

蓝莓对外源硒的吸收、转化及其对品质效应的影响

刘庆, 田侠, 史衍玺*

青岛农业大学资源与环境学院, 山东青岛266109

摘要: 为探讨蓝莓对外源硒的吸收、转化及施硒对蓝莓品质的影响, 通过田间试验研究了叶面喷施和土壤基施亚硒酸钠条件下, 蓝莓中总硒、有机硒、矿质元素和可溶性糖含量以及超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化, 计算了蓝莓中有机硒占总硒的比例和硒利用率。结果显示, 蓝莓硒含量随施硒量的增加而增大, 叶面喷施的效果显著优于土壤基施。叶面喷施条件下, 施硒量为 $120 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 蓝莓硒含量最高可达 $158.9 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为对照的50倍以上。有机硒占总硒的比例处于 82.46%~89.34%之间, 不同处理差异不显著。以 $60 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施硒量于开花期和坐果期分2次喷施硒利用率最高。施硒降低了蓝莓中K、Na含量, 增加Ca、Mn含量, 对Mg未产生显著影响。随施硒量增加, 蓝莓中可溶性糖含量呈先增加后降低的趋势, 但各处理间差异不显著。叶面喷施提高了蓝莓浆果中SOD活性, 当施硒量为 $120 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 其差异达显著水平。以 $60 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施硒量于开花期和坐果期分2次喷施, 为富硒蓝莓最佳的施硒方式。

关键词: 外源硒; 蓝莓; 吸收转化; 矿质元素; 可溶性糖; 有机硒

硒是人体必需的微量矿质营养元素(Yadav等2005), 人体缺硒可引起克山病、大骨节病等疾病(Thomson 2004), 有关硒具有防癌抗癌、清除体内自由基、抗膜脂过氧化、防止衰老等作用已经得到证实(彭安等1995)。目前, 世界上有40多个国家和地区土壤缺硒, 我国有一半以上地区的土壤处于缺硒或低硒水平(何振立1998)。植物硒是人和动物硒的重要来源, 植物体中的硒含量从几十到上百 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 不等(董广辉等2002)。在一些缺硒或硒生物可利用性低的土壤上, 植物体内及可食用部位硒含量不高, 导致通过饮食提供的硒远远不能满足人体对硒的需求。植物可通过根系和叶片从土壤和空气中吸收硒, 同时也通过叶片向空气中排放硒(李家熙等2000), 通过外源硒补给提高作物可食部位硒含量, 是缺硒地区人群补硒的重要途径。研究不同作物可食部位对硒的富集吸收特征及其施硒效应, 可为利用生物强化技术实现作物富硒提供理论依据与技术支持, 从而生产更多的富硒产品, 为人类提供更安全、有效的植物性硒源(Chilimba等2012)。

目前, 关于农产品富硒的研究主要集中于不同作物品种富硒能力比较(张艳玲等2002; 施和平等1993)、不同硒形态的作物富集吸收特征(Hopper和Parker 1999; Cartes等2005)、不同施硒方式对作物吸收富集硒的影响(周鑫斌等2007; Wang等2013)以及硒在土壤-植物系统中的迁移转化特征(Ermakov和Jovanovic 2010; Li等2008; 吴雄平等2009)等方面, 涉及的作物品种多集中于小麦、玉米、大豆、花

生等粮食或油料作物(张艳玲等2002), 因其果实中含有丰富的蛋白质、氨基酸等成分, 对硒元素的富集量较大; 而针对果蔬类产品的研究如苹果、桃、梨、冬枣、蓝莓等的研究虽有报道(刘群龙等2015; 张海英等2010), 但针对无机硒向有机硒转化、施硒的环境与生态效应以及施硒的品质效应等方面涉及较少。

蓝莓属于杜鹃花科越橘属植物, 因其独特的营养功能被联合国粮农组织列为人类五大健康食品之一(张艳玲等2002)。本研究以生长于我国低硒土壤上的半高丛蓝莓为试验材料, 通过根部基施与叶面喷施亚硒酸钠溶液的方法, 研究不同施硒方式对蓝莓吸收和富集硒的影响以及蓝莓浆果中无机硒向有机硒转化规律, 探讨不同硒施用量对蓝莓矿质元素吸收、SOD活性以及可溶性糖含量等品质指标的影响, 为富硒蓝莓生产提供科学依据。

材料与方法

1 试验设计

试验分别于2013、2014年连续2年以相同的试验方案于山东省淄博市博山区“山里阿哥”农业科技有限公司蓝莓生产基地进行。试验田土壤为

收稿 2016-01-19 修定 2016-07-10

资助 农业部公益性行业科研专项经费项目“优质高效富硒农产品关键技术与示范”(201303106)。

致谢 博山区农业综合开发办公室和山东“山里阿哥”农业科技有限公司在试验场地和田间管理方面提供帮助。

* 通讯作者(E-mail: yanxiyy@126.com)。

酸性棕壤,其基本理化性状为pH 5.3,有机质 $10.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总硒 $0.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $104.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $67.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $96.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验用蓝莓品种为引自黑龙江省的5年生半高丛蓝莓(*Vaccinium corymbosum* L.)品种‘北蓝’,日光温室种植,株行距为 $100 \text{ cm}\times 150 \text{ cm}$ 。

