

谢斌,吴文良,郭岩彬,等. 作物富硒研究进展[J]. 江苏农业科学,2014,42(1):15-18.

作物富硒研究进展

谢斌¹, 吴文良¹, 郭岩彬¹, 孙宏杰², 焦子伟³

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 山东淄博市博山区农业综合开发办公室, 山东淄博 255200;

3. 伊犁师范学院化学与生物科学学院, 新疆伊宁 835000)

摘要:硒是人体必需的微量元素,人体中的硒主要来源于作物。对作物富硒,提高作物及人体中硒含量的研究成为人体硒营养改善的一个重要领域和热点。本文从硒的施入方式和不同作物富硒差异上概述了各种作物富硒的研究进展,并对其根源性因素——土壤因素对作物富硒影响的研究进行了综述。

关键词:作物;富硒;影响因素

中图分类号:S-1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2014)01-0015-03

硒作为一种微量元素于1817年被瑞典科学家 Berlius 发现并命名^[1]。硒具有抗癌、抗氧化、增强机体免疫力、防治心血管疾病、保肝及解毒排毒等作用^[2]。中国是个缺硒国家,1982年在《营养学报》上首次公开披露我国72%的地区属于缺硒或低硒地区,2/3的人口存在不同程度的硒摄入不足^[3]。根据GB 13105—1991《食品中硒限量卫生标准》(以Se计):粮食(成品粮)≤0.3 mg/kg,豆类及制品≤0.3 mg/kg,蔬菜(包括薯类)≤0.1 mg/kg,水果≤0.05 mg/kg,肉类(畜、禽)≤0.5 mg/kg,肾≤3.0 mg/kg,鱼类≤1.0 mg/kg,蛋类≤0.5 mg/kg,鲜奶类≤0.03 mg/kg,奶粉≤0.15 mg/kg^[4]。成年人膳食硒最低需要量为22 μg/d^[5],生理需要量约为40 μg/d^[6]。而对于一般地区居民来说,膳食硒最高安全摄入量为400 μg/d^[7]。因此,农作物对硒的吸收和富集,以及硒对植物生物学效应的研究引起了广泛重视^[8-9]。近年来,越来越多的研究表明,依据植物对硒吸收积累的营养特性,通过农业技术措施,经过食物链系统,由植物吸收转化,调节硒的含量、价态以及形态的变化,促进硒从土壤向食物链的迁移,对于解决缺硒地区硒营养问题、提高人类健康水平具有重要意义^[9]。

1 各种作物富硒研究进展

1.1 不同施入方式影响作物富硒能力

1.1.1 自然富硒 我国大部分地区存在不同程度的缺硒,也存在一些富含硒的地区。湖北省恩施州是我国迄今发现的第一个高硒区,被誉为“世界硒都”,具有世界上唯一独立的硒矿床。在湖北恩施烟区土壤硒有98%以上的区域处于“足”和“富”以上的水平,平均含量达到0.63 mg/kg,在恩施的土壤富硒区烟叶硒含量与土壤硒含量表现出极显著的正相关^[10-11],且恩施州植烟区烟叶硒含量平均为0.22 mg/kg,高

于我国其他烟区^[12]。陕西省紫阳县是我国已发现的第二个高硒区,研究发现紫阳的茶叶中约有70%达到了富硒水平^[13]。2003—2006年,江西省首次发现在丰城市含有大面积富硒土壤,面积达524.7 km²,硒含量0.4~0.9 μg/g,平均含量约0.538 μg/g^[14];2007年以来,丰城市利用当地丰富的硒资源,全力打造中国生态硒谷品牌及生态富硒产业集群,走出了一条具有地方特色的农业产业道路^[15]。其他的如贵州开阳、安徽石台等地土壤中也含有较多的硒^[16]。自然富硒受到自然界中天然硒含量以及土壤理化性质的限制,但自然富硒符合自然规律,能保持自然界的生态平衡^[17]。

