

局部根区水分胁迫下钙对冬小麦生长及养分吸收的影响

周芳,赵玉霞,王文岩,李雪芳,王林权

(西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:以小偃22为材料,采用Hoagland营养液进行分根培养试验,研究了局部根区水分胁迫下,钙对冬小麦幼苗生长及养分吸收的影响。设置2个钙水平处理(正常供钙和不供钙)、3种水分处理(正常水分、局部根区水分胁迫和全部根区水分胁迫),共6个处理。结果表明:不论是否水分胁迫,缺钙处理冬小麦幼苗的株高、主根长、生物量、叶绿素相对含量(SPAD值)、相对含水量及地上部N、P、Ca含量和根系N、P、K、Ca含量均显著低于正常供钙处理($P < 0.05$)。正常供钙条件下,局部根区水分胁迫使株高增加4.4%,正常水分、局部根区水分胁迫和全部根区水分胁迫的植株生物量分别为 1.54 、 $1.66 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $0.97 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$,比缺钙处理分别高19.4%、25.8%和4.3%;全部根区水分胁迫下,冬小麦的株高及主根长均显著降低。缺钙条件下,植株对N、P、Ca等养分的吸收显著降低。正常供钙条件下,正常水分、局部根区水分胁迫和全部根区水分胁迫处理地上部全氮含量分别为 36.54 、 $36.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $32.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,比缺钙处理分别高9.5%、6.5%和6.9%;全磷含量分别为 7.48 、 $7.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,比缺钙处理分别高3.0%、13.1%和22.7%;全钙含量分别为 8.35 、 $8.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,比缺钙处理分别高26.5%、24.4%和19.7%。结果说明钙显著影响冬小麦幼苗生长发育和养分利用,钙可促进局部根区水分胁迫下冬小麦幼苗的生长及其对养分的吸收,缓解全部根区水分胁迫的抑制效应。

关键词:钙;局部根区水分胁迫;冬小麦;生物量;叶绿素相对含量;养分吸收

中图分类号:S512.1⁺1 文献标志码:A

Effects of calcium on growth of winter wheat seedlings and nutrient uptake under partial-root water stress

ZHOU Fang, ZHAO Yu-xia, WANG Wen-yan, LI Xue-fang, WANG Lin-quan

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The effects of calcium on growth and nutrient absorption of winter wheat seedlings (Xiaoyan 22) under partial-root water stress induced PEG-6000 by were investigated, using Hoagland solution cultivation with split-root experiment. Ca^{2+} was eliminated by EGTA. Six treatments were set up in this experiment, including a factorial combination of three water stress schemes (no water stress (CK), half-root water stress (HRWS) and total-root water stress (TRWS)) and two calcium treatments (with calcium and without). The results showed that shoot height, taproot length, biomass, relative water content (RWC), relative chlorophyll content (SPAD), and N, P, Ca concentrations in winter wheat seedlings without calcium treatment were significantly lower than those with calcium, regardless of water stress ($P < 0.05$). With the treatment of calcium, plant height in HRWS was increased by 4.4%. Biomass in CK, HRWS, and TRWS were 1.54 , $1.66 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ and $0.97 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$, respectively, which were 19.4%, 25.8% and 4.3% greater than those without treatment of calcium. Plant height and root length in TRWS became decreased significantly. Without the treatment of calcium, concentrations of N, P and Ca etc. in seedlings were significantly reduced. Total nitrogen of shoot with calcium treatment in CK, HRWS, and TRWS were 36.54 , $36.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $32.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 9.5%, 6.5% and 6.9%, respectively, higher than those without; total phosphorus were 7.48 , $7.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $6.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,

收稿日期:2014-03-17

基金项目:农业部农业科研杰出人才及其创新团队培养计划资助

作者简介:周芳(1988—),女,安徽亳州人,硕士研究生,主要从事植物营养及抗旱生理研究。E-mail:zhoufang0808@126.com。

通信作者:王林权(1964—),教授,博士生导师,主要从事植物营养生理与调控、节水施肥技术研究。E-mail:linquanw@yahoo.com.cn。

3.0%, 13.1% and 22.7%, respectively, higher than those without; above-ground total calcium were 8.35, 8.37 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 5.53 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively, 26.5%, 24.4% and 19.7% higher than those without calcium. The results indicated that calcium had significant effects on the development and nutrient use of winter wheat seedlings by promoting growth and nutrient uptake under water stress, relieving the inhibitory effect in the entire root.

