

网络出版时间:2014-03-26 17:09

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.007

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.007.html>

干旱胁迫下小麦抗旱能力与其根系特征间的关系

唐玉婧, 马 猛, 邓西平, 唐春强, 邓 荣, 杨淑慎

(西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】研究不同基因型小麦抗旱能力的遗传差异与其根系特征间的关系。【方法】采用 -1.0 MPa PEG-6000 模拟干旱胁迫,测定抗旱型小麦长武 134 和干旱敏感型品种郑引 1 号在干旱胁迫下根系的含水量、相对含水量、水分饱和亏、根体积、可溶性蛋白含量、膜透性等生理指标,比较 2 个品种的根系对干旱胁迫的生理学响应;并通过观察样品根系组织的石蜡切片,分析在受到胁迫后根系解剖结构的变化。【结果】与郑引 1 号相比,在受到干旱胁迫时,随着胁迫时间的延长,长武 134 根系的含水量、相对含水量、可溶性蛋白含量和根体积等指标下降更缓慢,水分饱和亏和膜透性上升缓慢,总体表现出更强的抗旱性。根系组织石蜡切片观察表明,长武 134 出现了根部导管直径减小以及根内皮层增厚等有利于植物适应干旱胁迫的现象,且这些变化较郑引 1 号更为明显。【结论】受干旱胁迫后,抗旱小麦根系的生理指标及形态结构的特征,是植物抗旱生理基础和形态基础的反映。

【关键词】 小麦;PEG 胁迫;抗旱能力;根系特征

【中图分类号】 S512.101

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)04-0048-07

Relationship between drought resistance and root characteristics of wheat under drought stress

TANG Yu-jing, MA Meng, DENG Xi-ping, TANG Chun-qiang, DENG Rong, YANG Shu-shen

(College of Life Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to discover the relationship between drought tolerance and root growth of wheat with different genotypes. 【Method】 Two wheat varieties Changwu 134 and Zhengyin 1 were treated with -1.0 MPa PEG-6000 as simulated drought stress. The physiological conditions of root under drought stress were evaluated by comparing their root water content, relative water content, water saturation deficit, root volume, soluble protein content and membrane permeability. The root morphological changes after drought stress were analyzed by observing the roots paraffin samples under microscope. 【Result】 Changwu 134 showed a stronger drought resistance than Zhengyin 1. With the drought stress, the root water content, relative water content, soluble protein content and root volume of wheat Changwu 134 decreased more slowly, while the water saturation deficit and membrane permeability of Changwu 134 increased more slowly compared to Zhengyin 1. A catheter diameter reduction and an inner cortex thickening conducive to plant adaptation to drought stress were observed in roots paraffin of Changwu 134, while Zhengyin 1 had less morphological changes in root. 【Conclusion】 With the drought stress, the drought resistant wheat differed in physiological and morphological characteristics of root from non-drought resistant wheat, reflecting the physiological and morphological basis required by plant drought resistance.

【收稿日期】 2013-09-18

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31271625)

【作者简介】 唐玉婧(1987—),女,广西桂林人,硕士,主要从事植物抗旱分子生物学研究。E-mail: yujingtang00@163.com

【通信作者】 杨淑慎(1956—),女,陕西黄陵人,教授,博士生导师,主要从事植物抗逆生理与植物细胞工程研究。

E-mail: yangshushen2002@163.com

Key words: wheat; PEG stress; drought resistance; root characteristics

干旱是制约农业生产发展的主要逆境因素,受其影响造成的粮食减产位于各种自然灾害之首^[1]。因此,在生产上解决小麦的抗旱、耐旱问题已成为科学研究者的重要任务。长期以来,人们大多只注意到植物植株地上部分对干旱的生理反应,而对其地下部分即根系的了解和关注还相对较少^[2]。根系作为植物体的重要营养器官,当土壤干旱时,根系能首先感受到水分胁迫并迅速发出信号,使植物整个植株对干旱做出反应^[3];同时植株还能改变根系的形态以适应土壤的干旱。因此,根系是研究植物抗旱性、耐旱性的一个重要组成部分^[4]。

系统研究植物根系发育、根群分布、植株不同生长发育时期根系吸收水分和养分的能力,以及不同环境条件下根系的变化,对认识和调控植物生长意义重大。小麦根系的重要作用之一就是从土壤中吸收水分,其吸收水分的多少,不仅受土壤物理机械特性的制约,而且还受到根系生长状况和代谢作用的影响^[5-9];同时,根系本身的生长、发育和生理变化在很大程度上取决于土壤的水分状况。可见,小麦根系与土壤水分之间相互依存,相互制约,具有明显的关联。干旱地区小麦的生长过程和生长状况以及最终产量的形成,在很大程度上取决于植株特别是根系对土壤水分的吸收和利用,而这些则又在很大程度上取决于小麦根系的形态和构型。植物根系的形态和构型,如根系生物量、根长、密度、根体积、根系下扎特性等直接影响其对土壤水分的吸收和利用,是衡量其抗旱性、耐旱性的重要指标^[10]。因此,研究土壤水分胁迫对小麦根系形态、构型建成和生理指标等的影响,对进一步挖掘旱地小麦生产潜力、提高小麦产量具有重要意义。