硒叶面喷施试验采用双因素随机区组设计,施硒方式为喷施 Na_2SeO_3 溶液。主因素为施硒量,共4个水平,分别为0、30、60和 $120 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。副因素为喷施时期,分别为T1(4月25日开花期喷施1次)、T2(5月15日坐果期喷施1次)、T3(4月25日和5月15日开花期和坐果期各喷1次)、T4(5月15日和6月1日坐果期和果实膨大期各喷1次)。叶面喷施试验共计16个处理,每个处理重复3次。所有处理以等量的水配制不同浓度 Na_2SeO_3 溶液进行喷施,对照处理以喷施等量水代替 Na_2SeO_3 溶液。

土壤基施亚硒酸钠共设5个施硒水平,纯硒施用量分别为0、80、160、320和 $640 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,采用开沟灌根法于蓝莓开花前一次性施入。施硒时沿每株蓝莓基部开挖深度约10 cm的半环形沟,将配制好的亚硒酸钠溶液一次性浇入,然后覆土掩埋。

2 样品采集与测定

2.1 样品采集与处理

于6月中旬蓝莓果实成熟期时进行样品采集。每个小区采集蓝莓浆果100~150 g,样品采集后立即放于加冰块的保温箱中保鲜储藏。样品带回实验室后,用超纯水洗净,再用干净的纱布吸干表面的水分,匀浆机制成匀浆,储存备用。

2.2 土壤与蓝莓样品测定

土壤总硒测定采用国标方法(中华人民共和国农业部2006),土壤pH测定采用电位法,有机质测定采用重铬酸钾容量法,碱解氮测定采用碱解扩散法,速效磷测定采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾测定采用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵浸提-原子吸收分光光度法(贾亚雄等2008)。

蓝莓浆果中矿质元素(K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu和Zn)测定采用硝酸-高氯酸联合消煮,原子吸收分光光度法测定。蓝莓浆果中可溶性糖测定采用蒽酮比色法(李合生2003)。蓝莓浆果中超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性测定采用NBT光化还原法(中华人民共和国卫生部2010)测定。

蓝莓中总硒的测定:准确称取蓝莓浆果匀浆10 g,置于150 mL锥形瓶中,加入10 mL硝酸/高氯酸混合酸(10:1, V/V),消化至溶液澄清无色并有大量白烟冒出时取下,然后加入2 mL浓盐酸,再置于电热板上加热沸腾几分钟后取下,使Se(VI)全部还原为Se(IV),冷却后用去离子水转移至50 mL容量瓶,加入2 mL 10%的铁氰化钾,定容。原子荧光光谱仪测定(中华人民共和国卫生部2010)。

蓝莓中有机硒测定:采用差减法进行,具体步骤如下。准确称取蓝莓匀浆10 g,置于50 mL离心管中,加入30 mL超纯水,室温下超声振荡30 min,于 $4 \times 192.5 \times \text{g}$ 离心10 min,倒出上清液,残渣再重复提取1次。上清液收集后,倒入分液漏斗中,加入5 mL环己烷萃取,收集水相于烧杯中,电热板上加热蒸发掉大部分水后,加入10 mL的硝酸-高氯酸混合酸(10:1, V/V),在电热板上加热消解至无色透明并有大量白烟冒出时取下,冷却后加2 mL盐酸,再置于电热板上加热沸腾几分钟后取下,冷却后用去离子水转移定容至50 mL容量瓶,原子荧光光谱仪测定溶液中无机硒含量。利用已测得的总硒含量减去无机硒含量,即得蓝莓中有机硒含量(Sun等2013)。

3 相关参数计算

硒利用率(%)=(不同处理蓝莓中总硒含量-对照处理蓝莓中总硒含量)/单位面积施硒量 $\times 100$ 。其中,本试验基地蓝莓平均产量参考值为 $1.5 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

4 数据处理

试验数据采用SPSS 19.0和Excel 2007进行统计分析。

实验结果

1 施硒对蓝莓中总硒含量的影响

1.1 叶面喷施对蓝莓中总硒含量的影响

由表1可以看出,与不施硒相比,施硒可显著提高蓝莓中的总硒含量,且总硒含量随施硒量的增加而增大。从不同施硒时期的比较来看,在低施硒量下($30 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$),开花期1次喷施(T1)的效果最好,开花期和坐果期分2次喷施(T3)的效果最差,在低施硒量下不同施硒时期蓝莓富硒效果的顺序为 $T1>T2>T4>T3$ 。在较高施硒量下($60\sim 120 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$),开花期与坐果期分2次喷施(T3)的效果最好,坐果期和果实膨大期喷施(T4)效果最差,高施硒量下不同施

