损伤后因蛋白质合成途径受阻导致 SOD 活性随之降低,而在逆境下能保持 SOD 活性具有较高水平的品种则耐受性更强^[39-41]。本研究结果表明,各品种的 MDA 含量均随干旱胁迫的增加而升高,SOD 活性均随干旱程度的增加而降低,说明各品种均受到了干旱带来的不同程度的损伤,其中泰麦 1918 与正常水分处理相比 MDA 含量的升高程度最小,SOD 活性降低程度最小,说明泰麦 1918 在干旱胁迫下清除活性氧的能力较强,对干旱的忍耐力

较高。

前人研究结果表明,逆境胁迫使植物体产生的活性氧破坏细胞膜,阻碍叶绿素合成,加速降解,从而降低叶绿素含量,导致光系统 II 受损,抑制光合同化物积累,降低干物质积累量^[36]。前人研究表明,干旱胁迫下小麦旗叶的 SPAD 值呈下降趋势,且胁迫下 SPAD 值较高的小麦品种具有较高的干物质质量,抗旱性较好^[42]。本研究结果表明,干旱胁迫下,各品种的 SPAD 值均随干旱程度的增加而下降,同一干旱程度下,相比其他品种,泰麦 1918 的 SPAD 值最高,且干物质质量的降低程度最小,因此,泰麦 1918 对干旱最不敏感。叶绿素荧光参数可以直接反映干旱胁迫下植物的叶绿体功能和光合性能。植物在干旱胁迫下,光系统 II 被破坏后,进行光化学反应的质体醌(PQ)数量减少,降低了相对电子传递速率(ETR)和植物叶片细胞产生电子的能力,导致最大光化学效率(F_v/F_m)和实际光化学效率($\phi PS II$)降低,进而限制了叶片的 CO_2 同化作用,降低光能利用率,产生过剩光能,为避免过量的光能带来的伤害,植物体通过增加 NPQ 以热的形式来淬灭多余的能量,从而起到保护的作用,增强光系统 II 对环境的适应性^[25,43-48]。本研究结果表明,干旱胁迫下,泰麦 1918 的 F_v/F_m 、 $\phi PS II$ 和 ETR 的降低程度最小, NPQ 的上升程度最大,说明泰麦 1918 的光系统 II 对干旱环境具有较高的耐受性,适应干旱环境能力较好,能够通过快速增加 NPQ 来启动光保护机制,减轻过量光能对光系统的伤害,并减缓 SOD 活性的降低,减少 MDA 的产生,维持较高光合性能及干物质积累,因此具有较高的抗旱性。前人在棉花、银杏、燕麦和大豆中的研究中发现, F_v/F_m 与 $\phi PS II$ 呈显著正相关,与 MDA 呈极显著负相关,SOD 与 MDA 呈显著负相关^[49-53],这与本研究在冬小麦中的研究结果一致,其中 NPQ 和 ETR 与 SOD 和 MDA 之间极显著相关,叶绿素荧光参数与抗旱系数亦呈极显著相关。因此,叶绿素荧光参数可作为评估冬小麦品种抗旱性的有效指标。

综上,干旱胁迫下,与其他品种相比较,泰麦 1918 的抗旱系数最高,抗旱性最好;其干旱胁迫下的干物质质量、根质量、根冠比、SPAD 值、 F_v/F_m 、 $\phi PS II$ 和 ETR 的降低程度最小,SOD 活性的降低程度最小, NPQ 的升高程度最大,MDA 含量的升高程度最小;通过进行相关性分析得到,叶绿素荧光参数与抗旱系数、酶活性和丙二醛含量间的相关性均达极显著水平。因此,叶绿素荧光参数可作为苗期快速鉴定冬小麦品种抗旱性的指标,为抗旱冬小麦品

种筛选提供理论依据。

参考文献:

- [1] 刘海红,徐学欣,吴姗姗,於思益,石岩,赵长星. 雨养条件下不同冬小麦品种产量形成及氮素利用特征[J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 133 - 144. doi: 10.7668/hbxb. 20190270.
Liu H H, Xu X X, Wu S S, Yu S Y, Shi Y, Zhao C X. Studies on yield formation and nitrogen utilization characteristics of different winter wheat varieties under rain-fed condition[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(6): 133 - 144.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015: 244 - 245, 260 - 261, 407 - 410.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015: 244 - 245, 260 - 261, 407 - 410.
