

小白菜抗盐胁迫的根系响应机制

徐芬芬,叶利民,夏晓蕾

(上饶师范学院生命科学学院,江西 上饶 334001)

摘要: 以前期筛选得到的抗盐品种‘四倍体矮脚黄’和盐敏感品种‘改良 605’为材料,采用水培方法,研究了两品种在根系形态、根系细胞质膜伤害、根系渗透调节物质含量和根系活性氧及其清除系统对盐胁迫的响应。试验结果表明,‘四倍体矮脚黄’盐处理组的根系长度、根系分支数、根毛直径等分别较 CK 降低了 0.71 cm、0.6 个·株⁻¹、0.28 mm 和 2.5 μm,根毛密度较 CK 增加了 3 根·mm⁻¹,除根毛长度较 CK 显著降低外($P < 0.05$),其它指标均与 CK 差异不显著。而‘改良 605’在盐处理组未见根毛分化,根系也不分支,其根长、根系分支数、根毛长度、根毛直径和根毛密度等较 CK 的降低值分别为:5.87 cm、5.0 个·株⁻¹、0.63 mm、17.3 μm 和 24 根·mm⁻¹,远远高于‘四倍体矮脚黄’。盐处理组各指标均极显著低于 CK($P < 0.01$)。生理指标测定结果表明,盐胁迫促使两个品种根系可溶性糖、可溶性蛋白质含量增加,相对电导率提高,保护酶活性降低,Na⁺/K⁺ 比值增大,活性氧积累,但抗盐品种‘四倍体矮脚黄’的变化程度小于盐敏感品种‘改良 605’。

关键词: 小白菜;盐胁迫;根系生长;生理响应

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A

Physiology response of roots of pakchoi varieties to salt stress

XU Fen-fen, YE Li-min, XIA Xiao-lei

(Life Science College, Shangrao Normal University, Shangrao, Jiangxi 334001, China)

Abstract: With pakchoi varieties, i. e. a salt-resistance variety ‘tetraploid Aijiaohuang’ and a salt-sensitive variety ‘Improvement 605’, as the experimental materials, this study were carried out to investigate and report the response of root morphology, root cell membrane damage, root osmotic adjustment substance content and its scavenging system of reactive oxygen under the different salt tolerance hydroponic solution. The results showed that the root length, number of branches roots and root hair diameter of the ‘tetraploid Aijiaohuang’ under salt stress was decreased by 0.71 cm, 0.6 number·plant⁻¹, 0.28 mm and 2.5 μm, respectively. But the root hair density was increased by 3 number·mm⁻¹ compared with that of CK. The root hair length decreased significantly while other indexes did not changed markedly. In addition, ‘Improvement 605’ had no new hairs and branch roots under the salt stress. Physiological analysis showed increase in proline content, soluble sugar content, the relative conductivity Na⁺/K⁺ ratio, and reactive oxygen accumulation, whereas revealed decrease in protecting enzyme activity for both varieties. And the variation of physiological indexes were lower for the salt-sensitive variety ‘Improvement 605’ than the tolerant variety ‘tetraploid Aijiaohuang’.

Keywords: pakchoi; salt-resistance; root growth; physiology response

小白菜 (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis* Makino Var. *communis*) 原产中国, 俗称青菜, 是人们喜爱的大众化蔬菜。设施蔬菜栽培已成为我国蔬菜生产重要的生产方式, 但随着近几年设施蔬菜栽培的迅猛发展, 栽培技术和管理措施的落后以及农民过分追求近期经济效益, 造成了土壤出现一系列的问题, 其中土壤次生盐渍化是主要的问题之一。盐胁迫对不同作物的伤害机制是不同的, 因此不同作物对盐胁迫表现出来的抗性机制也不同^[1]。有的作物在盐胁迫下表现出较强的渗透调节能力, 体内大量积累渗透调节物质, 而有的作物通过增强自身的抗氧化能力来缓解盐胁迫伤害。根系最早感受盐胁迫逆境, 是最直接的受害部位。因此根系是植物应对盐胁迫的首要部位^[2]。根系在逆境下能够通过改

收稿日期:2016-04-12 修回日期:2017-03-10
基金项目:2015 年江西省教育厅科技项目(GJJ151055);2015 年上饶师范学院科技创新项目(201503);2015 年大学生科技项目
作者简介:徐芬芬(1978—),女,副教授,硕士,主要从事植物逆境生理研究。E-mail:xfylm7875@163.com。