本研究采用 -1.0 MPa PEG-6000模拟干旱胁迫,测定了抗旱型小麦品种长武134和干旱敏感型小麦品种郑引1号根系的含水量、相对含水量、水分饱和亏、根体积、可溶性蛋白和膜透性,并观察了根部的形态学变化,以期阐明小麦抗旱能力与其根系各项生理指标及形态指标之间的联系,探讨不同基因型小麦之间抗旱的生理差异,为旱地小麦栽培以及育种提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料、仪器及试剂

所用抗旱小麦品种长武134和非抗旱小麦品种

郑引1号,皆由西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室提供。长武134为西北地区主栽的著名抗旱品种,具有抗旱、高产、耐寒、抗倒伏等特点,1998年通过国家农作物品种审定委员会审定,将其与干旱敏感品种郑引1号作对比分析,能够揭示不同基因型小麦抗旱能力的遗传差异与其根系特征间的关系。

试验所用主要仪器及试剂包括:电子天平、紫外分光光度计、电导仪,考马斯亮蓝G-250、番红、固绿、无水乙醇、冰醋酸、二甲苯、蒸馏水等。

1.2 试验方法

挑选籽粒饱满均一、无病虫害的小麦种子,用自来水冲洗数次,控去水分后,将小麦种子腹股沟向下均匀摆放在培养皿中,于室温下用蒸馏水浸泡种子使其吸胀萌芽,每天换水3次;种子露白后,选取萌发程度一致的种子,腹股沟朝下置于砂盆中培养,每天浇水2次,光周期12 h/12 h(光照/黑暗);通气2次,每次30 min,室温下培养。待幼苗长至一叶一心时,换用Hoagland营养液水培。幼苗长至三叶一心时,将长武134和郑引1号分别设对照组和胁迫组,每组20株,设3个重复,进行不同处理:胁迫组用含有一 1.0 MPa PEG-6000的Hoagland营养液进行处理,对照组用Hoagland营养液培养。从处理0 h开始,到216 h,每24 h取样1次,用于各组生理指标测定以及形态学观测。

1.3 观测指标及方法

按照高俊凤^[11]的方法,测定样品根系含水量、相对含水量、水分饱和亏,采用水位取代法测定根体积,采用考马斯亮蓝G-250法测定根系可溶性蛋白含量,使用电导仪测定根系膜透性,制备根部石蜡切片观察根部结构的变化。每个指标重复测定3次以上。使用光学显微镜观察根部石蜡切片。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对小麦根系含水量、相对含水量及水分饱和亏的影响

从图1可以看出,在 -1.0 MPa PEG-6000的胁迫下,长武134对照组和郑引1号对照组的根系含水量随干旱胁迫时间的延长变化不显著;与对照组相比,长武134和郑引1号根系含水量都随胁迫时间的延长而下降。其中,长武134胁迫组根系含水量波动较小,下降更为缓慢,且总体下降程度小于

郑引 1 号。说明在干旱胁迫下,长武 134 更能缓解干旱对根系造成的渗透胁迫,使根系维持正常的生理功能,而郑引 1 号根系持水能力低,根系生理机能更容易受到干旱的影响。

从图 2 可以看出,在-1.0 MPa PEG-6000 的胁迫下,长武 134 对照组和郑引 1 号对照组根系在

相对含水量上变化不大;而胁迫组的小麦长武 134 和郑引 1 号根系相对含水量都随着胁迫时间的增加而有所下降。与郑引 1 号胁迫组相比,长武 134 胁迫组根系相对含水量下降程度小,说明干旱胁迫下长武 134 比郑引 1 号具有更强的适应干旱胁迫的能力。