Keywords: Calcium; partial-root water stress; winter wheat; biomass; relative chlorophyll content; nutrient element concentrations

钙是植物生长发育必需的大量元素之一,同时也是细胞内重要的第二信使,它介导的信号转导能够缓解逆境胁迫对植物造成的伤害^[1],已有研究表明外源钙可提高植物抗旱性^[2]。关于钙提高植物抗旱性的研究多数是从植物生理生化特性^[3]出发的,对钙提高植物抗旱性是否与养分吸收有关的研究较少。已研究发现外源喷施钙对植物矿质营养元素的含量有影响,特别是 K 含量显著提高^[4];钙对植物体内养分的分配也有一定影响^[5],但水分胁迫下钙对植物营养元素吸收的影响研究较少。

水分胁迫一直严重制约着我国小麦的生产,故提高旱地小麦抗旱性及产量是学者研究的热点之一。近年来,人们提出了一种新型的节水灌溉技术——局部根区灌水(Partial root - zone irrigation, PRI),其主要原理是让植物一部分根系处于湿润状态且正常生长;另一部分根系处于干旱(Partial root - zone drying)条件下感知干旱,进而产生根源信号来调控地上部应对干旱胁迫,达到节水及稳、高产的目的^[6]。局部根区供水可维持幼苗正常生长^[7],提高植株抗旱性。目前国内外关于干旱胁迫对养分吸收分配影响^[8]及分根渗透胁迫^[9-10]和钙对水分胁迫下植物生理生化特性影响^[3,11]的研究较多,而对局部根区水分胁迫下钙对植物幼苗生长及营养元素吸收影响的研究相对缺少。为此,本试验以冬小麦幼苗为材料,研究部分根区水分胁迫下,钙离子对冬小麦幼苗的生长特性及其养分含量的影响,旨在为深入了解钙在抗旱中的生理作用及旱地农业生产、节水灌溉提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为冬小麦(*Triticum aestivum* L.)品种小偃 22。挑选籽粒饱满、大小一致的小麦种子用 0.1% HgCl_2 消毒 10 min 后,再用无菌水漂洗干净,并在无菌水中浸种 12~24 h。浸种后将种子均匀撒在倒置的塑料筐底部,塑料筐底浸没于水中,于 25℃ ZPW-350 型智能植物培养箱内黑暗催芽。待种子萌发后,将其移到人工温室内进行培养。培养

期间种子与水面保持接触,每天光照 14 h,培养温度为昼 25℃/夜 21℃。发芽 3 d 后换为 1/2 Hoagland 营养液进行培养,3 d 后更换为 Hoagland 营养液。幼苗培养 14 d,取生长良好、均匀一致的幼苗进行试验处理。培养及处理期间,每天用充气泵通气并调节溶液 pH 值,每隔 3 d 更换一次培养液及处理液。Hoagland 营养液的组成为($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.18, KNO_3 0.51, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.49, KH_2PO_4 0.14, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 5.57×10^{-3} , Na_2EDTA 7.45×10^{-3} ,其中微量元素采用 Arnon 微量元素混合液。供钙是指 Hoagland 营养液中不加 EGTA,不供钙是指 Hoagland 营养液中加 EGTA。

试验所用的聚乙二醇 6000(Polyethylene glycol - 6000, PEG - 6000)由天津市科密欧化学试剂有限公司生产,乙二醇二乙醚二胺四乙酸(Ethylene glycol - bis - (2 - aminoethylether) - tetraacetic acid, EGTA)由西安国安生物科技有限公司生产。

分根装置为本实验室的专利产品(专利号: ZL2010 1 0225628.3),具体使用方法参照徐猛等^[12]的方法。

1.2 试验设计

将选取的小麦幼苗,去除胚乳并将根冲洗干净,然后将幼苗转移到分根装置(图 1)中,并将小麦根均匀放置到隔板两侧,尽量保证两隔壁根数目相等。每个装置中定植 10 株幼苗。用 Hoagland 营养液配制 PEG - 6000 胁迫液,PEG - 6000 的浓度是 10% (w/v),渗透势约为 -0.56 MPa ^[13](相当于中度干旱胁迫)。处理见表 1,共 6 个处理,每个处理重复 3 次。小麦幼苗处理 7 d 后取样,测定各项指标。

