

硒碘联合生物营养强化规律及硒碘交互作用初步研究^①

鲁亚普^{1,2}, 王张民², 袁林喜², 尹雪斌^{2,3,4*}

(1 中国科学技术大学纳米科学技术学院, 江苏苏州 215123; 2 江苏省硒生物工程技术研究中心, 江苏苏州 215123;

3 中国科学技术大学苏州研究院, 江苏苏州 215123; 4 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026)

摘要: 硒和碘是人体重要的微量元素, 硒和碘缺乏可能导致人体处于亚健康状态或患多种疾病。膳食是安全、高效的补充硒和碘的方式。目前, 对植物吸收两种元素的相关性研究较为匮乏。本试验通过施加一定含量梯度的碘酸钾、硒酸盐, 探究番茄、生菜两种作物对硒和碘的吸收能力, 以及两种元素吸收的相关性。研究结果表明: 番茄植株相比生菜, 对无机硒和碘酸钾的富集能力更强; 生菜和番茄中, 硒和碘的吸收没有显著相关性。

关键词: 番茄; 生菜; 生物强化; 硒碘互作

中图分类号: S512; Q945.14; TS202.1 文献标识码: A

硒和碘是动物和人体所必需的微量营养元素。硒是动物细胞中谷胱甘肽过氧化物酶的组成成分, 辅酶家族活性部分辅基。在抗癌, 抗氧化, 解毒, 拮抗重金属, 维持人体神经、生殖等系统正常发育及功能等方面具有重要作用^[1]。缺硒导致人体出现各种疾病, 但过量摄取特别是无机形态的硒会引起人畜的中毒症, 危害健康。所以摄入适量的合适形态的硒具有重要的意义^[2]。

碘离子通过甲状腺分泌的一系列激素发挥生理功能^[3]。主要生理作用有: 维持机体能量代谢, 调控物质分解以提供生命活动所需的能量和热; 促进机体发育甲状腺激素调控生长期儿童的骨骼、性器官、肌肉及身高体重发育; 同时对促进胎儿和婴幼儿大脑维持正常形态、功能和代谢至关重要^[4]。

WHO 推荐的成年人硒摄入量为 50 μg/d, 碘 150 μg/d。中国缺硒地区超国土面积的 70%, 其中 30% 严重缺硒^[5]。近年来因无碘盐宣传冲击及环境污染的加剧, 全国相当多地区甲状腺肿发病率有大幅回升趋势^[6]。食盐加碘是目前最普遍的补碘方法, 但存在较明显缺陷, 如食盐中添加的无机碘在烹饪过程中易升华损失, 无机碘生物利用率低、中毒较强等问题^[7]。无机碘摄入量过高不仅影响体内脱氧酶系统的活性, 而且还会阻碍细胞正常化代谢^[8]。通过膳食补充硒和碘是安全、高效的方式。

薛泰麟等^[9]以小麦、玉米、油菜等为研究对象, 证明高硒含量植物具有抗氧化作用, 增加了植株体内抗氧化能力, 提高了植株的抗逆性和抗衰老能力; 杜慧玲等^[10]发现适量硒可促进生菜的光合作用。碘对植物的必需性尚未获得普遍认同, 但自然界中很多植物尤其是海生植物都有富集碘的能力。

自然条件下作物中的硒、碘等微量元素含量大多受土壤等环境背景值限制, 通过生物营养强化等技术, 如添加外源微量元素肥料, 可生产出具有补充特定功能性营养作用的作物, 从而实现通过膳食补充硒、碘等微量元素, 同时可提高作物经济价值^[11]。但通过外源添加微量元素肥料会带来一些问题, 如提高肥料成本、造成土地污染等^[12], 同时, 非聚硒植物累积的氨基酸主要是硒代蛋氨酸, 含量很少, 大部分组成蛋白质充当酶, 使得非累积型植物易发生硒中毒^[13]。过量碘对作物有毒害作用, 表现为影响植物生理生化活性, 生物量或产量减少等^[14], 限制了此类营养强化技术的发展与推广。