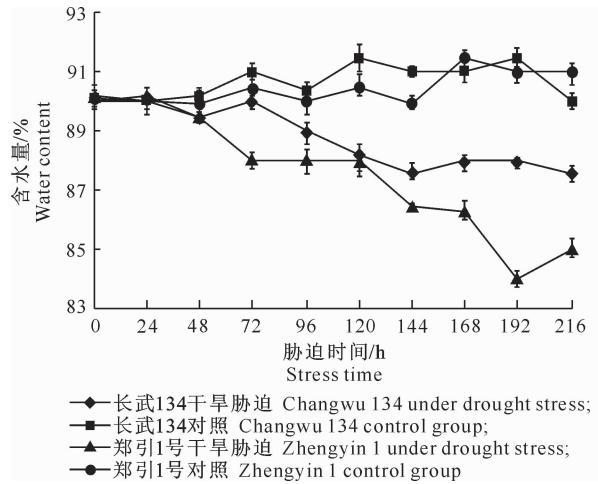


图 1 干旱胁迫对小麦根系含水量的影响
Fig. 1 Effects of drought on water content of wheat root

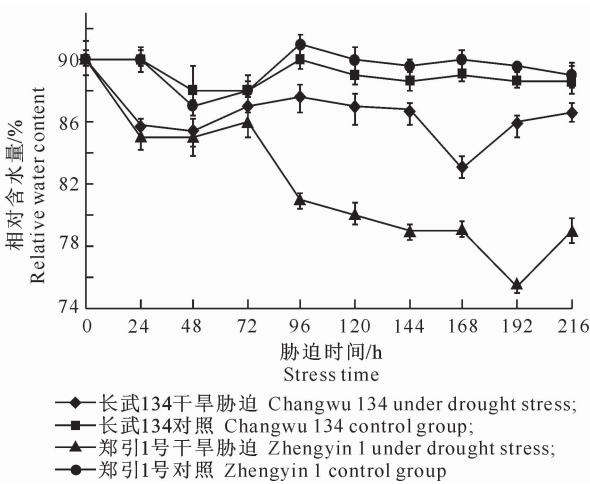


图 2 干旱胁迫对小麦根系相对含水量的影响
Fig. 2 Effects of drought on relative water content of wheat root

干旱胁迫对小麦根系水分饱和亏的影响见图 3。从图 3 可以看出,在-1.0 MPa PEG-6000 的胁迫下,长武 134 和郑引 1 号对照组的根系水分饱和亏变化不大,而胁迫组的根系水分饱和亏都随着胁迫时间的延长而增加。与郑引 1 号相比,长武 134 根系水分饱和亏增加缓慢,总体上升程度低于郑引 1 号。说明干旱胁迫下郑引 1 号比长武 134 更容易失去水分。

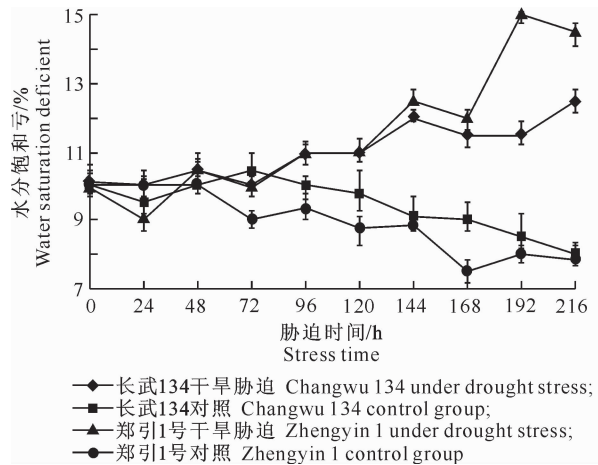


图 3 干旱胁迫对小麦根系水分饱和亏的影响
Fig. 3 Effects of drought on water saturation deficit of wheat root

2.2 干旱胁迫对小麦根体积的影响

从图 4 可以看出,在-1.0 MPa PEG-6000 的胁迫下,长武 134 对照组和郑引 1 号对照组在根体积上随胁迫时间的延长变化不大;而胁迫组中,长武 134 小麦和郑引 1 号的根系体积随着胁迫时间的延长都有明显的下降,与郑引 1 号相比,长武 134 的根体积下降缓慢,且下降的程度小于郑引 1 号。说明干旱胁迫使小麦根系生长发育受到抑制。