1.3 测定项目及方法

株高、主根长:将植株完全展开,用直尺测定。生物量:分别收获两侧根室根系及植株地上部,然后于 70℃ 鼓风干燥箱中烘至恒重,测定干物质量。叶绿素相对含量用 SPAD - 502(Minolta 公司生产)测定。叶片相对含水量:采用称重法,即相对含水量 $\text{RWC}(\%) = [(\text{鲜重} - \text{干重}) / (\text{饱和鲜重} - \text{干重})] \times 100$ 。将地上部和根系样品烘干粉碎后测定全氮、磷、全钾及全钙含量等。用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮植物

样品,AA3 连续流动分析仪测全氮,钒钼黄比色法测磷,火焰光度计测全钾;用 HNO₃ – HClO₄ 消煮植物样品,原子吸收分光光度法测全钙。

表 1 分根设计与试验处理
Table 1 Split-root method and treatments

处理 Treatments	左隔室(L) Left compartment	右隔室(R) Right compartment
正常水分 + 正常供钙 (CK1) Control with calcium	Hoagland 营养液 * Hoagland solution *	Hoagland 营养液 Hoagland solution
局部根区水分胁迫 + 正常供钙 (HRWS1) Half – root water stress with calcium	Hoagland 营养液 Hoagland solution	含 10% PEG – 6000 的 Hoagland 营养液 Hoagland solution with 10% PEG – 6000
全部根区水分胁迫 + 正常供钙 (TRWS1) Total – root water stress with calcium	含 10% PEG – 6000 的 Hoagland 营养液 Hoagland solution with 10% PEG – 6000	含 10% PEG – 6000 的 Hoagland 营养液 Hoagland solution with 10% PEG – 6000
正常水分 + 不供钙(CK2) Control without calcium	Hoagland 营养液 + 5 mmol·L ⁻¹ EGTA * * Hoagland solution with 5 mmol·L ⁻¹ EGTA * *	Hoagland 营养液 + 5 mmol·L ⁻¹ EGTA Hoagland solution with 5 mmol·L ⁻¹ EGTA
局部根区水分胁迫 + 不供钙 (HRWS2) Half – root water stress without calcium	Hoagland 营养液 + 5 mmol·L ⁻¹ EGTA Hoagland solution with 5 mmol·L ⁻¹ EGTA	含 10% PEG – 6000 的 Hoagland 营养液 + 5 mmol·L ⁻¹ EGTA Hoagland solution with 10% PEG – 6000 and 5 mmol·L ⁻¹ EGTA
全部根区水分胁迫 + 不供钙 (TRWS2) Total – root water stress without calcium	含 10% PEG – 6000 的 Hoagland 营养液 + 5 mmol·L ⁻¹ EGTA Hoagland solution with 10% PEG – 6000 and 5 mmol·L ⁻¹ EGTA	含 10% PEG – 6000 的 Hoagland 营养液 + 5 mmol·L ⁻¹ EGTA Hoagland solution with 10% PEG – 6000 and 5 mmol·L ⁻¹ EGTA

注:*, 营养液及胁迫液中钙离子浓度为 5 mmol·L⁻¹; **, EGTA 是钙离子螯合剂,螯合营养液及胁迫液中的钙离子。
Note: *, the Ca²⁺ content in nutrient and stress solution is 5 mmol·L⁻¹; **, EGTA used to chelate Ca²⁺ in nutrient and stress solution is a Ca²⁺ chelating agent.

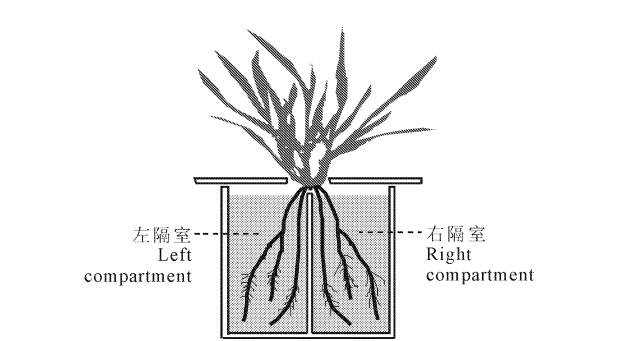


图 1 分根装置示意图

Fig.1 Sketch of the split-root system

1.4 数据处理

运用 Excel2003 和 DPS7.05 软件进行数据处理与统计分析,LSD 法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 局部根区水分胁迫下钙对冬小麦幼苗株高、主根长的影响

