

磷酸盐与硒酸盐相互作用对小白菜磷和硒吸收的影响

赵文龙, 梁东丽*, 石 美, 胡 斌, 肖 然, 王嘉薇

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:采用土培盆栽试验方法,研究了不同浓度磷酸盐与硒酸盐相互作用对小白菜生长、磷和硒吸收的影响,旨在为安全有效地进行补硒和硒污染土壤的植物修复提供理论依据。结果表明,在试验的硒浓度范围内(1.0~5.0 mg·kg⁻¹),硒酸盐对小白菜产生毒害作用,表现为单施硒酸盐处理较对照小白菜的根长、株高、地上部和地下部干重均下降,且高硒处理(5.0 mg·kg⁻¹)小白菜 SPAD 值显著下降。施用磷酸盐能显著增加小白菜生物量,明显缓解硒酸盐的毒害作用,且由于生物稀释效应导致小白菜地上、地下部硒浓度下降,但小白菜的硒吸收量增加。施磷小白菜地上部硒平均利用率提高至 42%,且同等硒浓度低磷处理小白菜硒利用率高于高磷处理,表明适量施磷可提高硒的利用率。施磷时施硒对小白菜地上部磷浓度无显著影响,但由于硒的毒害作用导致磷吸收量下降。

关键词:磷酸盐;硒酸盐;生长;吸收

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)12-2331-08 **doi:**10.11654/jaes.2013.12.004

Effects of Phosphate and Selenate Interactions on Uptake of Phosphorus and Selenium by Pak Choi

ZHAO Wen-long, LIANG Dong-li*, SHI Mei, HU Bin, XIAO Ran, WANG Jia-wei

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University; Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: Phosphate may influence movement and uptake of selenium in soil-plant systems. A pot experiment was carried out to study the effects of phosphate and selenate interactions on growth, uptake of phosphorus and selenium of pak choi. Addition of selenate alone significantly reduced the root length, shoot height and dry weight of shoots and roots, and also caused the decline of Chlorophyll Meter Readings (SPAD values) at higher doses. Supplying phosphate increased the pak choi biomass, but significantly reduced concentrations of selenium in both roots and shoots due to the biological dilution. However, selenium accumulation by pak choi was increased by phosphate applications. Applying phosphate increased the average selenium use efficiency by up to 42% at all selenate rates (1.0~5.0 mg·kg⁻¹), with higher selenium use efficiency in low than in high phosphate treatments. Applying selenate had no effects on phosphorus concentrations of pak choi, while reduced phosphorus accumulation by pak choi due to the selenium toxicity.

Keywords: phosphate; selenate; growth; uptake

硒是人和动物生命活动中的一种必需微量元素,其缺乏(<40 μg·d⁻¹)和过量(>400 μg·d⁻¹)都会影响人和动物健康^[1]。我国 72% 的县(市)存在不同程度的缺硒现象,其中 1/3 为严重缺硒区^[2]。土壤施硒是通过饮食补硒的很好途径^[3],但施入的硒肥,只有 5%~30% 被

植物吸收利用,70%~90% 残留在土壤中并随土壤环境的变化而发生迁移、转化^[4]。因此,硒污染问题在全球范围内屡见不鲜^[5-6],我国湖北恩施及陕西紫阳两个富硒区均曾发生过硒中毒事件^[7]。此外,随着硒在金属冶炼、电子设备、玻璃制造、色素合成等工农业领域的不断应用,使得硒污染日益加剧^[8],硒也因此成为与全球环境和人体健康有关的元素而备受关注。

磷肥作为作物生长必需的大量元素,被广泛用于农业生产实践^[9]和植物修复中^[10],用于提高作物产量和土壤修复效率。但不容忽视的是,磷与硒间的相互

收稿日期:2013-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41171379);西北农林科技大学创新团队项目

