

连作对马铃薯根系生物学特征和 叶片抗逆生理的影响

张文明^{1,2}, 邱慧珍^{1,2}, 刘 星^{1,2}, 张俊莲^{2,3,4}, 王 蒂^{2,3,4}

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070;
3. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对连作导致马铃薯生长发育受阻和产量下降等问题, 在甘肃省景泰县条山农场设置了不同连作年限的大田试验, 从植株自身形态和生理响应方面初探马铃薯连作障碍的可能机制。结果表明: 连作明显降低了马铃薯地上和地下部生物量, 增加了总根长、根表面积、根尖数和根冠比, 且随着连作年限的延长, 生物量下降越大, 而总根长、根表面积、根尖数和根冠比增加越大, 连作 5 年的总根长、根表面积、根尖数和根冠比比轮作分别增加了 39.35%、26.60%、31.67% 和 70.90%; 连作明显增加了块茎膨大期叶片 MDA 活性, 叶片 SOD、POD 和 CAT 的活性随连作年限表现为先上升后下降, 从连作 3 a 开始, 叶片 MDA 活性急剧增加, 而叶片 SOD、POD 和 CAT 的活性急剧下降; 连作 1 a 和 2 a 地块的块茎产量差异不显著, 但连作 3 a 后块茎产量较轮作下降了 45% 以上。由此可见, 在当地生态环境和栽培及品种条件下连作的阈值年限可能为 2 a, 根系生长增加是马铃薯应对连作逆境的主动性适应机制。

关键词: 马铃薯; 连作; 根系形态; 抗逆生理

中图分类号: S532.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)04-0020-04

Effect of continuous cropping on morphology and physiological characteristics of potato root and leaf

ZHANG Wen-ming^{1,2}, QIU Hui-zhen^{1,2}, LIU Xing^{1,2}, ZHANG Jun-lian^{2,3,4}, WANG Di^{2,3,4}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Gansu Province Key Laboratory of Arid land Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Gansu Province Key Laboratory of Crop Genetic & Germplasm Enhancement, Lanzhou, Gansu 730070, China;
4. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: This study aims to investigate the effect of continuous cropping on growth and yield of potato, employing field experiment conducted at Tiao Shan farm, Jing Tai country in 2010. The results showed that dry weight of root and shoot significantly reduced with the increasing years of continuous cropping. However, total root length, root surface area, root numbers and root-to-shoot ratio significantly increased. Compared with rotation cropping, total root length, root surface area, root numbers and root-to-shoot ratio increased by 39.35%, 26.60%, 31.67%, and 70.90% after five years of continuous cropping, respectively. The activity of leave MDA significantly increased, while those of SOD, POD and CAT increased at first for the early year but decreased sharply at later years of continuous cropping. After three years of continuous cropping, the activity of leave MDA significantly increased, while the activity of SOD, POD and CAT decreased sharply. Tuber yield had no significant difference between one year or two years of continuous cropping, while it decreased more than 45% after three years of continuous cropping. The result shows that the threshold of potato continuous cropping may be at least two years, when the positive effect of promoting root growth begins to emerge.

Keywords: potato; continuous cropping; root morphology; physiological resistance

马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 是世界公认的全价 食品, 是位居小麦、玉米和水稻之后的世界第四大粮

收稿日期: 2013-07-05

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200803031; 201103004); 国家马铃薯产业技术体系(CARS-10-P18); 甘肃省科技重大专项(1102NKDA025)

作者简介: 张文明(1980—), 男, 甘肃会宁人, 在读博士, 主要从事作物营养生态的教学与科研工作。E-mail: zhangwm@gsau.edu.cn。

通信作者: 邱慧珍(1961—), 女, 博士, 教授, 主要从事植物营养和营养生态的教学与科研工作。E-mail: hzqiu@gsau.edu.cn。

食作物^[1],是甘肃省第三大粮食作物。甘肃省是我国重要的马铃薯种薯和商品薯基地以及淀粉加工基地^[2-3],近3 a 马铃薯种植面积稳定在 $6.4 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 以上,连续10 a 种植面积稳居全国第二,总产量居全国第一。马铃薯生产已成为甘肃省带动农业和农村经济发展,促进农业增效、农民增收的战略性主导产业。

马铃薯是茄科作物,不抗连作,应避免重茬和迎茬种植^[4]。然而,随着马铃薯产业的快速发展和种植效益的不断提高,马铃薯连作现象十分普遍,连作障碍问题日益凸显,产量和品质大幅下降,严重阻碍了马铃薯产业的健康、高效和可持续发展。

