

Study on Drought Resistance Mechanism of Wild Wheat Germplasm Resources

Shaoyu Wang, Yi Yu, Hui Zhang, Yuanyuan Huai, He Zhang, Jinshan Cao, Yi Xu, Chun Ji, Fangyao Sun, Dexiang Wu*, Genlou Sun

Anhui Agricultural University, Hefei Anhui
Email: 394931435@qq.com, *dexiangwu198@yeah.net

Received: Aug. 16th, 2019; accepted: Aug. 27th, 2019; published: Sep. 3rd, 2019

Abstract

This experiment systematically analyzed the related traits of 150 wheat varieties collected from home and abroad, and selected 7 varieties ① 542439; ② 277131; ③ 538726; ④ 277130; ⑤ 10474; ⑥ 343181; ⑦ 237659. Drought tests were conducted to determine the relative water content, conductivity, superoxide anion production rate, malondialdehyde (MDA) content, proline content, and catalase (CAT) and peroxidase (POD) of the material. The comprehensive comparative analysis of activity and the performance under field cultivation conditions showed that the overall variation trend of the three wheat varieties numbered 3538726, 63431181 and 7237659 under drought treatment was relatively flat, and still maintained high water content in the later stage of stress. The antioxidant enzyme activity and drought tolerance were good; the wheat varieties numbered 2277131 had better comprehensive traits in the early stage of stress, and had better drought resistance in the short term; the varieties numbered 427713 and 510474 were generally poor in drought tolerance. The varieties with better drought resistance in the materials were screened and identified, which provided materials for further systematic study on the molecular mechanism and breeding of drought resistance of wheat.

Keywords

Wild Wheat, Germplasm Resources, Drought Resistance Mechanism

野生小麦抗旱种质资源的抗旱机理研究

王邵宇, 于怡, 章惠, 怀园园, 张贺, 曹金山, 徐毅, 纪春, 孙方耀, 吴德祥*, 孙根楼

安徽农业大学, 安徽 合肥
Email: 394931435@qq.com, *dexiangwu198@yeah.net

*通讯作者。

文章引用: 王邵宇, 于怡, 章惠, 怀园园, 张贺, 曹金山, 徐毅, 纪春, 孙方耀, 吴德祥, 孙根楼. 野生小麦抗旱种质资源的抗旱机理研究[J]. 农业科学, 2019, 9(9): 731-740. DOI: 10.12677/hjas.2019.99104

摘要

近年来干旱问题成为影响对小麦生长的主要因素之一, 为了应对干旱胁迫对小麦生长的抑制, 本实验对150份国内外征集来的小麦品种进行极端干旱处理, 再恢复正常生长条件, 选择出了7个抗旱能力有差异的品种① 542439; ② 277131; ③ 538726; ④ 277130; ⑤ 10474; ⑥ 343181; ⑦ 237659。进行抗旱试验, 通过对材料的叶片相对含水量、电导率、超氧阴离子产生速率、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸含量以及过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性的综合比较分析, 结果表明: 在干旱处理下编号为③ 538726、⑥ 343181和⑦ 237659的三个小麦品种总体变化趋势相对平缓, 在胁迫后期仍能保持较高的含水量和抗氧化酶活性, 耐旱性好; 编号为② 277131的小麦品种在胁迫前期综合性状较好, 在短期内抗旱性较好; 编号为④ 27713和⑤ 10474的品种总体来看, 耐旱性较差。筛选并鉴定出材料中抗旱性较好的品种, 为进一步系统研究小麦的抗旱分子机理和育种工作提供材料。

关键词

野生小麦, 种质资源, 抗旱机理

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

小麦(*Triticum aestivum* L.)是世界性的重要粮食作物, 适应性广, 较耐储藏, 作为我国最重要的口粮之一, 小麦产业发展直接关系到我国的粮食安全和社会稳定[1] [2]。目前全球干旱、半干旱地区约占土地总面积 36%, 占耕地面积的 43%, 大多数国家都面临水资源危机, 我国也不例外。就目前来看, 干旱问题已然成为影响作物产量以及影响作物正常健康生长的一个相当重要的逆境因子[3]。小麦是我国最主要粮食作物之一, 种植面积相当广泛, 而小麦大部分主产地处于这些干旱、半干旱地区, 干旱是限制我国小麦产量的主要因素之一[4]。所以小麦的抗旱性育种已经成为当前小麦育种不可忽视的问题。据研究, 小麦在干旱的胁迫环境下会导致相对含水量、以及过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性的下降以及电导率、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸含量、超氧阴离子产生速率的上升, 引起了植株的光合速率的降低, 造成植株干物质积累减少, 同时干旱条件下活性氧(ROS)在体内积累, 对植株造成损伤, 消耗增多, 最终导致了小麦产量的降低[5] [6]。中国是全球人口最多的农业大国, 农业可持续发展的重要性显而易见。在中国农业可持续发展中, 提高农业资源转化率是核心问题, 而其中的水资源又是关键[7]。如何提高农业水资源的转化效率需要植(作)物抗旱性、抗逆性理论的支撑, 这也是当前植物生理学、作物生理学和逆境生物学(stress biology)的中心问题, 更是现在从分子水平上探索植物水分胁迫响应机理的国际分子生物学(molecular biology)前沿热点问题之一[8] [9] [10]。小麦对非生物胁迫(abiotic stress)干旱的反应机制我们尚未完全了解, 对于这一类相关研究是我们必须去做的事情。研究小麦对干旱胁迫的反应, 会为以后的抗旱育种工作提供很大帮助。