有诸多研究显示, 适量的硒可以增加植物对重金属的拮抗能力^[15], 因而硒可能减轻碘对作物的毒害, 提高作物对碘的富集、耐受, 从而可以提高外源微量元素肥料利用率、降低成本、减轻对环境的负担, 并可以生产复合营养强化产品, 从而提高经济价值。

番茄和生菜是两种常见蔬菜, 生长期短, 培养条

基金项目: 山西省农谷建设科研专项(SXNGJSKYZX201706)和山西省重点研发计划重点项目(201703D211001-01-02)资助。

* 通讯作者(xbyin@ustc.edu.cn)

作者简介: 鲁亚普(1992—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事功能农业研究。E-mail: luyapu@mail.ustc.edu.cn

件相对简单,是营养强化的良好目标。目前有诸多对番茄和生菜分别进行硒、碘强化的研究,但对其硒-碘联合强化的研究不多见。

本研究旨在探究番茄和生菜对硒、碘的富集效率,以及在硒-碘联合强化条件下硒-碘是否存在相互作用。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试生菜品种为香港高华子公司所产“意大利全年耐抽苔生菜”;番茄品种为“粉冠”。

供试试剂:分析纯碘酸钾;硒添加剂为苏州硒谷科技有限公司提供的基准硒肥,产品代码 SETEK-BF-S02,由含硒矿石活化得来,主要形态为亚硒酸盐和少量硒酸盐,总硒含量 6 000 mg/kg。

1.2 试验与检测方法

试验田位于苏州市车坊一蔬菜大棚基地,土壤基础理化性质:耕层有机质 28.0 g/kg,全氮 1.6 g/kg,全磷 1.1 g/kg,全钾 14.2 g/kg,pH 5.8,总硒含量 0.18 mg/kg,总碘含量 1.82 mg/kg。施肥时间为 3 月 21 日,生菜生长期处在移栽后 10 d,番茄生长期处在开花前两周。硒添加剂和碘酸钾各设置 3 个梯度,共 9 组,每组约 1.4 m²,分为 3×3 共 9 穴,各组间隔 2 m,详细梯度见表 1。施肥方式为穴施,将两种试剂混合均匀后,均分 9 份等量施加到各穴中,其他条件保持相同。

表 1 试验梯度设置
Table 1 Design of gradient spread

组别	硒添加剂(g/组)	碘酸钾(g/组)
1(对照组)	0	0
2	0	2
3	0	4
4	20	0
5	20	2
6	20	4
7	40	0
8	40	2
9	40	4

生菜采样时间为施肥后 6 周,整株采集,去掉根部;番茄采样时间为施肥后 8 周,每穴随机采摘 2 个西红柿果实。样品洗净后,用去离子水冲洗 3 遍,生菜样品在 60 °C 下烘干约 48 h 后粉碎,番茄样品用匀浆机匀浆。

硒总量检测方法:氢化物原子荧光光谱法(GB

5009.93—2017),取干样 0.2 g 左右,鲜样 4 g 左右于锥形瓶中,加入 2 ml 高氯酸,8 ml 硝酸,经冷消解 12 h 后,置于电热板上热消解,110 °C 加热 1 h,130 °C 加热 1.5 h,180 °C 加热 2 h,之后加热到 210 °C 赶酸,至锥形瓶内有较浓高氯酸白雾时,冲洗瓶壁,并再次赶酸至有白烟,取下冷却后加入 5 ml 浓盐酸还原 12 h,转移至 25 ml 比色管,定容,取适量待测液于进样管中上机检测(所用仪器为 Rayleigh AF-2000);

碘总量检测方法:如文献[16]中所用紫外-可见分光光度法,试样经碱性条件下在马弗炉中灰化后,碘化物全部转化为无机态,在酸性条件下,用溴水氧化为碘酸盐,除溴后加入过量碘离子,形成黄色 I³⁻ 水溶液,利用紫外-可见分光光度仪在 287.5 nm 波长处(所用仪器为 SHIMADZU UV-2450)对照标准浓度组进行定量。