作者简介:赵文龙(1988—),男,河南安阳人,硕士研究生,主要从事土壤环境化学方向研究。E-mail:wlzaw113628@163.com

* 通信作者:梁东丽 E-mail:dongliliang2005@yahoo.com

作用将直接影响硒在环境介质中的迁移转化、吸收累积,因此搞清土壤-植物系统中磷与硒间的相互作用十分重要。

土壤中的硒酸盐和亚硒酸盐是易被植物吸收利用的两种价态^[1],许多研究表明磷酸盐可抑制亚硒酸盐的吸收^[12-13],但也有磷酸盐可促进作物吸收亚硒酸盐的报道^[14-15]。与亚硒酸盐相比,硒酸盐的生物有效性高,作物对其吸收量远远大于亚硒酸盐^[16-17],因此在生产实践中施入的硒肥主要是硒酸盐^[18]。有关磷酸盐和硒酸盐相互作用方面也开展了一些研究,有的认为施入磷酸盐降低了土壤对硒酸盐的吸附作用,能提高硒酸盐的生物有效性^[19],但水培试验却证实提高磷酸盐的浓度导致硒酸盐处理苜蓿^[20]和小麦^[21]中硒含量下降。Ylärinta^[22]在土培盆栽试验中也发现,施入磷能降低黑麦草中硒的含量;而陈思杨等^[21]却在水培试验中发现,施磷可增加水稻硒的累积,但却导致小麦硒累积量的下降。由此可见,有关磷酸盐和硒酸盐相互作用对硒吸收影响的研究结果不尽一致。本文选择硒富集植物小白菜^[23]作为供试作物,通过土培盆栽试验研究了磷酸盐与硒酸盐相互作用对小白菜生长、磷硒吸收的影响,旨在为硒肥的合理配施及硒污染土壤的植物修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤为塿土,采自陕西杨凌西北农林科技大学北校区试验田,采用多点取样法采集表层土壤(0~20 cm),自然风干后,剔除残茬、碎砾,全部土样过孔径5 mm筛。土壤基本理化性质为:pH值7.74,阳离子交换量(CEC)23.34 cmol·kg⁻¹,黏粒含量39.5%,碳酸钙55.00 g·kg⁻¹,有机质16.33 g·kg⁻¹,全氮1.11 g·kg⁻¹,速效磷17.05 mg·kg⁻¹,速效钾144.83 mg·kg⁻¹,全硒0.131 mg·kg⁻¹。

盆栽作物为小白菜(*Brassica chinensis*),品种为秦白2号,由西北农林科技大学种子公司提供。供试硒为硒酸盐(硒酸钠),磷为磷酸二氢钠,为分析纯试剂,且均为钠盐,以减少伴随离子的可能影响。

1.2 试验设计

根据实际生产中磷的施用水平(章永松等^[24]认为蔬菜适宜生长的土壤有效磷水平为60~90 mg·kg⁻¹,大于90 mg·kg⁻¹则偏高)和预实验结果(硒酸盐浓度在2.5 mg·kg⁻¹时,其生物量达最大),外源磷设无磷(0 mg·kg⁻¹)、低磷(75 mg·kg⁻¹)和高磷(150 mg·kg⁻¹)3

个水平;外源硒设置为0、1.0、2.5、5.0 mg·kg⁻¹,分别代表无硒、低硒、中硒和高硒4个水平。将磷与硒各水平进行完全交互,共12个处理,每个处理重复4次,共48盆。选择内径17 cm、深13 cm的塑料盆,每盆装土2.5 kg,每千克土壤施入0.15 g N(试剂为尿素,分析纯)和0.1 g K(试剂为氯化钾,分析纯),将各处理磷和硒折算配制成对应的磷酸二氢钠和硒酸钠溶液,用小型喷雾器均匀喷入土壤,充分混匀,控制水分为田间持水量的60%,平衡10 d播种。每盆播12颗小白菜种子,7 d后间苗,10 d后定苗至5株。小白菜在网室生长,期间保持自然光照及通风,最高温度为19~35℃,最低温度为9~19℃,生长期间保持土壤湿度为田间持水量的70%左右,40 d后收获。

1.3 样品采集和指标测定

小白菜收获后,测定其生长指标(根长、株高、生物量)、叶绿素含量(SPAD值)、硒和磷含量。具体方法是:将小白菜连根收获,用蒸馏水将根和叶子洗干净,并用吸水纸擦干。将其地上、地下部分离后测定根长(用直尺测定主根长)、株高和鲜重。植物样品90℃杀青30 min后,60℃烘至恒重,称量地上和地下部干重。

土壤基本理化性质用常规方法^[25]测定。SPAD值用SPAD-502叶绿素仪测定^[26]。植物样中磷的测定:样品经H₂SO₄-H₂O₂消解后,用钼蓝法测定^[25]。植物样品中硒的测定:样品经HNO₃-HClO₄(体积比为4:1)消解和6 mol·L⁻¹盐酸还原后,用氢化物发生-原子荧光光谱法(北京吉天 AFS-930 双道原子荧光光度计)测定^[27]。同时用圆白菜样(GBW10014)作为质量控制样品,实测圆白菜质控样值为(0.23±0.02)mg·kg⁻¹[标准值为(0.20±0.03)mg·kg⁻¹]。

1.4 数据分析

使用DPS v7.05和SPSS 13.0进行数据分析处理,对数据进行双因子方差分析,并采用Duncan法进行多重比较,不同字母表示5%显著水平。

为了表明施入土壤中的硒被小白菜利用的情况,本文引入硒利用率^[28]的概念。计算公式如下:

硒利用率(%)=(某处理硒吸收量-不施硒处理硒吸收量)/某施硒处理硒加入量×100%

为了表明小白菜富集磷、硒的能力,引入富集系数(BCF_{shoot}和BCF_{root})的概念^[23]。计算公式如下(式中C表示硒浓度):

地上部富集系数(BCF_{shoot})=C_{地上部分}/C_{生长介质}

地下部富集系数(BCF_{root})=C_{地下部分}/C_{生长介质}

2 结果与分析

2.1 磷酸盐与硒酸盐相互作用对小白菜生长的影响

2.1.1 对小白菜 SPAD 值、株高和根长的影响

表 1 给出了不同浓度磷、硒相互作用对小白菜生长的影响结果。可以看出,单施硒能显著降低小白菜的根长、株高($P<0.05$),高硒处理小白菜根长、株高较无硒处理分别下降了 66.4%和 63.4%。单施磷对小白菜根长的促进作用显著,高磷处理小白菜根长较无磷处理增加了 25.2%($P<0.05$),但施磷对小白菜株高的影响不显著。磷硒复合作用时,相同磷水平下,小白菜根长均随外源硒浓度的增加而显著下降($P<0.01$),但施硒对小白菜株高的影响不显著;相同硒水平下,小白菜的根长随外源磷浓度的增加而增大,但低磷和高磷处理间无显著差异。与单施磷处理不同的是,当硒浓度 $\geq 2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,施磷可显著增加小白菜株高($P<0.05$)。