植物的株高和根长对水分亏缺的反应很敏感。由表 2 可看出,不论有无水分胁迫,不供钙处理冬小麦幼苗的株高和主根长均低于正常供钙处理。正常

表 2 局部根区水分胁迫下钙对冬小麦幼苗株高、主根长的影响

Table 2 Effects of calcium on shoot height and taproot length of winter wheat seedlings under partial-root water stress

处理 Treatments	株高 Shoot height /cm	左主根长 Taproot length in left compartment /cm	右主根长 Taproot length in right compartment /cm
CK1	34.70b	24.23bc	24.87a
HRWS1	36.23a	28.93a	24.73ab
TRWS1	30.40c	24.13cd	24.10ab
CK2	30.47c	23.47c	23.33bc
HRWS2	31.17c	25.00b	22.27d
TRWS2	28.60d	22.60d	22.30cd

注:不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平,下同。
Note: Different letters mean significant differences among treatments at the 5% level and hereinafter.

供钙条件下,局部根区水分胁迫处理(HRWS1)的株高和左主根长(未胁迫)均显著高于 CK1,平均株高及主根长较 CK1 分别增加了 4.4%、19.4%;右主根长(胁迫)与 CK1 间无显著差异,说明正常供钙条件下局部根区水分胁迫可以促进冬小麦地上部和未胁迫根区根系的生长。不供钙条件下,局部根区水分

胁迫处理(HRWS2)的株高与 CK2 差异不显著,左主根长较 CK2 增加了 6.5%,而右主根长降低了 4.5%;HRWS2 处理的株高及左右主根长较 HRWS1 分别降低了 14.0%、13.6%和 9.9%。全部根区水分胁迫下不论正常供钙与否,冬小麦的株高及左主根长均显著降低,TRWS1 比 CK1 分别降低了 12.4%和 5.6%,比 HRWS1 分别降低了 22.3%和 21.0%;TRWS2 比 CK2 分别减少了 6.1%和 3.7%,比 HRWS2 分别减少了 8.9%和 9.6%;TRWS2 处理的株高及左右主根长较 TRWS1 分别降低了 5.9%、6.3%和 7.5%,说明缺钙加重了全部根区水分胁迫对冬小麦幼苗地上部和根系生长的抑制作用。

2.2 局部根区水分胁迫下钙对冬小麦幼苗叶绿素相对含量的影响

由图 2(A)知,不供钙处理冬小麦幼苗的叶绿素相对含量较正常供钙处理均显著降低。正常供钙条件下,局部根区水分胁迫(HRWS1)处理的 SPAD 值与 CK1 无显著差异,而不供钙时 HRWS2 处理的 SPAD 值显著高于 CK2,但 HRWS2 处理的 SPAD 值显

著低于 HRWS1,说明缺钙会抑制叶绿素的合成。正常供钙和不供钙条件下,局部根区水分胁迫处理的叶绿素相对含量均高于全部根区水分胁迫处理,且差异显著;TRWS1 处理的 SPAD 值显著高于 TRWS2。说明全部根区水分胁迫显著抑制叶绿素的合成,缺钙则会加重这种胁迫效应。

2.3 局部根区水分胁迫下钙对冬小麦幼苗相对含水量的影响

由图 2(B)知,局部根区水分胁迫降低了冬小麦幼苗的相对含水量。正常供钙条件下,局部根区水分胁迫处理(HRWS1)的相对含水量与 CK1 无显著差异,TRWS1 处理的相对含水量显著低于 HRWS1;不供钙条件下,HRWS2 处理的相对含水量显著低于 CK2,而 TRWS2 的相对含水量则显著低于 HRWS2;HRWS1 处理的相对含水量显著高于 HRWS2,且 TRWS1 处理的相对含水量显著高于 TRWS2。说明缺钙会加重冬小麦的水分胁迫效应;而局部根区水分胁迫下,正常供钙可缓解水分胁迫效应。

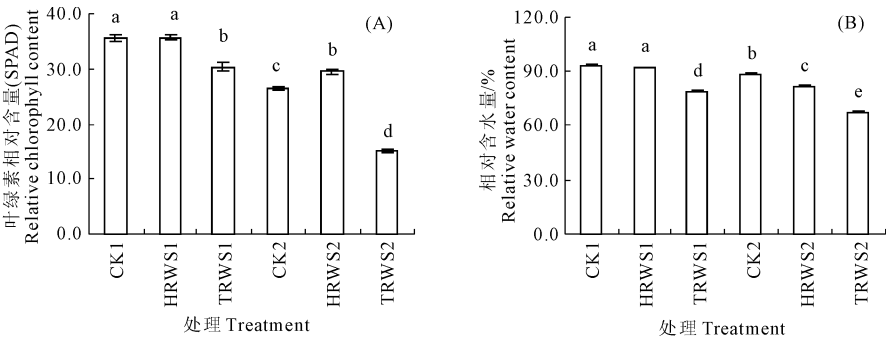


图 2 局部根区水分胁迫下钙对冬小麦幼苗叶绿素含量(A)及相对含水量(B)的影响

Fig.2 Effects of calcium on chlorophyll content(A) and relative water content(B) of winter wheat seedlings under partial-root water stress.