数据分析及制图使用 Origin 9.0,数据相关性使用 Pearson 相关性分析法。

2 结果与讨论

2.1 番茄和生菜的碘强化效果

由图 1A 可知,在添加适量的碘酸钾后,生菜的碘含量有明显提升,相比对照组从 50 mg/kg 提高到了约 500 mg/kg。番茄的碘含量也有明显提升,相比对照组从 10 mg/kg 提高到了约 30 mg/kg,最高累积量可达约 50 mg/kg(图 1B)。施加 2 g/组碘酸钾相比对照提升明显,但施加 4 g/组碘酸钾相比 2 g/组碘酸钾没有明显提升,且施加 4 g/组出现了一定程度叶片发黄、枯萎现象,可见对碘酸钾的吸收已接近其耐受限度。根据试验结果,生菜和番茄碘酸钾强化上限可以参考 2.9 g/m²。

2.2 番茄和生菜的硒强化效果

由图 2A 可知,在添加适量的硒添加剂后,生菜的硒含量有明显提升,硒含量相比对照组从 30 μg/kg 提高到了平均 320 μg/kg,最高累积量可达约 500 μg/kg。番茄的硒含量也有明显提升,相比对照组从 2 μg/kg 提高到了约 9 μg/kg(图 2B)。生菜和番茄硒累积量与硒添加剂施加量呈显著正比关系($P<0.1$),施加 40 g/组硒添加剂相比 20 g/组硒添加剂富集量可提升近两倍。这说明,番茄和生菜对无机硒的耐受上限高于 170 mg/m²。

2.3 番茄和生菜对硒碘吸收的相关性

由图 3、图 4 及表 2 线性拟合结果可知,所有梯度斜率皆为正值,因此生菜和番茄中,硒对碘、碘对硒皆存在正相关影响,在各背景值梯度下都有较明显提升;但 $P>0.1$,显著性不强。

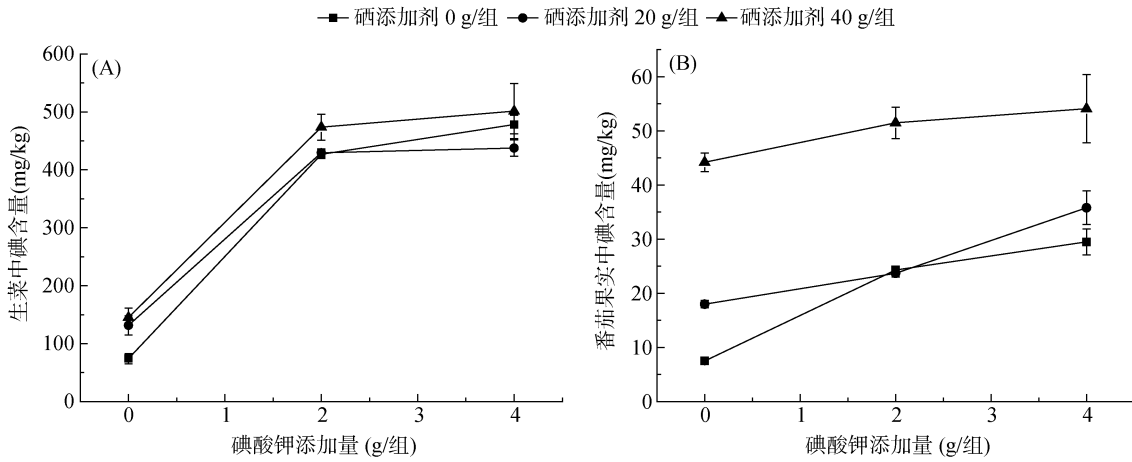


图 1 生菜(A)和番茄(B)碘强化效果

Fig. 1 Iodine biofortification in lettuce(A) and tomato(B)