1.1.2 人工富硒 人工富硒一般是以亚硒酸盐或硒酸盐的形式将硒施入到作物中去,被作物吸收的效率较高。目前人工富硒方法主要有叶面施硒、土壤施硒、硒液浸种等^[18]。对冬小麦喷施硒酸钠溶液发现,小麦中的全硒含量与施硒酸钠的量呈线性关系。此外,小麦秸秆硒含量、小麦籽粒硒含量与施硒量3者间互呈线性关系^[19]。贾朝佩通过对小白菜、生菜等几种作物进行盆栽试验,以研究土壤中加入外源硒和叶面喷施外源硒2种方式下作物对硒的吸收效果,发现叶面喷施外源硒比土壤中加入外源硒更有利于作物硒的吸收^[20]。硒液浸种试验表明,低浓度的硒液浸种利于种子的发芽,高浓度的硒液浸种抑制种子的萌发,如对玉米进行硒液浸种,1.5 mg/kg的硒液最有利于玉米种子的发芽^[21],而最利于番茄、芸豆种子发芽的硒液浓度分别是4 mg/L和15.0 mg/L^[22-23]。罗杰等通过盆栽试验,发现人工施硒能短时间内有效提高水稻中的硒含量,使其接近甚至超过自然富硒土壤区所产水稻的硒含量^[17]。但人工施用的含硒肥料会打破自然界的化学平衡,影响水稻生理期,同时长期使用可能造成环境问题。

1.2 不同作物类型吸收硒的能力不同

根据植物对硒的吸收能力的差异,可将植物分为硒积累植物和硒非积累植物两大类^[24]。植物中的硒含量差异很大,其范围从不足1 mg/kg到几千mg/kg不等^[25-26]。不同类型的植物对土壤硒的吸收效率不同,植物对土壤中硒的吸收系数(吸收系数=植物全硒/土壤全硒)大约在10%~50%之间^[25]。据苏琪等研究表明,农作物为低硒植物,其含硒量是:油菜籽>大豆>小麦>稻谷>蚕豆^[27]。蔬菜作物对硒的吸收能

收稿日期:2013-05-12

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(编号:201303106)。

作者简介:谢斌(1989—),男,江西宜春人,硕士,主要从事作物富硒研究。E-mail:tonyk138xb@163.com。

通讯作者:焦子伟(1973—),男,河南淮阳人,博士,副教授,主要从事微生物促生机理及绿色有机农业综合调控研究。E-mail:741285332@qq.com。

力相对要高一些,但对于不同种类的蔬菜,对硒的吸收均存在一定的差异,不同类型蔬菜可食用部分富硒能力依次为:葱蒜类>白菜类>绿叶菜类>豆类>瓜类>薯芋类>茄果类^[28]。

1.3 粮食作物富硒

在小麦拔节期、灌浆初期和灌浆中期喷施硒液肥,小麦籽粒中硒含量能比对照高3倍左右^[29]。唐玉霞等建议在小麦抽穗期至灌浆初期进行叶面喷施亚硒酸钠溶液,喷硒浓度以40 mg/L为宜,用液量750 kg/hm²^[30]。张洋研究表明,硒肥处理的春小麦收获后各器官硒浓度大小依次为根>叶>籽粒>茎,硒吸收累积量大小依次为籽粒>茎>叶>根,且硒肥处理能促进不同品种春小麦产量的提高^[31]。在黑龙江省低硒地区对小麦、玉米和大豆进行叶面喷硒,籽粒中含硒量的提高幅度与喷硒量呈正相关,叶面喷硒30 g/hm²即可使小麦、玉米和大豆籽粒的硒含量满足低硒地区居民补硒的需要^[32]。张晶等的研究表明,叶面喷硒可明显提高水稻中的含硒量,大米硒含量随喷硒浓度的增加而增加,水稻叶、茎、稻谷、大米的硒含量比对照分别增加了544.7%、842.8%、1575.0%、4466.7%,喷施100 mg/kg浓度的亚硒酸钠可满足富硒大米的要求^[33]。

