

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^①

马 迅¹, 诸旭东¹, 宗良纲^{1*}, 方 勇², 胡秋辉²

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 南京财经大学食品科学与工程学院, 南京 210046)

摘 要: 通过盆栽试验, 研究了钙镁磷肥与氨基酸叶面肥混施共 5 种不同调控处理对酸性富硒土壤有效硒、水稻各部位硒含量以及其籽粒有机硒含量的调控效果。试验共分为 6 个处理: CK, 常规钙镁磷肥用量, 0.2 g/kg; P₁, 单施低量钙镁磷肥, 0.4 g/kg; P₂, 单施高量钙镁磷肥, 0.6 g/kg; B, 单施氨基酸叶面肥, 1 500 ml/hm²; P₁+B, 单施低量钙镁磷肥并配施氨基酸叶面肥, 0.4 g/kg + 1 500 ml/hm²; P₂+B, 单施高量钙镁磷肥并配施氨基酸叶面肥, 0.6 g/kg + 1 500 ml/hm²。结果表明: 在无外源硒素添加的前提下, 不同调控措施均能有效提高酸性富硒土壤中硒的有效性。高用量的 2 个处理(P₂, P₂+B)对提高土壤硒有效性的效果最佳, 分别使土壤有效硒的含量提高了 43.54 μg/kg 和 42.16 μg/kg, 使水稻籽粒有机硒含量分别相应提高了 39.27 μg/kg 和 28.65 μg/kg, 5 种处理的增幅均达到了极显著水平 ($P < 0.01$)。

关键词: 钙镁磷肥; 氨基酸叶面肥; 混施; 硒; 酸性富硒土壤; 水稻

中图分类号: S156.6 文献标识码: A

硒是人体所必需的微量营养元素, 是体内抗氧化酶的重要组成部分, 具有增强人体免疫力、预防心血管疾病、抗衰老以及抗癌等作用^[1-2]。有报道显示人体摄取硒的主要来源是食物, 摄入量不足会导致大骨节病、肌综合症以及心血管疾病等^[3], 而大多数植物是从土壤中吸收硒然后富集到植物的可食部位, 故土壤中有效硒含量的丰缺与人体健康密切相关。刘铮等^[4-5]在我国缺乏微量元素的土壤及其区域分布的研究中发现我国大部分耕作土壤都存在不同程度的硒缺乏状况, 从东北到西南的低硒带跨越黑龙江、吉林、内蒙古、山东、湖北、四川等 10 多个省市的部分地区, 表层土壤硒含量为 0.006 ~ 9.130 mg/kg^[6]。硒是以阴离子酸根的形式被植物吸收利用, 其在土壤中的有效性受到 pH 的影响, 在碱性土壤中硒有效性较高, 而在酸性土壤中硒易与铁形成难溶的氧化物或是水合氧化物从而导致其有效性较低。土壤含硒水平特别是土壤生物有效性硒水平对作物吸收硒发挥很大作用^[7]。因此, 通过调控措施提高土壤硒化学有效性, 来提高作物吸收硒的量(生物有效性)至关重要。过去十多年来, 这方面的研究取得了一定成果, 但仅仅局限于外

源施硒肥来实现^[8]。果秀敏等^[9]的研究结果表明土壤施硒量在 8.0 ~ 24.0 mg/kg 时, 花椰菜的硒含量会随着施硒量的增加而增加; 土壤施硒量在 16.0 ~ 32.0 mg/kg 时, 花椰菜中的蛋白质以及糖类有机物的含量会显著提高。但是这种通过外源补硒提高土壤硒有效性的措施会带来一系列问题, 比如说提高肥料成本以及容易造成硒污染从而给人体健康带来危害, 同时对于我国拥有的富硒土壤资源也是浪费。

磷是植物生长必需的营养元素之一, 在其生长代谢中起到重要作用。磷和硒在土壤中的化学行为具有相似性且均以阴离子形态存在, 在酸性条件下其对应的阴离子均易被铁铝氧化物与黏粒矿物等吸附, 两者存在竞争吸附作用, 故磷的存在可以使硒从土壤中释放出来, 使土壤硒的化学有效性提高, 从而在生产上可以通过施用磷肥来提高土壤中硒的含量。基于本课题组前期在江苏宜溧山区酸性富硒茶园土壤上实施不同调控措施, 利用磷素对提高土壤硒有效性取得的良好进展^[10], 以及去年在江西丰城生态硒谷开展田间示范研究, 获得的水田条件下调控和施用肥料的技术参数。本试验通过水稻盆栽试验对其技术参数进一