变其形态与分布来适应不利环境^[3-4],所以,根的生长发育状况对植物的耐盐能力至关重要,而目前缺乏不结球白菜耐盐胁迫机制的系统研究。

目前关于根系对盐胁迫响应的研究较集中于根系生理特性方面的研究,如崔云玲等^[5]研究表明,油菜抗性品种通过减少对 Na^+ 吸收,维持 K^+ 的稳定,来保持较高的 Na^+/K^+ 比从而增强其抗盐性;侯晨^[6]研究表明,早稻根系可通过增强保护酶活性,降低 MDA 含量,以及恢复 Na^+/K^+ 比来使细胞获得耐盐性。关于盐胁迫对根毛形态影响的研究较少,卢学琴等^[7]研究表明,0.6% ~ 0.8% NaCl 胁迫处理下,剑麻幼苗根毛的生长受到较明显抑制,根毛基部萎缩及根毛脱落加重。根毛是植物吸收水分的主要部位,盐胁迫下根毛发育不良是影响幼苗生长的主要因素。所以研究盐胁迫对根毛形态的影响非常重要,而目前关于盐胁迫对小白菜根系生长影响的报道仅见于徐芬芬等^[8]的研究,其结果发现,盐胁迫小白菜细根较少,表现为根毛区宽度极小,有的品种甚至没有根毛分化。而目前对盐胁迫下根毛形态和根尖生理的系统研究较为缺乏,本研究通过模拟盐逆境,对比耐盐和盐敏感品种根系和根毛的形态以及根尖生理特性,探讨不结球白菜抗盐的根系生理响应机制,丰富根系响应盐胁迫的系统理论。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.2 材料培养与处理设置

试验于 2015 年 11 月至 12 月进行,两品种小白菜幼苗培养至两叶期时,进行盐胁迫处理,两个品种分别设两种处理:1/2 hoagland 营养液(对照);1/2 hoagland 营养液 + 100 mmol·L⁻¹ NaCl(盐处理),重复 3 次,每重复 50 株苗。于处理后第 3 天,测定根系和根毛形态,选择根尖部分测定渗透调节物质含量、超氧自由基(O_2^-)产生速率、过氧化氢(H_2O_2)含量和保护酶活性等。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 根系和根毛的形态参数测定 选择生长良好、颜色鲜白的根作为根毛形态测定的试验材料。用直尺测量主根长,用剪刀剪下根端约 2 cm 长的细根,放入事先滴入少许蒸馏水的培养皿中,把培养皿里的细根置于 NIKON 7500 型显微镜(尼康体视显微镜)下观察并测量和照相,用显微测微尺和 Motic Images Plus 2.0 软件测量距根端 0 ~ 7 mm 处的细根直径、根毛密度和长度。每株苗测定 5 次,然后计算平均数。

1.3.2 根系渗透调节物质含量和细胞质膜透性的测定 脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法^[9],可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法^[9]; K^+ 、 Na^+ 含量参考王宝山与赵可夫用原子吸收分光光度计测定^[10]。细胞质膜透性参照李敏等^[11]采用的相对电导率的测定方法。

1.3.3 根系活性氧积累和保护酶活性的测定 O_2^- 产生速率的测定参照王爱国和罗广华的方法^[12], H_2O_2 含量的测定参照刘俊等的方法^[13]。参照刘萍的方法测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性^[14]。