2.4 局部根区水分胁迫下钙对冬小麦幼苗生物量的影响

由表 3 知,不供钙处理冬小麦幼苗的生物量均比正常供钙处理低。CK1 处理的生物量显著高于 CK2。局部根区水分胁迫下不论是正常供钙还是不供钙,地上部质量与未胁迫处理相当或略高,左根质量、总根质量及植株总质量均高于未胁迫处理;HRWS1 处理的生物量显著高于 HRWS2。全部根区水分胁迫下不论正常供钙与否,地上部质量、左右根质量、总根质量及植株总质量均显著低于未胁迫及局部根区水分胁迫水平;TRWS1 处理的生物量与 TRWS2 无显著差异。局部根区水分胁迫处理的根

冠比较高,HRWS1 和 TRWS1 处理的根冠比均显著高于 CK1,CK2 处理的根冠比显著高于 CK1。说明水分胁迫对地上部生长的抑制作用大于对根系的抑制作用,较多的干物质分配到根系,且水分胁迫下钙对冬小麦地上部和根系的生长具有一定的调节效应。

2.5 局部根区水分胁迫下钙对冬小麦幼苗营养元素含量的影响

从表 4 可知,不供钙处理冬小麦幼苗的地上部 N、P、Ca 含量及根系 N、P、K、Ca 含量均低于正常供钙处理。说明钙对冬小麦幼苗吸收营养元素具有重要影响。

表 3 局部根区水分胁迫下钙对冬小麦幼苗生物量的影响

Table 3 Effects of calcium on biomass of winter wheat seedlings under partial-root water stress

处理 Treatments	地上部质量 Shoot mass (g DM)	左根质量 Root mass in left compartment (g DM)	右根质量 Root mass in right compartment (g DM)	总根质量 Total root mass (g DM)	根冠比 Root to shoot ratio	植株总质量 Total plant mass (g DM)
CK1	1.07a	0.23bc	0.24a	0.47b	0.44c	1.54b
HRWS1	1.14a	0.28a	0.25a	0.53a	0.46ab	1.66a
TRWS1	0.67c	0.16d	0.15c	0.30d	0.45b	0.97d
CK2	0.88b	0.21c	0.21b	0.41c	0.47a	1.29c
HRWS2	0.89b	0.25b	0.19b	0.44bc	0.49a	1.32c
TRWS2	0.64c	0.14d	0.15c	0.29d	0.45b	0.93d

表 4 局部根区水分胁迫下钙对冬小麦幼苗氮、磷、钾及钙含量的影响

Table 4 Effects of calcium on nitrogen, phosphorus, potassium and calcium concentrations of winter wheat seedlings under partial-root water stress

器官 Organ	处理 Treatments	全氮含量 N concentration /(g·kg ⁻¹ DM)	全磷含量 P concentration /(g·kg ⁻¹ DM)	全钾含量 K concentration /(g·kg ⁻¹ DM)	全钙含量 Ca concentration /(g·kg ⁻¹ DM)
地上部 Shoot	CK1	36.54a	7.48a	13.96a	8.35a
	HRWS1	36.65a	7.51a	14.26a	8.37a
	TRWS1	32.70c	6.54b	14.21a	5.53c
	CK2	33.37b	7.26a	14.04a	6.60b
	HRWS2	34.41b	6.64b	15.16a	6.73b
	TRWS2	30.59c	5.33c	14.53a	4.62c
左根系 Root in left compartment	CK1	28.40b	6.16b	10.56a	6.83a
	HRWS1	29.76a	6.78a	9.78ab	7.03a
	TRWS1	22.41c	5.94bc	7.88c	6.09ab
	CK2	28.24b	6.11c	9.64b	5.66b
	HRWS2	28.80b	5.59c	9.03b	5.75b
	TRWS2	22.14c	5.15d	7.12c	4.91c
右根系 Root in right compartment	CK1	28.39a	6.17a	10.57a	6.84a
	HRWS1	25.86b	6.04ab	9.55b	6.43a
	TRWS1	22.38d	5.95b	7.87c	6.08a
	CK2	28.23a	6.09ab	9.51b	5.67b
	HRWS2	23.93c	5.29c	9.40b	5.52b
	TRWS2	22.18d	5.13c	7.11c	4.92c