基金项目: 农业部公益性行业项目(201303106)资助。

* 通讯作者(zonglg@njau.edu.cn)

作者简介: 马迅(1992—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事环境质量与食品安全研究。E-mail: 907087279@qq.com

步优化,并从机理上分析不同调控措施在提高土壤硒化学有效性基础上进而提高其生物有效性的效果,旨在为生产实际的推广应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自江西省丰城市尚庄镇田北刘家村农田,采集的耕层土壤样品(0~20 cm)带回实验室自

然风干,避免阳光直射,在半干时碾压土块并除去根系、小石块等杂物。待土壤风干后过10目尼龙筛,用于水稻盆栽试验。供试土壤基本性质见表1,可以看出土壤全硒含量为0.55 mg/kg,根据土壤全硒含量划定的标准^[11]:<0.125 mg/kg属缺硒土壤,0.125~0.175 mg/kg属少硒土壤,0.175~0.450 mg/kg属足硒土壤,0.450~3.000 mg/kg为高硒土壤,故该土壤属于高硒土壤。

表1 供试土壤的基本性质
Table 1 Basic properties of tested soil

pH	有机质(g/kg)	全磷(g/kg)	全氮(g/kg)	全硒(mg/kg)	土壤质地
6.18	23.91	0.51	1.67	0.55	粉砂质黏壤土

1.2 供试材料

盆栽试验的供试材料有: 钙镁磷肥:高园牌钙镁磷肥(湖北荆门市高园磷肥有限公司生产,有效 $P_2O_5 \geq 125$ g/kg); 氨基酸叶面肥:禾稼春 5-ALA含氨基酸水溶性肥料(南京禾稼春生物科技有限公司生产,游离氨基酸 ≥ 10 g/L,微量营养元素 ≥ 20 g/L);

盆栽桶:聚乙烯(PE)材质,桶口上口径23 cm,下口径16 cm,高19 cm; 水稻种:武运粳23号(全生育期158 d),秧苗由江苏省溧阳市南渡镇万亩水稻示范区提供。

1.3 试验设计

室外盆栽试验共分为6个处理: CK,生产上常规钙镁磷肥用量,0.2 g/kg; P_1 ,单施低量钙镁磷肥,0.4 g/kg; P_2 ,单施高量钙镁磷肥,0.6 g/kg; P_1+B ,单施低量钙镁磷肥并配施氨基酸叶面肥,0.4 g/kg+1 500 ml/hm²; P_2+B ,单施高量钙镁磷肥并配施氨基酸叶面肥,0.6 g/kg+1 500 ml/hm²; B,单施氨基酸叶面肥,1 500 ml/hm²,每个处理均有3个重复。

秧苗于2015年6月17日进行移栽,秧龄25 d,每盆插秧1穴,1穴10株。氨基酸叶面肥施用的时间在水稻分蘖期,并选择无风的晴天下午日落后用喷雾器均匀喷施。水稻收获时,在每盆采集耕层混合土样同时采集3~5株水稻完整植株,用自来水冲洗后再用去离子水冲洗干净,用剪刀将水稻的根系、稻秆和稻谷分开,放入预先升温到60℃环境下的鼓风烘箱内杀青烘干至恒重。水稻根系和稻秆用粉碎机粉碎,稻粒人工脱粒后经糙米机脱壳并用粉碎机打碎过0.3 mm(60目)筛,然后装入密封袋中,标明信息后低温保存待测。土壤样品室内自然风干并除去根系等杂质,样品混合均匀后四分法取样混合,磨样时

分别过1 mm(20目)、0.149 mm(100目)筛保存备用。

1.4 测定项目与方法

供试土壤理化性质的测定参照《土壤农化分析》^[12]推荐的方法:土壤pH采用电位法测定;土壤有机质(OM)含量采用油浴加热重铬酸钾氧化-容量法测定;土壤有效磷含量采用0.05 mol/L HCl-0.025 mol/L (1/2 H₂SO₄)法测定;土壤全磷含量采用HClO₄-H₂SO₄法测定。水稻各器官硒含量参照食品安全国家标准(GB 5009.93-2010)推荐的方法测定。土壤全硒含量测定参照吴少尉等^[13]推荐的方法,硒的形态分析参照瞿建国等^[14]和吴少尉等^[13]推荐的方法测定,其中残渣态的测定方法同全硒。