表1 喷施处理下蓝莓中的总硒含量

Table 1 Total Se content in blueberry under foliar spraying

施硒量/g·hm ⁻²	总硒含量/μg·kg ⁻¹			
	T1	T2	T3	T4
0	2.7 ^d	2.7 ^d	2.7 ^c	2.7 ^d
30	48.3 ^c	36.6 ^c	19.9 ^b	23.7 ^c
60	111.9 ^b	69.2 ^b	155.3 ^a	38.5 ^b
120	138.4 ^a	76.5 ^a	158.9 ^a	62.1 ^a

不同小写字母代表不同施硒量之间在0.05水平下差异显著。

硒时期蓝莓富硒效果的顺序为T3>T1>T2>T4。不同施硒量下,以120 g·hm⁻²施硒量于开花期和坐果期

分2次喷施的总硒含量最高,为158.9 μg·kg⁻¹;但与60 g·hm⁻²处理的差异不显著。所以,60 g·hm⁻²施硒量于开花期和坐果期分2次喷施,可作为蓝莓富硒的最佳施硒方式。

1.2 土壤基施对蓝莓中总硒含量的影响

从表2可以看出,土壤基施蓝莓中总硒含量显著高于不施硒处理($P<0.05$),并且随施硒量的增加而增大。在施硒量为80~320 g·hm⁻²,蓝莓中的总硒含量差异不显著。当施硒量为640 g·hm⁻²时,蓝莓中总硒含量最高,与其他处理差异达显著水平,但仍远低于喷施条件下蓝莓中的总硒含量。

表2 不同施硒方式下蓝莓中有机硒含量及其占总硒比例的变化

Table 2 Changes in organic Se content and the percentage of total Se in blueberry under different application patterns

施硒方式	施硒量/g·hm ⁻²	总硒含量/μg·kg ⁻¹	无机硒含量/μg·kg ⁻¹	有机硒含量/μg·kg ⁻¹	有机硒占总硒比例/%
喷施(开花期喷施1次)	0	2.67 ^d	0.44 ^d	2.23 ^d	83.50 ^a
	30	48.30 ^c	7.00 ^c	41.30 ^c	85.52 ^a
	60	111.90 ^b	15.18 ^b	96.72 ^b	86.44 ^a
	120	138.40 ^a	30.27 ^a	114.13 ^a	82.46 ^a
基施	0	2.67 ^c	0.44 ^d	2.23 ^d	83.50 ^a
	80	4.64 ^b	0.70 ^c	3.94 ^c	84.81 ^a
	160	5.29 ^b	0.86 ^b	4.43 ^{bc}	83.71 ^a
	320	6.57 ^b	0.94 ^b	5.63 ^b	85.69 ^a
	640	14.50 ^a	1.55 ^a	12.95 ^a	89.34 ^a

不同小写字母代表同一施硒方式不同施硒量处理之间在0.05水平下差异显著,下表同此。

2 施硒对蓝莓中有机硒含量的影响

有机硒是作物中硒的主要赋存形态,同时也是人体补硒的生物安全形态硒。从表2可以看出,在喷施和基施2种施硒方式下,蓝莓中有机硒占总硒的比例处于82.46%~89.34%之间,二者差异不显著。喷施方式下,随施硒量增加,蓝莓中有机硒所占比例逐渐增加;但当施硒量增加到120 g·hm⁻²时,蓝莓中有机硒所占比例却有所下降。基施方式下,蓝莓中的有机硒所占比例与施硒量无明显的相关性。两种施硒方式对有机硒占总硒的比例未造成显著影响。

3 施硒对蓝莓硒利用率的影响

由表3可知,所有处理蓝莓硒的利用率均在5%以下,喷施处理下蓝莓硒利用率远高于基施处理,不同施硒量和施硒时期蓝莓硒的利用率差异明显。不同施硒时期,蓝莓对硒的利用率变化规律不一致。其中T1和T3处理蓝莓硒利用率随施硒量的

表3 不同施硒方式下蓝莓硒利用率的变化

Table 3 Changes of Se utilization coefficient under different application patterns

施硒方式	施硒量/g·hm ⁻²	硒利用率/%			
		T1	T2	T3	T4
喷施	0	—	—	—	—
	30	2.28	1.70	0.86	1.05
	60	2.73	1.66	3.82	0.90
	120	1.70	0.92	1.95	0.74
基施	80	0.04			
	160	0.02			
	320	0.02			
	640	0.03			

增加呈先升高后降低的趋势,而T2和T4处理蓝莓硒利用率随施硒量增加而逐渐降低。以60 g·hm⁻²施硒量于开花期和坐果期分2次喷施硒利用率最高,为3.82%,可作为蓝莓富硒的最佳施硒方式。