单施硒处理当硒浓度 $\geq 2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,小白菜 SPAD 值显著低于对照;但对于磷硒复合处理,仅高磷高硒处理小白菜的 SPAD 值显著低于其他处理。

2.1.2 对小白菜生物量的影响

单施硒处理小白菜生物量随外源硒浓度的升高而显著下降($P<0.05$),高硒处理($5.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)小白菜地上、地下部干重较无硒处理分别下降了 89.1%和 81.5%(表 1),表明该试验浓度下施硒对小白菜生长产生了抑制作用。单施磷与无磷处理相比,增加了小白菜的生物量,其中高磷处理小白菜地上、地下部生物量分别较无磷处理提高了 107.4%和 184.6%。磷硒复合处理中,相同磷水平下,小白菜生物量随外源硒浓度的升高而降低,高磷高硒处理小白菜地上、地下部干重较单一高磷处理分别下降了 26.2%和 57.4%;相同硒水平下,施磷显著增加了小白菜的生物量,其中高硒高磷处理小白菜地上、地下部干重分别较高硒无磷处理增加了 12.9 倍和 6.5 倍。这些都说明磷硒复合作用下,施磷能有效地缓解高浓度硒酸盐对小白菜生长的毒害作用,但高磷和低磷处理间差异不显著。

双因子方差分析表明,各磷或硒处理间的生长指标呈显著差异,但磷硒交互作用对小白菜地上、地下生物量的影响不显著,而小白菜根长和株高却受到显著影响($P<0.01$),说明根长、株高对磷硒交互作用更敏感。

表 1 磷酸盐与硒酸盐相互作用对小白菜生长指标的影响

Table 1 Growth of pak choi as influenced by phosphate and selenate interactions

处理 Treatment		SPAD 值	根长/cm Root length	株高/cm Plant height	地下干重/g Root biomass	地上干重/g Shoot biomass
磷 P	硒 Se/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
无磷 No P	0	34.4±1.9a	10.7±0.8bc	19.0±1.5abc	0.11±0.04ef	3.82±0.87d
	1.0	33.6±1.1ab	8.4±0.9d	19.0±2.1abc	0.10±0.02ef	2.72±0.36de
	2.5	30.2±0.7c	6.4±0.1e	17.1±2.0c	0.04±0.01fg	1.53±0.41ef
	5.0	31.3±0.6bc	3.6±0.7f	6.9±1.0d	0.02±0.01g	0.42±0.07f
低磷 Low P	0	35.5±0.8a	12.2±1.4ab	19.8±1.6ab	0.32±0.05ab	8.42±2.55a
	1.0	33.5±2.9ab	11.8±0.1ab	21.2±1.1a	0.29±0.03ab	7.36±1.20abc
	2.5	34.4±2.7a	9.4±0.6cd	20.4±1.6ab	0.29±0.08ab	8.27±0.56a
	5.0	34.9±2.4a	7.8±0.2de	18.3±1.6bc	0.15±0.06de	5.73±0.55c
高磷 High P	0	34.9±1.0a	13.4±1.9a	20.6±2.1ab	0.36±0.09a	7.93±0.81a
	1.0	34.2±3.0ab	12.6±0.5a	19.9±1.0ab	0.26±0.02bc	7.42±0.98ab
	2.5	33.8±1.3ab	10.6±1.2bc	21.1±1.7a	0.21±0.01cd	7.31±0.94abc
	5.0	29.4±1.4c	8.1±1.0de	21.1±1.7a	0.15±0.04de	5.85±1.01bc
P		**	**	**	**	**
Se		**	**	**	**	**
P×Se		*	**	**	NS	NS

注:同一列数据进行多重比较,不同的字母表示数据在 5%水平上差异显著;表底 3 行是双因素方差分析显著性差异水平,**表示达到 99%的差异显著性,*表示达到 95%的差异显著性,NS 表示差异性不显著。下同。

Note: Different letters within a column indicate significant differences at 5% level. The last three rows show that a significant difference in two-way ANOVA, ** indicates a significant difference at 1% level, * indicates a significant difference at 5% level, NS indicates no significance. The same below.