水稻籽粒无机硒采用王梅等^[15]推荐的方法测定:准确称取1.000 g样品于25 ml容量瓶中,在容量瓶中加入20 ml水,25℃条件下以210 r/min振荡2 h后定容并用定量滤纸过滤。吸取滤液10 ml于消煮管中并加2.5 ml浓盐酸,盖上弯颈小漏斗静置过夜,次日在电热板上消煮15 min,冷却后将消煮液转移到50 ml容量瓶中,定容,摇匀,最后用原子荧光光度计测定。

水稻籽粒有机硒的含量即水稻籽粒总硒的含量减去其无机硒的含量。

水稻籽粒硒的有机化率=水稻籽粒有机硒/其总硒。

1.5 数据处理

采用SPSS 20.0统计分析软件进行数据处理和差异显著性检验,并用Microsoft Excel 2002软件进行图表制作。

2 结果与讨论

2.1 不同处理对土壤硒化学有效性的影响

土壤中硒的化学有效性对其生物有效性有着直

接的影响,水溶态硒与可交换态硒对作物最为有效,被称为有效硒^[16]。土壤中的有效硒与作物吸收的硒存在良好的相关性,可以在一定程度上反映作物吸收硒的情况。研究不同调控措施下土壤有效硒的变化不仅是评价土壤硒化学有效性的指标,而且能够更加全面地反映出土壤硒的生物有效性。从图 1 可以看出,不同调控措施下土壤有效硒含量均有不同程度的提高,与 CK 相比,除 P₁ 和 B 处理外各种调控措施的提高幅度均达到了极显著水平($P<0.01$)。对于不同用量的钙镁磷肥处理,P₂ 处理对土壤有效硒的提高效果高于 P₁ 处理,两者分别比 CK(97.44 μg/kg)增加了 42.16 μg/kg 和 14.88 μg/kg。B 处理对土壤有效硒的提高效果高于 P₁ 处理,而低于 P₂ 处理,相比 CK 提高了 20.63 μg/kg。而本研究提出的钙镁磷肥与氨基酸叶面肥复合处理提高效果要比相应量的钙镁磷肥处理更好,P₁+B 和 P₂+B 处理分别比 CK 增加了 26.20 μg/kg 和 43.54 μg/kg,差异达到了极显著水平($P<0.01$)。

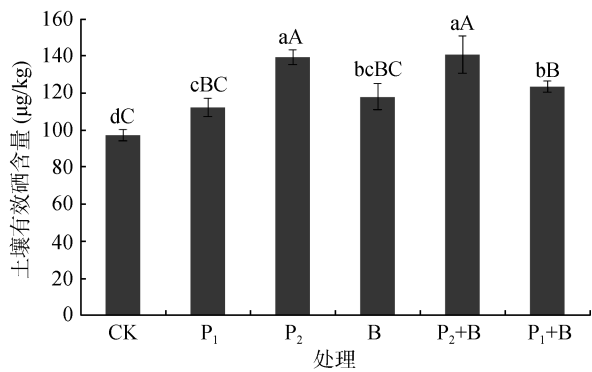
杨旋等^[17]采用改良剂与氨基酸叶面肥配施的方式提高强酸性高硒茶园土壤中硒有效性的研究表明:在不添加外源硒素的前提下,钙镁磷肥与氨基酸叶面肥

配施的调控方式对提高土壤硒的生物有效性最佳,使土壤有效硒含量提高了 146.71 μg/kg,增幅达到了极显著水平($P<0.01$),本试验得出的结果与其相似。另外本课题组也对此试验结果进行了机理性研究,表 2 列出了不同处理条件下土壤中的存在形态,可以发现水溶态、可交换态和有机结合态硒有较明显的改变。除此之外,土壤有效硒含量与 pH 呈正相关,即 pH 越大的土壤,其硒的有效性就越高。关于这一现象我们认为一方面可能是在低 pH 情况下($pH<5$),土壤中的硒易与其他元素形成可溶性金属络合物,使其硒的有效性降低;当土壤中的 pH 升高时,负电荷在其表面增加,氢氧化物可取代吸附位点上的硒酸盐离子,使硒酸盐离子释放到土壤溶液中,硒的生物有效性升高^[18]。另一方面由于向土壤中添加钙镁磷肥使其磷酸氢根离子增加,土壤中的磷酸氢根离子与亚硒酸盐存在竞争吸附作用,为内配体交换机制。相对于亚硒酸盐来说,磷酸氢根离子是更强的配体离子,与其同时存在时,磷酸氢根离子优先被土壤吸附,进而使土壤对亚硒酸盐的吸附减少,土壤中硒的有效性增加^[19]。当土壤中磷素升高到一定水平时,其硒的有效性升高程度趋于平稳甚至有下降的趋势,具体原因有待进一步研究。