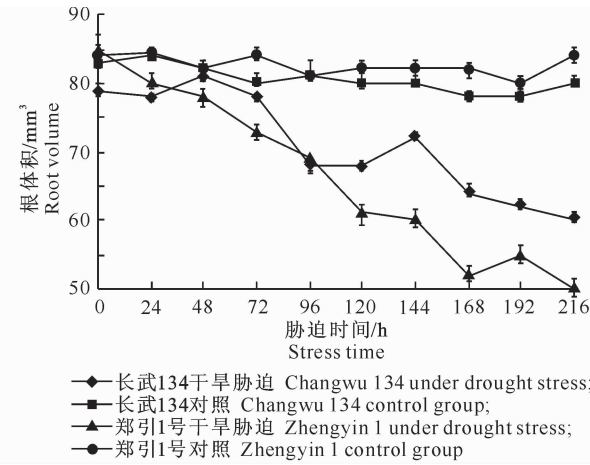


图 4 干旱胁迫对小麦根体积的影响
Fig. 4 Effects of drought on volume of wheat root

2.3 干旱胁迫对小麦根系可溶性蛋白含量的影响

从图 5 可以看出,在-1.0 MPa PEG-6000 的胁迫下,长武 134 对照组和郑引 1 号对照组在根系可溶性蛋白含量上差别不大;而长武 134 胁迫组和郑引 1 号胁迫组根系可溶性蛋白含量都随着胁迫时间的延长而下降。其中,长武 134 胁迫组小麦根系可溶性蛋白含量比郑引 1 号下降得更为缓慢,且总体下降程度小于郑引 1 号。

2.4 干旱胁迫对小麦根系膜透性的影响

从图 6 可以看出,在-1.0 MPa PEG-6000 干

旱胁迫下,长武 134 对照组和郑引 1 号对照组在根系膜透性上变化都不大;而随着胁迫时间的延长,长武 134 胁迫组和郑引 1 号胁迫组的根系膜透性都有不同程度的增加,且长武 134 胁迫组根系膜透性比郑引 1 号上升慢,程度小。干旱胁迫时,被伤害的关键部位是膜系统。干旱造成根细胞的损伤,使根的膜透性增加。说明在干旱胁迫下,长武 134 能更有效地保持其根系细胞质膜的完整性,较郑引 1 号具有更高的抗旱性。