1.4 蔬菜富硒

对蔬菜作物在不同生长时期喷硒能产生不同的效果。对青椒、茄子、黄瓜、生菜和小葱5种蔬菜进行叶面喷硒,喷硒效果依次为结果期>开花期>苗期^[34]。叶菜类蔬菜对叶面喷施的硒能直接吸收,而果菜类蔬菜则由叶片吸收后再向果实中转移。孙发仁对6种蔬菜喷施不同浓度的硒,硒含量依次为小白菜>油菜>西葫芦>番茄>芸豆>黄瓜,叶菜硒含量提高幅度较大^[35]。王晋民等以青花菜、胡萝卜和大蒜为研究对象,发现既有利于有机硒富集又不致产量降低的Na₂SeO₃叶面喷施浓度以不超过0.5 mg/L为宜^[36]。冯两蕊等对生菜按一定浓度梯度喷施硒溶液的研究表明,喷施硒的浓度与生菜的富硒量呈正相关,硒溶液对生菜的产量和品质也起到一定的促进作用^[37]。宋满坡等以叶面施硒和土壤施硒2种方式处理芹菜,芹菜叶面喷施硒浓度为60 mg/L、土壤施用硒肥为0.01 g/m²时,对芹菜的生物产量和硒含量促进作用最大^[38]。小白菜和萝卜的含硒量随土壤施硒量的增加而显著增加,二者呈线性关系。对番茄叶面喷施亚硒酸钠,番茄果实第一次采收时含硒量最高,随采收时间延后,番茄的含硒量也逐渐降低^[39]。

1.5 其他作物富硒

除了粮食作物和蔬菜,我国还有许多其他作物的富硒技术研究,如富硒茶、富硒烟等。许春霞等在茶叶新梢生长期间喷施150~180 mg/kg的亚硒酸钠水溶液,5 d后即可采茶,其成品茶叶含硒量可达富硒茶的标准^[40]。恩施烟区土壤基本达到富硒水平,且烟叶中硒含量上部叶最高为0.18 mg/kg,中部叶和下部叶基本相当,为0.17 mg/kg^[10]。大田条件下,对猕猴桃施硒,猕猴桃各部分的硒含量显著升高,硒在猕猴桃中的累积顺序为根>叶>花>果实^[41]。

2 影响作物富硒的因素

土壤理化性质影响硒在土壤中的存在形态,从而影响作物对硒的吸收^[42]。土壤中的硒以不同的形态存在,主要包括

硒酸盐(VI)、亚硒酸盐(IV)、元素硒(0)及有机态硒。土壤全硒代表土壤中各种形态硒的总和,只能作为土壤硒的容量指标。土壤中的有效态硒才是能够被植物直接利用的硒,这部分硒包括Se(VI)、水溶性Se(IV)和极少部分的有机态硒^[43]。在缺硒地带,土壤中的硒主要以非有效态的形式存在,而高硒土壤中则含有较高含量的有效态硒。土壤中有效硒而非全硒是决定植物中硒水平的关键^[44]。研究发现,几种不同形态的硒的生物利用率分别为:亚硒酸钠100%、硒酸钠73.9%、硒化钠41.9%、元素硒7.4%^[45]。土壤有效硒与土壤全硒、土壤pH值、土壤阳离子交换量(CEC)、土壤有机质等土壤理化性质有关^[43,46]。

2.1 土壤全硒

土壤全硒是影响土壤有效硒的决定性因素。土壤有效硒即为土壤可提取的硒,土壤全硒与土壤可提取硒呈线性关系,如陕西紫阳县土壤全硒与土壤有效硒呈正相关关系($r^2=0.9933$)^[3,47]。恩施土壤富硒区烟叶硒含量与土壤全硒含量相关性显著;土壤低硒区烟叶硒含量与土壤全硒含量相关性不显著。表明低硒土壤中有效硒的含量低,而富硒土壤中有效硒含量较高,且与土壤全硒呈正相关关系^[11,48]。