随着气候条件的恶化, 和降水的不平衡, 我国大部分地区处在干旱和半干旱之间, 水资源成为制约

农业发展的一个主要因素[11][12]。小麦在我国属于主要种植作物,作为我国人民的主食,满足人体提供所需的蛋白质。干旱胁迫会对小麦造成严重的危害,在降水量不平衡的背景下,尤其是在缺乏降水的夏季,干旱往往伴随着高温的发生,直接后果是小麦产量的降低[13]。干旱会通过破坏光系统稳定性从而抑制小麦叶片的光合作用,降低叶片的光合速率(Pn),而且在小麦生育进程的不同时期影响程度不同,其胁迫程度随生育期的推进而更加严重。研究结果表明,干旱会降低小麦叶片的气孔导度,间接使CO₂供应不足,光合速率下降。随着干旱程度增加,植物细胞渗透势升高,细胞含水量下降,水分的丧失导致植物细胞内叶绿素、胡萝卜素以及核酸和其他生物大分子分解[14][15][16][17]。导致细胞内的各种生理生化反应不能正常进行,最终细胞结构和内含物被破坏。干旱胁迫使光合机构被破坏,光合作用不能正常进行,光合速率显著下降,有机物质得不到积累,小麦的正常生长受到抑制[18]。高温胁迫降低小麦抗氧化系统的活力[19]。受到干旱胁迫时,植物会进行光呼吸和梅勒反应,从而过度累积过氧化氢(H₂O₂);另一方面逆境影响了植株体内多种氧化还原酶的活性,致使活性氧的积累等[20]。根据研究,得出抗氧化物酶的活性随着干旱程度的升高显著降低,导致植物体内积累的活性氧得不到及时的清除,造成植物体内存在过量的H₂O₂[21]。据研究证明干旱胁迫使得在植物体中起清除活性氧作用的过氧化物酶(POD)及超氧化物歧化酶(SOD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性显著降低[22]。但不同阶段、不同程度的高温胁迫对抗氧化系统的影响有所不同。研究结果表明,干旱胁迫势必通过影响光合速率、蒸腾速率、气孔导度等光合结构而引起细胞的抗氧化系统紊乱,并最终降低小麦产量[23]。如何破解干旱危害影响,提高小麦自身的干旱耐性已成为作物学科研究热点。研究表明,干旱会加速小麦叶片衰老抑制小麦产量品质形成,干旱胁迫减弱了光合产物供应能力[24]。蛋白质和淀粉分别占小麦籽粒重的9%~26%和65%~74%左右,在很大程度上决定了小麦粒重[25]。干旱胁迫导致灌浆期缩短,粒数和粒重降低,产量严重下降,这与小麦灌浆及储存干物质向籽粒的运转都和干旱胁迫条件有一定的联系有关,同时还会降低与其有关的酶活性,从而严重干扰了产量形成因素,导致小麦的产量严重下降[26]。

2. 实验材料与方法

2.1. 供试材料

筛选后的小麦品种共7个,编号分别是① 542439;② 277131;③ 538726;④ 277130;⑤ 10474;⑥ 343181;⑦ 237659。

2.2. 实验地区概况

试验地土壤黄棕壤土,地面平整,土层深厚,地力中等,土壤pH=6.5,土壤有机质含量为1.39%,速效氮为87 mg·kg⁻¹,速效磷为13 mg·kg⁻¹,速效钾为72 mg·kg⁻¹。试验期间常出现高温干旱天气。

