

磷对富硒赤红壤与红壤上小白菜硒吸收及土壤硒形态的影响^①

邢颖, 刘永贤, 梁潘霞, 廖青, 潘丽萍, 陈锦平, 黄太庆, 江泽普*

(广西农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007)

摘要: 采用土培盆栽试验方法, 研究了广西两种主要富硒土壤施入不同水平磷对小白菜硒吸收积累的影响及土壤硒形态转化规律, 旨在为提高土壤有效形态硒含量及植物硒含量提供理论依据。试验采集广西具有代表性的富硒赤红壤(贵港市桂平市)和富硒红壤(桂林市永福县), 设置 4 个磷梯度盆栽试验。结果表明: 相同的磷处理在不同土壤上对小白菜硒吸收效果不同。在富硒赤红壤上低磷处理(P50, 50 mg/kg)有利于小白菜地上部和地下部对硒的吸收; 在富硒红壤上中磷处理(P110, 110 mg/kg)小白菜地上部硒含量最高, 地下部施入磷则硒含量均显著低于对照。同时, 磷的施入对硒在小白菜体内的转运在两种土壤上也存在差异。在富硒赤红壤上当磷施入量在 80 mg/kg 以下时, 磷的施入会抑制硒从地下部向地上部的转运; 在富硒红壤上磷的施入则均能促进硒的转运; 但二者均在中磷处理时达到峰值。植株体内硒含量间的差异取决于土壤有效形态硒含量。研究结果显示磷的施入均显著增加了土壤中水溶态和交换态硒的含量, 且小白菜硒的含量与土壤中水溶态硒规律一致。研究还发现在两种土壤上不同磷处理对土壤硒形态转化规律不同, 这为进一步研究磷与土壤硒间的互作关系提供了参考。

关键词: 磷; 富硒赤红壤; 富硒红壤; 硒形态

中图分类号: S151.9 **文献标识码:** A

硒是人和动物必需的微量元素, 而硒的缺乏或过量都会引起疾病^[1]。而食品中硒主要来源于植物, 其硒含量很大程度上取决于栽培土壤硒的本底水平^[2]。土壤中硒的形态及价态直接影响着植物对硒的吸收与积累^[3-5]。有效态硒作为植物最易吸收利用的形态, 与植物硒含量的相关性最好^[6]。土壤中的硒根据其溶解性、移动性、有效性和毒性的大小, 按从大到小的顺序分为可溶态、碳酸盐结合态及可交换态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态 5 种形态^[7]。一般认为可溶态和可交换态的硒易于被植物吸收利用, 也被称为土壤有效硒^[8]。土壤中硒的形态也随土壤性质(如 pH、Eh)、矿物质的组成、吸附表面等不同而发生变化^[9-10]。因此, 利用影响硒形态的因素可以改变土壤硒有效性, 是调控土壤-植物硒转化的有效途径。

Liu 等^[11]的研究发现, 适量施磷能促进水稻地上部对四价硒的累积, 但过量施磷却抑制了地上部对四价硒的累积, 且施用不同磷量均抑制了水稻地下部硒的吸收。陈思杨等^[12]研究发现缺磷处理水稻的地上

部、地下部硒含量下降; 而小麦的地上部、地下部硒含量增加。赵文龙等^[13]研究发现磷硒间的相互作用受硒含量影响。在低硒条件下(1.0 mg/kg)条件下, 磷会抑制小白菜地上部和地下部硒的吸收, 导致硒含量下降。当土壤硒含量增加至 5.0 mg/kg 时, 施磷对小白菜地上部硒含量影响不显著, 但显著增加了小白菜地下部硒含量, 说明施磷能促进小白菜根部对硒的吸收^[14]。有研究认为亚硒酸盐是通过被动运输的方式进入植物体^[15], 研究发现磷能促进植物蒸腾作用, 而蒸腾作用直接影响亚硒酸盐的被动运输^[16]。因此, 施磷通过增强植物的蒸腾作用和促进根部生长来间接促进硒的被动吸收。同时有研究发现, 菜豆、大豆、单细胞真核生物球石藻对亚硒酸盐的吸收同时存在主动和被动两种吸收方式, 植物对磷和硒的选择吸收性及环境介质中磷和硒的含量比是决定哪种方式起主要作用的因素^[17]。在实际的土壤条件下磷与硒的相互关系十分复杂, 两者间的关系随土壤条件的不同会产生不同的变化, 因此研究两者在广西天然富硒