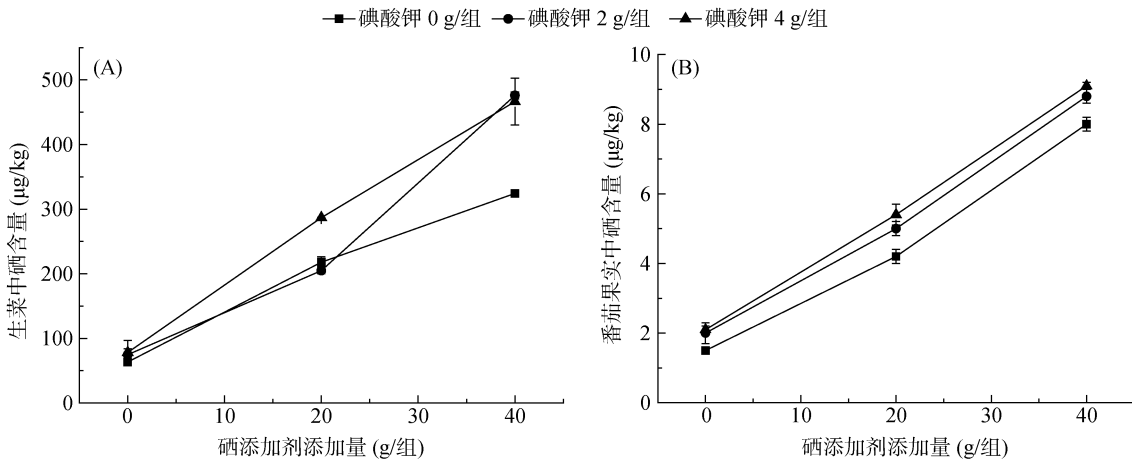


图 2 生菜(A)和番茄(B)硒强化效果

Fig. 2 Selenium biofortification in lettuce(A) and tomato(B)

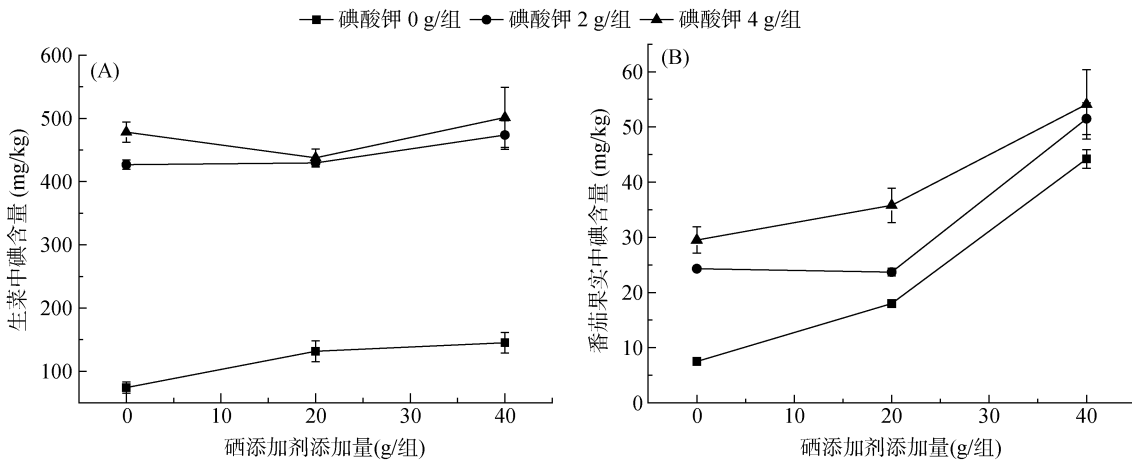


图 3 硒对生菜(A)和番茄(B)碘吸收的影响

Fig. 3 Effects of selenium on iodine uptake in lettuce(A) and tomato(B)

