

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.20007

施硒及不同形态磷肥对小麦硒吸收和磷肥利用率的影响

安军妹, 范晓芳, 侯振安, 闵伟, 冶军*, 索常凯, 安映荷, 王宗伟

(石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003)

摘要: 通过田间微区试验, 研究施用硒肥及4种不同形态磷肥对小麦硒吸收和磷肥利用率的影响。硒肥设不施硒(SE0)和施硒(SE)2个处理, 各硒肥处理下设置5个磷肥处理, 分别为不施磷肥(CK)、施用磷酸(AP)、聚磷酸铵(APP)、磷酸一铵(MAP)和磷酸二铵(DAP)。结果表明: 不施硒肥条件下, 不同形态磷肥均能促进小麦硒吸收, 但小麦籽粒硒含量均未达到富硒稻谷国家标准。其中, APP处理磷肥利用率最高, 分别较AP、MAP和DAP处理提高2.49、4.86和7.07个百分点。施硒肥条件下, 小麦籽粒硒含量显著增加。其中, MAP处理小麦籽粒硒含量和产量分别较CK处理增加68.11%和56.70%, 磷肥利用率分别较AP、APP和DAP处理提高16.09、15.03和14.86个百分点。因此, 硒肥配合施用磷酸一铵能够增加小麦籽粒硒含量, 提高磷肥利用率和产量。

关键词: 硒肥; 磷肥; 小麦; 硒吸收; 磷肥利用率

硒既可以防癌、抗癌, 又能保护细胞膜, 还有增强机体免疫力的功能^[1]。在大自然中, 虽然硒主要的来源是植物, 但其本质上最终的来源是土壤, 影响自然界中硒水平的因素主要有土壤中硒的含量以及作物吸收和转运硒的能力^[2]。富硒土壤指的是全硒含量 $>0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 且 $\leq 2.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤^[3]。新疆第八师天业生态园是典型的石灰性土壤, 平均硒含量达到 $0.582 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 符合土壤的富硒标准, 但即使土壤达到富硒标准, 也不能保证作物籽粒一定能达到富硒水平。因此, 提升人体硒营养健康最有益的方式就是提高作物吸收和转运硒的能力。

小麦是我国最主要的粮食作物之一且种植面积较大, 通过增强小麦籽粒吸收硒的能力, 间接地用饮食来提高人体对硒的摄入量是一种既安全又有效的补硒措施。磷是作物生长必需的大量元素之一, 施用磷肥是农业生产中为了提高作物产量所采取的的必要措施之一。土壤中硒和磷的存在状态及其化学行为均有相似性, 在很多研究土壤对硒和磷吸附的试验中已得到验证^[4]。在土壤-植物这一系统中, 磷酸盐与亚硒酸盐之间的相互作用非常复杂。其一, 磷酸盐与亚硒酸盐在土壤里有相同的吸附位

点, 且磷酸盐的吸附能力强于亚硒酸盐^[5]。施磷肥会通过降低亚硒酸盐在土壤表面的吸附量从而使硒的生物有效性提高^[6]。其二, 作物吸收磷酸盐、亚硒酸盐时用相同的转运通道, 二者在吸收上又存在竞争关系^[7]。因此, 磷和硒在作物体内的相互作用, 出现了不一致的研究结果。

当前的研究多以水培或者盆栽试验为主, 主要研究作物在不同磷浓度与硒浓度下对硒吸收的影响^[8-10], 关于不同形态磷肥对小麦硒吸收的研究鲜有报道。本文进行施用硒肥和4种不同形态磷肥对小麦吸收硒、磷肥利用率及产量影响的研究, 为提高小麦籽粒硒含量并达到富硒水平提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2019年4~7月在新疆石河子市天业生态园进行。土壤类型为灌耕灰漠土, 质地为壤土, 土壤基本理化性质见表1。供试硒肥为分析纯亚硒酸钠(Na_2SeO_3), 磷肥种类和养分含量N-P₂O₅-K₂O为: 磷酸(0-62-0)、聚磷酸铵(12-67-0)、磷酸一铵(12-60-0)和磷酸二铵(18-46-0, 滴灌二铵), 供试作物为小麦(新春20号)。

1.2 试验设计

以硒肥和磷肥为试验因素, 硒肥设不施硒(SE0)和施硒(SE)2个处理, 施硒量为 $7.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 每个硒肥处理下设5个磷肥处理, 分别为不施磷肥(CK)、施用磷酸(AP)、聚磷酸铵(APP)、