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761052)、广西创新驱动重大专项项目(桂科 AA17202026)、广西青年基金项目(2016GXNSFBA380131)、广西农业科学院科技发展基金项目(桂农科 2017JM01; 桂农科 2017JM03)、广西农业科学院基本科研业务专项项目(桂农科 2017YZ03; 2015YT33)和广西富硒特色作物试验站项目(桂 TS2016011)资助。

* 通讯作者(lzjeep@163.com)

作者简介: 邢颖(1986—), 女, 青海西宁人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤生态与高值农业研究。E-mail: xingying-126@163.com

区的相互作用对提高作物硒素吸收积累十分有意义。

广西是富硒大省区,富硒土壤面积达 212.1 万 hm^2 ^[18],为目前全国圈定出的特大面积连片富硒土壤区域;其中占土壤总面积 34.95% 的为赤红壤和 30.05% 的为红壤。赤红壤硒含量较高,平均含量为 0.964 mg/kg,红壤硒含量平均为 0.645 mg/kg^[19-20],有效硒含量占总硒的 12.8%,而富硒土壤种植玉米、水稻、水果及罗汉果等天然硒含量未达广西富硒含量标准。因此,通过研究富硒赤红壤和富硒红壤上磷对

小白菜硒吸收积累以及土壤硒形态转化的影响,探究两种类型土壤上磷-硒互作效应,对进一步提高广西富硒土壤硒有效性具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土分别采自广西贵港市桂平市(富硒赤红壤)和广西桂林市永福县(富硒红壤),土壤养分、总硒及有效硒含量等基础数据见表 1。

表 1 盆栽用土土壤基础数据
Table 1 Basic information of pot test soils

供试土壤来源	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	pH	有机质(g/kg)	总硒(mg/kg)	有效硒(mg/kg)
贵港市桂平市	1.30	0.736	4.76	129	46.0	82.6	6.3	16.0	0.95	0.021
桂林市永福县	2.39	0.87	30.9	129	3.85	107	5.1	82.4	0.55	0.026

注:贵港市桂平市土壤为赤红壤砂页岩母质,桂林市永福县土壤为红壤砂页岩母质。

盆栽作物为小白菜,品种为长梗白菜。盆栽试验用磷肥为磷酸二氢钠(分析纯),氮肥主要成分为尿素(分析纯),钾肥主要成分为氯化钾(分析纯)。

1.2 试验方法

试验共设置 4 个磷(P)水平:50、80、110、150 mg/kg,分别记作 P50、P80、P110、P150,以及不施磷肥的对照 CK,各处理 3 次重复。选择内径 13.5 cm、深 10.5 cm 的塑料盆,每盆装土 0.7 kg,每千克土壤施入 0.15 g 氮(N)和 0.1 g 钾(K),将各处理磷换算成对应的磷酸二氢钠含量后,将其配置成溶液用小型喷壶均匀喷入土壤,调节水分为田间持水量的 60%,放置 10 d 后播种。每盆播种 10 粒,7 d 后间苗,10 d 后定苗至 3 株。小白菜在塑料大棚内生长,期间保持自然光照及通风,最高温度为 25 ~ 35℃,最低温度为 15 ~ 25℃,生长期间保持土壤湿度为田间持水量的 70% 左右,30 d 后收获。