2.3. 栽培措施与试验设计

采用原位土回填的大田盆栽的栽培方式(即取大田0~20 cm耕作层土壤装入试验盆,然后将试验盆埋入试验田中)。小麦种植于聚乙烯塑料盆,每个盆钵(高30 cm,直径25 cm)内装过筛土7.5 kg,盆底部嵌入地面以下20 cm。为保证植株营养需求,每盆施用全N 1.2 g, P₂O₅ 0.36 g和K₂O 0.9 g,分别相当于大田每公顷施纯N 220 kg, P₂O₅ 90 kg, K₂O 165 kg。其中氮肥分两次施入,基追比为5:5,追肥于拔节期施入。土壤经水沉实后播种,每盆播种16粒,在三叶一心时,间苗至每盆8株。每份材料三个重复,分别随机种植于三个盆子内,试验盆周围大田种植相同品种小麦,栽培措施如大田。开花期选择长势一致的小麦植株进行标花。

本研究针对山羊草,野生二粒小麦和节节麦等世界各地的小麦种质资源观察生理响应,进行系统抗

旱性评价；为进一步系统研究小麦的抗旱分子基机理和育种提供材料。在干旱胁迫条件下，对 7 个小麦品种进行抗旱鉴定。以材料分蘖进行分株种植，播种前土壤经水沉实，以保证小麦正常发芽，每三天浇一次水，保持土壤湿度。土中种植培养一个月后，停止浇水，把小麦转移至人工气候室开始进行干旱胁迫。分别于 0/10/20 天上午 10 时左右取材料，进行植株的生理指标测定。

2.4. 测定项目与方法

2.4.1. 相对含水量

称取植株材料 0.2 g 的鲜重(FW)，及其饱和鲜重(SFW)。再称取干重(DW)。用以下公式计算相对含水量(RWC)。

$$RWC = (FW - DW) / (SFW - DW) * 100\% \quad [15]$$

土壤相对含水量：(湿重 - 干重)/干重。

2.4.2. 电导率

称取植物新鲜样品 0.1 g，测定电导率 S1，在水浴锅中煮沸直到植物组织完全被杀死后测定电导率 S2。其相对电导率为 $L = S1/S2$ [15]。

2.4.3. 超氧阴离子产生速率

样品提取：0.5 g 小麦叶片，加 5 ml 酶提取液[50 mmol·L⁻¹ pH 7.0 磷酸缓冲液(PBS)，0.4% (W/V)聚乙烯吡咯烷酮(PVP)]冰浴研磨成匀浆，之后 10,000 g/min 冷冻离心 20 min，上清液即为酶液。叶片超氧阴离子(O₂⁻)产生速率参考前人的方法(Wang and Luo, 1990)。500 μl 提取液加入 pH 7.0 PBS 和 10 mmol·L⁻¹ 羟胺，于 25°C 水浴中保温 20 min，加入 17 mmol·L⁻¹ 对氨基苯磺酸和 7 mmol·L⁻¹ α-萘胺，之后 25°C 水浴中保温 20 min，测定 530 nm 处 OD 值[15]。

2.4.4. 丙二醛含量

丙二醛(MDA)含量测定参考 Zhang (1992) 等的方法。加入 4 ml 三氯乙酸和硫代巴比妥酸混合液，1 ml 酶液，沸水浴 20 min，4000 g/min 离心 15 min，上清液测定 532 nm 和 600 nm 处的 OD 值[15]。

2.4.5. 脯氨酸含量的测定

采用酸性茚三酮显色法测定[15]。

2.4.6. 抗氧化酶活性

过氧化氢酶(CAT)活性

$$CAT \text{ 酶活性}(\text{mgH}_2\text{O}_2/\text{gFW}\cdot\text{min}) = (A - B) \times V_T \times 1.7/\text{FW} \times V_T \times t \quad [15]$$

过氧化物酶(POD)活性

$$POD \text{ 活性}(\Delta A470/\text{min}\cdot\text{gFW}) = \Delta A470 \times V/V_a/W = \Delta A470 \times 5/0.02/0.5 = \Delta A470 \times 500 \quad [15]$$

2.4.7. 综和抗旱系数、抗旱隶属函数值的计算

$$\text{综和抗旱系数(RI)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{PI} \quad [16]$$

式中：PI = X_i/Ck_i；X_i 为干旱胁迫条件下相对含水量的值，Ck_i 为正常灌水条件下相对含水量的值

$$\text{隶属函数值 } X(u) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中：X 为各品种的相对含水量的值，X_{max} 和 X_{min} 分别为所有品种相对含水量的最大值和最小值。

最后累加每个品种各指标的抗旱隶属值，并求其平均值。平均值越大，表示抗旱性越强。

抗旱分级标准：

综和抗旱系数：强抗 $RI \geq 1.00$ ；中抗 $0.99 \geq RI \geq 0.90$ ；干旱敏感型 $RI \leq 0.89$ 抗旱隶属函数值：强抗 $X(u) \geq 0.60$ ；中抗 $0.499 \geq X(u) \geq 0.40$ ；干旱敏感型 $X(u) \leq 0.499$ 。