3 讨论

比较番茄和生菜对硒、碘的富集能力可以发现，同组梯度中，生菜的硒含量大约是番茄的 20 倍，碘

含量大约是番茄的 10 倍。生菜的含水率约为 93%~96%，番茄含水率约为 85%~90%，考虑到生菜为干样检测，番茄为鲜样检测，扣除含水率影响，生菜中硒含量与番茄相仿，碘含量只有番茄的一半左

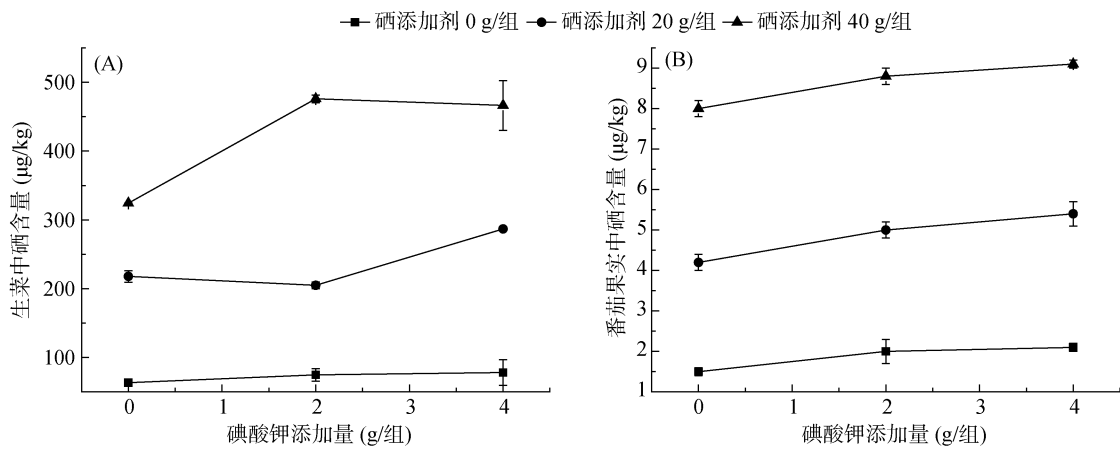


图 4 碘对生菜(A)和番茄(B)硒吸收的影响
Fig. 4 Effects of iodine on selenium uptake in lettuce(A) and tomato(B)

表 2 硒、碘吸收相关性线性拟合
Table 2 Linear fitting of correlation between selenium and iodine uptake

蔬菜	项目	添加剂	添加量(g/组)	斜率	截距	R ²	P 值
生菜	硒对碘吸收的影响	碘酸钾	0	81.50 ± 16.32	1.78 ± 0.63	0.774 9	0.217 8
			2	419.88 ± 15.47	1.17 ± 0.60	0.586 1	0.300 7
			4	460.78 ± 38.94	0.58 ± 1.51	-0.740 4	0.765 4
	碘对硒吸收影响	硒添加剂	0	64.82 ± 2.94	3.68 ± 1.14	0.824 4	0.191 5
			20	202.07 ± 35.40	17.25 ± 13.71	0.225 6	0.427 6
			40	351.27 ± 60.08	35.50 ± 23.27	0.399 0	0.369 4
番茄	硒对碘吸收的影响	碘酸钾	0	4.88 ± 5.85	0.92 ± 0.23	0.885 0	0.154 2
			2	19.57 ± 10.58	0.68 ± 0.41	0.466 9	0.345 4
			4	27.50 ± 4.47	0.62 ± 0.17	0.853 0	0.174 8
	碘对硒吸收的影响	硒添加	0	1.57 ± 0.15	0.15 ± 0.06	0.741 9	0.233 9
			20	4.27 ± 0.15	0.30 ± 0.06	0.928 6	0.121 0
			40	8.08 ± 0.19	0.28 ± 0.07	0.871 1	2.163 4

右；考虑到生菜绝大部分可食用，番茄不可食的根、茎、叶部分也会累积一定含量的硒和碘，番茄相比生菜对试验所施用的硒添加剂和碘酸钾富集能力、耐受能力更强。

Carvalho 等^[17]指出，在只施用有机硒肥的情况下，生菜对硒的富集能力高于番茄，与本试验结果对比，显示出生菜和番茄对有机硒和无机硒的吸收效率有所不同，对于无机硒，番茄比生菜的富集效率更高。