1.4 数据分析

试验数据用 Excel 软件分析,采用新复极差法进行显著性测验。

2 结果与分析

2.1 根系和根毛形态参数

由表 1 分析可知,盐处理下两品种小白菜根长、根系分支数、根毛长度和根毛直径等均较 CK 降低,其中,耐盐品种‘四倍体矮脚黄’在盐胁迫下根系长度、根系分支数、根毛长度、根毛直径和根毛密度分别为 11.64 cm、4.7 个·株⁻¹、0.50 mm、17.5 μm 和 28 根·mm⁻¹,CK 上述各指标值分别为 12.35 cm、5.3 个·株⁻¹、0.78 mm、20.0 μm 和 25 根·mm⁻¹,可见,盐处理组的根系长度、根系分支数、根毛长度、根毛直径分别较 CK 降低 0.71 cm、0.6 个·株⁻¹、0.28 mm 和 2.5 μm ,而根毛密度反而较 CK 增加了 3 根·mm⁻¹。经统计分析可知,盐胁迫处理组除根毛长度较 CK 显著降低外($P < 0.05$),其它指标均与 CK 差异不显著。而盐敏感品种‘改良 605’在正常情况下(CK)根毛发育良好,但在盐胁迫下未见根毛分化,根系也不分支,其根长、根系分支数、根毛长度、根毛直径和根毛密度等较 CK 的降低值分别为:5.87 cm、5.0 个·株⁻¹、0.63 mm、17.3 μm 和 24 根·mm⁻¹,统计分析结果表明,盐处理组的各指标均极显著低于 CK($P < 0.01$)。‘改良 605’各根系生长指标降低值均远远高于‘四倍体矮脚黄’,说明‘改良 605’根系生长和根毛发育受盐胁迫影响更为显著。

从图 1 可以看出两品种盐胁迫下根长变短,分支数减少,根茎变粗,但‘改良 605’与 CK 差异较大。图 2 为两品种根毛生长情况,盐胁迫下‘改良 605’无根毛分化,而‘四倍体矮脚黄’根毛长度明显较 CK 短,根毛数目与 CK 相差不大。说明盐胁迫抑制了盐敏感品种根毛的分化是盐敏感品种受盐胁迫伤害的主要原因。

表 1 盐胁迫下抗盐性不同的两品种小白菜根系和根毛形态

品种 Variety	根长 Root length /cm		根系分支数 Root branch number (branch number/plant)		根毛长度 Root hair length /mm		根毛直径 Root hair diameter /μm		根毛密度 Root hair density /(number·mm ⁻¹)	
	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl
四倍体矮脚黄 The tetraploid Aijiaohuang	12.35	11.64	5.3	4.7	0.78*	0.50	20.0	17.5	25	28
改良 605 Improvement 605	11.23**	5.36	5.0**	0.0	0.63**	0.00	17.3**	0.0	24**	0

注:上述差异显著性为 *t* 检验结果,“*”和“**”分别表示同一品种 NaCl 处理与 CK 差异达 0.05 和 0.01 水平,下表同。
Note: The significant difference above was *t* test result, * and ** indicate that the significantly difference of NaCl treatment and CK at 0.05 and 0.01 level respectively, the same as below.

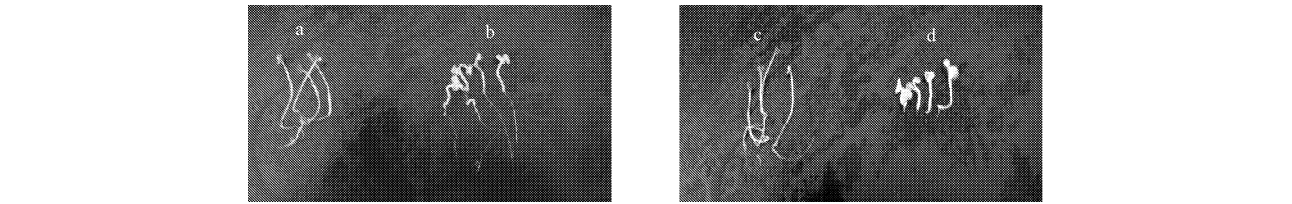


图 1 两个品种 CK 与盐处理下根系生长情况

Fig.1 Root growth of two species under CK and salt treatment

从左至右依次为:‘四倍体矮脚黄’的 CK(a)和 NaCl 处理(b),‘改良 605’的 CK(c)和 NaCl 处理(d)。下同
From left to right: the CK (a) and NaCl treatment (b) of ‘tetraploid Aijiaohuang’, the CK (c) and NaCl treatment (d) of ‘improvement 605’. The same as below.