2.5. 统计分析

运用 Microsoft2010 进行数据处理和作图，通过 DPS 数据处理系统进行数据分析。

3. 结果与分析

3.1. 干旱胁迫下不同小麦品种叶片相对含水量变化

由表 1 可知在小麦灌溉 10 天后，田间取样测得各品种小麦的叶片含水量之间无显著性差异。D1 组和 D0 组测得的各品种叶片相对含水量均有不同程度的下降，并达到显著水平。且在 D1 处理水平条件下，下降的幅度依次为③ 538726 < ⑥ 343181 < ⑦ 237659 < ② 277131 < ① 542439 < ④ 277130 < ⑤ 10474；在 D0 处理水平条件下，下降的幅度依次为③ 538726 < ⑥ 343181 < ⑦ 237659 < ① 542439 < ④ 277130 < ⑤ 10474 < ② 277131。这说明小麦品种，③ 538726 受干旱胁迫的影响最小，其次是⑥ 343181 和⑦ 237659 这两个品种对干旱的敏感度相对较低。而② 277131 和① 542439 的短期内抗旱能力高，但长期处于干旱环境下生长则会受到抑制。因而综合考虑，③ 538726、⑥ 343181 和⑦ 237659 这三个品种综合抗旱性较好，可作为小麦抗旱育种的优质材料，④ 277130、⑤ 10474 这两个品种的耐旱性较差，抗旱育种时不宜考虑。

Table 1. Relative water content of different wheat varieties

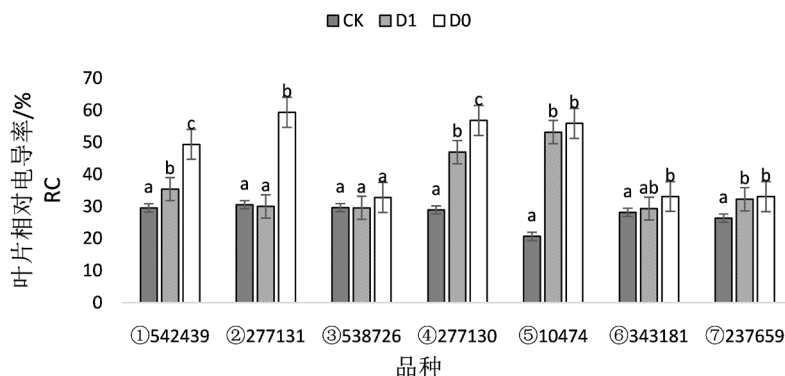
表 1. 不同小麦品种叶片相对含水量

品种 Cultivars	叶片相对含水量/%			降幅(D1 对 CK)/%	降幅(D0 对 CK)/%
	CK	D1	D0		
① 542439	91.87a	81.66ab	66.94a	11.11	27.13
② 277131	93.88a	85.85ab	57.57b	8.55	38.68
③ 538726	92.98a	89.30a	78.60c	3.95	15.46
④ 277130	92.26a	77.18bc	65.31a	16.35	29.21
⑤ 10474	90.08a	75.1c	61.49ab	16.56	31.73
⑥ 343181	95.11a	90.62a	79.10c	4.72	16.92
⑦ 237659	95.29a	89.80a	78.10c	5.76	18.05

注：同行中标注不同小写字母的数据代表处理间差异在 5%水平显著。下同。

3.2. 干旱胁迫下不同品种小麦叶片相对电导率变化

由图 1 可以看出，小麦叶片在受到干旱胁迫时相对电导率升高。干旱条件下各个品种的叶片 RWC 降低，导致叶片相对电导率的升高。抗性强的作物品种在干旱环境下叶片相对含水量降低缓慢的，相对电导率上升平缓，植物受伤害程度较轻。由图 1 可知，编号为③ 538726、⑥ 343181 和⑦ 237659 的品种在干旱条件下相对电导率升高慢且程度平缓，表明其耐旱性强；品种编号① 542439；④ 277130；⑤ 10474 由于 RWC 降低幅度极大，相对电导率上升的也很快，表明了其对干旱反应最敏感，耐旱性最弱。



注：图中同一品种上标的不同小写字母代表处理间差异在 5%水平显著。下同。

Figure 1. Changes of relative conductivity of different wheat cultivars under drought stress