1.3 测定项目和方法

小白菜收获后,测定其地上部和地下部生物量、硒含量。土壤测定基础土样常规理化性质及有效硒含量,盆栽收获后测定土壤不同形态硒含量。

植株样测定的具体方法是:将小白菜连根收获,用蒸馏水将根和叶子洗净,并用吸水纸擦干。称量鲜重后植物样品 105℃ 杀青 30 min 后,60℃ 烘至恒重,称量地上和地下部干重。植物样品中硒的测定:样品经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (体积比为 4:1)消解和 6 mol/L 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^[21]。土壤基本理化性质用常规方法^[22]测定。

土样自然风干后,过 20 和 100 目筛,采用连续浸提法提取各含硒组分^[23-25],具体步骤如下:水溶态。称取 2.000 0 g 过 100 目筛土壤样品于干净的 50 ml 聚丙烯离心管中,加入去离子水 20 ml,在 25℃ 下以转速 200 r/min 恒温振荡 1 h,然后以 4 000 r/min 转速离心 10 min,倾出上清液,过滤,待测。交换态。在沉淀中加入 0.1 mol/L $\text{KH}_2\text{PO}_4\text{-K}_2\text{HPO}_4$ 溶液 20 ml,在 25℃ 下以转速 200 r/min 恒温振荡 2 h,离心及待测步骤同。铁锰氧化物结合态。在沉淀中加入 3 mol/L HCl 20 ml,置于 90℃ 恒温水浴中加热 50 min,期间以转速 200 r/min 间歇振荡,离心及待测步骤同。有机结合态。在沉淀中加入 0.1 mol/L $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 20 ml,置于 90℃ 恒温水浴中加热 2 h,期间以转速 200 r/min 间歇振荡,离心及待测步骤同。残渣态。将沉淀烘干,取出残渣,重新研磨,称取 1.000 0 g 左右,以下操作同土壤总硒的测定。每个提取态前后都将离心管称重用以扣除残留在沉淀中未被倾出出的硒。土壤总硒:采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (体积比为 3:2)消解,后续步骤同植物样硒测定。

1.4 数据处理

试验数据取 3 次重复的平均值和标准误差,采用 SPSS17.0 软件进行方差分析,用 SSR 法进行差异显著性检验,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$,Excel 2013 进行制表绘图。

$$\text{TF(转移系数)}=A/B^{[26]}$$

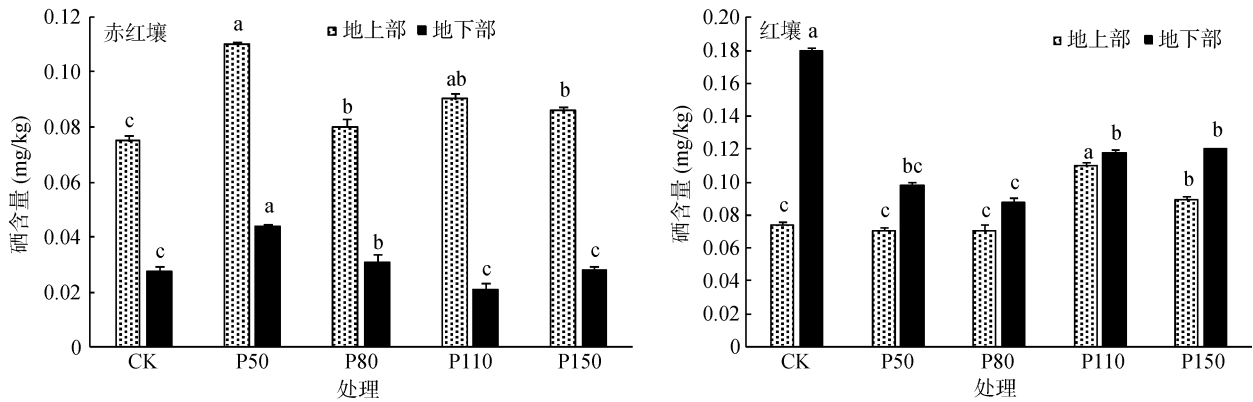
式中:A 表示植株地上部硒含量(mg/kg);B 表示植株地下部硒含量(mg/kg)。