- [3] 黄峰,杜太生,王素芬,梅旭荣,龚道枝,陈源泉,康绍忠. 华北地区农业水资源现状和未来保障研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 28 - 37. doi: 10.15302/JSSCAE-2019.05.024.
Huang F, Du T S, Wang S F, Mei X R, Gong D Z, Chen Y Q, Kang S Z. Current situation and future security of agricultural water resources in North China[J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2019, 21(5): 28 - 37.
- [4] Yavas I, Unay A. Effects of zinc and salicylic acid on wheat under drought stress[J]. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 2016, 26(4): 1012 - 1018.
- [5] Guo Z J, Shi Y, Yu Z W, Zhang Y L. Supplemental irrigation affected flag leaves senescence post-anthesis and grain yield of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 180: 100 - 109. doi: 10.1016/j.fcr. 2015.05.015.
- [6] 曾占奎,王征宏,王黎明,庞玉辉,韩志鹏,郭程,王春平. 北部冬麦区小麦新品种(系)的节水生理特性与综合评判[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 137 - 143. doi: 10.7606/j. issn. 1000-7601. 2019.05.20.
Zeng Z K, Wang Z H, Wang L M, Pang Y H, Han Z P, Guo C, Wang C P. Water-saving physiological characteristics and comprehensive evaluation of new wheat varieties (lines) in northern winter wheat region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 137 - 143.
- [7] Barbagallo R P, Oxborough K, Pallett K E, Baker N R. Rapid, noninvasive screening for perturbations of metabolism and plant growth using chlorophyll fluorescence imaging[J]. *Plant Physiology*, 2003, 132(2): 485 - 493. doi: 10.1104/pp. 102.018093.
- [8] Gutierrez M, Reynolds M P, Raun W R, Stoned M L, Klatt A R. Spectral water indices for assessing yield in elite bread wheat genotypes under well-irrigated, water-stressed, and high-temperature conditions[J]. *Crop Science*, 2010, 50(1): 197 - 214. doi: 10.2135/cropsci2009.07.0381.
- [9] Ball S T, Konzak C F. Relationship between grain yield and remotely-sensed data in wheat breeding experiments[J]. *Plant Breeding*, 1993, 110(4): 277 - 282. doi: 10.1111/j. 1439-0523. 1993. tb00590. x.
- [10] Reynolds M P, Rajaram S, Sayre K D. Physiological and genetic changes of irrigated wheat in the post-green revolution period and approaches for meeting projected global demand[J]. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1611 - 1621. doi: 10.2135/cropsci1999.3961611x.
- [11] 任婕,孙敏,任爱霞,林文,薛建福,全锦,王文翔,高志强. 不同抗旱性小麦品种耗水量及产量形成的差异[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 211 - 220. doi: 10.13930/j. cnki. cjea. 190515.
Ren J, Sun M, Ren A X, Lin W, Xue J F, Tong J, Wang W X, Gao Z Q. Difference in water consumption and yield among different drought-resistant wheat cultivars[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(2): 211 - 220.
- [12] 邵千顺,王斐,王克雄,任小龙,杨琳. 宁夏南部山区冬小麦抗旱指标鉴定研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 66 - 71. doi: 10.7606/j. issn. 1000-7601. 2018.03.10.
Shao Q S, Wang F, Wang K X, Ren X L, Yang L. Studies on identification of drought resistance index of winter wheat in southern mountain area of Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 66 - 71.
- [13] 吴儒刚. 黄淮麦区小麦品种的遗传多样性和抗旱性分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
Wu R G. Genetic diversity and drought resistance for wheat varieties in the Yellow-Huai valley region[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018.
- [14] 陈晓杰. 中国冬小麦抗旱指标评价、种质筛选及重要性状与 SSR 标记的关联分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
Chen X J. Evaluation of drought tolerance index, selection of drought tolerance varieties and association analysis of important traits with SSR markers in Chinese winter bread wheat[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.
- [15] 韩梅,孙绿,李玉刚,刘海红,吴姗姗,赵长星,盖红梅. 干旱胁迫对不同品种小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(26): 6 - 12. doi: 10.11924/j. issn. 1000-6850. casb18040063.
Han M, Sun L, Li Y G, Liu H H, Wu S S, Zhao C X, Ge H M. Drought stress: effects on photosynthetic characteristics of flag leaf and yield of wheat varieties[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(26): 6 - 12.
- [16] 郑世英,郑建峰,徐建,郑芳,李士平,张乃芹,于凌春,耿建芬. 外源硅对 PEG 胁迫下小麦幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 74 - 78. doi: 10.7606/j. issn. 1000-7601. 2017.02.13.