4 施硒对蓝莓矿质元素吸收的影响

矿质元素含量是蓝莓反映蓝莓品质优劣的重要指标之一, 蓝莓对矿质元素的吸收量受环境中矿质元素含量及蓝莓自身对矿质元素吸收能力的影响。以T1处理为例, 研究不同施硒量对蓝莓中K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 8种矿质元素含量的影响。由表4可以看出, 无论喷施还是土壤基施, 蓝莓中K、Na离子含量均随施硒量增加而明显下降, Mn、Ca离子随施硒量增加而有所增加, Mg离子变化不明显, Fe、Cu和Zn均出现先增加后降低然后再增加的趋势。说明施用外源硒显著抑制了蓝莓对K、Na两种离子的吸收, 促进蓝莓对Mn、Ca两种离子有吸收, 而对Fe、Cu、Zn等离子则由于复杂的离子协同或拮抗作用, 随施硒量的增加而表现出一定的波动性。

5 施硒对蓝莓浆果中SOD活性和可溶性糖含量的影响

从表5可以看出, 叶面喷施处理下, 蓝莓浆果

中SOD活性呈现上升趋势。施硒量 $\leq 60 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 蓝莓中SOD活性与对照差异不显著; 当施硒量为 $120 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 蓝莓中SOD活性与其他处理之间差异达显著水平。土壤基施处理下, 蓝莓中SOD活性随施硒量的增加呈先升高后降低趋势, 但不同处理之间差异未达到显著水平。

施用外源硒使蓝莓中可溶性糖含量呈先增加后降低的趋势。喷施处理下, 当施硒量不超过 $60 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 蓝莓中可溶性糖含量高于对照处理; 当施硒量为 $120 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 蓝莓中可溶性糖含量低于对照处理, 但各处理之间的差异未达到显著水平。基施处理下, 蓝莓中可溶性糖含量均高于对照处理, 各处理之间差异未达到显著水平。由此可知, 通过施用外源硒进行富硒蓝莓生产时, 在喷施时施硒量不超过 $120 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$, 基施不超过 $640 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 施硒对蓝莓中的可溶糖含量不会产生显著影响。

表4 不同施硒方式下蓝莓矿质元素含量的变化

Table 4 Changes of mineral element content in blueberry under different application patterns

施硒方式	施硒量/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$	K含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Na含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Ca含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Mg含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Fe含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Mn含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cu含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Zn含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
喷施(开花期喷施1次)	0	9 005.5 ^a	3 015.2 ^a	662.0 ^c	274.5 ^a	85.4 ^b	19.3 ^c	5.2 ^b	10.1 ^b
	30	6 558.9 ^b	2 166.9 ^b	734.5 ^{bc}	260.6 ^a	109.6 ^a	29.8 ^b	6.5 ^a	10.5 ^b
	60	5 982.4 ^b	2 232.5 ^b	824.4 ^b	243.2 ^a	79.1 ^b	31.6 ^b	6.1 ^a	7.7 ^c
	120	5 959.5 ^b	2 179.3 ^b	939.0 ^a	281.5 ^a	102.6 ^a	41.6 ^a	6.8 ^a	18.1 ^a
基施	0	9 005.5 ^a	3 015.2 ^a	562.0 ^a	274.5 ^a	85.4 ^a	19.3 ^b	5.2 ^a	11.7 ^a
	80	6 974.2 ^b	2 410.7 ^b	587.2 ^a	250.3 ^a	78.9 ^a	33.7 ^a	5.4 ^a	12.3 ^a
	160	6 785.1 ^b	2 428.1 ^b	610.0 ^a	272.8 ^a	81.6 ^a	38.2 ^a	5.3 ^a	11.5 ^a
	320	6 215.3 ^b	2 273.6 ^b	625.0 ^a	265.3 ^a	87.2 ^a	35.6 ^a	5.4 ^a	11.9 ^a
	640	6 596.0 ^b	2 272.3 ^b	627.8 ^a	240.3 ^a	87.1 ^a	41.7 ^a	4.9 ^a	10.7 ^a

表5 不同施硒方式对蓝莓浆果中SOD活性和可溶性糖含量的影响

Table 5 Effects of different application patterns on SOD activity and soluble sugar content in blueberry

施硒方式	施硒量/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$	SOD活性/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)	可溶性糖含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW)
喷施(开花期喷施1次)	0	243.4 \pm 16.2 ^b	58.8 \pm 5.3 ^a
	30	254.8 \pm 15.6 ^b	62.6 \pm 4.6 ^a
	60	268.6 \pm 17.3 ^b	60.9 \pm 4.9 ^a
	120	332.5 \pm 13.6 ^a	56.4 \pm 3.8 ^a
基施	0	243.4 \pm 17.8 ^a	57.8 \pm 4.3 ^a
	80	236.2 \pm 18.2 ^a	58.1 \pm 5.2 ^a
	160	265.7 \pm 15.4 ^a	61.5 \pm 4.8 ^a
	320	257.9 \pm 14.7 ^a	62.1 \pm 3.2 ^a
	640	236.1 \pm 14.2 ^a	59.4 \pm 4.0 ^a