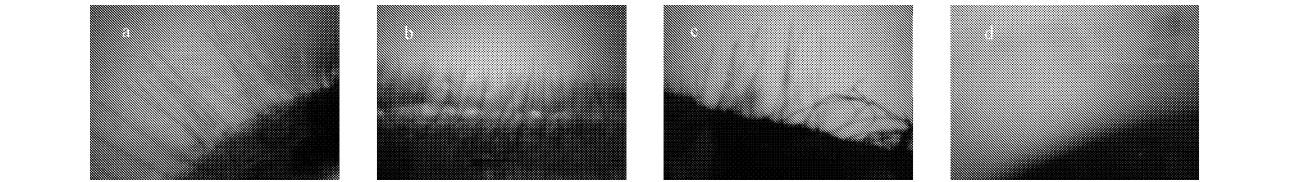


图 2 两个品种在正常与盐处理条件下根毛的显微照片(放大 40 倍)

Fig.2 Micrographs of root hair of two varieties under CK and salt treatment (enlarged 40 times)

2.2 根系渗透调节物质含量和细胞质膜透性

由表 2 分析可知,两个品种 NaCl 处理的根系脯氨酸含量和可溶性糖含量均较 CK 显著提高,其中,‘四倍体矮脚黄’盐处理组脯氨酸和可溶性糖两种渗透调节物质含量均极显著高于 CK ($P < 0.01$),‘改良 605’盐处理组的脯氨酸含量和可溶性糖含量也显著超过 CK ($P < 0.05$)。表明盐胁迫下抗盐性不同的小白菜品种均能通过根系合成较多的渗透调节物质来降低自身的渗透势,以增强吸水能力。耐盐品种‘四倍体矮脚黄’的渗透调节能力较盐敏感品种‘改良 605’更强。

两品种盐处理组的根系相对电导率均较 CK 提高,其中,盐敏感品种‘改良 605’盐处理的根系相对电导率(为 16.12%)显著高于 CK(为 11.52%) ($P < 0.05$),而耐盐品种‘四倍体矮脚黄’的盐处理根系相对电导率(为 13.26%)与 CK(12.43%)差异不显著。

表明盐胁迫下小白菜根系细胞质膜透性增大了,细胞膜受到了一定程度的损伤,盐敏感品种受到的伤害显著,而耐盐品种受伤害不显著。

盐胁迫下,植物体内会积累大量的 Na^+ 、 Cl^- 等离子,对植物的生长造成伤害。细胞中 Na^+/K^+ 比是植物耐盐性的重要指标。盐敏感品种‘改良 605’盐处理根系 Na^+/K^+ 比值(15.63)显著高于 CK(6.62) ($P < 0.01$),而‘四倍体矮脚黄’盐处理 Na^+/K^+ 比值(9.36)和对照 Na^+/K^+ 比值(6.43)间无显著差异。说明耐盐品种‘四倍体矮脚黄’表现出对 Na^+ 的吸收减少,对 K^+ 有更好的吸收能力,较盐敏感品种更强。

2.3 根系活性氧积累和保护酶活性

‘四倍体矮脚黄’盐处理的 O_2^- 产生速率与 CK 无显著差异,但 H_2O_2 含量却显著高于 CK ($P < 0.01$)。而‘改良 605’盐处理的 O_2^- 产生速率显著高

于 CK ($P < 0.01$), H_2O_2 含量与 CK 差异不显著。从增加的程度来看,盐处理组‘四倍体矮脚黄’和‘改良 605’的 O_2^- 产生速率分别较 CK 增加 $1.21\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $3.3\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, ‘四倍体矮脚黄’和‘改良 605’盐处理组的 H_2O_2 含量分别较 CK 增加 $14.49\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $4.43\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。说明盐胁迫下两品种均有活性氧大量积累,但‘四倍体矮脚黄’大量积累

H_2O_2 , 而‘改良 605’积累的 H_2O_2 少,更偏向积累 O_2^- 。盐胁迫下两品种 SOD、POD 和 CAT 三种保护酶活性均较 CK 降低,与 CK 相比,‘四倍体矮脚黄’盐处理组三种保护酶活性差异均不显著,而‘改良 605’盐处理三种保护酶活性显著低于 CK ($P < 0.05$)。盐处理下盐敏感品种保护酶活性显著降低,而 O_2^- 大量积累,是盐敏感品种受盐害较重的原因之一。

表 2 抗盐性不同的两品种小白菜渗透调节物质含量和细胞质膜透性

品种 Variety	脯氨酸含量 Proline content /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)		可溶性糖含量 Soluble sugar /($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)		Na^+/K^+ 比值 Na^+/K^+ ratio		相对电导率 Relative conductivity/%	
	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl
四倍体矮脚黄 Tetraploid Aijiaohuang	12.31	25.63 ^{**}	20.74	28.64 ^{**}	6.43	9.36	12.43	13.26
改良 605 Improvement 605	15.73	22.21 [*]	22.73	27.74 [*]	6.62	15.63 ^{**}	11.52	16.12 [*]