Zheng S Y, Zheng J F, Xu J, Zheng F, Li S P, Zhang N Q, Yu L C, Geng J F. Effects of exogenous silicon on plant growth and activity of anti-oxidative enzymes in wheat seedlings under drought stress[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(2): 74 - 78.
- [17] 孙聚涛,王洋,郑艳,张正斌. 小麦水分高效利用分子育种研究进展[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(2): 205 - 211. doi: 10.7606/j. issn. 1009-1041. 2017.02.08.
Sun J T, Wang Y, Zheng Y, Zhang Z B. Advances in molecular breeding of drought resistance and high water use efficiency in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(2): 205 - 211.

- [18] 胡梦芸,李辉,庞建周,刘茜,张颖君,孙丽静. 过量表达蔗糖转运蛋白基因增强转基因小麦的耐旱性[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1473 - 1483. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.08.02.
Hu M Y, Li H, Pang J Z, Liu Q, Zhang Y J, Sun L J. Overexpression of sucrose transporter (TaSUT1A) improves drought tolerance in transgenic wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(8): 1473 - 1483.
- [19] Raun W R, Solie J B, Johnson G V, Stone M L, Lukina E V, Thomason W E, Schepers J S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance[J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(1): 131 - 138. doi:10.2134/agronj2001.931131x.
- [20] Aparicio N, Villegas D, Casadesus J, Araus J L, Royo C. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(1): 83 - 91. doi:10.2134/agronj2000.92183x.
- [21] Royo C, Aparicio N, Villegas D, Casadesus J, Monneveux P, Araus J L. Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting mediterranean conditions[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(22): 4403 - 4419. doi:10.1080/0143116031000150059.
- [22] Crain J, Reynolds M, Poland J. Utilizing high-throughput phenotypic data for improved phenotypic selection of stress-adaptive traits in wheat[J]. *Crop Science*, 2017, 57(2): 648 - 659. doi:10.2135/cropsci2016.02.0135.
- [23] 刘秉焱,韩翠英,刘虎岐. 4 个小麦抗旱相关转录因子基因的表达及其与抗旱生理生化指标的相关性[J]. 西北农业学报, 2016, 25(4): 530 - 532. doi:10.7606/j.issn.1004-1389.2016.04.008.
Liu B Y, Han C Y, Liu H Q. Correlation between expression of drought-related transcription factor genes and physiological, biochemical indexes in wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(4): 530 - 532.
- [24] Yadav B, Kumawat C, Verma A K, Yadav D K, Yadav P. Fluorescence imaging for crop stress monitoring: a review[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2017, 6(4): 568 - 575. doi:10.20546/ijemas.2017.604.068.
- [25] Pereira T S, Lima M D R, Paula L S, Lobato A K S. Tolerance to water deficit in cowpea populations resulting from breeding program: detection by gas exchange and chlorophyll fluorescence [J]. *Indian Journal of Plant Physiology*, 2016, 21(2): 171 - 178. doi:10.1007/s40502-016-0218-3.
- [26] 农业干旱等级[S]. 中华人民共和国国家标准. GB/T 23136-2015.
Grade of agricultural drought[S]. National Standards of the People's Republic of China. GB/T 23136-2015.
- [27] 张炜,高巍,曹振,何丽珊,谭桂玉,王保民. 干旱胁迫下小麦(*Triticum aestivum* L.) 幼苗中 ABA 和 IAA 的免疫定位及定量分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(15): 2940 - 2948. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2014.15.004.
Zhang W, Gao W, Cao Z, He L S, Tan G Y, Wang B M. Immunolocalization and quantitation of ABA and IAA in the organs of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(15): 2940 - 2948.
- [28] 胡标林,余守武,万勇,张铮,邱兵余,谢建坤. 东乡普通野生稻全生育期抗旱性鉴定[J]. 作物学报, 2007, 33(3): 425 - 432. doi:10.3321/j.issn:0496-3490.2007.03.012.
Hu B L, Yu S W, Wan Y, Zhang Z, Qiu B Y, Xie J K. Drought-resistance identification of Dongxiang common wild rice (*Oryza rufipogon* Griff.) in whole growth period [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(3): 425 - 432.
- [29] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels [J]. *Analytical Biochemistry*, 1971, 44(1): 276 - 287. doi:10.1016/0003-2697(71)90370-8.
- [30] Quan R D, Shang M, Zhang H, Zhao Y X, Zhang J R. Improved chilling tolerance by transformation with *betA* gene for the enhancement of glycinebetaine synthesis in maize[J]. *Plant Science*, 2004, 166(1): 141 - 149. doi:10.1016/j.plantsci.2003.08.018.