讨 论

1 施硒对蓝莓硒富集的影响

国内外关于施用外源硒进行作物富硒的研究已有许多报道。人们通过土壤施硒或叶面喷硒等各种农艺强化措施, 获得了富硒小麦、富硒玉米、富硒水稻、富硒蔬菜等富硒产品, 为缺硒地区人群补硒、防止硒缺乏症做出了重要贡献(赵春梅等2010)。虽然土壤硒缺乏是导致作物组织中硒含量偏低的主要原因, 但是不同作物类型富硒能力的差异也对作物可食部位硒含量产生重要影响。Wang等(2013)研究了基施和叶面喷施条件下玉米籽粒对硒的利用率, 发现喷施条件下的利用率为27%~52%, 基施条件下的利用率为1.42%~1.69%。本研究中, 在以60 g·hm⁻²施硒量下进行叶面喷施条件下, 蓝莓中的总硒含量最大可达155.3 μg·kg⁻¹, 为对照的50倍以上。以亩产1 000 kg蓝莓计算, 硒的利用率为3.82%。基施条件下, 在施硒量80~640 g·hm⁻²时, 蓝莓中的总硒含量仅为14.5 μg·kg⁻¹, 约为对照的5倍, 此时硒的利用率为0.02%~0.04%, 以80 g·hm⁻²施用量下利用率最高。可见, 外源硒基施条件下, 因土壤固定作用和蓝莓根系吸收及由地下向地上部转运能力的限制, 蓝莓对硒的当季利用效率远低于喷施条件下的利用效率, 通过叶面喷施提高作物硒含量是一种经济、快速、可行的补硒方式。但是从对外源硒的利用率来看, 蓝莓对外源硒的利用率远低于玉米, 其主要原因可能是硒进入植物体后是以硒蛋白的形态存在(陈铭等1994), 而蓝莓浆果中的蛋白含量远低于玉米籽粒中蛋白含量所致。

2 施硒对蓝莓中有机硒转化的影响

对人体补硒来讲, 真正有效且安全的硒形态是有机态硒。有机态硒主要以蛋白硒的形态存在, 其与蛋白质结合的形式以硒代蛋氨酸(Se-Met)为主(赵春梅等2010)。因硒和硫属于同一主族元素, 性质相近, 硒一旦被作物吸收进入体内, 便会随硫转运家族一同被运输, 并参与硫的代谢和同化作用, 主要代替蛋白质中的半胱氨酸和甲硫氨酸中的硫, 有时还伴随着对作物的一些毒害作用(赵春梅等2010)。有研究指出, 硒在被吸收进入作物体内3 min后即可有70%以上的硒转化为有机硒(Ermakov和Jovanovic 2010)。Sun等(2013)测定富

硒大米中的硒形态, 发现有有机硒占总硒的78.3%。吴瑶庆等(2011)测定丹东地区蓝莓中有机硒含量占总硒含量的91.06%。本研究中, 不同施硒量叶面喷施条件下, 测得蓝莓中有机硒占总硒的比例为82.46%~86.44%, 土壤基施条件下蓝莓中有机硒占总硒的比例为83.50%~89.34%, 有机硒占总硒的比例基施略高于喷施, 这可能由于基施方式下, 蓝莓吸收的无机硒向有机硒转化的过程与喷施条件下存在差异所致。截止目前, 关于无机硒向有机硒转化的相关报道不多, 影响无机硒向有机硒转化的机理性研究仍需加强。

3 施硒对蓝莓矿质元素吸收的影响

随着作物富硒工作的广泛开展, 人们开始关注硒对植物的生态和生物效应的研究(陈铭等1994)。大量的研究证实, 硒的增产效应仅仅限于较低的施硒量条件, 高施硒量下甚至有毒害作用(龚子同1985)。本研究通过对施硒影响蓝莓矿质元素吸收的结果发现, 2种施硒方式均显著降低蓝莓中K、Na离子含量, Ca和Mn离子含量有所增加, 对Mg离子均未产生显著影响, 对Fe、Cu、Zn等3种元素离子的影响呈现波动性特点, 但总体上叶面喷施大于土壤基施的影响效果。此结果与前人在其他作物上的研究结果具有一定差异。如王晋民等(2006)研究认为叶面喷施一定浓度的硒, 可促进青花菜对Ca、Mg、Fe和K等元素的吸收。李登超等(2003)利用水培试验研究认为施硒后可增加小白菜地上部Ca、Mg、Mn、Zn含量而降低了K元素的含量。以上差异的产生, 除作物自身的营养特性差异之外, 与作物环境条件、养分供应状况都有一定关系, 其影响机理有待进一步深入研究。

4 施硒对蓝莓SOD活性、可溶性糖含量的影响

蓝莓浆果中富含的SOD是植物体内清除自由基最关键的保护酶之一, 它具有生物活性, 可用于清除植物包括人体内的超氧自由基, 延缓衰老, 对其抗氧化功能的发挥具有重要意义。已有的研究表明, 施硒可提高多种作物组织中SOD活性, 从而增强其对环境的抗逆性和抗氧化能力(杜新民和张海春2014; 雷红灵等2010)。本研究发现, 叶面喷施与基施亚硒酸钠对蓝莓浆果中SOD活性的影响不尽相同。叶面喷施条件下, 随施硒量的增加, 蓝莓浆果中SOD活性增加明显, 尤其当施硒量为120