2 结果与分析

2.1 不同磷水平对小白菜硒吸收积累的影响

图 1 为不同磷水平处理对富硒赤红壤和红壤上小白菜地上部和地下部硒含量的影响。从图 1 可以看出,两种土壤条件下小白菜地上部和地下部硒含量规律有显著差异。其中,在赤红壤条件下小白菜地上部硒含量均显著高于地下部,不同磷水平处理间地上部

和地下部硒含量均存在差异,随磷施入量增加地上部和地下部硒含量均有不同程度的下降,其中低磷处理(P50)在富硒赤红壤上有利于植株对硒的吸收。在红壤条件下小白菜地上部和地下部硒的吸收则与赤红壤不同,在同一处理中地下部硒含量高于地上部,即红壤条件下硒多积累于根部,而磷的施入显著减少了根部硒含量;随磷施入量增加小白菜地上部和地下部硒含量均显著增加,其中在 P110 处理时达到峰值。



(图中不同小写字母表示同一部位不同磷处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

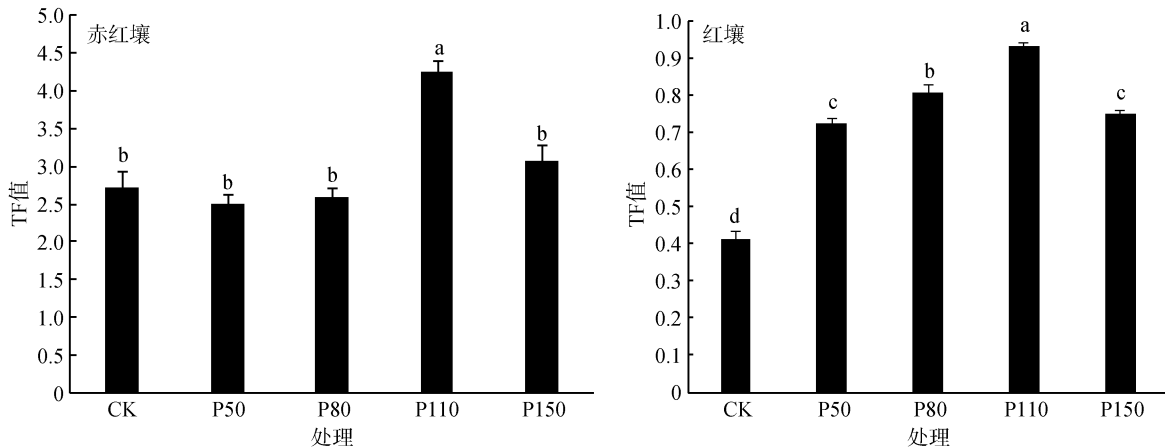
图 1 富硒赤红壤、红壤条件下不同磷处理对小白菜地上部和地下部硒吸收的影响

Fig. 1 Effects of different phosphorus treatments on selenium uptake in aboveground and underground organs of pakchoi in selenium-rich latosolic red soil and selenium-rich red soil

2.2 不同磷水平对小白菜中硒转移的影响

用转移系数 TF 来反映磷对小白菜硒从地下向地上转移的影响。结果表明,赤红壤和红壤条件下小白菜硒的转移系数差异显著(图 2)。在赤红壤上硒转移系数(TF 值)均大于 1,红壤条件下均小于 1;在两种土壤上硒转移系数均为 P110 处理(110 mg/kg)最高,且显著高于其他处理。在赤红壤上 P50、P80 处理与对照相比硒的转移系数分别下降了 7.98% 和 4.40%,