- [31] 葛超,王灿国,韩冉,程敦公,李法计,郭军,宫文萍,刘成,曹新有,李豪圣. 小麦新品种济麦 262 抗旱性研究[J]. 山东农业科学, 2019, 51(2): 28 - 32, 39. doi:10.14083/j.issn.1001-4942.2019.02.006.
Ge C, Wang C G, Han R, Cheng D G, Li F J, Guo J, Gong W P, Liu C, Cao X Y, Li H S. Study on drought tolerance of new wheat variety Jimai 262[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 51(2): 28 - 32, 39.
- [32] 翁亚伟,张磊,张姗,田中伟,靳雪莹,李梦雅,余钟毓,姜东,戴廷波. 盐旱复合胁迫对小麦幼苗生长和水分吸收的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2244 - 2252. doi:10.5846/stxb201601040020.
Weng Y W, Zhang L, Zhang S, Tian Z W, Jin X Y, Li M Y, Yu Z Y, Jiang D, Dai T B. Effects of salt with drought stress on growth and water uptake of wheat seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2244 - 2252.
- [33] El Siddig M A, Baenziger S, Dweikat I, El Hussein A A. Preliminary screening for water stress tolerance and genetic diversity in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars from Sudan[J]. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 2013, 11(2): 87 - 94. doi:10.1016/j.jgeb.2013.08.004.
- [34] 王学君,董亮,马征,郑福丽,董晓霞,张柏松. 抗旱剂浸种对干旱胁迫下小麦幼苗 SOD 活性和形态指标的影响[J]. 山东农业科学, 2020, 52(1): 65 - 68. doi:10.14083/j.issn.1001-4942.2020.01.011.
Wang X J, Dong L, Ma Z, Zheng F L, Dong X X, Zhang B S. Effects of soaking seeds with drought resistant agents on SOD activity and morphological indexes of wheat under drought stress[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(1): 65 - 68.
- [35] Azhiri-Sigari T, Yamauchi A, Kamoshita A, Wade L J. Genotypic variation in response of rainfed lowland rice to drought and rewatering [J]. *Plant Production Science*, 2000, 3(2): 180 - 188. doi:10.1626/ppls.3.180.
- [36] Asch F, Dingkuhn M, Sow A, Audebert A. Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice [J]. *Field Crops Research*, 2005, 93(2-3): 223 - 236. doi:10.1016/j.fcr.2004.10.002.
- [37] Embiale A, Hussein M, Husen A, Sahile S, Mohammed K. Differential sensitivity of *Pisum sativum* L. cultivars to water-deficit stress: changes in growth, water

- status, chlorophyll fluorescence and gas exchange attributes[J]. *Journal of Agronomy*, 2016, 15(2):45-57. doi:10.3923/ja.2016.45.57.
- [38] Kondo M, Murty M V R, Aragones D V. Characteristics of root growth and water uptake from soil in upland rice and maize under water stress[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(3): 721-732. doi:10.1080/00380768.2000.10409137.
- [39] 刘子涵,石晓艺,闫鹏娇,段阳,耿兴侠,叶佳丽,李莎,杨雪桐,张高明,贾雨林,张玲丽,宋喜悦. D²型细胞质雄性不育小麦绒毡层细胞程序化死亡与活性氧代谢[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(21): 4071-4086. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2017.21.002.
- Liu Z H, Shi X Y, Yan P J, Duan Y, Geng X X, Ye J L, Li S, Yang X T, Zhang G M, Jia Y L, Zhang L L, Song X Y. Tapetal programmed cell death, antioxidant response and oxidative stress in wheat anthers associated with D²-type cytoplasmic male-sterility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(21): 4071-4086.
- [40] 赵燕昊,曹跃芬,孙威怡,戎均康. 小麦抗旱研究进展[J]. *植物生理学报*, 2016, 52(12):1795-1803. doi:10.13592/j.cnki.pj.2016.0299.
- Zhao Y H, Cao Y F, Sun W Y, Rong J K. The research advances in drought resistance in wheat[J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52(12):1795-1803.
- [41] 薛盈文,黄寿光,范博文,石新新,阚虎飞,刘鑫,赵长江,于立河. 低温和 UV-B 复合胁迫对小麦幼苗抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(6): 834-840. doi:10.7606/j.issn.1009-1041.2017.06.16.