2.2 磷酸盐与硒酸盐相互作用对小白菜硒吸收的影响

2.2.1 对小白菜硒浓度的影响

单施硒处理小白菜地上、地下部硒含量随外源硒浓度的升高而增大,且各处理间差异显著($P<0.01$) (图1)。单施磷使得小白菜地上部硒含量随磷浓度增加有下降趋势,但是各磷浓度间差异不显著。磷硒复合处理中,磷浓度相同时,小白菜地上、地下硒含量随外源硒浓度的增大而增加,变化趋势与单施硒处理相同;硒浓度相同时,小白菜地上部和地下部硒含量却随施入磷浓度的增加而下降,地上和地下硒含量分别下降了29.5%~45.0%和43.8%~56.4% ($P<0.05$),且当硒浓度 $\leq 2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,施磷处理对地上部硒含量的影响不显著,只有在高硒浓度下,施磷处理影响显著;而在所有硒浓度下,施磷处理对地下部硒含量的影响均显著。

2.2.2 对小白菜硒吸收量的影响

单施硒处理小白菜地上、地下部硒吸收量随硒浓度的升高有增加趋势,但差异不显著(表2)。单施磷对小白菜硒吸收量的影响不显著。但磷硒复合处理中,相同磷浓度处理小白菜地上、地下部硒吸收量随外源硒浓度的升高而显著增大;当硒浓度 $\geq 2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,施磷(低磷和高磷)能显著提高小白菜地上、地下部硒吸收量($P<0.05$),但高磷处理的影响显著小于低磷处理。

单施硒处理小白菜硒利用率随外源硒浓度的增加逐渐下降(表2)。磷硒复合处理中,同等磷浓度时,小白菜硒利用率随硒浓度的增大呈现先上升后下降的趋势,且在 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒处理时达最大;同

等硒浓度时,施磷显著提高了小白菜硒利用率,但是低磷处理小白菜硒的利用率高于同等硒浓度的高磷处理。

双因子方差分析表明,磷和硒的吸收量均受到磷、硒或磷硒交互作用的显著影响($P<0.01$)。

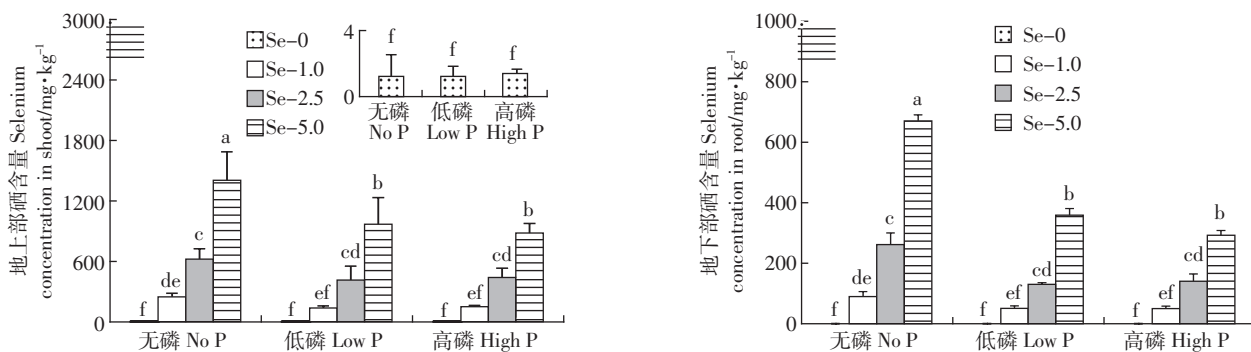
2.3 磷酸盐与硒酸盐相互作用对小白菜磷吸收的影响

单施磷处理小白菜地上部磷含量(图2)及吸收量(表2)均随外源磷浓度的增加而显著增大($P<0.05$)。单施硒处理小白菜地上部磷含量和吸收量较对照处理分别平均下降了38.4%和72.0% ($P<0.05$),但不同硒浓度间无显著差异。磷硒复合处理中,同等硒浓度时,小白菜地上部磷含量及吸收量随外源磷浓度影响的变化趋势与单施磷处理相似,即随外源磷浓度的增加而增大;同等磷浓度时,施硒对小白菜地上部磷含量无显著影响,却因其对小白菜生长的抑制作用(表1),显著降低了地上部磷的吸收量。

2.4 磷酸盐和硒酸盐相互作用对小白菜硒、磷富集的影响

单施硒处理中,小白菜地上硒的富集系数($\text{Se-BCF}_{\text{shoot}}$)和地下硒的富集系数($\text{Se-BCF}_{\text{root}}$)均随施外源硒浓度的增加而显著增大($P<0.05$)。单施磷处理对 $\text{Se-BCF}_{\text{shoot}}$ 无显著影响。磷硒复合处理中,相同磷水平下, $\text{Se-BCF}_{\text{shoot}}$ 和 $\text{Se-BCF}_{\text{root}}$ 均随外源硒浓度的增加而增大;相同硒水平下,与无磷处理相比,施磷导致小白菜 $\text{Se-BCF}_{\text{shoot}}$ 和 $\text{Se-BCF}_{\text{root}}$ 的显著下降,说明磷酸盐的存在降低了小白菜对硒酸盐的富集作用。

单施磷处理小白菜地上磷富集系数($\text{P-BCF}_{\text{shoot}}$)显著低于无磷处理,但低磷与高磷处理间差异不显



Se-0, Se-1.0, Se-2.5, Se-5.0 分别代表硒处理的4个水平。对地上、地下部各磷硒处理之间分别进行多重比较,

不同的字母表示在5%水平下差异显著,下同。不施硒的3个磷处理小白菜地下部硒含量未检出

Se-0, Se-1.0, Se-2.5, Se-5.0 represent four levels of selenium addition. Different letters indicate significant differences at 5% level