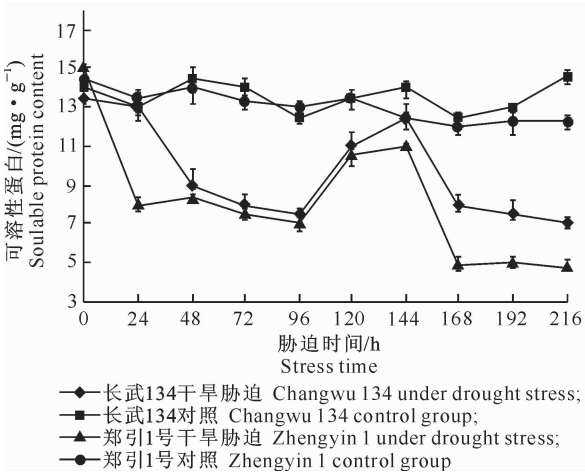


图 5 干旱胁迫对小麦根系可溶性蛋白含量的影响

Fig. 5 Effects of drought stress on soluble protein content of wheat root

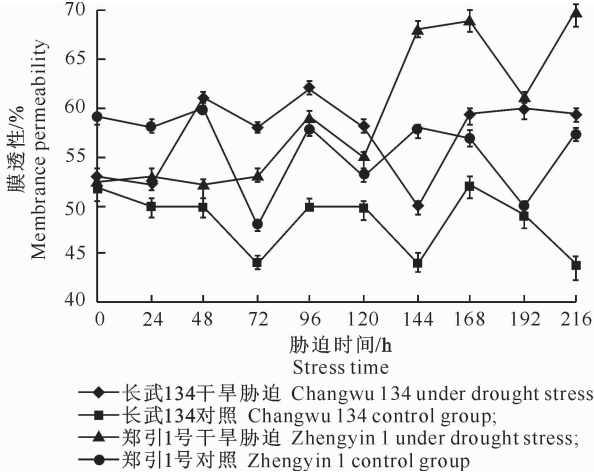


图 6 干旱胁迫对小麦根系膜透性的影响

Fig. 6 Effects of drought on membrane permeability of wheat root

2.5 干旱胁迫对小麦根部结构的影响

在用-1.0 MPa PEG-6000 模拟干旱胁迫后,

每 24 h 取样 1 次对胁迫组根部,制作石蜡切片,观察结果如图 7(长武 134)和图 8(郑引 1 号)所示。

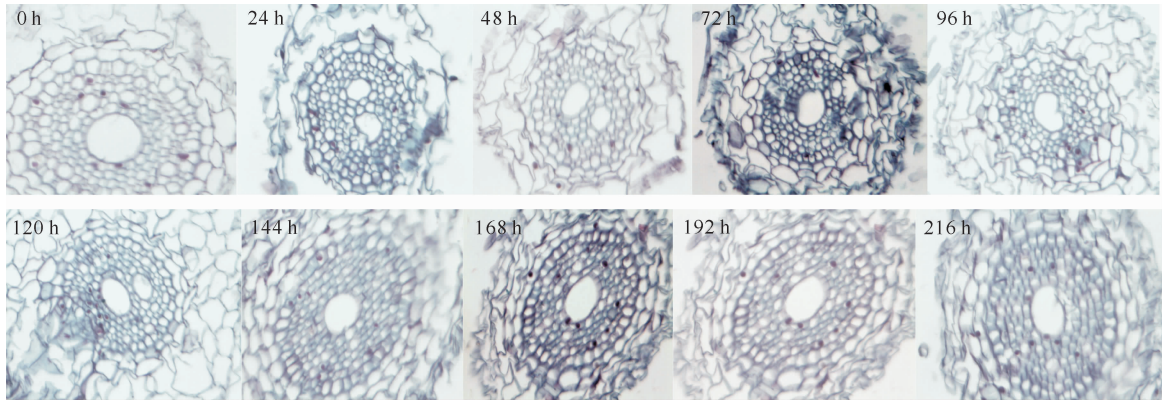


图 7 干旱胁迫下长武 134 根部结构的变化(×400)

Fig. 7 Paraffin section photos of Changwu 134 root under water stress (×400)

由图 7 和图 8 可见,正常供水条件下,长武 134 和郑引 1 号根部外皮层细胞体积较大,皮层薄壁细胞和内皮层细胞饱满,中央大导管为圆形,属于根的正常形态,2 个品种间差别不大。胁迫至 96~120 h 时,长武 134 内皮层细胞形状变化不明显,而郑引 1

号内皮层细胞体积减小。在胁迫至 144 h 时,长武 134 和郑引 1 号根直径都明显减小,外皮层细胞都开始萎缩,内皮层细胞轻微萎缩,且长武 134 略微出现内皮层增厚现象,但是在郑引 1 号根部未观察到此现象。胁迫至 168 h 时,长武 134 和郑引 1 号根

部外皮层细胞和内皮层细胞都有明显萎缩,长武 134 中观察到内皮层增厚现象,而在郑引 1 号中仍然未观察到。胁迫至 216 h 时,长武 134 和郑引 1

号的外皮层细胞都有萎缩现象,且郑引 1 号外皮层细胞发生坏死;长武 134 出现明显的内皮层加厚,而郑引 1 号无明显加厚。

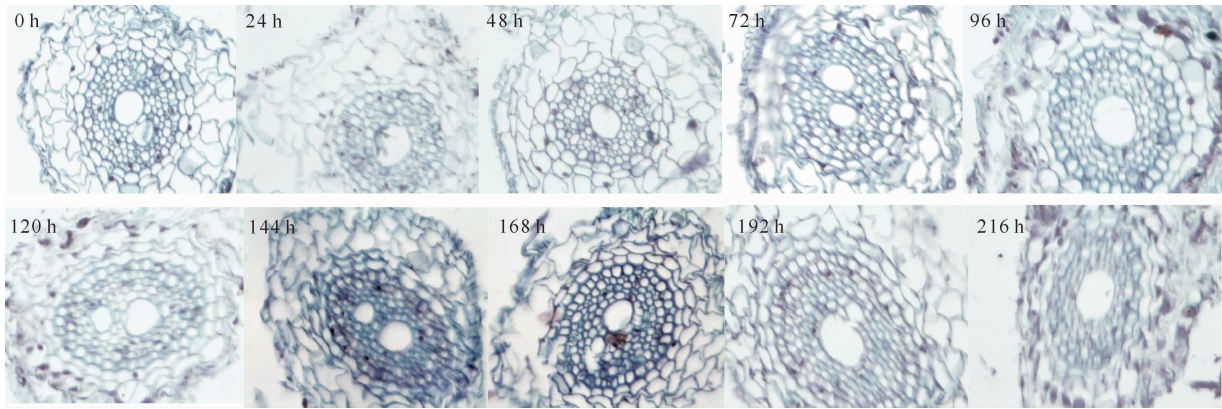


图 8 干旱胁迫下郑引 1 号根部结构的变化(×400)

Fig. 8 Paraffin section photos of Zhengyin 1 root under water stress (×400)

综上所述,在胁迫开始后,随着胁迫时间的延长,长武 134 和郑引 1 号的根体积都有减小的趋势,外皮层、皮层薄壁细胞与内皮层细胞体积也逐渐减小,而后萎缩;2 个小麦品种的中央大导管直径也都逐渐减小,但是疏导组织所占的比例增加。在总体变化趋势上,长武 134 和郑引 1 号有所不同的是,长武 134 中央大导管和周围小导管的直径减小程度大于郑引 1 号;长武 134 小麦根部内皮层细胞萎缩情况的出现时间晚于郑引 1 号;并且在胁迫后期,长武 134 根部出现了在郑引 1 号中未观察到内皮层的增厚现象。说明长武 134 的内皮层增厚,使其具有更强的干旱适应性。