表 2 土壤中各形态硒含量(μg/kg)
Table 2 Contents of various Se forms in soil under different treatments

处理	水溶态	可交换态	酸溶态	有机结合态	残渣态	合计
CK	37.12 ± 3.86 d	60.32 ± 2.49 d	62.60 ± 4.81 ab	270.40 ± 1.12 a	135.49 ± 0.32 a	565.93 ± 29.43
P ₁	41.31 ± 2.19 c	71.01 ± 2.50 bc	64.71 ± 3.43 a	258.93 ± 4.31 b	129.50 ± 1.11 ab	565.45 ± 13.11
P ₂	53.44 ± 3.77 b	86.17 ± 1.39 a	59.91 ± 2.89 b	242.40 ± 5.44 d	130.39 ± 1.09 a	572.30 ± 23.09
B	40.38 ± 1.30 c	77.69 ± 1.88 b	66.09 ± 3.64 a	252.23 ± 4.38 c	134.39 ± 2.00 a	570.77 ± 24.00
P ₁ +B	53.92 ± 4.45 b	69.72 ± 4.01 c	51.68 ± 4.07 c	259.00 ± 3.92 b	132.88 ± 0.88 a	567.19 ± 19.08
P ₂ +B	64.54 ± 3.93 a	76.44 ± 1.39 b	51.28 ± 4.15 c	239.59 ± 4.54 d	135.01 ± 0.39 a	566.86 ± 22.05

注:表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平,下同。



(图中小写字母和大写字母不同分别表示处理间差异达到 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平,下同)

图 1 不同处理对土壤有效硒含量的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on contents of soil available Se

2.2 不同处理对土壤硒生物有效性的影响

2.2.1 对水稻各器官硒素吸收的影响 磷与硒虽不是同主族元素,但它们在土壤中均以阴离子的形态被植物吸收利用。目前对施用磷肥提高作物吸收硒的研究结果差别较大^[20-22],作物体内硒的含量是评价土壤硒生物有效性的重要指标,本试验中水稻不同部位硒的含量可以一定程度地反映出通过不同调控措施提高酸性富硒土壤硒的生物有效性效果。值得注意的是由于水稻不同部位对硒的吸收和积累能力不同,导致其体内硒的分布不均匀,一般水稻体内的硒营养主要来源于土壤,水稻根系作为营养吸收器官,从土壤中吸收并积累有效硒,自下而上向各营养组织传输,所以水稻对酸性富硒土壤中硒的吸收主要集中在其根和茎

部位,而籽粒中硒的含量相对较低。由图 2 我们可以看出,不同调控措施下水稻各器官硒的含量明显高于对照且均呈现根>茎>籽粒的规律。这与诸旭东等^[23]研究的结果相似。对于水稻根而言,不同处理对其硒

含量的影响存在显著差异,使水稻根中硒的含量有增加的趋势,分别增加了 1.92 倍、1.78 倍、1.79 倍、1.98 倍和 1.92 倍(图 2A)。5 种处理对水稻根系硒含量的提高,与 CK 相比均达到了极显著的效果($P<0.01$)。