图 1. 干旱胁迫下不同品种小麦叶片相对电导率的变化

3.3. 干旱胁迫下不同品种小麦叶片超氧阴离子产生速率、丙二醛含量变化

由图 2 和图 3 可知，小麦在干旱胁迫下叶片超氧阴离子产生速率和丙二醛含量均显著提高。通常植物在干旱胁迫下体内活性氧积累会超过正常水平，抗氧化酶会受 ROS (活性氧)的增加而被诱导合成，用以抵御清除活性氧和防止膜脂过氧化，从而增强植物的自我保护能力[18][19]。丙二醛(MDA)是脂质过氧化的主要产物之一，其浓度反映了膜脂过氧化程度，在本研究中，干旱情况下，小麦叶片的超氧阴离子产生速率直线上升，MDA 含量总体呈现上升趋势。但从图 2 和图 3 可看出，编号为② 277131、③ 538726 和⑥ 343181 的品种却综合呈现出缓慢上升的过程，上升幅度也较小，这表明了其对外界干旱胁迫相对不敏感，在干旱条件表现出较好的耐旱性。同时，这几个品种有较高的保护酶活性。在胁迫前期和中期，主要是以增强保护酶活性来有效地清除活性氧，抑制膜脂过氧化，而在胁迫后期，在各种抗氧化酶活性降低的条件下，则靠增加渗透调节能力来适应干旱。相比之下品种⑦ 237659 的超氧阴离子产生速率和丙二醛含量在受旱前期上升较② 277131、③ 538726 和⑥ 343181 相对缓慢，但在干旱胁迫后期超氧阴离子的产生速率和丙二醛含量突然升高，说明品种⑦ 237659 耐短期干旱，不能长期生长在干旱地区。

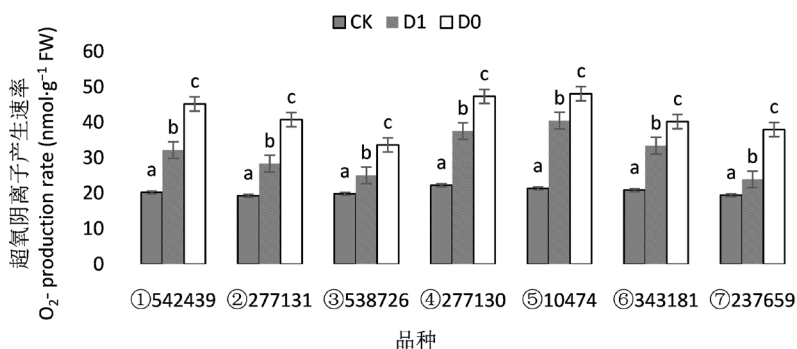


Figure 2. Effect of drought stress on the rate of superoxide anion production in different wheat cultivars

图 2. 干旱胁迫对不同品种小麦叶片超氧阴离子产生速率的影响

3.4. 干旱胁迫下不同品种小麦叶片脯氨酸含量变化

植物在受到逆境胁迫时，体内会迅速积累脯氨酸这类渗透调节物质，以及时改变细胞渗透式，防止

细胞过度失水,对植物体造成不可恢复的伤害[20]。脯氨酸通过渗透调节,可以保护植物体中的重要蛋白质和酶类,避免其变性失活,使各种生化反应能够正常进行,缓解逆境(干旱)对植物的伤害。从图4中可以得出品种③ 538726各处理间的脯氨酸含量变化最不显著;品种② 277131在分蘖后灌水的脯氨酸含量相对于D0处理之间有上升但没有达到显著水平;灌水量对品种⑦ 237659的影响微弱,W1处理组与对照组之间脯氨酸含量的差异没有达到显著水平。

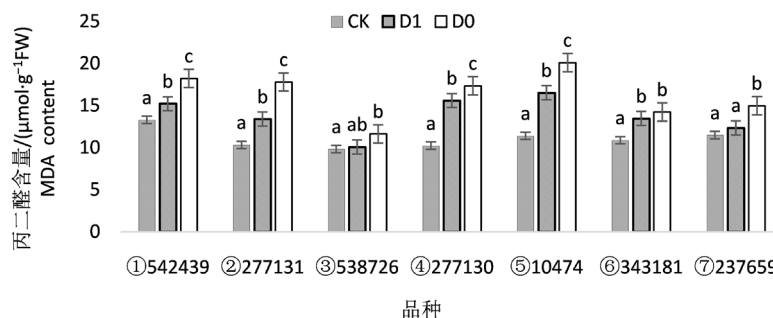


Figure 3. Effect of drought stress on malondialdehyde content in different wheat varieties