3 讨 论

干旱直接限制植物的生长,植物通过调整形态构造和不同器官的生长速度来适应干旱胁迫^[12]。研究表明,根系在土壤剖面的可调节性分布对根系吸水功能和作物生产力具有重要作用^[13]。在土壤—植物—大气系统中,土壤水分直接被根系吸收利用,当植物遭受土壤水分胁迫时,根系首先感应并合成大量 ABA,随蒸腾作用转运到地上部分,引起整个植株对水分胁迫作出反应,与此同时根系形态结构也发生相应变化^[14-15]。根系的解剖结构是根系发育水平的直接体现,与生理功能具有密切的联系^[2,9],其木质化程度、输导组织、表皮上的附属结构等会影响植物抵抗干旱的能力^[16]。木质部比较发达,输导组织所占比例有增大趋势,能更有效地输送水分,韧皮部薄壁组织细胞的细胞壁强烈木质化,可

进一步保证水分输导的安全性^[17]。
小麦在干旱胁迫后,由于外界的渗透势降低,小麦根系失水,直接导致根细胞含水量降低^[18]。相对含水量(RWC)反映了随着植物根系生长,能被植株利用的水分状况,一定程度上反映了根系的健康水平,是判断植物在水分亏缺时是否能维持生长的一个重要指标^[13]。在受干旱胁迫时,随着胁迫时间的延长,长武 134 根系含水量及相对含水量较郑引 1 号下降更缓慢。在相同干旱胁迫下,抗旱能力较强的植物水分饱和亏较小^[19]。本研究中,在受干旱胁迫时,随着胁迫时间的延长,长武 134 水分饱和亏增加更缓慢,且根体积下降更慢,说明长武 134 具有更强的抗旱性,也表现出了预期的指标特征。

可溶性蛋白通过主动积累来降低渗透势,是植物细胞质中的重要渗透调节物质之一,在一定范围内的干旱胁迫下能维持细胞的膨压^[20]。轻度干旱胁迫导致可溶性蛋白含量上升,而重度或中度干旱胁迫导致大量 ROS 的产生,破坏细胞膜的完整性,使得膜透性增加,内容物外渗,最终导致可溶性蛋白含量下降,且胁迫程度越强,下降幅度越大^[17,21]。小麦长武 134 可溶性蛋白含量在胁迫下减少得更慢,说明其具备更强的干旱适应性,可以推测小麦长武 134 植株在干旱胁迫下具有高抗氧化能力,因而具有更强的细胞膜稳定性。

在正常情况下,植物中存在的保护酶和多种内源活性氧清除剂,能维持活性氧代谢平衡,使活性氧维持在正常水平,但是在干旱胁迫下,当细胞失水达到一定程度时,如果保护酶系统不能及时有效地清

除小麦体内自由基,植物体内的活性氧就会大量积累,破坏正常代谢时活性氧的产生与清除的平衡^[22],引起一系列链式反应,导致膜脂过氧化,膜的选择透性丧失,细胞膜透性增加,引起细胞内容物外渗,可溶性蛋白含量降低。细胞膜相对透性反映了细胞失水受伤害的程度。小麦根系的生物膜系统是对逆境伤害最敏感的部位。研究表明,小麦根系质膜相对透性和小麦根系膜脂过氧化水平随干旱胁迫的加强而增大,相互之间呈显著正相关,植物的抗旱性与膜脂抗氧化能力呈正相关^[23-24]。因此,在干旱胁迫下,植物的可溶性蛋白含量、膜透性减少得越慢,则其抗旱性越强。长武134能更有效地保持其根系细胞质膜的完整性,可推断长武134比郑引1号具有更强的抗旱性。

根细胞含水量的降低在结构上表现为根直径减小,细胞由圆形或长方形逐渐变为椭圆或不规则形,其次根部其他次级结构也都存在着渐进式的萎缩和变形。本研究结果表明,抗旱性强的品种可以通过合成渗透调节物质,使根内外水势差减小,根细胞失水减轻,减缓根的整体体积减小;另外,植物还可以通过改变植株的结构,如增加根皮层厚度,减小导管直径等手段来减少失水^[6]。在-1.0 MPa PEG-6000模拟干旱胁迫下,长武134根部导管直径减小,根内皮层增厚现象较郑引1号更为明显。

根系导管直径减小,有利于植物抵抗干旱。有研究发现,随水分胁迫的变化,根总直径与根系木质部导管并非呈正比例变化,随着抗旱性的增强,导管直径呈减小趋势^[14]。土壤水分不仅影响根的生长势,而且还影响根导管直径。对不同抗旱性春小麦品种种子根的结构进行解剖后发现,在受到干旱胁迫时,强抗旱性品种的根导管直径明显减小,说明这种结构有利于小麦更有效地利用土壤水分^[9]。反之,根部结构上的变化反映了根的水分状况和失水情况,这种变化越明显越剧烈,说明根的失水情况越严重。