2.2 土壤pH值

土壤中硒的形态与土壤pH值有密切关系。在酸性土壤中,土壤中的硒难以被植物利用;在碱性土壤中,土壤中的亚硒酸盐易被氧化为硒酸盐,这种水溶性硒可迅速被植物利用^[49]。pH值对作物硒吸收的影响程度与土壤类型有关,如在沙壤土中,不同pH值对作物的硒吸收影响显著,在黏土中,不同pH值对作物的硒吸收没有显著的影响^[50-51]。

2.3 土壤阳离子交换量(CEC)

CEC是影响土壤有效硒的重要因素,它不仅影响土壤缓冲能力的大小,也是评价土壤保肥能力、改良土壤和合理施肥的重要依据^[48,52]。土壤有效硒随CEC的增加而增加^[53]。赵妍等研究表明,茶园土壤有效硒含量与CEC存在极显著的正相关关系^[52],也说明了CEC大的土壤其有效硒含量也高。

2.4 土壤有机质

土壤有机质对土壤中的硒有吸持作用,硒在表层土壤中的富集与含碳物质的关系密切。宋明义等将有机质与硒的相关关系作图,发现硒与有机质的线性关系良好($r=0.550$),表明土壤中有机质对硒元素具有强烈的吸附与固定作用^[54]。但土壤中的有机质大量积累时将降低硒对作物的有效性^[49-50]。土壤有机质也能与土壤pH值共同作用影响着土壤中硒的有效性,当土壤中的有机质含量高而pH值低,或者有机质含量低而pH值高时,土壤中硒的有效性较高^[55]。

2.5 其他因素

其他因素如母质类型是导致土壤含硒量高低的主要原因。生物、气候、地形等对土壤含硒量的消长也起到一定的作用^[56]。土壤有效硒与土壤腐殖质也有一定的关系。曹静祥等发现,土壤水溶性硒与土壤腐殖质呈负相关,这是由于腐殖质与硒的拮抗作用,阻碍了亚硒酸盐进一步氧化成水溶性硒酸盐^[57]。

3 展望

近年来,作物富硒的研究取得了较大进展,明确了不同作

物富硒能力的差异及硒施入方式对作物富硒的影响,但仍需作进一步深入研究。今后应加强在作物对硒吸收规律的研究,侧重研究土壤硒尤其是有效硒在土壤-植物系统中转化、迁移机理,有助于作物富硒技术研究,以提高低硒地区作物对硒的利用效率。此外,硒在植物上的生理功能是多样的,作物富硒不仅影响其硒含量,还会影响到作物的生长发育、产量和品质等。依据生物技术、育种技术、食品加工等相关技术,应对富硒品种选育、优质高产关键技术攻关及相关富硒产品开发等方面加以研究,以利于作物富硒研究不断深入和富硒产业持续发展。

参考文献:

- [1]王云,魏复盛.土壤环境元素化学[M].北京:中国环境出版社,1995.
- [2]史丽英,罗世伟.微量元素硒的研究进展[J].襄樊职业技术学院学报,2005,4(1):108-110.
- [3]谭见安,郑达侯,侯少范,等.克山病与自然环境和硒营养背景[J].营养学报,1982,4(3):175-182.
- [4]GB13105—1991食品中硒限量卫生标准[S].北京:中国标准出版社,1991.
- [5]Taylor J B, Marchello M J, Finley J W, et al. Nutritive value and display-life attributes of selenium-enriched beef-muscle foods[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2008, 21(2): 183-186.
- [6]杨光圻,周瑞华,荫士安,等.我国人民硒需要量的研究[J].卫生研究,1985,14(5):24.
- [7]杨光圻,顾履珍.微量元素硒的人体需要量和安全摄入量范围[J].生理科学进展,1992,23(2):184-186.
- [8]吴永尧,彭振坤,罗泽民.植物对硒的吸收及其效应[J].湖北民族学院学报:自然科学版,1997,15(3):10-13.
- [9]徐文.硒的生物有效性及植物对硒的吸收[J].安徽农学通报,2009,15(23):46-47,67.
- [10]赵书军,陈红华,李锡宏,等.恩施烟区土壤硒分布特征及其与烟叶硒的关系[J].中国烟草科学,2011,32(21):63-66.
- [11]彭祥全,吴承亚.恩施高硒区硒源背景监测调查分析[J].微量元素与健康研究,2006,23(1):35-36,56.
- [12]黎妍妍,李锡宏,赵书军,等.恩施州植烟土壤及烟叶硒含量状况分析[J].中国烟草科学,2011,32(增刊1):67-75.
- [13]程良斌,梅紫青,黄隆富,等.紫阳茶含硒量的调查研究[J].茶叶科学,1991,11(1):63-66.
- [14]陈细发.对我市富硒产业发展的调查与研究[C]//宜春市纪念改革开放30周年理论研讨会论文集,2008:86-91.
- [15]吴文良,张征,卢勇,等.江西省丰城市“中国生态硒谷”创意产业的发展战略[J].农产品加工:创新版,2010(3):72-75.
- [16]彭祥全,陈小华,朱和绪,等.活化硒矿粉与农作物补硒[J].微量元素与健康研究,2009,26(6):59-62.
- [17]罗杰,温汉辉,吴丽霞,等.自然富硒与人工施硒肥的比较[J].中国农学报,2011,27(33):90-97.
- [18]Polona S, Marija O, Joze O, et al. Selenium uptake and species distribution in selenium-enriched bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds obtained by two different cultivations[J]. Eur Food Res Technol, 2007, 225: 233-237.
- [19]Martin R, Broadley, John A, et al. Selenium biofortification of high-yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilisation[J]. Plant Soil, 2010, 332: 5-18.
- [20]贾朝佩.作物对外源硒的吸收效果及外源硒对作物生物量的影响研究[D].合肥:安徽农业大学,2010.
- [21]张秀梅,孙效文,孙桂玲.硒对玉米发芽率和植株生长的影响[J].农业科技通讯,2005(8):18-19.
- [22]王玉凤,徐喧,孙其文.硒浸种对番茄种子萌发的影响[J].湖北农业科学,2009,48(10):2461-2464.
- [23]周大寨,朱玉昌,张驰,等.硒浸种对芸豆种子萌发的影响[J].湖北民族学院学报:自然科学版,2007,25(1):91-93.
- [24]Rosenfield B. Selenium[M]. New York: Academic Press, 1964.
- [25]Vadim E, Larisa J. Characteristics of selenium migration in soil-plant system of East Meshchera and Transbaikalia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2010, 107: 200-205.
- [26]张驰,吴永尧,彭振坤.植物硒的研究进展[J].湖北民族学院学报:自然科学版,2002,20(3):58-62.
- [27]苏琪.中国饲料、牧草中含硒量分布图[M].北京:中国农业科技出版社,1985.
- [28]黄凯丰,时政,冯健瑛.富硒蔬菜的研究现状[J].长江蔬菜,2011(10):14-17.
- [29]宋家永,张万业,王永华,等.小麦富硒生产技术研究[J].中国农学通报,2005,5(21):197-199.
- [30]唐玉霞,王慧敏,刘巧玲,等.河北省麦田土壤硒的含量、形态及其有效性研究[J].华北农学报,2010,25(21):194-197.
- [31]张洋.喷施硒、锌肥对不同品种春小麦产量及硒吸收积累特性的影响[J].南方农业学报,2012,43(5):626-629.
- [32]罗胜国,徐宁彤,刘元英.叶面喷硒提高粮食中的硒含量[J].东北农业大学学报,1999,30(1):18-22.
- [33]张晶,李向民,孙晶.叶面喷硒对水稻含硒量的影响[J].安徽农业科学,2011,39(20):12031-12033.
- [34]张懋,丁霄霖,秦防,等.几种蔬菜的硒结合规律和农艺优化研究[J].无锡轻工业大学学报,1997,16(4):7-12.
- [35]孙发仁.富硒蔬菜的研究与开发[J].西北园艺,1999(3):7-9.
- [36]王晋民,赵之重,段冰.叶面施硒对不同蔬菜硒富集和产量的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(7):103-106.
- [37]冯两蕊,杜慧玲,王日鑫.叶面喷施硒对生菜富硒量及产量与品质的影响[J].山西农业大学学报:自然科学版,2007,27(3):291-294.
- [38]宋满坡,段晓琴.亚硒酸钠对芹菜含硒量的影响[J].北方园艺,2008(12):65-66.
- [39]杜振宇,史衍玺,王清华.蔬菜对硒的吸收及适宜补硒食用量[J].生态环境,2004,13(2):230-231,267.
- [40]许春霞,李向,肖永绥.喷施亚硒酸钠对茶叶含硒量的影响[J].茶叶科学,1996,16(1):19-23.
- [41]李亚敏,姬海宁.猕猴桃对硒的吸收、分布、积累特性的研究[J].河北林果研究,2011,26(4):385-388.
- [42]Wang S S, Liang D L, Wei W, et al. Relationship between soil physical-chemical properties and selenium species based on path analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 823-830.
- [43]李辉勇.土壤溶液中硒的价态变换及其影响因素[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2001,27(2):139-142.
- [44]张艳玲.土壤-植物系统中硒的迁移转化及低硒地区食物链中硒的调节[J].土壤与环境,2002,11(4):388-391.
- [45]徐凯明,刘懿,雷勇,等.控量富硒茶研发技术研究[J].陕西农业科学,2010(1):53-57.