说明在富硒赤红壤上低磷处理会降低小白菜地下部硒向地上部的转移;而 P110、P150 处理分别使硒转移系数相较于对照增加了 56.25% 和 13.04%,说明高磷处理有利于硒从地下部向地上部转移。在红壤上结果有所不同,小白菜硒转移系数与对照相比均有不同程度的增加,其中 P110 处理(110 mg/kg)的硒转移系数相较于对照增加了 125.82%,不同磷处理增加量均在 75% 以上,说明磷的施入显著提高了小白菜地



(图中不同小写字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著)

图 2 富硒赤红壤和红壤条件下不同磷处理对小白菜中硒转移因子的影响

Fig. 2 Effects of different phosphorus treatments on selenium translocation factors in pakchoi in selenium-rich latosolic red soil and selenium-rich red soil

下部硒向地上部的转移。两种土壤因土壤类型不同,因此当施入相同的磷时小白菜对硒的转移能力也会有所差异,这与土壤本身的理化性质等因素有关。

2.3 不同磷水平对富硒土壤硒形态的影响

不同量的磷施入土壤后,小白菜地上部与地下部硒含量的变化取决于土壤不同形态硒含量的变化。表 2 为富硒赤红壤和富硒红壤在不同磷处理下土壤硒形态的变化。相对于对照,磷的加入使两种土壤有效态硒均有显著增加,其中在赤红壤上不同磷处理显著提高了水溶态和交换态硒的含量,且磷的加入更有利于增加水溶态硒的含量,在富硒红壤上规律一致。据表 2 结果还可以看出,不同磷处理在不同类型富硒土壤上硒形态变化规律不同。在富硒赤红壤上,P50、P80 和 P110 处理增加土壤有效态硒含量,而同时铁锰氧化物结合态和有机结合态硒含量显著下降,说明在磷含量低于 110 mg/kg 时富硒赤红壤中有效态硒主要来源于铁锰氧化物结合

态和有机结合态的转化;当磷浓度升高至 150 mg/kg 时,铁锰氧化物结合态和有机结合态硒几乎没有变化外,主要由残渣态转化为有效态。在富硒红壤上,除 P80 处理有部分有效态硒来自铁锰氧化物结合态的转化外,其他均由残渣态转化;同时磷的施入也增加了有机结合态硒的含量。由此可见,不同磷处理在不同土壤类型上对硒的转化结果不同,但均能提高土壤有效态的含量,进而增加了小白菜硒的含量。

从表 2 可以看出,两种富硒土壤水溶态硒含量增加量均显著高于交换态。其中富硒赤红壤水溶态以 P50 处理最高,相较于对照增加 198.17%,而在图 1 中小白菜地上部和地下部硒含量最高也是 P50 处理。富硒红壤水溶态以 P110 处理最高,相较于对照增加 155.88%,且在图 1 中小白菜地上部硒含量最高值也是 P110。因此可以认为,在富硒土壤上植物吸收土壤中的有效形态硒时优先选择水溶态硒。

表 2 不同磷水平对富硒赤红壤和红壤土壤硒形态的影响(%)

Table 2 Effects of different phosphorus concentrations on soil selenium morphology in selenium-rich latosolic red soils and red soils

土壤	处理	水溶态		交换态		有效态		铁锰氧化物 结合态占比	有机物 结合态占比	残渣态 占比
		占比	增加量	占比	增加量	占比	增加量			
赤红壤	CK	1.09 c		1.45 c		2.54 c		1.92 a	2.42 a	93.12 a
	P50	3.25 a	198.17	1.95 b	34.48	5.19 a	104.72	1.68 b	2.24 ab	90.88 a
	P80	2.40 b	120.18	1.85 b	27.59	4.26 b	67.32	1.81 b	2.12 b	91.81 a
	P110	2.64 b	142.20	1.91 b	31.72	4.55 b	79.13	1.73 b	1.93 c	91.79 a
	P150	3.13 a	187.16	2.20 a	51.72	5.32 a	109.84	1.91 a	2.47 a	90.29 a
红壤	CK	1.36 c		1.42 d		2.78 c		2.11 a	1.96 b	91.15 a
	P50	2.61 b	91.91	3.31 a	133.10	5.92 a	112.95	2.19 a	2.22 a	89.67 a
	P80	2.23 b	63.97	1.92 c	35.21	4.15 b	49.28	1.68 b	2.28 a	91.90 a
	P110	3.48 a	155.88	2.67 b	88.03	6.15 a	121.22	1.99 a	2.24 a	89.62 a
	P150	3.21 a	136.03	2.71 b	90.85	5.92 a	112.95	2.09 a	2.19 a	89.80 a