局部根区水分胁迫处理(HRWS1)的地上部 N 含量与 CK1 无差异,左根系(未胁迫)N 含量显著高于 CK1,而右根系(胁迫)N 含量显著低于 CK1; HRWS1 处理的地上部及根系 N 含量均显著高于 HRWS2。全部根区水分胁迫下不论正常供钙与否,地上部及根系 N 含量均显著低于未胁迫及局部根区水分胁迫水平,TRWS1 与 TRWS2 处理间无显著差异。说明局部根区水分胁迫不会严重影响地上部的氮素供应和非胁迫根区的氮素吸收,但会影响胁迫根区的氮素吸收;全部根区水分胁迫则显著抑制氮素的吸收,且钙的调节效应减弱。

各处理 P 含量与 N 含量有相似的变化趋势,但水分胁迫条件下,磷素的吸收对钙的供应更为敏感,HRWS1 和 TRWS1 处理的地上部及根系 P 含量显著高于 HRWS2 和 TRWS2。

不同处理间地上部 K 含量差异不显著。正常供钙条件下,局部根区水分胁迫处理(HRWS1)的根系 K 含量均低于 CK1;而不供钙条件下,HRWS2 处理的根系 K 含量与 CK2 无差异。全部根区水分胁迫下不论正常供钙与否,根系 K 含量均显著低于未胁迫及局部根区水分胁迫水平,TRWS1 与 TRWS2 处理间无显著差异。

不供钙处理地上部及根系 Ca 含量均显著低于正常供钙处理;全部根区水分胁迫下地上部 Ca 含量无显著差异,而左右根系 Ca 含量差异显著,TRWS1 处理的左右根系 Ca 含量高于 TRWS2。局部根区水分胁迫下不论正常供钙与否,地上部及根系 Ca 含量均与未胁迫无显著差异。全部根区水分胁迫下不论正常供钙与否,地上部 Ca 含量均显著低于未胁迫及局部根区水分胁迫水平;不供钙条件下,TRWS2 处理的根系全钙含量显著低于 CK2 和 HRWS2。说明植株体内的全钙含量主要受钙供应的控制,缺钙会影响根系的钙元素吸收积累并向地上部运输,而水分胁迫则会使根系吸收钙更加困难。

3 讨论与结论

钙是植物生长发育的主要调控者^[14],它在稳定植物细胞壁和细胞膜、调控植物体内各种酶活性及离子吸收平衡、保护光合结构、提高植物抗逆性等方面具有重要作用。植物生长对水分胁迫非常敏感,水分亏缺时植物叶水势会大大降低,从而影响细胞的分裂与扩张,植物生长受到抑制,干物质的积累也受到影响^[15],且水分胁迫下植物叶片叶绿素含量及相对含水量均会降低。郭瑞等^[16]研究表明,PEG-6000 模拟水分胁迫显著抑制冬小麦幼苗的生长。顾学花等^[17]指出供钙可促进干旱胁迫下花生的营养生长,缓解干旱胁迫的抑制作用。崔妙玲等^[18]研究发现,局部根区水分胁迫对平邑甜茶的生长具有积极的作用。本研究中,不论供钙与否,全部根区水分胁迫均显著抑制冬小麦幼苗的生长,但正常供钙时抑制作用较小,说明钙可缓解全部根区水分胁迫对冬小麦生长的抑制作用,这与前人研究结果一致。局部根区水分胁迫下供钙显著促进了冬小麦幼苗的生长及干物质的积累,其生长明显优于正常供水处理,这说明局部根区水分胁迫可促进冬小麦幼苗的生长,且钙在其中起了某些特殊的调节作用;局部根区水分胁迫下正常供钙较不供钙冬小麦幼苗叶片相对含水量、叶绿素相对含量均显著升高,这是由于水分胁迫下钙会调节气孔关闭,减少水分散失^[19],提高相对含水量;同时钙也提高植物体内保护酶 SOD、POD 及 CAT 的活性,降低 MDA 的积累^[17],从而减轻活性氧对叶绿体的破坏^[20],抑制 MDA 对叶绿素的降解。