皮层厚度减小,是植物对干旱的适应性表现。土壤缺水时,根系皮层细胞首先受到伤害,皮层薄壁细胞在干旱胁迫下失水,发生皱缩,造成细胞体积减小,排列不规则,使得皮层厚度减小,且有部分破裂。随着水分胁迫时间的延长,重度水分亏缺时的皮层变化越来越明显。受到干旱胁迫后,皮层厚度减小不仅仅是细胞失水的直接结果,植物也可以通过皮层厚度的减小来降低水分的径向运输阻力,从而增强对逆境的适应性^[25]。

内皮层加厚也是植物抗旱的表现之一。当水分

和矿质元素被根的表皮吸收后,沿着质外体途径和共质体途径运输。当进入2条途径的水分和溶质到达内皮层时,由于内皮层细胞排列紧密和凯氏带的存在,水和溶质只能经过共质体路线进入到维管柱中,因此内皮层的凯氏带阻断了皮层与维管柱之间的质外体运输途径,控制着营养物质和水分进入维管柱,并能防止其回流进入皮层甚至倒流回土壤溶液^[11,26]。

本研究中,随着抗旱性或水分胁迫程度的加剧,对小麦长武134和郑引1号而言,一方面根中央大导管及周围小导管直径减小,增大了输水阻力;另一方面,根增厚的内皮层上,由于凯氏带的存在,还有防止维管柱内的溶质倒流至皮层的作用,从而防止了植物水分的散失,增厚的内皮层还增强了根系的机械强度,可以防止植物根系由于失水发生进一步的形变。

综上所述,通过长武134和郑引1号小麦品种根系所表现出的生理生化指标和形态学的差异可以看出,在干旱胁迫后,长武134在根系的水分状况、根体积、根部显微结构、膜透性、可溶性蛋白含量等方面都符合抗旱能力强的品种特征,属于抗旱型品种,而郑引1号则表现出弱于长武134的抗旱能力。本研究不仅揭示了小麦抗旱性与根系特征之间的密切关系,而且为以根系特征作为靶标的小麦抗旱分子改良提供了理论依据。

参考文献

- [1] 崔江慧,李宵,常金华. PEG模拟干旱胁迫对高粱幼苗生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 160-165.
Cui J H, Li X, Chang J H. Biochemical characteristics in sorghum seedlings under PEG simulated drought stress [J]. Chinese Agric Sci Bull, 2011, 27(9): 160-165. (in Chinese)
- [2] 李鲁华,李世清,翟军海,等. 小麦根系与土壤水分胁迫关系的研究进展[J]. 西北植物学报, 2001, 21(1): 1-7.
Li L H, Li S Q, Zhai J H, et al. Review of the relationship between wheat roots and water stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(1): 1-7. (in Chinese)
- [3] Jia W, Zhang J. Stomatal movements and long-distance signaling in plants [J]. Plant Signaling and Behavior, 2008, 3(10): 772-777.
- [4] 景蕊莲,胡荣海. 作物抗旱性的根系研究[J]. 麦类作物学报, 1995(3): 37-39.
Jing R L, Hu R H. Study on drought resistance of crop root system [J]. Tritical Crops, 1995(3): 37-39. (in Chinese)
- [5] Chen Y, Chen P, De Los Reyes B G. Differential responses of the cultivated and wild species of soybean to dehydration stress [J]. Crop Science, 2006, 46(5): 2041-2046.