注:同列数据不同小写字母者表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著,下同。

3 讨论

3.1 磷对小白菜硒吸收转运的影响

本研究发现,相同的磷施入不同类型的富硒土壤后小白菜对硒的吸收效果不同。在富硒赤红壤上,小白菜对硒的吸收地上部显著高于地下部,但当施入的磷量增加时,地上部和地下部硒含量有不同程度的下降。低磷处理(P50, 50 mg/kg)有利于小白菜地上部和地下部对硒的吸收。在富硒红壤上,小白菜地下部硒含量高于地上部,不同磷处理降低了地下部硒的含量,但地上部在中磷处理(P110, 110 mg/kg)时硒含量最高。周骏等^[27]对土壤-水稻系统中硒的迁移研究发

现,土壤性质不同水稻对硒的吸收也不同。这与土壤类型、土壤有机质、pH 等因素有关。本研究中的两种土壤其类型不同,因此在施入磷后表现出不同的硒吸收结果,也印证了这一结论。赵文龙等^[28]研究发现,当土壤中有硒存在的同时磷的施入会增加小白菜中硒的含量,低磷处理的影响显著高于高磷处理,这与本研究中富硒赤红壤上的结果一致。磷和硒的相互作用受到硒含量的影响,在土壤硒含量 1.0 mg/kg 范围内施用高含量的磷能促进小白菜体内硒从地下到地上的转运^[13],这与本研究结果一致。两种富硒土壤在本研究中均为施入中高含量的磷促进了小白菜地下部硒向地上部的转运。

3.2 磷对两种富硒土壤硒形态转化的影响

在土壤-植物系统中,磷与硒的相互作用十分复杂,有研究认为土壤中的磷酸盐和亚硒酸盐竞争吸附位点,且磷酸盐的吸附性较强,因此磷的施入能够降低土壤对硒酸盐的吸附,提高土壤硒的有效性^[29-30]。这与本研究中磷的施入提高了两种类型土壤中水溶态和交换态硒含量结论一致。由此可见,有关磷酸盐与亚硒酸盐的相互作用对植物硒吸收、转运的影响的研究结果不尽一致。同时在富硒赤红壤和富硒红壤上不同水平磷的施入土壤硒形态变化规律不同。一方面可能是因为磷的施入改变了土壤中磷酸盐和硒酸盐的比例,从而打破了原来的硒形态平衡,使硒形态产生了变化。赵文龙等^[13]研究认为磷硒的相互作用受磷施入量的影响,也从侧面印证了这一猜想。另一方面可能是磷的施入对土壤理化性质、微生物和酶等产生了影响,从而使存在于其中的硒形态发生了转化。在这一方面相关研究鲜有报道,需进一步研究。

3.3 磷对土壤-植物系统中硒转化的影响

大量研究表明,磷肥的施入会增加植物对硒的吸收,两者间存在协同作用。也有研究认为两者在吸收时竞争同一转运通道,因此存在拮抗作用^[13]。但在实际情况中却十分复杂,根据土壤本身硒含量、不同形态硒含量及理化性质等不同结果也会存在差异。本研究中两种土壤类型上小白菜体内硒含量均与土壤中有效态硒含量规律一致,且与水溶态硒含量关系最为密切。侯军宁和李继云^[31]研究发现水溶态硒与作物吸收性之间有良好的相关性,这与本研究结果一致。但同时也指出这种规律常出现在盆栽试验中,大田试验则常有异常。因此,针对大田土壤磷-硒间的互作关系仍需进一步研究。