图 3. 干旱胁迫对不同品种小麦叶片丙二醛含量的影响

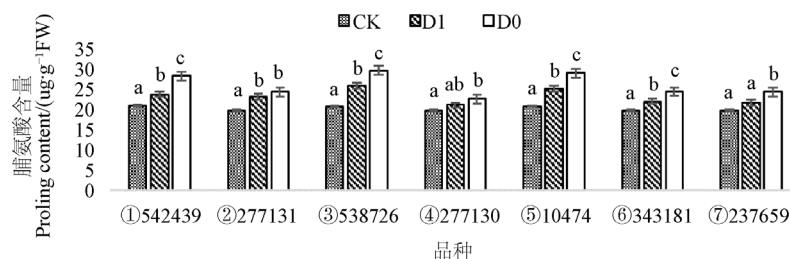


Figure 4. Changes of proline content in wheat leaves of different cultivars under drought stress

图 4. 干旱胁迫下不同品种小麦叶片脯氨酸含量的变化

3.5. 干旱胁迫下不同品种小麦叶片抗氧化酶活性变化

植物在受到干旱胁迫时,体内活性氧清除机制被破坏,活性氧产生和清除的动态平衡被打破,导致活性氧在体内过度积累;另一方面逆境影响了植株体内多种氧化还原酶的活性,致使活性氧的积累,植物体受到伤害。过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)等抗氧化酶作为活性氧清除酶类,其作用是清除植物体内过多的活性氧,避免其过度积累[21][22][27]。在受到干旱胁迫时,活性氧的不断积累,会破坏植物体内的抗氧化系统,并进一步破坏抗氧化酶的活性。由此得出结论在同样的逆境条件下,抗氧化酶活性高,则抗旱能力相对较强。由图5、图6可以看出品种② 277131、③ 538726、⑥ 343181和⑦ 237659的CAT活性和POD活性都相对较高,且活性降低较小,其中品种③ 538726的耐旱性状最好,D1处理和D0处理之间CAT和POD的活性改变较小,没有达到显著水平。

3.6. 不同小麦品种抗旱指标

为了评价这7个小麦品种的抗旱能力,我们通过计算各品种的综合抗旱系数与抗旱隶属函数值来观察的品种小麦的耐旱性。由表2可知品种③ 538726的综合抗旱能力最强,品种⑦ 237659与⑥ 343181的耐旱性略次之。品种④ 277130的耐旱能力最弱,不宜在干旱地区种植。

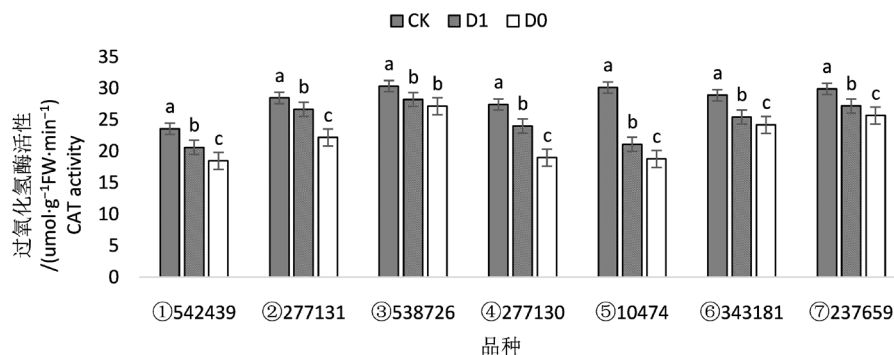


Figure 5. Changes of CAT activity in different wheat cultivars under drought stress

图 5. 干旱胁迫下不同品种小麦叶片 CAT 活性的变化

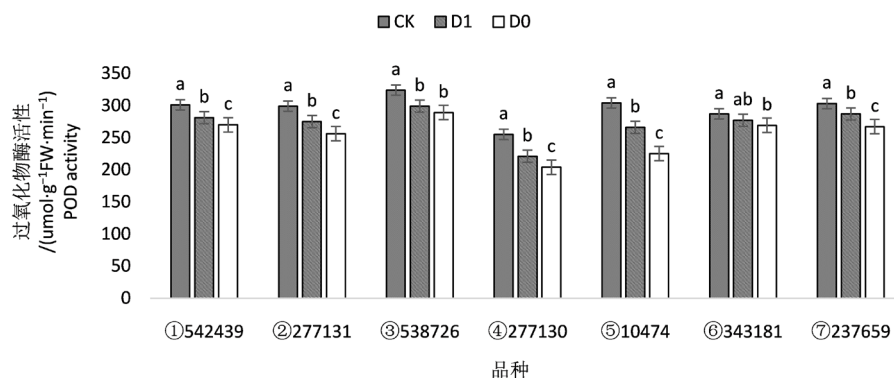


Figure 6. Changes of POD activity in different wheat cultivars under drought stress