高华健,任静,蔡凤香,等. MAPK 调节水稻幼苗根系生长的分子机制[J]. 江苏农业科学,2014,42(1):18-21.

MAPK 调节水稻幼苗根系生长的分子机制

高华健,任静,蔡凤香,李伟,李晶,隋亚平,赵风云

(山东理工大学生命科学院,山东淄博 255049)

摘要:以水稻品种中花 11 号为材料,利用 MAPKK 抑制剂 PD(PD 98059)分析了 MAPK 信号对水稻根系生长、 H_2O_2 产生、生长素积累分布及生长素和细胞周期基因表达谱的影响。结果表明,PD 处理促进了初生根和不定根的伸长生长,但抑制了侧根的形成和发育,并诱导了 H_2O_2 的产生和生长素的积累增加。分子水平分析显示,PD 处理分别使 14 个生长素基因和 12 个细胞周期基因表达上调,使 3 个生长素基因和 7 个细胞周期基因表达下调。这些结果说明在正常条件下,MAPK 对水稻幼苗根系生长的调节与其控制 H_2O_2 产生和生长素平衡及调控生长素和细胞周期基因表达有密切关系。

关键词:MAPK(丝裂原活化蛋白激酶);生长素;水稻根系

中图分类号:S511.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2014)01-0018-04

MAPK 信号级联是植物体内的重要信号分子^[1],越来越多的证据表明 MAPK 信号在调节植物生长发育、细胞增殖、激素生理及环境胁迫应答过程中发挥重要作用^[2]。生长素是植物体内的关键激素之一,影响植物根系生长、细胞分裂及基因表达。关于生长素与 MAPK 的关系有不同的报道^[3-4],如 Mockaitis 等报道生长素诱导拟南芥根系 MAPK 活性增加^[5],Mizoguchi 等试验也得到类似结果^[6]。相反,Kovtun 等研究表明 NPK1(a specific plant MAPK kinase kinase, MAPKKK)激活 MAPK 信号级联,抑制早期生长素应答基因转录^[7],Lee 等和 Dai 等分别报道 MPK12 和 MKK7 是生长素信