目前,有关连作障碍的研究大多集中在设施蔬菜^[5-6]、瓜果^[7-8]、大豆^[9-11]和中药材^[12-14]等作物上,但近年来随着马铃薯产业的发展和连作问题的出现,马铃薯连作障碍的研究也越来越受到关注,而有关马铃薯连作障碍机理的研究大都集中在对土壤养分、土壤酶和土壤微生物等的变化方面,有关马铃薯连作后植株根系生物学特征和叶片抗逆生理方面的变化少见报道。为此,本研究通过在甘肃省景泰县布置马铃薯连作试验,从马铃薯植株本身出发,对不同连作年限的马铃薯进行了根系形态指标和叶片抗逆生理方面的研究,以期对马铃薯连作障碍的可能机理提供帮助。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大田试验于2010年4—8月在位于甘肃省中部沿黄灌区的白银市景泰县条山农场($103^{\circ}33' \sim 104^{\circ}43'E, 36^{\circ}43' \sim 37^{\circ}38'N$)进行。境内海拔1 274~3 321 m,属温带大陆性干旱气候,年均温 9.1°C ,无霜期141 d。年均降水量185.6 mm,年均蒸发量1 722.8 mm,年均日照时数2 713 h,全县光热资源丰富,日照百分率62%,太阳年均辐射量 $618.1 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 年均活动积温3 614.8 $^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温3 038 $^{\circ}\text{C}$ 。供试土壤为灰钙土,有机质 $10.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.71 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $193 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 8.08(水土比5:1)。当地水源充足,农业灌溉条件良好。

1.2 试验设计

在条山农场马铃薯种植区域内选择不同连作年限的相邻地块进行田间试验,以前茬为玉米的轮作地块为对照(用 L_0 表示),其余依次为连作1年(L_1)、2年(L_2)、3年(L_3)、4年(L_4)和5年(L_5)。所选地块地势平坦、肥力均匀。每处理3次重复,小区面

积 $9 \text{ m} \times 6.1 \text{ m}$,采用宽垄双行覆膜种植,垄宽1.35 m,行距70 cm,株距17 cm,种植密度 $84 075 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。播种、施肥和覆膜均采用机械化一次完成。不施有机肥,氮肥用量为 $210 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,N:P₂O₅:K₂O=1.4:1.0:2.0,化肥用15-15-15的复合肥、尿素和硫酸钾。所有化肥均在播种时一次性基施,田间管理措施同当地大田。4月25日播种,播种前一天切种薯,并用高锰酸钾浸泡消毒,8月25日收获。供试品种为当地主栽的加工型马铃薯品种“大西洋”,由条山农场提供。

1.3 样品采集

在马铃薯产量形成的关键时期——块茎膨大期(7月30日)采集植株样品,每小区15株,用铁锹在尽量不破坏根系的前提下将植株整株挖出,用剪刀将根系剪下并冲洗干净,将地上和地下部分别装入袋中带回实验室用于根系形态指标和干物质的测定;同时在各小区采集马铃薯主茎上倒四叶的顶小叶100片左右,放入冰盒,迅速带回实验室,用于抗逆酶活性的测定。成熟期对各地块块茎产量进行实测计产。

1.4 测定项目与方法

根系形态指标用加拿大产 Win RHIZOTM 2009 根系扫描与分析系统测定;干物质测定,在 105°C 下烘干,然后称重;叶片超氧化物歧化酶(SOD)采用NBT还原法测定;过氧化物酶(POD)采用NBT还原法测定;过氧化氢酶(CAT)采用紫外吸收法测定;丙二醛(MDA)含量采用TCA-TBA方法测定^[15]。

1.5 数据处理

采用Excel 2003和SPSS 13.0软件进行数据统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 连作对马铃薯根冠比和根系形态的影响

2.1.1 连作对马铃薯根系形态的影响 由表1可以看出,连作明显增加了马铃薯总根长、根表面积和根尖数,且随着连作年限的延长,马铃薯总根长、根表面积和根尖数越大。相对于轮作,连作5 a的马铃薯总根长、根表面积和根尖数分别增加了39.35%、26.6%和31.67%。连作对根直径和根体积没有显著影响,但连作后呈现根直径变细、根体积增大的趋势。这可能是在连作情况下,马铃薯植株为了应对逆境状况并维持自身正常的生长发育和生理代谢,需要从土体中吸收更多的营养物质,进而“刺激”了植株根系的发育,这应该是马铃薯植株在连作条件下的一个主动形态学适应机制。