图 6. 干旱胁迫下不同品种小麦叶片 POD 活性的变化

Table 2. Drought resistance indicators of different wheat varieties

表 2. 不同小麦品种抗旱指标

品种 Cultivars	综合抗旱系数 RI	隶属函数值 X(u)
① 542439	0.81	0.44
② 277131	0.76	0.37
③ 538726	0.90	0.70
④ 277130	0.77	0.36
⑤ 10474	0.75	0.28
⑥ 343181	0.89	0.72
⑦ 237659	0.88	0.70

4. 讨论

本研究结果表明, 逆境条件下, 植物通过代谢变化即形成逆境蛋白、增加渗透调节物质等来提高细胞对逆境的抵抗能力, 其中可脯氨酸等是植物体内重要的渗透调节剂[25], 可使植物在逆境条件下维持正常的渗透压, 通过清除活性氧以及激发抗氧化酶活性, 来增强植物的抗性。逆境胁迫会导致植物根系对水分和养分的吸收量降低, 导致丙二醛含量和超氧阴离子在植物体内积累, 加剧了逆境对植物的伤害[28]。本实验中, 干旱胁迫下, 各品种小麦叶片的丙二醛含量大幅度增加, 是细胞膜脂过氧化作用加强的结果, 且干旱导致细胞内 POD、SOD 等抗氧化酶的活性降低, 从而加剧干旱胁迫导致小麦产生的氧化胁迫。

5. 结论

通过对叶片相对含水量、电导率、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸含量、以及过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)等的数据分析, 我们得出以下结论:

叶片相对含水量在干旱胁迫下, 随着供植株生长的土壤相对含水量不断下降, 叶片相对含水量也都呈下降趋势。干旱胁迫下, 编号③ 538726 和⑥ 343181 品种在干旱条件下 RWC 降低幅度较小, 相对电导率升高慢, 表明其耐旱性强; 品种编号④ 277130 和⑤ 10474 由于 RWC 降低幅度极大, 相对电导率上升的也很快, 表明了其对干旱反应最敏感, 耐旱性最弱。在干旱条件下, 能长期保持较高含水量的品种的耐旱性较好。编号为② 277131 和④ 277130 的品种在胁迫前期含水量较高, 但胁迫后期含水量骤降, 波动性大; 而编号为③ 538726 的品种含水量保持相对平缓, 表示其对外界的干旱胁迫并不敏感。

干旱胁迫下, 超氧阴离子的产生速率迅速升高, 但是③ 538726 和⑦ 237659 的产生速率最慢, 编号为④ 277130 和⑤ 10474 的产生速率最高, 最不耐干旱。

干旱情况下, MDA 含量总体呈现上升趋势, 但是编号③ 538726、⑥ 343181 和⑦ 237659 品种的 MDA 含量增加量较少, 这表明了其应对外界环境的干旱胁迫能力较好。

干旱胁迫下, 脯氨酸含量呈整体呈现上升趋势, 其中编号为③ 538726 和⑤ 10474 的品种, 脯氨酸的增量较其他品种多, 有利于其应对干旱的胁迫, ② 277131、④ 277130 的脯氨酸含量增量较少, 不利于其抗旱生长。

在干旱条件下生长时, 在 CAT 活性方面, 试验的 7 个品种中, 编号为③ 538726 和⑤ 10474 的品种 CAT 活性变化较为平缓, 且每次样品的活性均较高; 而编号为① 542439 和④ 277130 的品种 CAT 活性波动最大, 最终 CAT 活性又降至最低, 其耐旱性状最差。

干旱胁迫下 POD 活性升高, 细胞清除自由基能力增强, 在底物浓度对酶活性影响的下, 逆境时抗旱性弱的植株品种产生的自由基多, 而同一逆境下自由基的生成量差异也可以理解成是抗旱性不同所致。根据实验中数据的波动状态, 并不是始终上升或始终下降趋势, 即抗氧化酶活性波动较小、曲线相对平缓的品种抗旱性较好。根据编号为③ 538726 和⑥ 343181 的品种三次取样测得的 POD 活性变化图, 在试验的 7 个品种中, 它们的变化最为平缓。图 6 表现的是编号为④ 277130 ⑤ 10474 和品种的 POD 活性变化, 在 7 个试验品种中, 其波动最大。

结果表明: 编号为③ 538726 的品种抗旱系数与抗旱指数在 7 个品种中排最高, 且总体变化趋势相对平缓, 在胁迫后期仍能保持较高的含水量和抗氧化酶活性, 耐旱性好; 编号为② 277131 的品种在胁迫前期综合性状较好, 在短期内抗旱性较好; 编号为④ 277130 的品种总体来看, 耐旱性较差。