4 结论

在富硒赤红壤和富硒红壤上施入不同用量的磷均有利于小白菜对硒的吸收。其中,在富硒赤红壤上磷用量 50 mg/kg 时小白菜对硒的吸收效果最佳,在富硒红壤上磷用量在 110 mg/kg 时小白菜地上部硒吸收效果最佳,且地下部施入磷后硒含量均显著低于对照。小白菜体内硒的转运在两种土壤上也存在差异,在富硒赤红壤上当磷施入量为 80 mg/kg 以下时,磷的施入会抑制硒从地下部向地上部的转运,在富硒红壤上则均能促进硒的转运,但均在 110 mg/kg 时达到峰值。说明不同土壤类型对土壤-植物系统中硒的吸收转化结果不同。通过测定土壤中不同形态硒含量,发现磷的施入显著增加了土壤中水溶态与交换态硒

的含量,且土壤中水溶态硒含量与植株中硒含量规律一致。但磷施入后在两种土壤上对硒形态转化规律不同,产生这样差异的原因及机制有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Rayman M P. The argument for increasing selenium intake[J]. Proc. Nutr. Soc., 2002, 61: 203-215
- [2] Durán P, Acuña J J, Jorquera M A, et al. Enhanced selenium content in wheat grain by co-inoculation of selenobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi: A preliminary study as a potential Se biofortification strategy[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 57: 275-280
- [3] Salhani N, Boulyga S, Stengel E. Phytoremediation of selenium by two helophyte species in subsurface flow constructed wetland[J]. Chemosphere, 2003, 50: 967-973
- [4] Chen Q, Shi W, Wang X. Selenium speciation and distribution characteristics in the rhizosphere soil of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41: 1411-1425
- [5] Ramos S, Faquin V, Guilherme L, et al. Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite[J]. Plant Soil and Environment, 2010, 12: 583-587
- [6] Lyons G, Ortiz-Monasterio I, Stangoulis J, et al. Selenium concentration in wheat grain: Is there sufficient genotypic variation to use in breeding[J]. Plant and Soil, 2005, 269: 369-380
- [7] Wang S S, Liang D L, Wang D, et al. Selenium fractionation and speciation in agriculture soils and accumulation in corn (*Zea mays* L.) under field conditions in Shaanxi Province, China[J]. Sci. Total Environ., 2012, 427/428: 159-164
- [8] Hu B, Liang D L, Lei L M, et al. Effects of copper and selenium fractions on soil urease and nitrate reductase activity in combined pollution soil[J]. Ecotox. Environ. Safe., 2014, 110: 41-48
- [9] Zawislanski P T, Zavarin M. Nature and rates of selenium transformations: A laboratory study of Kesterson reservoir soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 791-800
- [10] 石建凡, 林清, 吴鹏盛, 等. 土壤中微量元素硒含量的影响因素分析[J]. 科技创新与应用, 2015(26): 175
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 赵文龙, 胡斌, 王嘉薇, 等. 磷与四价硒的共存对小白菜磷、硒吸收及转运的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 2020-2026
- [14] Zhao X Q, Mitani N, Yamaji N, et al. Involvement of silicon influx transporter OsNIP2; 1 in selenite uptake in rice[J]. Plant Physiology, 2010, 153(4): 1871-1877