表 1 连作对马铃薯根系形态的影响

Table 1 Effect of potato continuous cropping on root morphology

处理 Treatments	总根长 Total root length /cm	根表面积 Root surface area /cm ²	根直径 Root diameter /mm	根体积 Root volume /cm ³	根尖数 Root numbers per plant
L ₀	388.50b	160.76b	1.35a	5.41a	1904b
L ₁	465.83ab	174.62ab	1.206a	5.31a	2185ab
L ₂	464.00ab	182.65ab	1.31a	5.90a	2235ab
L ₃	466.62ab	189.96ab	1.25a	6.08a	2322ab
L ₄	477.50ab	192.02ab	1.31a	6.30a	2316ab
L ₅	541.38a	203.54a	1.23a	6.22a	2507a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

Notes: Different small letters in the same column indicated significant difference at $P < 0.05$ level. The same bellow.

2.1.2 连作对马铃薯根冠比的影响 由表 2 可以看出,相对于轮作,连作明显降低了马铃薯地上和地下部生物量,连作年限越长,生物量下降越大;连作条件下植株地上部干重的下降比例明显大于地下部干重的下降比例,从而导致连作条件下马铃薯根冠比的增大,且连作年限越长,根冠比越大,与轮作相比,连作 5 a 的根冠比增加了 70.9%。这说明在连作逆境条件下,根系总体的生长受到抑制,导致根系干物质积累的下降,从而根系对养分的吸收减少,进而影响了地上部干物质的积累;而地上干物质的减少影响光合产物的形成和向下运输,从而反过来影响根系的发育。此外,从前面根系形态的结果得知,根系为了应对连作逆境,为了吸收更多的养分供地上部生长,进而“刺激”了根系的发育,从而导致根冠比增大。因此,根冠比增大也是马铃薯在连作条件下的主动形态学适应,但根冠比过大,根系消耗大量光合产物,使光合产物向生殖器官的投入减少,影响地上部生物学产量和经济产量的形成,这与后面马铃薯产量的结果相一致。

表 2 连作对马铃薯根冠比的影响

Table 2 Effect of potato continuous cropping on the ratio of root to shoot

处理 Treatments	地下部干重 /(g·株 ⁻¹) Dry weight of root/(g·plant ⁻¹)	地上部干重 /(g·株 ⁻¹) Dry weight of shoot/(g·plant ⁻¹)	根冠比 The ratio of root to shoot
L ₀	3.37a	36.85a	0.0915
L ₁	2.98ab	32.07b	0.0929
L ₂	2.65bc	25.07c	0.1057
L ₃	2.38c	21.61d	0.1101
L ₄	2.23c	19.63e	0.1136
L ₅	2.77bc	17.71f	0.1564

2.2 连作对马铃薯植株抗逆生理的影响

由表 3 可以看出,连作增加了叶片 MDA 活性,且随着连作年限的延长而增加,并且从连作 3 年开始,叶片 MDA 活性急剧增加,相对于连作 2 a,连作 3、4、5 a 的叶片 MDA 活性分别增加了 2.13、2.50 倍和 2.88 倍。这说明连作后膜脂过氧化作用加强,细胞膜系统结构和功能出现不同程度的伤害,连作 1 a 和 2 a 受害程度较轻,而连作 3 a 以后受害程度明显增加。

表 3 连作对马铃薯叶片生理活性的影响

Table 3 Effect of potato continuous cropping on leaves physiological activity

处理 Treatments	超氧化物歧化酶 SOD/(U·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	过氧化物酶 POD/(μg·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	过氧化氢酶 CAT/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	丙二醛 MDA /(μmol·g ⁻¹)
L ₀	114.32c	246.58b	40.18a	2.49c
L ₁	137.36b	272.50ab	37.23a	2.99c
L ₂	159.21a	344.33a	39.67a	3.21c
L ₃	74.62d	210.50c	14.00b	10.06b
L ₄	47.59e	159.17d	11.79b	11.23ab
L ₅	48.64e	165.34d	10.78b	12.46a

叶片 SOD、POD 和 CAT 随连作年限增长表现为先上升后下降的趋势,这与赵晓萌^[15]等在西洋参上的研究结果基本一致。马铃薯在连作 2 a 时叶片 SOD、POD 和 CAT 的活性达到高峰,与连作 2 a 相比,从连作 3 a 开始叶片 SOD、POD 和 CAT 的活性急剧下降。这是由于随着活性氧的产生,在能控制的范围内,植物体内防御膜脂过氧化反应的保护酶会相应增加,维持体内活性氧的平衡,保护膜结构的稳定性^[16-17];但当质膜遭受活性氧不可逆损伤后,细胞内的酶结构遭到破坏,活性随之降低,从而失去保护细胞的作用^[18],这从叶片 MDA 活性的变化也可以说明这一点。