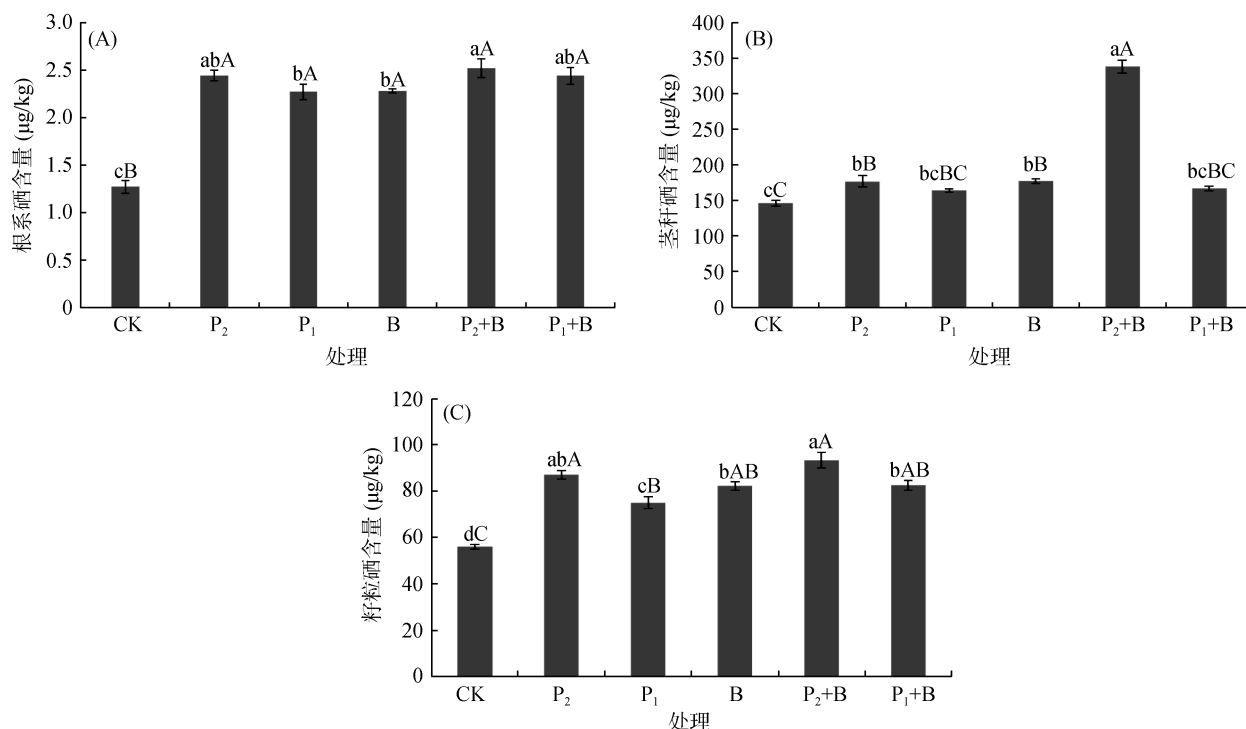


图 2 不同处理对水稻各部位硒含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on Se contents in different rice organs

不同调控措施对水稻茎中硒含量的提高效果从低到高依次是 CK、P₁、P₁+B、P₂、B、P₂+B(图 2B)。本试验中设置的高用量钙镁磷肥与氨基酸叶面肥配施处理的提高效果均比其他 5 个处理更好,使水稻茎中硒的含量相比 CK 提高 0.192 mg/kg,达到了极显著水平($P<0.01$);其次是氨基酸叶面肥处理,其提高效果略优于 P₁+B、P₁和 P₂ 3 个处理,相比 CK 来说使水稻茎中硒的含量提高了 0.031 mg/kg,达到了极显著差异水平($P<0.01$)。值得注意的是 P₁和 P₁+B 处理对水稻茎中硒含量的提高效果不是很大,没有达到极显著差异水平。这可能是因为土壤中有有效硒的含量较少导致其硒的化学有效性较低,当向土壤中施加低用量的钙镁磷肥时,其硒的有效性提高效果不明显,植物吸收的硒主要积累在根部而且几乎不向地上部的植物器官运输,导致水稻茎中硒的含量较少。只有当土壤中的有效硒含量较高时,植物吸收的四价硒才会同化为硒氨酸并以硒氨酸的形式由根向地上部运输,从而导致水稻茎、籽粒等部位中硒的含量增加,土壤中硒的生物有效性也随之提高。

结合本课题组前期的田间试验结果^[23],钙镁磷肥与氨基酸叶面肥复合处理(1 125 kg/hm²+ 1 500 ml/hm²)对水稻籽粒硒含量的提高效果要优于单施钙镁磷肥(1 125 kg/hm²)和氨基酸叶面肥处理(1 500 ml/hm²),相比 CK 提高了 0.03 mg/kg,达到了极显著水平($P<0.01$)。本试验对钙镁磷肥与氨基酸叶面肥混施的调控措施进行进一步细化,研究不同用量的钙镁磷肥与氨基酸叶面肥处理对水稻籽粒硒生物有效性的影响,结果表明不同处理对水稻籽粒总硒含量的提高均达到了极显著水平($P<0.01$),其硒含量的变幅为 0.075 ~ 0.093 mg/kg(图 2C)。其中高用量的钙镁磷肥与氨基酸叶面肥处理对水稻籽粒的提高效果与茎、根相似即优于其他处理,与 CK 相比对水稻籽粒硒含量提高了 0.038 mg/kg,其他处理对水稻籽粒含量的提高效果从低到高依次是 P₁、P₁+B、B、P₂。根据《食品中硒限量卫生标准》(GB 13105-1991)^[24]以及《富硒稻谷》(GB/T 22499-2008)^[25]规定,富硒稻谷加工的大米硒含量应在 0.04 ~ 0.30 mg/kg,并且粮食(成品粮)硒含量应 ≤0.30 mg/kg,本试验中通过不同调控