Gonzali 等^[18]指出，碘并非高等植物必需元素，但碘元素会参与高等植物的生物、化学过程，极低浓度的碘可以促进植物生长，高等植物对碘的吸收，没有统一规律，而是与植物种类、施肥时期、施肥量等多种因素有关，但一般随碘化合物分子量和化合价的增加而减少^[19]。Hong 等^[20]研究显示，生菜对碘化钾(KI)的富集能力远高于番茄；Kiferle 等^[21]的研究显示，番茄对碘酸钾(KIO₃)的富集能力显著低于对碘化钾(KI)的富集能力。结合本试验结果，说明当外源碘

添加剂为碘化钾(KI)时，生菜的富集能力远高于番茄，而当外源碘添加剂为碘酸钾(KIO₃)，番茄具有更好的富碘能力。诸多研究显示，碘的生物有效性受诸多因素影响，包括价态、温度、土壤微生物活性、土壤氮含量、氮形态等^[20-23]，这表明为获得最佳的碘富集效果，要根据不同物种、不同种植环境选取合适的外源添加剂。

本试验中，番茄和生菜中硒和碘的吸收之间不存在显著相关性，这与 Zhu 等^[24]的研究结果相一致，但 Smolen 等^[22]研究指出，当对生菜叶面喷施碘酸钾(KIO₃)和硒酸钠(Na₂SeO₄)时，两者存在协同作用，这显示出施肥方式对两者间的关系存在重要影响。相比叶面喷施，由于土壤环境的复杂性和吸收方式的不同，基施时两者间即便存在相互影响，也容易被其他影响因素所干扰、抵消，如 SeO₄²⁻会与 SO₄²⁻竞争，I⁻会与 Cl⁻竞争并对土壤氧化电位十分敏感等^[25]。

本试验结果虽然硒和碘之间不存在显著协同作

用,但也未表现拮抗作用,说明两者混合使用,不会降低各自的富集效率,可以作为复合肥使用。

4 结论

1) 施加 170 mg/m²无机硒添加剂时,番茄果实对硒的累积量可达 9 μg/kg,生菜为 500 μg/kg;当施加 2.9 g/m²碘酸钾时,番茄碘累积量可达 50 mg/kg,生菜为 500 mg/kg。

2) 番茄相比生菜,对碘酸钾和所用硒添加剂的富集、耐受能力更强。

3) 番茄和生菜对碘酸钾和所用硒添加剂的富集不存在显著相关性。

参考文献:

- [1] Alejandro F M, Charlet L. Selenium environmental cycling and bioavailability: A structural chemist point of view[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2009, 8: 81-110
- [2] 陈元明. 硒的神秘疗效[M]. 北京: 中国财经出版社, 1998: 12-38
- [3] Eckhoff K M, Maage A. Iodine content in fish and other food products from East Africa Analyzed by ICP-MS[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 1997, 10: 270-282
- [4] 颜世铭, 李增禧, 熊丽萍. 微量元素的生理作用和体内平衡[J]. *广东微量元素科学*, 2002, 9: 1-49
- [5] 侯少范. 中国低硒带人群营养状态的变化趋势与成因分析[J]. *地理研究*, 2000, 19(2): 134-140
- [6] 吴泰相, 俞红吉, 郝保清. 解决我国微量元素营养不足问题的建议[J]. *微量元素与健康研究*, 1999, 16(4): 61-63
- [7] Rose N R, Bonita R, Burek C L. Iodine: An environmental trigger of thyroiditis[J]. *Autoimmunity Reviews*, 2002(1): 97-103
- [8] 臧世臣, 倪树林, 李长林, 等. 16 种野生植物硒含量与土壤硒的关系[J]. *林业科技*, 1996, 21(4): 41-42
- [9] 薛泰麟, 侯少范, 谭见安, 等. 硒在高等植物体内的抗氧化作用—I. 硒对过氧化作用的抑制效应及酶促机制的探讨[J]. *科学通报*, 1993, 38(3): 274-277
- [10] 杜慧玲, 冯两蕊, 牛志峰, 等. 硒对生菜抗氧化酶活性及光合作用的影响[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(5): 226-229
- [11] 赵其国, 尹雪斌. 功能农业[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 6-23
- [12] 马迅, 诸旭东, 宗良纲, 等. 不同调控措施对酸性富硒土壤硒有效性及水稻产量性状的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(2): 284-290
- [13] Lauchli A. Selenium in plant-uptake, functions and environmental toxicity[J]. *Acta Botanica Croatica*, 1993, 106: 455-468
- [14] Mynett A, Wain R. Herbicidal action of iodide: Effect on chlorophyll content and photosynthesis in dwarf bean *Phaseolus vulgaris*[J]. *Weed Research*, 1973, 13(1): 101-109
- [15] 袁思莉, 余焱, 万亚男, 等. 硒缓解植物重金属胁迫和累积的机制[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(6): 545-550
- [16] 孙媚华, 陈迁, 陈泽智, 等. 紫外-可见分光光度法测定单质碘含量[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2012, 25(2): 37-41
- [17] Carvalho K, Gallardo-Williams M, Benson R, et al. Effects of selenium supplementation on four agricultural crops[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51: 704-709
- [18] Gonzali S, Kiferle C, Perata P. Iodine biofortification of crops: Agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2017, 44: 16-26
- [19] Umaly R, Poel L. Effects of iodine in various formulations on the growth of barley and pea plants in nutrient solution culture[J]. *Annals of Botany*, 1971, 35: 127-131
- [20] Hong C I, Weng H X, Qin Y C, et al. Transfer of iodine from soil to vegetables by applying exogenous iodine[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28: 575-583
- [21] Kiferle C, Gonzali S, Holwerda H, et al. Tomato fruits: A good target for iodine biofortification[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 4(205): 205
- [22] Smolen S, Kowalska I, Sady W. Assessment of biofortification with iodine and selenium of lettuce cultivated in the NFT hydroponic system[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 166: 9-16
- [23] 王松山, 梁东丽, 魏冉, 等. 基于路径分析的土壤性质和硒形态的关系[J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 823-830
- [24] Zhu Y G, Huang Y Z, Hu Y, et al. Interactions between selenium and iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) in solution culture[J]. *Plant and Soil*, 2004, 261: 99-105
- [25] Smolen S, Sady W. Influence of iodine form and application method on the effectiveness of iodine biofortification, nitrogen metabolism as well as the content of mineral nutrients and heavy metals in spinach plants (*Spinacia oleracea* L.)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 143: 176-183

Preliminary Study on Rule of Synergetic Biofortification and Interaction of Selenium and Iodine

LU yapu^{1,2}, WANG Zhangmin², YUAN Linxi², YIN Xuebin^{2,3,4*}

(1 *Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Suzhou, Jiangsu 215123, China*; 2 *Jiangsu Bio-Engineering Research Center for Selenium, Suzhou, Jiangsu 215123, China*; 3 *Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China, Suzhou, Jiangsu 215123, China*; 4 *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract: Iodine (I) and selenium (Se) are important trace elements for human body, and the lack of I and Se may lead to sub-health or a variety of diseases. Diet is a safe and efficient approach of Se and I supplement. However, there are insufficient studies now focusing on the interaction of I and Se on their uptake in plants. This study was to explore the interaction of I and Se on their uptake in tomato and lettuce and the capabilities of two crops in absorbing I and Se by adding potassium iodate and selenate (inorganic Se) with certain concentration gradients. The results showed that compared with lettuce, tomato had a stronger uptake capability for inorganic Se and potassium iodide (KI). There is no significant interaction on Se and I uptake in lettuce and tomato.

Key words: Tomato; Lettuce; Biofortification; Interaction between selenium and iodine