- [6] 周晓果,景蕊莲,郝转芳,等. 小麦幼苗根系性状的 QTL 分析[J]. 中国农业科学,2005,38(10):1951-1957.
Zhou X G, Jing R L, Hao Z F, et al. Mapping QTL for seedling root traits in common wheat [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(10):1951-1957. (in Chinese)
- [7] 郑桂珍,关军锋,李广敏. 渗透胁迫下钙对小麦胚芽鞘和根系生长的影响[J]. 中国农业科学,2005,38(3):486-491.
Zheng G Z, Guan J F, Li G M. Effect of calcium on growth of coleoptile and root in wheat under osmotic stress [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(3):486-491. (in Chinese)
- [8] 彭涛,王玮,崔德才,等. 渗透胁迫下小麦根系渗透调节与根冠淀粉水解的研究[J]. 西北植物学报,2005,25(2):218-224.
Peng T, Wang W, Cui D C, et al. Osmotic adjustment in wheat roots and hydrolysis of starch in root-cap of wheat under osmotic stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(2):218-224. (in Chinese)
- [9] 王静. 不同品种春小麦种子根的解剖结构和抗旱性的初步研究[J]. 西北植物学报,1995,15(8):159-163.
Wang J. Preliminary study on anatomical structure and drought resistance of different varieties of spring wheat seed root [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1995, 15(8):159-163. (in Chinese)
- [10] 丁红,张智猛,戴良香,等. 干旱胁迫对花生根系生长发育和生理特性的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(6):1586-1592.
Ding H, Zhang Z M, Dai L X, et al. Effects of drought stress on the root growth and development and physiological characteristics of peanut [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6):1586-1592. (in Chinese)
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安:世界图书出版社,2000:32-78.
Gao J F. Plant physiology experimental technique [M]. Xi'an: World Book Press, 2000:32-78. (in Chinese)
- [12] 徐飞,郭卫华,徐伟红,等. 刺槐幼苗形态、生物量分配和光合特性对水分胁迫的响应[J]. 北京林业大学学报,2010,32(1):24-32.
Xu F, Guo W H, Xu W H, et al. Effects of water stress on morphology, biomass allocation and photosynthesis in *Robinia pseudoacacia* seedlings [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(1):24-32. (in Chinese)
- [13] 刘金祥,谭杏婵,刘家琼. 高温胁迫对香根草含水量、膜透性、脯氨酸和叶绿素含量的影响[J]. 草原与草坪,2005(6):58-61.
Liu J X, Tan X C, Liu J Q. Effects on relative water content, membrane permeability, proline content and chlorophyll content of *Vetiveria zizanioides* under high temperature stress [J]. Grassland and Turf, 2005(6):58-61. (in Chinese)
- [14] 张岁岐,周小平,慕自新. 不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(10):1-6.
Zhang S Q, Zhou X P, Mu Z X. Effects of different irrigation patterns on root growth and water use efficiency of maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer-
- ing, 2009, 25(10):1-6. (in Chinese)
- [15] 王家顺,李志友. 干旱胁迫对茶树根系形态特征的影响[J]. 河南农业科学,2011,40(9):55-57.
Wang J S, Li Z Y. Effects of drought stress on root morphology of tea [J]. Journal of Henan Agricultural, 2011, 40(9):55-57. (in Chinese)
- [16] 闫江艳,张永清,冯晓敏,等. 干旱胁迫及复水对不同黍稷品种根系生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2012,32(2):348-354.
Yan J Y, Zhang Y Q, Feng X M, et al. Effect of drought stress and rewatering on physiological characteristics of roots in different proso millet varieties [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(2):348-354. (in Chinese)
- [17] Blokhina O, Virolainen E, Fagerstedt K. Antioxidants oxidative damage and oxygen deprivation stress: A review [J]. Annals of Botany, 2003, 91(2):179-194.
- [18] Nobel P S. Physicochemical and environmental plant physiology [M]. San Diego: Academic Press, 1991:251-254.
- [19] 梁银丽,杨翠玲. 不同抗旱型小麦根系形态与生理特性对渗透胁迫的反应[J]. 西北农业学报,1995,4(4):31-36.
Liang Y L, Yang C L. Responses of root system morphology and physiological characters on osmotic stress in drought resistance wheat varieties [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 1995, 4(4):31-36. (in Chinese)
- [20] 崔豫川,张文辉,王校锋. 栓皮栎幼苗对土壤干旱胁迫的生理响应[J]. 西北植物学报,2013,33(2):364-370.
Cui Y C, Zhang W H, Wang X F. Physiological responses of *Quercus variabilis* seedlings to soil drought stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(2):364-370. (in Chinese)
- [21] 韩蕊莲,李丽霞,梁宗锁. 干旱胁迫下沙棘叶片细胞膜透性与渗透调节物质研究[J]. 西北植物学报,2003,23(1):23-27.
Han R L, Li L X, Liang Z S. *Seabuckthorn* relative membrane conductivity and osmotic adjustment under drought stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(1):23-27. (in Chinese)
- [22] 冯晓敏,张永清,李鹏,等. 糜子幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(2):176-181.
Feng X M, Zhang Y Q, Li P, et al. Morphological and physiological responses of broomcorn millet seedlings to drought stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(2):176-181. (in Chinese)
- [23] Dhopte A M, Ramteke S D. Relative changes in root growth and root respiration in drought tolerant and susceptible genotypes of peanut under field conditions [J]. Annals of Plant Physiology, 1991, 5(2):213-217.
- [24] 王晨阳. 干旱胁迫对根的活性氧代谢的影响[J]. 华北农学报,1997,12(增刊):31-36.
Wang C Y. Effect of drought stress on root metabolism of reactive oxygen species [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1997, 12(S):31-36. (in Chinese)