$\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,其差异达显著水平。这可能是高的施硒量为蓝莓生长提供了一个逆境,从而刺激蓝莓中SOD活性升高来抵抗逆境的胁迫;基施条件下,各处理下蓝莓浆果中的SOD活性差异不显著,当施硒量为 $640\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,蓝莓浆果中的SOD活性反而有所下降,其原因可能是蓝莓根系吸收适量的硒,改善了蓝莓生长状况,从而其SOD活性有所下降。

可溶性糖含量对调节蓝莓的糖酸比具有重要作用,而糖酸比直接决定了蓝莓的口感,影响其市场认可度及其内在经济价值。施硒使蓝莓中的可溶性糖含量稍有增加,仅在喷施硒量达 $120\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,蓝莓中的可溶性糖含量低于对照处理,但影响未达到显著水平。该结果与已往的研究结果有所不同,据尚庆茂等(1998)报道,施硒能提高生菜茎叶的总糖、还原糖、叶绿素和可溶性蛋白质含量,降低粗纤维和亚硝酸盐的含量。杜振宇等(2004)也认为,施硒可显著增加茄子还原糖含量,降低萝卜可溶糖含量。可见,施硒对不同作物可食部位可溶性糖含量的影响存在差异,因此其影响机理仍需进一步研究。

综上所述,施用外源硒可以显著提高蓝莓中总硒与有机硒含量,叶面喷施条件下蓝莓的富硒效果优于土壤基施。施硒对蓝莓矿质元素吸收、SOD活性以及可溶性糖含量产生一定的影响,但对其品质的影响不大。以 $60\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施硒量于蓝莓开花期和坐果期分2次喷施,是蓝莓最佳的施硒方式。

5 富硒蓝莓生产的环境效应

由于不同施硒方式所导致的硒的利用率差异,必将会造成富硒生产过程中,部分未被有效利用的外源硒进入土壤和地下水,对环境带来危害。从本研究结果看,无论是叶面喷施还是土壤基施,蓝莓对硒的利用率均显著低于玉米、小麦等其它粮油作物。因此,针对蓝莓、山楂等果蔬类作物进行富硒生产时,不仅要考虑富硒生产过程中的经济效益,还要关注富硒生产对环境造成的影响,应对土壤和地下水中的硒进行实时监测,避免因盲目追求富硒产品中的硒含量而引发环境污染。

参考文献

Cartes P, Gianfreda L, Mora ML (2005). Uptake of selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms. *Plant Soil*, 276: 359–367

- Chen M, Tan JA, Wang WY (1994). Soil chemistry and plant nutrition of environmental selenium and healthy relations. *Prog Soil Sci*, 22 (4): 1–10 (in Chinese with English abstract) [陈铭, 谭见安, 王五一(1994). 环境硒与健康关系研究中的土壤化学与植物营养学. *土壤学进展*, 22 (4): 1–10]
- Chilimba ADC, Young SD, Black CR, Meacham MC, Lammel J, Broadley MR (2012). Agronomic biofortification of maize with selenium (Se) in Malawi. *Field Crop Res*, 125 (18): 118–128
- Dong GH, Wu ZJ, Chen LJ, Xi HT (2002). Cycling and regulation of selenium in soil plant ecosystem. *Agric Syst Sci Compr Stud*, 18 (1): 65–68 (in Chinese with English abstract) [董广辉, 武志杰, 陈利军, 解宏图(2002). 土壤—植物生态系统中硒的循环和调节. *农业系统科学与综合研究*, 18 (1): 65–68]
- Du XM, Zhang HC (2014). Effects of selenium on yield, qualities and protective enzymes of peanut sprouts. *Hubei Agric Sci*, 53 (15): 3568–3570 (in Chinese with English abstract) [杜新民, 张海春(2014). 硒对花生芽菜产量、品质及保护酶活性的影响. *湖北农业科学*, 53 (15): 3568–3570]
- Du ZY, Shi YX, Wang QH (2004). Effect of selenium application in soil on absorption and transformation of selenium and quality of radish. *Soils*, 36 (1): 56–60 (in Chinese with English abstract) [杜振宇, 史衍玺, 王清华(2004). 土壤施硒对萝卜吸收转化硒及品质的影响. *土壤*, 36 (1): 56–60]
- Ermakov V, Jovanovic L (2010). Characteristics of selenium migration in soil-plant system of East Meshchera and Transbaikalia. *J Geochem Explor*, 107: 200–205
- Gong ZT (1985). *Progress and Application of Soil Geochemistry*. Beijing: Science Press, 248–257 (in Chinese) [龚子同(1985). *土壤地球化学进展和应用*. 北京: 科学出版社, 248–257]
- He ZL (1998). *Soil-Chemical Balances of Pollution and Beneficial Elements*. Beijing: China Environmental Science Press, 345 (in Chinese) [何振立(1998). *污染及有益元素的土壤化学平衡*. 北京: 中国环境科学出版社, 345]
- Hopper JL, Parker DR (1999). Plant availability of selenite and selenite as influenced by the competing ions phosphate and sulfate. *Plant Soil*, 210: 199–207
- Jia YX, Sun L, He F, Wan LQ, Yuan QH, Li XL (2008). Analysis of effects of salt stress on absorption and accumulation of mineral elements in *Elymus* Spp. using atomic absorption spectrophotometer. *Spectrosc Spectral Anal*, 28: 2984–2988 (in Chinese with English abstract) [贾亚雄, 孙蕾, 何峰, 万里强, 袁庆华, 李向林(2008). 利用原子吸收光谱法分析盐胁迫对野生披碱草矿质元素吸收和积累的影响. *光谱学与光谱分析*, 28 (12): 2984–2988]
- Lei HL, Lu HB, Cai JZ, Qiu S, Zheng XJ, Li SR (2010). Effects of selenium on activity of antioxidant and effective ingredient in *Ampelopsis grossedentata*. *J Huazhong Agric Univ*, 29 (3): 321–325 (in Chinese with English abstract) [雷红灵, 陆海波, 蔡金洲, 邱松, 郑小江, 李世荣(2010). 硒对藤茶抗氧化酶活性及有效成分的影响. *华中农业大学学报*, 29 (3): 321–325]
- Li DC, Zhu ZJ, Xu ZH, Qian QQ (2003). Effects of selenium on the growth and nutrient absorption of pakchoi. *Plant Nutr Fert Sci*, 9 (3): 353–358 (in Chinese with English abstract) [李登超, 朱祝军, 徐志豪, 钱琼秋(2003). 硒对小白菜生长和养分吸收的影响.