2.3 连作对马铃薯产量的影响

不同连作年限下块茎产量如图 1 所示。

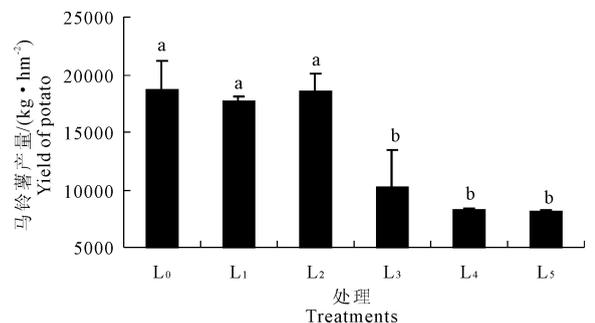


图 1 不同连作年限马铃薯产量的变化

Fig. 1 Yields of potato under different continuous cropping years

同 L_0 相比, L_1 和 L_2 地块的块茎产量差异不显著,但从 L_3 开始,块茎产量较 L_0 出现显著的下降,其降幅在 L_3 、 L_4 和 L_5 地块分别高达 45.40%、56.23%和 56.44%。这与前面抗逆生理指标的变化相对应,由此也可以推测,连作 2 a 可能是在当地生态环境和栽培及品种条件下马铃薯连作的阈值年限。

3 讨论

活性氧伤害是引起植物叶片衰老的原因之一,导致膜的损伤和破坏,引起膜脂过氧化^[16,19-20]。植物可通过多种途径产生活性氧,同时细胞内也存在清除这些活性氧的多种途径^[21],其中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)等是活性氧清除系统的重要保护酶^[22-23],它们能有效地阻止高浓度氧的积累,防止膜脂的过氧化作用,延缓植物的衰老,使植物维持正常的生长和发育^[18]。MDA 是膜脂过氧化作用的主要产物之一,其含量可表示细胞膜系统结构和功能受害的程度^[17,24]。本试验结果表明,连作明显增加了块茎膨大期叶片 MDA 活性,并且从连作 3 年开始,叶片 MDA 活性急剧增加;叶片 SOD、POD 和 CAT 随连作年限表现为先上升后下降的趋势,且从连作 3 a 开始叶片 SOD、POD 和 CAT 的活性急剧下降。这说明连作使马铃薯体内产生了活性氧,在连作 3 a 以下,马铃薯体内防御膜脂过氧化反应的保护酶相应增加,维持体内活性氧的平衡,保护膜结构的稳定性;但当连作超过 3 a 以后,由于质膜遭受活性氧不可逆损伤,细胞内的酶结构遭到破坏,活性随之降低,从而失去保护细胞的作用。以上结果表明,在当地生态环境和栽培及品种条件下马铃薯连作的阈值年限可能为 2 a,这与本试验中马铃薯产量的结果相吻合,当连作年限超过 2 a 后,马铃薯产量下降了 45% 以上。

植物的地上部分和地下部分由于功能和所处的环境不同,在营养物质的供求关系上既相互依赖又相互影响,根冠比是反映根系与地上部生长和干物质积累协调状况的重要指标^[25]。植物根系的形态特征,如根的长度、根半径、根毛和侧根的数量等,对吸收和利用土壤养分起着十分重要的作用^[26],根分枝多、半径小、根毛多等良好的根系发育和理想的根系参数是作物获得高产的必要保障^[27-28]。本试验结果表明,连作严重抑制了马铃薯地上和地下部干物质的积累,这说明当马铃薯处于连作逆境条件下,降低了对养分的吸收,从而导致干物质积累的下降;

但是根系为了应对连作逆境,为了吸收更多的养分供地上部生长,进而“刺激”了根系的发育,从而导致根冠比增大。本试验中根系总根长、根表面积、根尖数和根冠比随连作年限延长而增加的结果验证了这一点。因此,根冠比增大和根系形态的改变是马铃薯在连作条件下的主动形态学适应,但是马铃薯通过调整自身地上部和根系的干物质分配和形态变化而主动应对连作逆境是以消耗碳骨架为代价的,这种自身干物质的过度消耗可能是造成连作条件下植株生长发育和产量严重下降的重要原因之一。