基金项目

国家重点研发计划项目(2017YFD0301304)。

参考文献

- [1] 韩一军. 我国小麦产业发展现状分析及未来展望[J]. 农业展望, 2010, 6(11): 25-28.
- [2] 汪颖. 我国小麦抗旱性研究进展[J]. 园艺与种苗, 2011(2): 95-97.
- [3] 景蕊莲. 作物抗旱节水研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 1-5.
- [4] 赖金莉, 李欣欣, 薛磊, 等. 植物抗旱性研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 23-27.
- [5] Tong, H.W., Wan, Z.H., Liu, Y.K., et al. (2011) Distribution and Evaluation on Agronomic Traits and Disease Resistance of Wheat Germplasm from Hubei. *Journal of Triticeae Crops*, No. 1, 153-158.
- [6] 邹琦. 植物对水分胁迫的响应及其在旱作农业和抗旱育种中的应用[M]//吴平, 陈昆松. 植物分子生理学进展.

杭州: 浙江大学出版社, 2000: 207-215.

- [7] 佚名. 中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书[Z].
- [8] 俞嘉宁, 张林生, 高俊风. 水分胁迫对小麦幼苗及悬浮培养细胞中诱导蛋白表达的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(4): 865-870.
- [9] 余华顺, 张林生. 小麦种子萌发过程中类 PvLEA-18 的表达[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 63-68.
- [10] 俞嘉宁. 小麦耐旱、耐盐相关基因的克隆, 分析与功能研究[D]: [博士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003: 1-57.
- [11] Tarcgnski, M.C., Jensen, R.G. and Bobnet, H.J. (1993) Stress Protection of Transgenic Tobacco by Production of the Osmolyte Mannitol. *Science*, **259**, 508-511. <https://doi.org/10.1126/science.259.5094.508>
- [12] 武玉叶, 李德全, 赵士杰, 等. 水分胁迫下冬小麦的渗透调节及其与光合作用的关系[M]//吴丁, 卢翠桥. 植物生理学与跨世纪农业研究. 北京: 科学出版社, 1999: 99-106.
- [13] 王月福, 于振文, 潘庆民. 不同水分处理对耐旱性不同小麦品种旗叶衰老的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(2): 303-308.
- [14] 彭立新, 李德全, 束怀瑞. 园艺植物水分胁迫生理及耐旱机制研究进展[J]. 西北植物学报, 2002, 22(5): 1275-1281.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [16] 戴茂华, 刘丽英, 庞昭进, 岳秀琴, 吴振良. 不同棉花品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 中国农学通报, 2015, 31(21): 98-101.
- [17] 袁政, 张大兵. 植物叶片衰老的分子机制[J]. 植物生理学通讯, 2002, 38(4): 417-422.
- [18] 马林. 植物衰老期间生理生化变化的研究进展[J]. 生物学杂志, 2007, 24(3): 12-15.
- [19] 刘鹏涛, 冯佰利, 高金锋, 等. 干旱条件下冬小麦籽粒灌浆期冠层叶片衰老特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 129-132.
- [20] Olsson, M. (1995) Alterations in Lipid Composition, Lipid Peroxidation and Anti-Oxidative Protection during Senescence in Drought Stressed Plants and Non-Drought Stressed Plants of *Pisum sativum*. *Plant Physiology and Biochemistry Paris*, **33**, 547-553.
- [21] Savitch, L.V., Nassacci, A., Gray, G.R., et al. (2000) Acclimation to Low Temperature or Light Mitigates Sensitivity to Photo Inhibition: Roles of the Calvin Cycle and the Mehler Reaction. *Australian Journal of Plant Physiology*, **27**, 253-264. <https://doi.org/10.1071/PP99112>
- [22] 冯佰利, 高小丽, 王长发, 等. 干旱条件下不同温型小麦叶片衰老与活性氧代谢特性的研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 74-76.
- [23] 李向前, 王艳, 张富春. 棉花耐盐性及抗氧化性研究进展[J]. 生物技术通报, 2009(6): 21-24.
- [24] 张宾, 冯佰利, 韩媛芬, 等. 干旱条件下冷型小麦叶片衰老特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 70-73.
- [25] Liu, Y.-F., Gao, G.-Q. and Li, D.-Y. (2008) Comparison of Physiobiochemical Characteristics of Different Varieties under Drought Stress. *Guangxi Agricultural Sciences*, **39**, 456-461.
- [26] 刘瑞侠, 李艳辉, 陈邵宁, 等. 干旱高温协同胁迫对玉米幼苗抗氧化防护系统的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(4): 363-367.
- [27] 王孝威, 曹慧. 高等植物衰老的机理研究[J]. 山西农业大学学报, 2004, 4(16): 416-420.
- [28] 齐秀东, 孙海军, 郭守华. SOD-POD 活性在小麦抗旱生理研究中的指向作用[J]. 中国农学通报, 2005, 21(6): 230-232.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5507，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjas@hanspub.org