- 植物营养与肥料学报, 9 (3): 353–358]
- Li HS (2003). Experiment Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry. Beijing: China Higher Education Press, 195–197 (in Chinese) [李合生(2003). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 195–197]
- Li JX, Zhang GD, Ge Xiaoli, Zhang QL, Luo DH, Appleton JD, Johnson CC, Fordyce FM (2000). Prediction and Geochemical Environmental Character of Human Selenium Imbalances. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese) [李家熙, 张光弟, 葛晓立, 张绮玲, 罗代洪, Appleton JD, Johnson CC, Fordyce FM (2000). 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测. 北京: 地质出版社]
- Li YH, Wang WY, Luo KL, Li HR (2008). Environmental behaviors of selenium in soil of typical selenosis area, China. *J Environ Sci (China)*, 20: 859–864
- Liu QL, Wang D, Hao YY, Hao GW, Wu GL, Niu TQ (2015). Effects of spraying selenium on the mineral elements content and the storage properties of the pear fruits. *Plant Physiol J*, 51 (5): 655–660 (in Chinese with English abstract) [刘群龙, 郝燕燕, 郝国伟, 吴国良, 牛铁泉(2015). 叶面喷硒对梨果实矿物质元素积累和贮藏特性的影响. 植物生理学报, 51 (5): 655–660]
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1104–2006 Determination of selenium in soils. 2006.10 (in Chinese) [中华人民共和国农业部. NY/T 1104–2006 土壤中全硒的测定. 2006.10]
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/T5009. 93–2010. National food safety standard: Determination of selenium in foods. 2010.6 (in Chinese) [中华人民共和国卫生部. GB/T5009. 93–2010. 食品安全国家标准: 食品中硒的测定. 2010. 6]
- Peng A, Wang ZJ, Whanger PD, Combs GF, Yeh JY (1995). Environmental Bio-inorganic Chemistry of Selenium. Beijing: China Environmental Science Press, 11–12 (in Chinese with English abstract) [彭安, 王子健, Whnager PD, Combs GF, Yeh JY (1995). 硒的环境生物无机化学. 北京: 中国环境科学出版社, 11–12]
- Shang QM, Gao LH, Li SJ (2003). Effect of selenium on quality of hydroponics lettuce. *J China Agric Univ*, 9 (3): 353–358 (in Chinese with English abstract) [尚庆茂, 高丽红, 李式军(2003). 硒素营养对水培生菜品质的影响. 中国农业大学学报, 3 (3): 67–71]
- Shi HP, Zhang YJ, Liu ZS (1993). Absorption, distribution and transformation of selenium in the tomato plants. *Acta Bot Sin*, 35 (7): 541–546 (in Chinese with English abstract) [施和平, 张英聚, 刘振声(1993). 番茄对硒的吸收、分布和转化. 植物学报, 35 (7): 541–546]
- Sun M, LIU G, WU Q (2013). Speciation of organic and inorganic selenium in selenium-enriched rice by graphite furnace atomic absorption spectrometry after cloud point extraction. *Food Chem*, 141: 66–71
- Thomson CD (2004). Assessment of requirements for selenium and adequacy of selenium status: a review. *Eur J Clin Nutr*, 58 (3): 391–402
- Wang JM, Zhao ZZ, Shen ZJ (2006). Effect of selenium on content of selenium, yield and quality of broccoli. *J Northwest A&F Univ*, 34 (3): 127–130 (in Chinese with English abstract) [王晋民, 赵之重, 沈增基(2006). 叶面施硒对青花菜含硒量及产量与品质的影响. 西北农林科技大学学报, 34 (3): 127–130]
- Wang JW, Wang ZH, Mao H, Zhao HB, Huang DL (2013). Increasing Se concentration in maize grain with soil-or foliar-applied selenite on the Loess Plateau in China. *Field Crop Res*, 150: 83–90
- Wu XP, Liang DL, Bao JD, Xue RL (2009). Effects of different concentrations of selenate and selenite on growth and physiology of Chinese cabbage. *Acta Sci Circumstant*, 29 (10): 2163–2171 (in Chinese with English abstract) [吴雄平, 梁东丽, 鲍俊丹, 薛瑞玲(2009). Se(IV)和Se(VI)对小白菜生长及生理效应的影响. 环境科学学报, 29 (10): 2163–2171]
- Wu YQ, Meng ZR, Li L, Du CL, Chi HX (2011). Enrichment separation and determination of selenium protein in blueberries. *Acta Nutr Sin*, 33 (5): 463–467 (in Chinese with English abstract) [吴瑶庆, 孟昭荣, 李莉, 杜春林, 迟红训(2011). 蓝莓中蛋白硒形态的富集分离及测定方法. 营养学报, 33 (5): 463–467]
- Yadav SK, Singh I, Singh D, HAN SD (2005). Selenium status in soils of northern districts of India. *J Environ Manage*, 75 (2): 129–132
- Zhang HY, Han T, Tian L, Wang YN, Jia HJ (2010). Accumulation of Se in peach, jujube and strawberry after spraying Se fertilizer on leaves. *J Fruit Sci*, 27 (5): 802–806 [张海英, 韩涛, 田磊, 王有年, 贾海静(2010). 桃、枣和草莓对硒的吸收及富集特性研究. 果树学报, 27 (5): 802–806]
- Zhang YL, Pan GX, Chen Jin, Xi TB, Ding YL (2002). Effect of genotype on selenium uptake and accumulation by soybean in low Se soils. *Soybean Sci*, 21 (4): 263–266 (in Chinese with English abstract) [张艳玲, 潘根兴, 陈金, 谢同柏, 丁亚玲(2002). 低硒土壤中不同主栽大豆品种积累硒的差异及其原因. 大豆科学, 21 (4): 263–266]
- Zhao CM, Cao QM, Tang QF, Li XB (2010). Research advances on selenium accumulation in plants. *Chin J Trop Agric*, 30 (7): 82–86 (in Chinese with English abstract) [赵春梅, 曹启民, 唐群锋, 李晓波(2010). 植物富硒规律的研究进展. 热带农业科学, 30 (7): 82–86]
- Zhou XB, Shi WM, Yang LZ (2007). Effect of foliation of selenite on selenium accumulation and distribution in distribution in rice. *Acta Pedol Sin*, 44 (1): 73–78 (in Chinese with English abstract) [周鑫斌, 施卫明, 杨林章(2007). 叶面喷硒对水稻籽粒硒富集及分布的影响. 土壤学报, 44 (1): 73–78]