参考文献:

- [1] 谢从华. 马铃薯产业的现状与发展[J]. 华中农业大学学报, 2012,97(1):1-4.
- [2] 吴正强,岳云,赵小文,等. 甘肃省马铃薯产业发展研究[J]. 中国农业资源与区划, 2008,32(6):67-72.
- [3] 何三信,文国宏,王一航,等. 甘肃省马铃薯产业现状及提升措施建议[J]. 中国马铃薯, 2010,24(1):54-57.
- [4] 王树安. 作物栽培学理论[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 239.
- [5] 王芳,王敬国. 连作对茄子苗期生长的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2005,13(1):79-81.
- [6] 吴凤芝,王学征. 设施黄瓜连作和轮作中土壤微生物群落多样性的变化及其与产量品质的关系[J]. 中国农业科学, 2007,40(10):2274-2280.
- [7] 李坤,郭修武,郭印山,等. 葡萄根系浸提液的化感作用[J]. 应用生态学报, 2010,21(7):1779-1784.
- [8] 赵萌,李敏,王森焱,等. 西瓜连作对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J]. 微生物学通报, 2008,35(8):1251-1254.
- [9] 苗淑杰,乔云发,韩晓增. 大豆连作障碍的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2007,15(3):203-206.
- [10] 阮维斌,王敬国,张福锁. 连作障碍因素对大豆养分吸收和固氮作用的影响[J]. 生态学报, 2003,23(1):22-29.
- [11] 李春格,李晓鸣,王敬国. 大豆连作对土体和根际微生物群落功能的影响[J]. 生态学报, 2006,26(4):1144-1149.
- [12] 张重义,陈慧,杨艳会,等. 连作对地黄根际土壤细菌群落多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2010,21(11):2843-2848.
- [13] 吴宗伟,王明道,刘新育,等. 重茬地黄土壤酚酸的动态积累及其对地黄生长的影响[J]. 生态学杂志, 2009,28(4):660-664.
- [14] 郝慧荣,李振方,熊君. 连作怀牛膝根际土壤微生物区系及酶活性的变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2008,16(2):307-311.
- [15] 赵晓萌,张雪松,祁建军,等. 连作对西洋参根系生长及酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2009,25(13):103-107.
- [16] Matters G L. Synthesis of isozymes of super oxide dismutase in maize leaves in response to O_3 , SO_2 and elevated O_2 [J]. Experimental Botany, 1986,38:842-852.
- [17] 吴凤芝,黄彩红,赵凤艳. 酚酸类物质对黄瓜幼苗生长及保护酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2002,35(7):821-825.