- [15] Yu X Z , Gu J D. Differences in uptake and translocation of selenate and selenite by the weeping willow and hybrid willow[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2008, 15(6): 499–508
- [16] 许闯, 王松山, 李菊梅, 等. 长期施肥对红壤和黑土硫形态演变的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1069–1075
- [17] 周杰, 王东, 满建国, 等. 高氮条件下硫氮互作对冬小麦幼苗生长及氮、硫吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 42–51
- [18] 邓萍. 广西几多“硒”, 再摸“富”家底——我区对“长寿元素”硒开展再调查纪事[J]. 广西日报, 2014-01-15: 011
- [19] 周清湘. 广西土壤[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1994: 87–101
- [20] 班玲, 丁水福. 广西土壤中硒的分布特征[J]. 中国环境监测, 1992, 8(3): 98–101
- [21] 中华人民共和国卫生部. 食品国家安全标准 食品中硒的测定: GB 5009. 93—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [23] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态[J]. 环境化学, 1997, 16(3): 277–283
- [24] Martens D A , Suarez D L . Selenium speciation of soil /sediment determined with sequential extractions and hydride generation atomic absorption spectrophotometry[J]. Environmental Science & Technology, 1996, 31(5): 133–139
- [25] 吴少尉, 池泉, 陈文武, 等. 土壤中硒的形态连续浸提方法的研究[J]. 土壤, 2004, 36(1): 92–95
- [26] 段曼丽, 付冬冬, 王松山, 等. 亚硒酸盐对四种蔬菜生长、吸收及转运硒的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 658–665
- [27] 周骏, 刘兆云, 孟立丰, 等. 土壤性质对土壤-水稻系统中硒迁移的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 734–741
- [28] 赵文龙, 梁东丽, 石美, 等. 磷酸盐与硒酸盐相互作用对小白菜磷和硒吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2331–2338
- [29] Lee S, Doolittle J J, Woodard H J. Selenite adsorption and desorption in selected South Dakota soils as a function of pH and other oxyanions[J]. Soil Science, 2011, 176(2): 73–79
- [30] 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
- [31] 侯军宁, 李继云. 土壤硒的形态及有效硒的提取[J]. 土壤学报, 1990, 27(4): 405–410

Effects of Phosphorus on Selenium Uptake of Pakchoi and Soil Selenium Morphology in Se-rich Latosolic Red Soil and Red Soil

XING Ying, LIU Yongxian , LIANG Panxia, LIAO Qing, PAN Liping, CHEN Jinping,
HUANG Taiqing, JIANG Zepu*

(Agricultural Resources and Environment Research Institute,
Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: In order to provide theoretical basis for improving selenium content in soil and plant, the effects of different concentrations of phosphorus on selenium uptake and accumulation of pakchoi in two main selenium-rich soils of Guangxi and the morphological transformation of soil selenium were studied by soil culture pot experiment in which four phosphorus concentration gradients were designed for Se-rich latosolic red soils (Guiping City, Guigang City) and red soils (Yongfu County, Guilin City) in Guangxi. The results showed that the same phosphorus treatment had different effects on selenium uptake of pakchoi in different soils. Low phosphorus treatment (P50, 50 mg/kg) was beneficial to selenium uptake of pakchoi in Se-rich latosolic red soils. Selenium content in the aboveground part of pakchoi was the highest in P110 treatment (110 mg/kg), while that in the underground part was significantly lower than the control group in Se-rich red soils. At the same time, selenium transport by applying phosphorus to pakchoi was also different in the two soils. In Se-rich latosolic red soils, when the amount of phosphorus was less than 80 mg/kg, the application of phosphorus inhibited selenium transport from underground to aboveground, but selenium transport was promoted in Se-rich red soils, and both peaked at P110. The difference of selenium content in plants depends on the effective form of selenium content in soil. The results showed that the application of phosphorus significantly increased the contents of water soluble and exchangeable selenium in soil, and selenium content in pakchoi was consistent with the water-soluble selenium in the soil, different phosphorus treatments had different rules in selenium morphological transformation in the two soils, which provides a reference for further study on the interaction between phosphorus and selenium.

Key words: Phosphorus; Se-rich latosolic red soils; Se-rich red soils; Selenium morphology