号的负调控因子^[8-9]。这些研究表明在生长素信号传导过程中存在正调控和负调控 MAPK 途径^[4]。

细胞周期是控制植物生长的关键因子之一。MAPK 在细胞分裂过程中起核心作用^[4]。如烟草 NTF6(*Nicotiana tabacum* MAPK homolog)在细胞分裂晚后期被激活并瞬时定位在成膜体^[10]。NTF4(*N. tabacum* MAPK homolog)在细胞周期的 G₁ 期表达低,但在 S、G₂ 期表达高^[4]。Ma 等报道在胞质分裂过程中 MAPK 磷酸化与细胞板形成有关^[11]。细胞周期进程受细胞周期蛋白和(Cycs)和依赖于周期蛋白激酶(CDKs)等一系列蛋白调控^[12]。ROS 是植物体内的重要信号分子,有研究表明,MAPK 信号途径不仅受 ROS 诱导,还调节 ROS 产生^[13-14]。这些结果显示 MAPK 与生长素、细胞周期和 ROS 有密切关系,我们的前期研究发现生长素、细胞周期和 ROS 都参与了水稻根系生长的调节^[15],但是在水稻幼苗根系生长发育过程中 MAPK 与它们的关系还不清楚。本试验以水稻品种中花 11 号为材料,利用 MAPKK 抑制剂 PD(PD 98059)研究 MAPK 信号对水稻根系生长、 H_2O_2 产生、生长素积累分布及生长素和细胞周期基因表达谱的影响。

收稿日期:2013-04-24

基金项目:国家自然科学基金(编号:30671126);山东省淄博市科技发展计划(编号:109036,111089)。

作者简介:高华健(1992—),男,山东日照人,本科生;任静(1990—),女,山东邹平人,硕士研究生,从事植物逆境分子生物学研究。他们对本工作的贡献相同。

通信作者:赵风云,教授,从事植物逆境分子生物学研究。E-mail: zfy1226@126.com。

[46] 罗杰,王佳媛,游远航,等. 硒在土壤-水稻系统中的迁移转化规律[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2012,37(3):60-65.

[47] Zhao C Y, Ren J H, Xue C Z, et al. Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake[J]. Plant and Soil, 2005, 277:197-206.

[48] 于勤勤. 恩施富硒区硒元素迁移转化规律及开发研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.

[49] 邹邦基. 土壤——植物体系中的硒[J]. 土壤学进展,1983(3):1-10.

[50] Lars J. Selenium uptake by plants as a function of soil type, organic matter content and pH[J]. Plant and Soil, 1991, 133:57-64.

[51] Fouladmand H R. Estimation of cation exchange capacity from some soil physical-chemical properties[J]. Agricultural Sciences and Natural Resources, 2008, 15(1):11-18.

[52] 赵妍. 江苏省典型茶园土壤硒分布特性及其有效性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2467-2474.

[53] Gustafsson J P, Johnsson L, 王美珠. 瑞典森林土壤中有有机质对硒的吸持作用[J]. 土壤学进展, 1995, 23(2):43-49.

[54] 宋明义,蔡子华,黄春苗,等. 浙北平原区富硒土壤基本特征与成因分析[C]//中国科学技术协会学会学术部. 经济发展方式转变与自主创新——第十二届中国科学技术协会年会:第一卷. 北京:中国科学技术协会学会学术部,2010:1-6.

[55] Susanne E G, Trine A S, Anne F, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertiliser as influenced by soil organic matter content and pH[J]. Nutr Cycl Agroecosyst, 2007, 79:221-231.

[56] 王美珠,章明奎. 我国部分高硒低硒土壤的成因初探[J]. 浙江农业大学学报, 1996, 22(1):89-93.

[57] 曹静祥,孙淑庄,龙凌燕. 土壤 pH 与腐殖质对水溶性硒影响的研究[J]. 中国地方病防治杂志, 1993, 8(2):74-77.