措施使水稻籽粒中硒的含量均达到了富硒标准,总体上来看,通过不同调控措施对水稻籽粒硒含量的提高具有较好的效果。

2.2.2 对水稻籽粒有机硒转化的影响 植物中的硒分为有机硒和无机硒两种形态,其中有机硒是评价作物是否富硒以及利于人体健康的主要指标,有研究表明水稻籽粒中的硒主要以有机硒的形态存在,总硒中有机硒的含量为 897 ~ 959 g/kg^[26]。为了进一步分析不同调控措施下硒在水稻籽粒中的变化机理,本试验对水稻籽粒硒的形态进行测定,结果见于表 3,可以看出总硒中有机硒含量均为 890 g/kg 以上。不同调

控措施对水稻籽粒有机硒的提高效果与总硒相似,但对其有机硒含量的影响更为明显,与 CK 相比均达到了极显著水平($P<0.01$)。P₂+B 和 P₂ 两个处理使水稻籽粒有机硒含量分别相应提高了 39.27 μg/kg 和 28.65 μg/kg。对于有机化率来说,P₂+B、P₁+B 和 B 3 个处理对有机化率的提高效果最好,分别相应提高了 6.22%、3.47% 和 3.67%。说明钙镁磷肥与氨基酸叶面肥复合处理能够通过提高土壤硒的活化效果来影响水稻体内硒的转运与生物合成,进而影响所吸收的硒向有机态转化,提高稻米的生物营养价值,这也进一步验证了我们这种调控的可行性。

表 3 不同处理对水稻籽粒中有机硒含量的影响
Table 3 Effects of different treatments on organic Se contents in rice grains

指标	处理					
	CK	P ₂	P ₁	B	P ₂ +B	P ₁ +B
有机硒(μg/kg)	50.34 ± 0.35 dD	78.99 ± 1.28 bB	69.41 ± 0.99 cB	76.82 ± 1.01 bcB	89.61 ± 0.23 aA	76.92 ± 1.74 bcB
有机化率 (%)	89.70 cC	90.78 bcC	92.56 bcB	93.37 bB	95.92 aA	93.17 bB

注:表中同行数据小写字母和大写字母不同分别表示处理间差异达到 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平,下同

2.3 土壤硒形态与水稻各器官吸收硒的关系

土壤-水稻系统中水稻吸收的硒与土壤中各形态硒的含量有密切关系,表 4 给出了不同调控措施下土壤硒的不同形态与水稻各器官硒含量的相关关系,可以看出可溶态硒与水稻各器官的含量呈显著正相关,且以水稻根中硒含量的相关性最大,粒中硒含量的相关性最小,相关系数分别为 0.673 和 0.601。土壤可交换态硒含量与水稻不同器官中硒的含量均呈显著正相关趋势,相关系数分别为 0.549、0.606 和 0.735。由于土壤中水溶态硒和可交换态硒被称为有效硒,所以我们可以看出土壤中硒的化学有效性与生物有效性存在着很大的联系。

酸溶态硒、有机结合态硒和残渣态硒在植物中不

能直接利用,需要经过转化作用才能被植物吸收。其中有机结合态硒在环境中最易发生转化,那是因为处于土壤耕作层中的有机质在水耕熟化的过程中一方面富集游离的硒,另一方面又易于在耕作过程中因暴露于空气中而被氧化分解为小分子甚至完全降解释放其结合的硒,后者在有机结合态硒转化的过程中占主导地位。这 3 种形态的硒均与水稻各器官硒含量呈负相关,其中有机结合态硒与水稻根和粒的相关性达到了显著性水平,相关系数分别为 -0.549 和 -0.571。值得注意的是其与水稻茎中硒含量的相关性没有达到显著水平,相关系数为 -0.368。说明在水稻生长过程中,有机结合态硒的释放对水稻吸收硒的影响大于酸溶态硒和残渣态硒,从另一方面也说明植物吸收硒的最根本来源主要是土壤中的有机结合态硒转化为有效硒作为供植物吸收利用的硒源。

由于土壤中的有效硒与水稻籽粒总硒具有很强的相关性,我们可以利用这一点以调控的方式提高土壤硒的生物有效性,进而取代以土壤施硒等外源补硒的方式来提高水稻硒含量的传统措施。在酸性富硒土壤上种植水稻一方面能够产出品质高的天然富硒大米,充分体现绿色生态和可持续发展的优越性;另一方面能够节省当地因外源施硒肥而产生的成本同时也能避免因外源硒导致的水体和土壤污染。