表 3 抗盐性不同的两品种小白菜根系活性氧代谢和保护酶活性

品种 Variety	SOD 活性 SOD activity /($\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)		POD 活性 POD activity /($\text{U}\cdot\text{min}^{-1}$)		CAT 活性 CAT activity /($\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)		O_2^- 产生速率 O_2^- production rate ($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)		H_2O_2 含量 H_2O_2 content /($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	
	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl
四倍体矮脚黄 Tetraploid Aijiaohuang	142.35	131.64	65.3	54.7	53.78	50.50	1.54	2.75	14.25 ^{**}	28.74
改良 605 Improvement 605	141.23 [*]	95.36	65.0 [*]	41.3	50.63 [*]	30.00	1.73 ^{**}	5.03	13.24	17.67

3 讨 论

植物根系是营养的直接吸收利用者,当植物遭遇胁迫时,植物根系首先感应并迅速发出信号,使整个植株对胁迫作出反应,同时根系形态结构、化学成分数量和生物质量也发生相应变化。植物根系对胁迫的生理抗性主要包括:根系渗透调节作用、保护酶系统、胁迫蛋白产生、膜结构与功能的变化以及根系合成生物活性物质等。本试验研究结果发现,盐处理下两品种小白菜根长、根系分支数、根毛长度和根毛直径等均较 CK 降低,盐敏感品种‘改良 605’各指标降低值远远高于耐盐品种‘四倍体矮脚黄’,说明盐敏感‘改良 605’根系生长和根毛发育受盐胁迫影响更为显著。盐胁迫导致小白菜根尖活性氧积累、保护酶活性增强、渗透调节物质含量提高、细胞质膜透性增大。与盐敏感品种‘改良 605’相比,耐盐性品种‘四倍体矮脚黄’根部表现出 K^+ 积累、 Na^+/K^+ 比值低、脯氨酸和可溶性糖含量高、保护酶活性强等。说明耐盐性品种通过积累更多的渗透调节物质、增强保护酶活性、选择性吸收 K^+ 来等提高耐盐能力。

Na^+ 积累于根中, K^+ 吸收量减少,过多的 Na^+ 在细胞内聚集会对植物产生毒害作用;而抗盐品种‘四倍体矮脚黄’在盐胁迫条件下对 K^+ 的选择性吸收能力强,维持根中 Na^+/K^+ 比相对恒定,以适应低水势的环境,这与崔云玲等^[5]对油葵的研究结果相似。前人研究表明,ROS 作为植物在应对生物和非生物胁迫中的一种积极信号,具有信使作用^[15],ROS 信号表达的升高可能有利于植物对胁迫环境的快速积极反应。本研究结果表明,盐胁迫下两品种 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量均较 CK 提高,其中,抗盐品种‘四倍体矮脚黄’ O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量分别较 CK 增加 $14.49\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $4.43\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,而盐敏感品种‘改良 605’仅分别增加了 $1.21\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $3.3\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。表明抗盐品种对盐胁迫能产生快速积极的反应。另外,抗性品种‘四倍体矮脚黄’在盐胁迫下较盐敏感品种‘改良 605’积累较多的 H_2O_2 ,而 H_2O_2 在植物根伸长以及根毛发生方面起重要信使作用^[16]。盐胁迫对植物伤害最大的是根毛发育,抗性品种积累 H_2O_2 的能力较强,可能是其根系和根毛发育较好的原因。至于 H_2O_2 如何调节小白菜根毛分化有待于进一步研究。

天达到高峰的部分原因。

(3) 在水肥一体化滴灌条件下, 尽管氮肥中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 易溶于水, 且易随水迁移, 但是滴灌是一种局部湿润灌溉, 所以灌水施肥后, 土壤中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要分布在湿润体内, 不会发生明显的氮素养分流失, 因此有利于提高氮肥的利用效率。

基于上述研究结果, 在实际生产中可以根据灌水施肥时段不同致使速效氮分布不一致的特点, 结合作物不同生育期根系的分布特点, 即当作物根系分布较浅时采用先水后肥的方式, 根系分布在土壤“中间层”时可选用中间 1/2 时段施肥, 先肥后水的滴灌方式更加适宜作物根系分布较深的情况, 使速效氮较好地集中在作物根系附近, 防止因氮素淋溶而降低氮肥利用率, 从而真正提高水肥利用效率。

参 考 文 献:

[1] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 等. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, (S1): 81-84.