When no Se was applied, no selenium in pak choi roots in the three phosphorus treatments was detected

图1 磷酸盐与硒酸盐相互作用对小白菜硒含量的影响

Figure 1 The effect of phosphate and selenate interaction on selenium concentrations of pak choi

表 2 磷酸盐和硒酸盐相互作用对小白菜硒、磷吸收量的影响

Table 2 Effects of phosphate and selenate interactions on uptake of selenium and phosphorus in pak choi

处理 Treatment		硒吸收量 Selenium uptake/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$		硒利用率/%	磷吸收量 Phosphorus uptake/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$
磷 P	硒 Se/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上部 Shoots	地下部 Roots	Selenium use efficiency	地上部 Shoots
无磷 No P	0	4.9±4.2e	—	—	13.7±1.2f
	1.0	658.6±25.8de	9.03±2.28de	23.4%	6.5±1.7g
	2.5	717.6±87.6de	11.12±3.30de	11.0%	4.0±1.0g
	5.0	718.2±126.3de	13.41±4.71d	5.7%	1.0±0.4g
低磷 Low P	0	12.7±6.9e	—	—	40.3±2.6b
	1.0	977.5±58.0d	14.54±0.97d	34.6%	30.3±3.7d
	2.5	3 778.0±875.8c	32.38±6.86c	57.7%	30.3±1.7d
	5.0	5 416.1±1 037.4a	63.30±18.99a	42.6%	23.8±2.6e
高磷 High P	0	11.1±2.3e	—	—	48.9±5.2a
	1.0	997.6±70.3d	12.88±1.21de	35.3%	37.1±3.1bc
	2.5	3 200.4±766.5c	29.83±4.65c	48.9%	34.1±2.5cd
	5.0	4 781.4±877.2b	44.51±11.87b	37.5%	30.7±8.8d
P		**	**	—	**
Se		**	**	—	**
P×Se		**	**	—	**

注:由于小白菜地下生物量小,无法测定其磷含量(图 2 同),故无法计算地下部磷吸收量(表 3 同)。
Note: Phosphorus in plant roots was not detected due to too low root biomass.

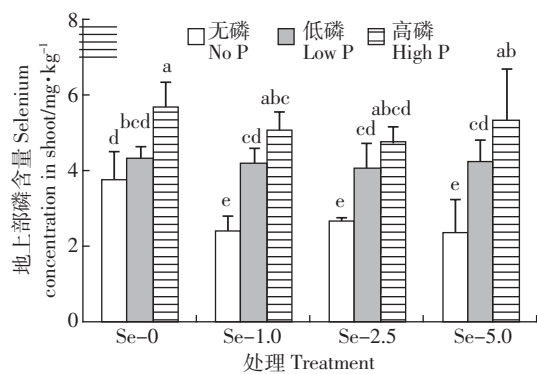


图 2 磷酸盐与硒酸盐相互作用对小白菜地上部磷含量的影响
Figure 2 The effect of phosphate and selenate interactions on phosphorus concentrations of pak choi shoots

著。单施硒处理小白菜的 P-BCF_{shoot} 均显著低于对照处理。磷硒复合处理中,同等硒浓度时,小白菜 P-BCF_{shoot} 随磷的施入而显著下降,但高磷和低磷处理间无显著差异;相同磷浓度时,外源硒浓度对小白菜的 P-BCF_{shoot} 无显著影响。

从双因子方差分析结果(表 3)可看出,施磷显著影响了 Se-BCF_{shoot} 和 Se-BCF_{root} ($P<0.01$),但对 P-BCF_{shoot} 的影响不显著,而硒对磷或硒的富集系数均产生了显著影响,磷硒相互作用仅对 Se-BCF_{root} 表现出显著影响。

表 3 磷酸盐和硒酸盐相互作用对硒、磷富集系数的影响

Table 3 The effect of phosphate and selenate interactions on bio-concentration factor of selenate to phosphate in pak choi

处理 Treatment		硒 Se		磷 P
磷 P	硒 Se/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Se-BCF _{shoot}	Se-BCF _{root}	P-BCF _{shoot}
无磷 No P	0	4.3±0.4f	—	218.0±44.2a
	1.0	217.5±31.8abc	79.4±14.1c	139.0±22.6b
	2.5	236.2±39.2ab	99.4±14.5b	154.8±5.3b
	5.0	273.1±55.1a	130.6±4.0a	135.4±53.7b
低磷 Low P	0	11.7±2.9f	—	46.5±3.5c
	1.0	126.7±17.2e	44.6±7.2e	45.1±4.6c
	2.5	175.1±46.4cde	49.3±2.3e	43.7±7.2c
	5.0	188.5±51.4bcd	69.9±4.4cd	45.5±6.4c
高磷 High P	0	10.7±2.2f	—	33.7±3.8c
	1.0	131.5±12.6de	44.2±6.8e	30.1±2.7c
	2.5	166.5±35.5cde	53.3±9.3e	28.1±2.4c
	5.0	171.4±18.8cde	56.9±3.1de	31.6±8.3c
P		**	**	NS
Se		**	**	**
P×Se		NS	**	NS