- Xue Y W, Huang S G, Fan B W, Shi X X, Kan H F, Liu X, Zhao C J, Yu L H. Effect of low temperature and UV-B on the antioxidant enzymes and osmotic substances in wheat seedlings[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(6): 834-840.
- [42] Guo R, Shi L X, Jiao Y, Li M X, Zhong X L, Gu F X, Liu Q, Xia X, Li H R. Metabolic responses to drought stress in the tissues of drought-tolerant and drought-sensitive wheat genotype seedlings[J]. *AoB Plants*, 2018, 10(2): 1-13. doi:10.1093/aobpla/ply016.
- [43] Krause G H, Somersalo S. Fluorescence as a tool in photosynthesis research: application in studies of photoinhibition, cold acclimation and freezing stress[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 1989, 323(1216): 281-293. doi:10.1098/rstb.1989.0010.
- [44] Saglam A, Saruhan N, Terzi R, Kadioglu A. The relations between antioxidant enzymes and chlorophyll fluorescence parameters in common bean cultivars differing in sensitivity to drought stress[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2011, 58(1): 60-68. doi:10.1134/S102144371101016X.
- [45] 崔俊美. 不同小麦的抗旱性比较及光合特性和抗氧化酶系统研究[D]. 成都:四川农业大学,2016.
- Cui J M. Comparison of drought resistance of different wheat and the photosynthetic characteristics and antioxidative defense system in wheat with different drought resistance[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [46] 谢燕,张庆龙,胡玲,王法宏,李豪圣,孔令安. PEG 胁迫对不同小麦品种幼苗抗旱生理指标的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(7): 947-954. doi:10.7606/j.issn.1009-1041.2017.07.12.
- Xie Y, Zhang Q L, Hu L, Wang F H, Li H S, Kong L A. Physiological responses of different wheat cultivars to PEG stress[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(7): 947-954.
- [47] 胡慧,马帅国,田蕾,吕建东,王彬,王娜,普正菲,董艳. 脱硫石膏改良盐碱土对水稻叶绿素荧光特性的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(12): 2439-2450. doi:10.11869/j.issn.100-8551.2019.12.2439.
- Hu H, Ma S G, Tian L, Lü J D, Wang B, Wang N, Pu Z F, Dong Y. Effects of saline-alkali soil improved by desulfurized gypsum on chlorophyll fluorescence characteristics of rice[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(12): 2439-2450.
- [48] 殷桂香,王瑾,徐惠君,陶丽莉,杜丽璞,毛新国,田小海,叶兴国. 几个小麦基因型苗期抗旱性鉴定及相关生理指标分析[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(2): 319-323. doi:10.7606/j.issn.1009-1041.2009.02.065.
- Yin G X, Wang J, Xu H J, Tao L L, Du L P, Mao X G, Tian X H, Ye X G. Drought tolerance test and related physiological indexes analysis at seedling stage of several wheat genotypes[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(2): 319-323.
- [49] Husen A, Iqbal M, Aref I M. Growth, water status, and leaf characteristics of *Brassica carinata* under drought and rehydration conditions[J]. *Brazilian Journal of Botany*, 2014, 37(3): 217-227. doi:10.1007/s40415-014-0066-1.
- [50] Chen Y, Luo Y Y, Qiu N F, Hu F, Sheng L L, Wang R Q, Cao F L. Ce³⁺ induces flavonoids accumulation by regulation of pigments, ions, chlorophyll fluorescence and antioxidant enzymes in suspension cells of *Ginkgo biloba* L. [J]. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 2015, 123(2): 283-296. doi:10.1007/s11240-015-0831-2.
- [51] 白健慧. 燕麦对盐碱胁迫的生理响应机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- Bai J H. The physiological mechanisms of oat responding to salt, alkali stresses[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.
- [52] 靳路真,王洋,张伟,徐晋豫,申战士,谢甫缙. 高温胁迫对不同耐性大豆品种生理生化的影响[J]. *大豆科学*, 2019, 38(1): 63-71. doi:10.11861/j.issn.1000-9841.2019.01.0063.
- Jin L Z, Wang Y, Zhang W, Xu J Y, Shen Z S, Xie F T. Effects of high temperature stress on physiological and biochemical traits of soybeans with different heat tolerance[J]. *Soybean Science*, 2019, 38(1): 63-71.
- [53] Chen Z H, Wu F B, Wang X D, Zhang G P. Heterosis in CMS hybrids of cotton for photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters[J]. *Euphytica*, 2005, 144(3): 353-361. doi:10.1007/s10681-005-8188-y.