- [33] Ochoa-Alfaro A E, Rodrí'guez-Kessler M, Pe'rez-Morales M B. Functional characterization of an acidic SK3 dehydrin isolated from an *Opuntia streptacantha* cDNA library [J]. *Planta*, 2012, 235: 565-578.
- [34] Wang Y Z, Wang H Z, Li R F, et al. Expression of a SK2-type dehydrin gene from *Populus euphratica* in a *Populus tremula* × *Populus alba* hybrid increased drought tolerance [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(46): 9225-9232.
- [35] Chung E, Cho C W, Kim K, et al. Ectopic expression of soybean KS-type dehydrin, SLT166 and SLT1629 conferred tolerance against osmotic and metal stresses of *Escherichia coli* and *Arabidopsis* [J]. *Journal of plant biotechnology*, 2009, 36(1): 38-44.
- [36] Park S C, Kim Y H, Jeong J C, et al. Sweet potato late embryogenesis abundant 14 (*lblea14*) gene influences lignification and increases osmotic-and salt stress-tolerance of transgenic calli [J]. *Planta*, 2011, 233(3): 621-634.
- [37] Xing X, Liu Y K, Kong X P, et al. Overexpression of a maize dehydrin gene, *ZmDHN2b*, in tobacco enhances tolerance to low temperature [J]. *Plant Growth Regulation*, 2011, 65(1): 109-118.
- [38] Xie C, Zhang R X, Qu Y T, et al. Overexpression of MtCAS31 enhances drought tolerance in transgenic *Arabidopsis* by reducing stomatal density [J]. *New Phytologist*, 2012, 195(1): 124-135.
- [39] Arora R, Peng Y H, Karlson D, et al. Physiology of cold-hardening in *Rhododendron*: Role of a dehydrin protein from *R. catawbiense* (*RcDhn5*) in cryoprotection and improving freezing tolerance [J]. *Journal American Rhododendron Society*, 2008, SUMMER: 153-158.
- [40] Muñoz-Mayor A, Pineda B, Garcia-Abellán JO, et al. Overexpression of dehydrin tas14 gene improves the osmotic stress imposed by drought and salinity in tomato [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169, 5(15): 459-468.
- [41] Iturriaga G, Schneider K, Salamini F, et al. Expression of desiccation-related proteins from the resurrection plant *Craterostigma plantagineum* in transgenic tobacco [J]. *Plant Molecular Biology*, 1992, 20: 555-558.
- [42] Lång V and Palva E T. The expression of a rab-related gene, rab18, is induced by abscisic acid during the cold acclimation process of *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh [J]. *Plant Molecular Biology*, 1992, 20: 951-962.
- [43] Shen Y, Tang M J, Hu Y L, et al. Isolation and characterization of a dehydrin-like gene from drought-tolerant *Boea crassifolia* [J]. *Plant science*, 2004, 166: 1167-1175.
- [44] Rouse D T, Marotta R, Parish R W. Promoter and expression studies on an *Arabidopsis thaliana* dehydrin gene [J]. *FEBS Letters*, 1996, 381: 252-256.
- [45] Sun X, Xi D H, Feng H, et al. The dual effects of salicylic acid on dehydrin accumulation in water-stressed barley seedlings [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, 56: 348-354.
- [46] Turco E, Close T J, Fenton R D, et al. Synthesis of dehydrin-like proteins in *Quercus ilex* L. and *Quercus cerris* L. seedlings subjected to water stress and infection with *Phytophthora cinnamomi* [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2004, 65: 137-144.
- [47] Chini A, Fonseca S, Fernandez G, et al. The JAZ family of repressors is the missing link in jasmonate signalling [J]. *Nature*, 2007, 448: 666-671.
- [48] Campos F, Zamudio F, Covarrubias A A. Two different late embryogenesis abundant proteins from *Arabidopsis thaliana* contain specific domains that inhibit *Escherichia coli* growth [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2006, 342: 406-413.
- [49] Zhai C, Lan J, Wang H, et al. Rice dehydrin K-segment have in vitro antibacterial activity [J]. *Biochemistry (Moscow)*, 2011, 76: 645-650.
- [50] Hara M, Fujinaga M, Kuboi T. Radical scavenging activity and oxidative modification of citrus dehydrin [J]. *Plant Physiology Biochemistry*, 2004, 42: 657-662.
- [51] Hara M, Kondo M, Kato T. A KS-type dehydrin and its related domains reduce Cu-promoted radical generation and the histidine residues contribute to the radical-reducing activities [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(6): 1615-1624.

(上接第 23 页)

- [18] 杜秀敏, 殷文璇, 赵彦修. 植物中活性氧的产生及清除机制 [J]. *生物工程学报*, 2001, 17(2): 121-124.
- [19] 郭泽建, 李德葆. 活性氧与植物抗病性 [J]. *植物学报*, 2000, 42(9): 881-891.
- [20] Tiffany L Weir, Sang-Wook Park, Jorge M Vivanco. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2004, (7): 472-479.
- [21] 杨淑慎, 高俊凤. 活性氧、自由基与植物的衰老 [J]. *西北植物学报*, 2001, 21(2): 215-220.
- [22] 姚月俊, 姚延涛. 华北落叶松体内超氧化物歧化酶初探 [J]. *山西农业大学学报*, 2008, 28(1): 40-44.
- [23] 魏梅红. 甲醛对芦荟 POD 酶活性的影响 [J]. *福建师范大学学报* (自然科学版), 2007, 23(4): 133-136.
- [24] 刘文革. 冷锻炼对不同倍性西瓜幼苗 SOD、POD 活性及 MDA 含量的影响 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(4): 578-582.
- [25] 任书杰, 张雷明, 张岁岐, 等. 氮素营养对小麦根冠协调生长的调控 [J]. *西北植物学报*, 2003, 23(3): 395-400.
- [26] 程建峰, 潘晓云, 刘宜柏. 作物根系研究法最新进展 [J]. *江西农业学*, 1999, 11(4): 55-59.
- [27] 杨长明, 杨林章, 欧阳竹. 不同养分与水分管理对水稻植株根系形态及其活力的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2004, 10(12): 82-85.
- [28] 贺德先, 张均, 杨青华, 等. 作物根毛研究进展 [J]. *河南农业科学*, 2006, (8): 5-8.