3 讨论

施磷可显著促进小白菜的生长,表现为小白菜的根长、地上部和地下部干重显著增加($P<0.01$)。单施

硒导致小白菜根长、株高、地上部和地下部干重下降,高硒处理也导致 SPAD 值显著降低(表 1),说明在该试验浓度下,硒对小白菜产生了毒害作用,这与众多研究结果一致^[23,29-30]。施磷可显著降低硒的毒害作用,表现为施磷后硒对小白菜根长、株高、地上部和地下部干重的抑制率下降(表 1)。有研究发现,在重金属污染的土壤中施磷可增加花椰菜^[31]和大豆^[32]的地上、地下部干重,这主要源于重金属毒性的下降(如共沉淀作用)及作物磷营养的增加^[31]。磷酸盐和硒酸盐在土壤中竞争吸附位点,施加磷酸盐可将土壤中吸附的硒酸盐解吸下来,从而增加了土壤硒的有效性^[33-34];目前还没有证据证明磷酸盐和硒酸盐在进入植物根部时存在吸收竞争作用。因此,施磷对硒毒害作用的降低,更多是由于施加磷酸盐明显改善了植物的磷营养,显著增加了小白菜的生物量(表 1)所产生的生物稀释效应所致。

一般情况下,因为土壤中硒含量比较低(全球平均为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),再加上一些地区硒的有效性低,所以一般作物中硒含量都在 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 级。本研究发现,施硒可显著增加小白菜对硒的吸收和累积,表现为施硒处理小白菜地上、地下部硒浓度、吸收量及富集系数均随硒浓度的升高而逐渐升高($P < 0.05$),且 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下的小白菜地上部硒含量平均高达 $1082 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与已有的许多研究结果一致^[23,30,35]。有研究证实,硒富集植物的硒含量亦可达每千克几百毫克或几千毫克^[36-37];十字花科植物(如小白菜)硒吸收量高^[38],施入硒酸盐后芥菜叶中硒含量也达到 $1464 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[39]。本研究发现,小白菜地上部和地下部硒含量均随施入磷浓度的增加而下降(图 1),这与 Khactak 等^[20]在砂培苜蓿试验中得到的结果一致。Ylärinta^[22]在土培试验中也发现,施入磷酸盐和硒酸盐能够导致意大利黑麦草中硒浓度显著下降,Singh 等^[40]在芥菜、Levesque^[41]在玉米中也发现施入的磷量和作物硒吸收间存在负相关。与此相反,Carter 等^[14]却发现,施磷能提高苜蓿中硒含量,Singh 和 Malhatra^[15]在三叶草中也得到相似的结论。这些截然不同的结果不仅源于作物种类、研究介质的不同,而且也与施入磷肥土壤种类、pH 等因素有关。本研究中施磷对小白菜硒含量的影响则主要源于磷对小白菜生长的促进作用所产生的稀释效应,因为施磷显著增加了小白菜的生物量,在高硒处理中,施磷后小白菜地上部干重甚至增加了 12.9 倍(表 1)。另外,本研究还发现施磷对小白菜地下部硒含量的影响差异显著,对地上部硒含量仅在高

硒处理有显著影响,原因是土壤中硒酸盐的生物有效性高,且作物吸收的硒酸盐很容易转运到植物体的地上部分^[23],使得作物地上部硒浓度常常是地下硒浓度的几倍或几十倍^[17],因此地下硒含量相对地更易受施入磷的影响。这与 Liu 等^[42]在水稻上得到的结论:过量的磷在低硒浓度时抑制水稻地上硒的累积,但在高硒浓度时对地上部硒累积无影响,水稻根系硒浓度与外源硒浓度无关,均随外源磷浓度增加而显著下降的结论相一致。

单施硒可导致小白菜地上部磷含量的显著下降(图 2),这与本研究中观察到的硒对小白菜生长的抑制作用有关(表 1)。但是,磷硒复合处理中,同等磷浓度下,虽然施硒仍抑制了小白菜的生长(表 1),但小白菜地上部的磷含量却随施硒浓度的增大无显著改变(图 2)。这可能是施磷后增加了小白菜的营养和抗性,小白菜对磷的吸收也因此未受到显著抑制。其他研究^[43,31]也表明,施磷可减少植物对一些重金属的吸收,从而增强植物对重金属的抗性。本研究还发现因为该试验硒浓度下对小白菜生长的抑制作用导致生物量下降(表 1),从而引起其地上部硒吸收量的显著降低。Kopsell 等^[44]也发现,甘蓝中磷含量随外源硒浓度的增加而显著下降;Singh^[40]却发现增施硒酸盐能提高芥菜植株体磷含量,并将其原因归结于硒酸盐的施入使得与土壤中羟基结合态的磷释放,增加了土壤中磷的有效性^[19]。施磷虽然导致小白菜地上、地下部硒含量下降,却显著增加了小白菜地上、地下部的吸收量和硒利用率(由平均 13.4%提高至 42.7%),且低磷处理小白菜硒的利用率高于同等硒浓度的高磷处理,故在进行补硒和植物修复时,应注意适量施磷。