2.4 不同处理对水稻产量性状的影响

水稻产量是评价水稻生长状况的重要指标之一,但由于当地长期采用传统的有机肥施用方式,

表 4 不同处理下土壤硒形态与水稻不同部位
硒含量的相关性

Table 4 Pearson correlation matrix between the contents of various Se forms in soil and Se contents in different rice organs

硒形态	水稻各部位		
	茎	根	粒
水溶态	0.265	0.673*	0.601*
可交换态	0.549*	0.606*	0.735*
酸溶态	-0.043	-0.004	-0.002
有机结合态	-0.368	-0.549*	-0.571*
残渣态	-0.043	-0.228	-0.085

注: *表示土壤硒形态与水稻不同部位硒含量相关性达到 $P<0.05$ 显著水平。

即以家禽粪便作为底肥施用土地，导致当地水稻经济产量整体偏低。磷肥在农业生产活动中被广泛地使用，其作为植物生长的重要营养元素之一，能够起到促进水稻根系吸收营养元素、提高产量等作用。本研究则是通过钙镁磷肥和氨基酸叶面肥配施的方式来促进水稻根系生长发育和硒素的吸收，进而提高经济产量，而经济产量的高低一般是通过分蘖率、成穗率、实粒数和千粒重等性状指标来反映。由表 5 可以看出，除 B 处理以外其他 4 种调控措施对水

稻经济产量的提高与 CK 相比均达到了极显著水平 ($P<0.01$)，提高效果从低到高依次是 B、 P_2+B 、 P_1 、 P_2 、 P_1+B ，且水稻产量的各项性状指标也都得到了一定的提高，与其变化趋势类似。我们可以看出对于就提高水稻产量而言。本试验提出的钙镁磷肥与氨基酸叶面肥处理能够有效地促进水稻产量的提高，值得注意的是钙镁磷肥的施用量不是越多越好，存在最优的施用量，这也为后期制定富硒农产品调控技术规程打下理论基础。

表 5 不同处理对水稻产量性状的影响
Table 5 Effects of different treatments on traits of rice yield

处理	分蘖率(%)	成穗率(%)	每穗实粒数	千粒重(g)	经济产量(g)	增产率(%)
CK	273	88.9	90.4 ± 3.6 bB	24.5 ± 1.2 bB	54.2 ± 3.7 bB	—
P ₁	343	90.3	96.7 ± 3.2 aAB	26.6 ± 0.2 aAB	64.9 ± 1.4 aA	19.8
P ₂	373	88.4	100.6 ± 2.1 aA	27.9 ± 1.0 aA	66.1 ± 3.7 aA	21.8
P ₁ +B	380	90.4	97.3 ± 2.3 aAB	26.2 ± 0.6 aAB	66.5 ± 5.3 aA	22.7
P ₂ +B	367	90.9	96.7 ± 2.6 aAB	28.6 ± 1.2 aAB	63.6 ± 3.6 aA	17.4
B	267	88.1	91.3 ± 1.2 bB	24.9 ± 0.9 bB	52.1 ± 4.8 bB	3.8

3 结论

1) 不同调控措施均能不同程度地提高酸性富硒土壤中硒的有效性，使水稻籽粒硒含量的变幅为 0.074 ~ 0.093 mg/kg，均达到了富硒大米标准。其中 P_2 (高用量的钙镁磷肥)和 P_2+B (高用量的钙镁磷肥与氨基酸叶面肥复合处理)两个处理效果最佳，分别使土壤有效硒含量提高 42.16 μg/kg 和 43.54 μg/kg，使水稻籽粒有机硒含量分别相应提高了 28.65 μg/kg 和 39.27 μg/kg。总体来说，5 种处理的增幅均达到了极显著水平 ($P<0.01$)，这也进一步验证了本研究中不同措施调控土壤硒有效性的可行性。

2) 总体来说土壤有效硒与水稻不同器官总硒呈显著正相关，植物吸收硒的最根本来源主要是土壤中的有机结合态硒转化为有效硒作为供植物吸收利用的硒源。水稻吸收硒的量(生物有效性)，尤其是水稻籽粒中积累的硒取决于土壤中的有效硒(化学有效性)。通过增施磷肥的调控措施，在扩大土壤磷素水平的基础上提高土壤硒的化学有效性是促进水稻吸收硒的有效途径。