Absorption and transformation of exogenous Se and its quality effects in blueberry (*Vaccinium corymbosum*)

LIU Qing, TIAN Xia, SHI Yan-Xi*

College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China

Abstract: The absorption and transformation of exogenous Se and its quality effects in blueberry (*Vaccinium corymbosum*) were studied. In this paper, we detected the changes of total selenium, organic selenium, mineral elements and soluble sugar contents and superoxide dismutase (SOD) activity in blueberry, and the proportion of organic Se in the total Se and the utilization ratio of selenium by foliar spraying and soil application method. The results showed that the Se content of blueberry increased with the increase of the amount of Se application, and the effect of foliar spraying was significantly better than that of soil application. The maximal Se content of blueberry could reach $158.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ when Se application was $120 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$, which was more than 50 times higher than that of the control. The proportion of organic Se in total Se was between 82.46%–89.34%, and the differences was not significant among the different treatments. The utilization rate of Se with $60 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ Se application and foliar spraying in the flowering and fruiting periods separately was highest. Se application reduced the K and Na contents in blueberry, increased the contents of Ca and Mn, and had no significant effect on Mg. With the increase of Se application, the soluble sugar content increased firstly and then decreased, but the differences were not significant among treatments. Foliar spraying increased the activity of SOD in blueberry, when Se application was $120 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$, the difference reached significant level. The treatment of $60 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ Se application and foliar spraying in the flowering and fruiting periods separately are the best ways of Se enriched blueberry.

Key words: exogenous Se; blueberry (*Vaccinium corymbosum*); absorption and transformation; mineral elements; soluble sugars; organic Se

Received 2016-01-19 Accept 2016-07-10

This work was supported by the Special Fund for Agriculture Scientific Research in the Public Welfare (201303106).

*Corresponding author (E-mail: yanxiyy@126.com).