水分胁迫会使植物体内氮、磷、钾、钙含量发生变化。已有研究发现,水分胁迫会影响冬小麦对氮磷钾的吸收^[21];小麦叶片氮、磷含量降低^[22],油菜

幼苗钾、钙含量也会显著下降^[23]。本研究中,全部根区水分胁迫下冬小麦幼苗地上部及根系 N、P、K、Ca 含量均显著降低,这与前人的研究结果一致;正常供钙处理这些营养元素的含量高于不供钙处理,这是因为水分胁迫下植物对钙的吸收降低造成植物体内钙缺乏^[24],植物的正常生长发育受到抑制,缺钙又加重这一抑制作用,植物根系活力显著降低^[25],从而使根系吸收营养元素的能力降低,营养元素含量大幅降低,而供钙可提高根系活力^[24],促进根系生长,因此会减缓水分胁迫对养分吸收的抑制作用。本研究发现局部根区水分胁迫下正常供钙可促进非胁迫根区根系对养分的吸收,这是由于局部根区水分胁迫下一部分根系处于充分供水状态,该部分根系可吸收植物维持正常生长所需的水分和养分,且水分胁迫下供钙可降低超氧自由基的产生速率、MDA 含量,根系活力增加^[24],因而根系的吸收能力增强,根系会吸收大量的矿质营养并向地上部转移。

综上所述,钙可促进局部根区水分胁迫下冬小麦幼苗的生长及干物质的积累,提高相对含水量、叶绿素相对含量及氮、磷、钾、钙含量,缓解水分胁迫的抑制作用,进而提高冬小麦幼苗的抗旱性;它对局部根区水分胁迫下冬小麦幼苗的生长及其对矿质的吸收有着特殊的调节作用。

参 考 文 献:

- [1] Kader Md A, Lindberg S. Cytosolic calcium and pH signaling in plants under salinity stress[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2010,5(3):233-238.
- [2] 蒋明敏,徐 晨,夏 冰,等.干旱胁迫下外源氯化钙、水杨酸和一氧化氮对大蒜抗旱性的影响[J]. *植物生理学报*, 2012,48(9):909-916.
- [3] 关军锋,李广敏. Ca^{2+} 与植物抗旱性的关系[J]. *植物学通报*, 2001,18(4):473-478.
- [4] 王富林,丁 宁,李洪娜,等.喷施不同钙肥对富士苹果果实品质和矿质营养元素含量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2013,41(6):2403-2406.
- [5] 王书丽. 钙硼营养对东方百合生长与养分吸收分配的影响[D]. 保定:河北农业大学,2006.
- [6] Loveys B R, Dry P R, Stoll M, et al. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops[J]. *Acta Horticulturae*, 1999,537:187-197.
- [7] Green S R, Clothier B E. Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone[J]. *Plant and Soil*, 1995,173:317-328.
- [8] 汪耀富,孙德梅,徐传快,等.干旱胁迫对烤烟养分吸收分配及产量品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006,24(1):65-69.

参 考 文 献:

[1] 何 川. 红薯的营养价值及开发利用[J].西部粮油科技,2003,(5):44-46.

[2] Laurie S M, Faber M, Jaarsveld P J van, et al. β - Carotene yield and productivity of orange-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* L. Lam.) as influenced by irrigation and fertilizer application treatments [J]. Scientia Horticulturæ, 2012,142:180-184.

[3] 史春余,王振林,郭风法,等.土壤通气性对甘薯养分吸收、 ^{14}C - 同化物分配及产量的影响[J].核农学报,2002,16(4):232-236.

[4] 史春余,王振林,余松烈.土壤通气性对甘薯产量的影响及其生理机制[J].中国农业科学,2001,34(2):173-178.

[5] 王树钿,于作庆.甘薯在不同土壤条件下高产规律的初步研究[J].中国农业科学,1981,(1):49-55.

[6] Kazuyuki W, Toshio K. Effects of the capacity and composition of soil air on the growth and yield of sweet potato plants[J]. Crop Science, 1964,33(4):418-422.

[7] 高 宗,刘杏兰,刘存寿,等.长期施肥对关中土肥力和作物产量的影响[J].西北农业学报,1992,1(3):65-68.

[8] 杜丽娜,邵明安,魏孝荣.沙质多孔介质中土壤颗粒的迁移[J].土壤学报,2014,51(1):49-57.

[9] 张 娟,张正斌,谢惠民,等.小麦叶片水分利用效率及相关生理性状的关系研究[J].作物学报,2005,12(31):1593-1599.