4 结论

(1)在试验浓度范围内硒酸盐对小白菜产生毒害作用,各生长指标均随硒浓度增大而下降;施用磷酸盐由于磷营养的增加所产生的生物稀释效应能明显缓解硒酸盐的毒害作用。

(2)小白菜地上部和地下部硒含量均随施入磷浓度的增加而下降,但施磷却显著增加了小白菜硒的吸收量和硒利用率,且同等硒浓度低磷处理小白菜硒的利用率高于高磷处理,表明适量施磷能提高硒的利用率。

(3)磷硒复合处理对小白菜地上部磷浓度无显著影响,但由于硒的毒害作用导致磷的吸收量下降。

参考文献:

- [1] Sager M. Selenium in agriculture, food, and nutrition[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2006, 78(1):111-134.
- [2] 赵中秋, 郑海雷, 张春光, 等. 土壤硒及其与植物硒营养的关系[J]. 生态学杂志, 2003, 22(1):22-25.
ZHAO Zhong-qiu, ZHENG Hai-lei, ZHANG Chun-guang, et al. Advances in the studies on selenium in soil and selenium biological effect [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1):22-25.
- [3] 咎亚玲, 王朝辉, 毛 晖, 等. 施用硒、锌、铁对玉米和大豆产量与营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):252-256.
ZAN Ya-ling, WANG Zhao-hui, MAO Hui, et al. Effect of Se, Zn and Fe application on yield and nutritional quality of maize and soybean[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):252-256.
- [4] Eich-Greatorex S, Sogn T A, Øgaard A F, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertiliser as influenced by soil organic matter content and pH[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79(3):221-231.
- [5] Wang M C, Chen H M. Forms and distribution of selenium at different depths and among particle size fractions of three Taiwan soils [J]. *Chemosphere*, 2003, 52(3):585-593.
- [6] Tan J A, Zhu W Y, Wang W Y, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 284(1):227-235.
- [7] Fordyce F, Guangdi Z, Green K, et al. Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15(1):117-132.
- [8] Lim T T, Goh K H. Selenium extractability from a contaminated fine soil fraction: Implication on soil cleanup[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(1):91-101.
- [9] Roselli C, Desideri D, Meli M A, et al. Sequential extraction for the leachability evaluation of phosphate fertilizers[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 95(2):373-376.
- [10] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6):881-893.
LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, YAN Xiu-lan, et al. Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6):881-893.
- [11] Banuelos G, Lin Z Q. Phytoremediation management of selenium-laden drainage sediments in the San Luis Drain: A greenhouse feasibility study[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 62(3):309-316.
- [12] Hopper J L, Parker D R. Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate[J]. *Plant and Soil*, 1999, 210(2):199-207.
- [13] Mora M de la L, Pinilla L, Rosas A, et al. Selenium uptake and its influence on the antioxidative system of white clover as affected by lime and phosphorus fertilization[J]. *Plant and Soil*, 2008, 303(1-2):139-149.
- [14] Carter D L, Robbins C W, Brown M J. Effect of phosphorus fertilization on the selenium concentration in alfalfa[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1972, 36(4):624-628.
- [15] Singh M, Malhotra P K. Selenium availability in berseem (*Trifolium alexandrinum*) as affected by selenium and phosphorus application[J]. *Plant and Soil*, 1976, 44(1):261-266.
- [16] Cartes P, Gianfreda L, Mora M L. Uptake of selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms[J]. *Plant and Soil*, 2005, 276(1-2):359-367.
- [17] 吴雄平, 梁东丽, 鲍俊丹, 等. Se(IV)和Se(VI)对小白菜生长及生理效应的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(10):2163-2171.
WU Xiong-ping, LIANG Dong-li, BAO Jun-dan, et al. Effects of different concentrations of selenate and selenite on growth and physiology of Chinese cabbage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(10):2163-2171.
- [18] Oldfield J E. Selenium world atlas[R]. Belgium, Grimbergen: Selenium-Tellurium Development Association, 2002:8-9.
- [19] Eich-Greatorex S, Krogstad T, Sogn T A. Effect of phosphorus status of the soil on selenium availability[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(3):337-344.
- [20] Khattak R A, Bakhtar D, Parker D, et al. Accumulation and interactions of arsenic, selenium, molybdenum and phosphorus in alfalfa[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1991, 20(1):165-168.
- [21] 陈思杨, 江荣风, 李花粉. 苗期小麦和水稻对硒酸盐/亚硒酸盐的吸收及转运机制[J]. 环境科学, 2011, 32(1):284-289.
CHEN Si-yang, JIANG Rong-feng, LI Hua-fen. Uptake and translocation of selenate or selenite by wheat and rice seedlings[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1):284-289.
- [22] Yläntä T. Effects of liming and the addition of sulphate and phosphate on the selenium content of Italian ryegrass[J]. *Journal Annales Agriculturae Fenniae*, 1990, 29(2):141-149.
- [23] 段曼莉, 胡 斌, 梁东丽, 等. 4种蔬菜对硒酸盐的吸收、富集与转运特征的研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):422-428.
DUAN Man-li, HU Bin, LIANG Dong-li, et al. Absorption, bioaccumulation and translocation of selenium in four different vegetables by applying selenate[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):422-428.
- [24] 章永松, 倪吾钟, 林咸永, 等. 杭州市郊菜园土壤的有效养分状况与施肥对策[M]//谢建昌, 陈际型. 菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥. 南京: 河海大学出版社, 1997:43-46.
ZHANG Yong-song, NI Wu-zhong, LIN Xian-yong, et al. The state of the available nutrients of the vegetable garden soils in the suburb of Hangzhou and fertilizing countermeasures[M]//Xie Jian-chang, Chen Ji-xing. The soil fertility of the vegetable garden and rational fertilization to vegetables. Nanjing: Hehai University Press, 1997:43-46.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Analysis methods for soil agro-chemistry[M]. The third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [26] 艾天成, 李方敏, 周治安, 等. 作物叶片叶绿素含量与SPAD值相关性研究[J]. 湖北农学院学报, 2000, 20(1):6-8.
AI Tian-cheng, LI Fang-min, ZHOU Zhi-an, et al. Relationship between chlorophyll meter readings (SPAD Readings) and chlorophyll content of crop leaves[J]. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2000,