参考文献：

[1] 李伟, 李飞, 毕德, 等. 兰州碱性土壤与农产品中硒分布及形态研究[J]. 土壤, 2012, 44(4): 632-638
[2] 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(2/3): 325-330
[3] 全双梅, 李晓燕, 邵树勋, 等. 开阳富硒农作物筛选研究[J]. 地球与环境, 2009, 37(3): 270-274
[4] 刘铮, 朱其清, 唐丽华, 等. 我国缺乏微量元素的土壤及其区域分布[J]. 土壤学报, 1982, 19(3): 209-223
[5] Chen J S, Wei F S, Zheng C J, et al. Background concentrations of elements in soil of China[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1991, 58(1): 699-712
[6] 严明书, 张茂忠, 唐将, 等. 重庆渝北地区表层土壤硒含量分布与农业经济意义[J]. 地球与环境, 2012, 40(4): 589-594
[7] Wen G C, Huang Y, Guo Y L, et al. Optional conditions of extraction method for available selenium in acid soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26 (5): 1996-2000
[8] 张宝军, 钟松臻, 龚如雨, 等. 赣南低丘红壤水稻土硒及其生物有效形态的组成与分布[J]. 土壤, 2017, 49(1): 150-154
[9] 果秀敏, 牛君仿, 方正, 等. 植物中硒的形态及其生理作用[J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(增刊): 142-143
[10] 赵妍, 马爱军, 宗良纲, 等. 不同调控措施在强酸性高硒茶园土壤中的应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2306-2312
[11] 谭见安. 中华人民共和国地方病与环境图集[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 83-118
[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005
[13] 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
[14] 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

- [15] 王梅, 张红香, 邹志辉, 等. 原子荧光光谱法测定富硒螺旋藻片中不同形态、价态的硒[J]. 食品科学, 2011, 32(6): 179–182
- [16] 姚欢, 宗良纲, 孟蝶, 等. 增施磷肥对提高强酸性高硒茶园土壤硒有效性的效果[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 288–291
- [17] 杨旒, 宗良纲, 严佳, 等. 改良剂与生物有机肥配施方式对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1069–1075
- [18] 周鑫斌, 于淑慧, 谢德体. pH 和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 119–127
- [19] 赵美芝. 土壤和粘粒矿物对亚硒酸盐的吸附和解吸[J]. 土壤学报, 1991, 28(2): 139–145
- [20] Cater D L, Robbins C W, Brown M J. Effect of phosphorus fertilization on the selenium concentration in alfalfa (*Medicago sativa*)[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1972, 36: 624–628
- [21] Singh M, Malhotra P K. Selenium availability in berseem (*Trifolium alexandrinum*) as affected by selenium and phosphorus application[J]. Plant and Soil, 1976, 44: 261–266
- [22] Levesque M. Some aspects of selenium relationships in eastern Canadian soils and plants[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1974, 54: 205–214
- [23] 诸旭东, 宗良纲, 马迅, 等. 内源调控与外源补硒对提高水稻吸收硒及其产量的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 398–404
- [24] 中华人民共和国卫生部. 食品中硒限量卫生标准(GB 13105-91)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991
- [25] 中华人民共和国农业部. 富硒稻谷 (GB/T 22499-2008)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
- [26] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 叶面喷硒对水稻籽粒硒富集及分布的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 73–78

Effects of Mixed Application of Calcium Magnesium Phosphate and Aminoacid Foliar Fertilizer on Se Availability in Acid Se-rich Soil and on Trait of Rice Yield

MA Xun¹, ZHU Xudong¹, ZONG Lianggang^{1*}, FANG Yong², HU Qiuhui²

(1 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2 Institute of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210046, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to investigate the effects of 5 different treatments of mixed application of calcium magnesium phosphate and aminoacid foliar fertilizer on Se availability in acid Se-rich soil, Se contents in different rice organs, and organic Se in rice grains. 6 treatments were designed: 1) CK, conventional calcium magnesium phosphate, 0.2 g/kg; 2) P₁, single low calcium magnesium phosphate, 0.4 g/kg; 3) P₂, single high calcium magnesium phosphate, 0.6 g/kg; 4) B, single aminoacid foliar fertilizer; 1 500 ml/hm²; 5) P₁+B; 6) P₂+B. The results showed that all treatments increased significantly soil Se availability and organic Se contents in rice grains compared with CK ($P<0.01$), the effects of P₂ and P₂+B treatments were best, which increased available Se contents by 42.16 μg/kg and 43.54 μg/kg, respectively, increased organic Se contents in rice grains by 28.65 μg/kg and 39.27 μg/kg, respectively.

Key words: Calcium magnesium phosphate; Aminoacid foliar fertilizer; Mixed application; Se; Acidic Se-rich soil; Rice