[2] 张学军, 赵桂芳, 朱雯清, 等. 菜田土壤氮素淋失及其调控措施的研究进展[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 105-108.

[3] Ju X T, Kou C L, Zhang F S. Nitrogen balance and groundwater ni-

trate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environmental Pollution, 2006, 143(1): 117-125.

[4] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1996, 59(3): 223-231.

[5] Richter J, Roelcke M. The N-cycle as determined by intensive agriculture-examples from central Europe and China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57(1): 33-46.

[6] 姚宝林, 朱 珠, 孙 建, 等. 不同水肥条件下土壤 N、P、K 分布规律研究[J]. 中国农村水利水电, 2011, (10): 7-10.

[7] 李久生, 张建君, 任 理, 等. 滴灌点源施肥灌溉对土壤氮素分布影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5): 61-66.

[8] 杨梦娇, 吕 新, 侯振安, 等. 滴灌施肥条件下不同土层硝态氮的分布规律[J]. 新疆农业科学, 2013, (5): 875-881.

[9] 程东娟, 赵新宇, 费良军, 等. 膜孔灌施尿素条件下氮素转化和分布室内模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 58-62.

[10] 黄耀华, 王 侃, 杨剑虹, 等. 滴灌施肥条件下土壤水分和速效氮迁移分布规律[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 87-94.

[11] Goldberg S D, Rinot M, Karu N. Effect of trickle irrigation intervals on distribution and utilization of soil moisture in a vineyard[J]. Soil Sci Soc Am J, 1971, 35(1): 127-130.

[12] 侯红雨, 庞鸿宾, 齐学斌, 等. 温室滴灌条件下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化迁移规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, (1): 48-52.

(上接第 181 页)

参 考 文 献:

[1] 许祥明, 叶和春, 李国凤. 植物抗盐机理的研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(4): 379-387

[2] Cramer G R, Luchli A, Epstein E. Effects of NaCl and CaCl₂ on ion activities in complex nutrient solutions and root growth of cotton[J]. Plant Physiology, 1986, 81(3): 792-797.

[3] Jia Y B, Yang X E, Feng Y, et al. Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2008, 9(5): 427-434.

[4] Srinivasarao C H, Benzioni A, Eshel A, et al. Effects of salinity on root morphology and nutrient acquisition by Faba beans (*Vicia faba* L.)[J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 2004, 52(2): 184-191.

[5] 崔云玲, 王生录, 陈炳东, 等. 不同品种油菜对盐胁迫响应研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 1051-1058.

[6] 侯 晨. 早稻根对盐胁迫的生理生化响应及信号转导[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.

[7] 卢学琴, 胡尚连, 曹 颖, 等. NaCl 胁迫对剑麻幼苗根毛生长及其生理代谢的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(5): 104-

108.

[8] 徐芬芬, 叶利民, 夏晓蕾, 等. 人工海水胁迫对不同品种小白菜萌发和根系生长的影响[J]. 上饶师范学院学报, 2015, 35(6): 81-85.

[9] 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, 2003.

[10] 王宝山, 赵可夫. 小麦叶片中 Na^+ 、 K^+ 提取方法的比较[J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(1): 50-52.

[11] 李 敏, 王维华, 王 然, 等. 高温胁迫对菠菜叶片保护酶活性和脂膜透性的影响[J]. 园艺学报, 2004, 31(1): 99-100.

[12] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[M]. 植物生理学通讯, 1990, (6): 55-57.

[13] 刘 俊, 吕 波, 徐朗莱. 植物叶片中过氧化氢含量测定方法的改进[J]. 生物化学与生物物理进展, 2000, 27(5): 548-551.

[14] 刘 萍, 李明军. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[15] 杜秀敏, 殷文璇, 赵彦修, 等. 植物中活性氧的产生及清除机制[J]. 生物工程学报, 2001, 17: 121-125.

[16] Foreman J, Demidchik V, Bothmell J H F, et al. Reative oxygen species produced by NADPH oxidase regulated plant growth[J]. Nature, 422: 442-446.