[10] 龚吉蕊,黄永梅,葛之藏,等.4种杂交杨对土壤水分变化的生态学响应[J].植物生态学报,2009,33(2):387-396.

[11] 邵明安,杨文治,李玉山.土壤植物大气连续体中的水流阻力及相对重要性[J].水利学报,1986,(9):8-14.

[12] 张喜英.冬小麦、夏玉米叶水势、蒸腾和液态水流阻力的田间试验研究[J].地理学报,1997,52(6):543-549.

[13] 刘义玲,李天来,孙周平,等.根际低氧胁迫对网纹甜瓜生长、根呼吸代谢及抗氧化酶活性的影响[J].应用生态学报,2010,21(6):1439-1445.

[14] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:197-198.

[15] 张继澍.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2006:91-92.

[16] 郭春芳,孙 云,陈常颂,等.茶树品种光合与水分利用特性比较及聚类分析[J].作物学报,2008,34(10):1797-1804.

[17] 黄明斌,邵明安.土壤植物系统中水流阻力的变性[J].土壤学报,1996,33(2):211-216.

[18] 程建平,曹凑贵,蔡明历,等.不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2006,17(10):1859-1865.

[19] 罗永忠,成自勇.水分胁迫对紫花苜蓿叶水势、蒸腾速率和气孔导度的影响[J].草地学报,2011,19(2):215-221.

(上接第 19 页)

[9] 赵军营,王利军,牛铁泉,等.苹果幼苗部分根系水胁迫对光合作用主要参数的影响[J].果树学报,2005,22(5):446-449.

[10] 梁宗锁,康绍忠,高俊风,等.分根交替渗透胁迫与脱落酸对玉米根系生长和蒸腾效率的影响[J].作物学报,2000,26(2):250-255.

[11] 卢 军,邢小军,朱利泉,等.高温干旱共胁迫下外源甜菜碱和 CaCl_2 对烟草生理响应的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1437-1443.

[12] 徐 猛,马巧荣,张继涛,等.盐胁迫下不同基因型冬小麦渗透及离子的毒害效应[J].生态学报,2011,31(3):0784-0792.

[13] 姚彩艳. NaCl 和 PEG 胁迫对不同基因型玉米幼苗伤害比较 [D].扬州:扬州大学,2008.

[14] 龚 明,李 英,曹宗巽.植物体内的钙信使系统[J].植物学通报,1990,7(3):19-29.

[15] 裴 冬,孙振山,陈四龙,等.水分调亏对冬小麦生理生态的影响[J].农业工程学报,2006,22(8):68-72.

[16] 郭 瑞,郝卫平,龚道枝. PEG-6000 模拟水分胁迫对不同抗旱性冬小麦生理生态指标的影响[J].作物杂志,2012,5:43-47.

[17] 顾学花,孙莲强,张佳蕾,等.施钙对干旱胁迫下花生生理特性及产量的影响[J].花生学报,2013,42(2):1-8.

[18] 崔妙玲,许雪峰,李天忠,等.半根水分胁迫下苹果幼苗根系生长及水分状况研究[J].中国农学通报,2006,22(8):355-359.

[19] 杨根平,盛宏达,赵彩霞,等.钙素和水分亏缺对大豆幼苗某些生理过程的影响[J].西北农业大学学报,1990,18(2):84-87.

[20] 姜义宝,崔国文,李 红.干旱胁迫下外源钙对苜蓿抗旱相关生理指标的影响[J].草业学报,2005,14(5):32-36.

[21] 王月福,于振文,潘庆民,等.水分胁迫对冬小麦不同抗旱性品种养分吸收分配和产量的影响[J].土壤肥料,1998,(6):3-6.

[22] 王月福,于振文,潘庆民,等.水分胁迫对耐旱性不同小麦小花分化发育和氮磷及激素含量的影响[J].西北植物学报,2000,20(1):38-43.

[23] 郑青松,刘海燕,隆小华.盐胁迫对油菜幼苗离子吸收和分配的影响[J].中国油料作物学报,2010,32(1):65-70.

[24] 王广恩,金卫平,李俊兰,等.干旱胁迫下外源钙对棉花幼苗抗旱相关生理指标的影响[J].华北农学报,2010,25(增刊):115-118.

[25] 王玉凤,王庆祥,商丽威.钙对 NaCl 胁迫下玉米幼苗根系活力和有机渗透调节物质含量的影响[J].玉米科学,2008,16(2):66-70.