- 20(1):6-8
- [27] GB 5009.93—2010 食品国家安全标准:食品中硒的测定[S].北京:中国标准出版社,2010.
- GB 5009.93—2010 National food safety standard: Determination of selenium in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [28] 高家合,李梅云,晋 艳.叶面喷施硒肥对烤烟的影响[J].中国农业科技导报,2007,9(2):61-65.
- GAO Jia-he, LI Mei-yun, JIN Yan. Effects of spraying Se fertilizer to leaves on flue-cured tobacco[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2007, 9(2): 61-65.
- [29] Sharma S, Bansal A, Dhillon S K, et al. Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2010, 329(1): 339-348.
- [30] 付冬冬,段曼莉,梁东丽,等.不同价态外源硒对小白菜生长及养分吸收的影响[J].植物营养与肥科学报,2011,17(2):358-365.
- FU Dong-dong, DUAN Man-li, LIANG Dong-li, et al. Effects of selenite and selenate on growth and nutrient absorption of pakchoi[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2): 358-365.
- [31] Chen S, Chen L, Ma Y, et al. Can phosphate compounds be used to reduce the plant uptake of Pb and resist the Pb stress in Pb-contaminated soils? [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(3): 360-365.
- [32] Cao X, Wahbi A, Ma L, et al. Immobilization of Zn, Cu, and Pb in contaminated soils using phosphate rock and phosphoric acid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2): 555-564.
- [33] Dhillon S K, Dhillon K S. Selenium adsorption in soils as influenced by different anions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163(6): 577-582.
- [34] Barrow N, Cartes P, Mora M. Modifications to the Freundlich equation to describe anion sorption over a large range and to describe competition between pairs of ions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(5): 601-606.
- [35] 胡 斌,王 丹,王松山,等.铜、硒复合污染对小白菜生长及金属吸收和转运的影响[J].环境科学学报,2011,31(9):2033-2041.
- HU Bin, WANG Dan, WANG Song-shan, et al. Uptake and transport of exogenous Cu and Se in pakchoi and their effects on growth[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 2033-2041.
- [36] Renkema H, Koopmans A, Kersbergen L, et al. The effect of transpiration on selenium uptake and mobility in durum wheat and spring canola [J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1-2): 239-250.
- [37] 江用彬,季宏兵,李甜甜,等.环境硒污染的植物修复研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2007,26(1):98-104.
- JIANG Yong-bin, JI Hong-bing, LI Tian-tian, et al. Advances of the research on the phytoremediation of the selenium polluted environment [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2007, 26(1): 98-104.
- [38] 周勋波,吴海燕,洪延生,等.作物施硒研究进展[J].中国农业科技导报,2002,4(6):45-49.
- ZHOU Xun-bo, WU Hai-yan, HONG Yan-sheng, et al. Progress on application of selenium to crop [J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2002, 4(6): 45-49.
- [39] Di Gregorio S, Lampis S, Malorgio F, et al. *Brassica juncea* can improve selenite and selenate abatement in selenium contaminated soils through the aid of its rhizospheric bacterial population[J]. *Plant and Soil*, 2006, 285(1): 233-244.
- [40] Singh M. Effect of selenium and phosphorus on the growth and chemical composition of raya (*Brassica Junceacos.*) [J]. *Plant and Soil*, 1979, 51(4): 485-490.
- [41] Levesque M. Some aspects of selenium relationships in eastern Canadian soils and plants[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1974, 54(2): 205-214
- [42] Liu Q, Wang D J, Jiang X J, et al. Effects of the interactions between selenium and phosphorus on the growth and selenium accumulation in rice (*Oryza Sativa*) [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2): 325-330.
- [43] 陈世宝,朱永官,杨俊诚.土壤-植物系统中磷对重金属生物有效性的影响机制[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(8):1-7.
- CHEN Shi-bao, ZHU Yong-guan, YANG Jun-cheng. Mechanism of the effect of phosphorus on bioavailability of heavy metals in soil-plant systems [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(8): 1-7.
- [44] Kopsell D A, Randle W M, Mills H A. Nutrient accumulation in leaf tissue of rapid-cycling brassica oleracea responds to increasing sodium selenate concentrations [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(7): 927-935.