收稿日期: 2020-01-03; 录用日期: 2020-03-28

基金项目: 国家科技支撑项目: 滴灌条件下粮食作物水肥资源高效利用与农田肥力提升研究与示范(2012BAD42B02)。

作者简介: 安军妹(1995-), 女, 新疆伊犁人, 硕士研究生, 主要从事新型肥料与现代施肥技术方面的研究。E-mail: ajmshzu@163.com。

通讯作者: 冶军, E-mail: yejun.shz@163.com。

表 1 供试土壤基本理化性质

pH	电导率 ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总硒 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效硒 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
8.01	191	15.54	56.58	23.94	297.00	0.582	0.017

磷酸一铵 (MAP) 和磷酸二铵 (DAP)。磷肥全部作追肥分 3 次随水滴施, 施用量为 P_2O_5 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验共 10 个处理, 每个处理重复 3 次, 30 个试验微区, 微区面积为 9 m^2 , 微区间设 1 m 保护行。

硒肥在播种前人工翻入土壤中, 深度为 20 cm。小麦采用 1 带 4 行的模式 (即 4 行小麦 1 条滴灌带, 行距为 15 cm, 滴头间距 30 cm), 播种量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小麦整个生育期灌水 450 mm, 灌溉次数为 6 次。氮肥 (尿素) 和钾肥 (氯化钾) 均作为追肥与磷肥一同随水滴施, 施用量分别为 $\text{N} 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O} 85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各磷肥处理中所含氮计入施肥量, 按施氮量 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 用尿素调节, 使所有处理含氮量相同。其他栽培管理措施与当地大田生产一致。

1.3 测定项目及方法

样品采集: 1) 土壤样品取土深度为 0 ~ 20 cm, 采集后的土壤样品在室内阴凉处自然风干, 除去植物残体和石砾后磨碎分别过 0.25 和 0.15 mm 筛, 待测。2) 植株样品在小麦蜡熟期进行采集, 先用流水冲洗根部泥沙, 然后用去离子水冲洗根部 3 次, 再把洗干净的植株样品用滤纸吸干水分, 按茎叶、颖壳和籽粒分开。于烘箱中 105°C 杀青 30 min, 而后在 60°C 下烘干至恒重, 冷却至室温后进行称重, 用小型粉样机粉碎后过 1 mm 筛, 存于自封袋中密封, 待测。

土壤全硒含量的测定按照 NY/T 1104-2006《土壤中全硒的测定》进行。土壤有效硒含量的测定选择 $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 溶液作为浸提剂^[11]。植株全硒含量的测定参照 GB 5009.93-2017《食品中硒的测定》进行。土壤全硒、有效硒及植株全硒测定所用仪器为海光 LC-AFS 9800 原子荧光光度计。植株全磷的测定参照《土壤农化分析》书植株中磷的测定 ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 钒钼黄比色法) 进行^[12]。小麦蜡熟期, 各微区均选择 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方用来测定穗数, 在样方内连续采集 20 株长势一致的小麦测定每穗粒数, 将小麦脱壳后测定千粒重并计算产量。

1.4 计算公式

硒累积量 ($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$) = 植株全硒含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) \times 生物量 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)^[13]

硒富集系数 = 植株各器官全硒含量 / 土壤全硒含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[14]

磷吸收 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 植株全磷含量 (%) \times 生物量 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$) \times 每公顷株数 / 1000

磷肥利用率 (%) = (施磷区作物吸磷总量 - 不施磷区作物吸磷总量) / 施磷量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times 100$ ^[15]

1.5 数据处理

用 Excel 2010 进行数据处理并作图表, 用 SPSS 19.0 进行方差分析和 Duncan 多重比较, 为了确定硒肥和磷肥对小麦植株硒含量、磷吸收、磷肥利用率和产量的影响, 对数据进行两因素方差分析, 硒肥和磷肥作为独立变量, 用单因素方差分析比较不同处理间差异。

2 结果与分析

2.1 施硒及不同磷肥对小麦植株硒含量及硒累积量的影响

2.1.1 小麦植株硒含量

由表 2 可知, 硒肥 (S)、磷肥 (P) 及硒肥与磷肥的交互作用 (S \times P) 对植株硒含量的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。SE 处理后茎叶、颖壳和籽粒的硒含量均显著高于 SE0 处理。SE0 条件下, 磷肥处理的茎叶硒含量在 $0.001 \sim 0.008 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 其中籽粒硒含量仅在 $0.001 \sim 0.002 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 远不及富硒稻谷国家标准规定的最低硒含量要求 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。SE 条件下, 各磷肥处理的茎叶硒含量达 $0.132 \sim 0.207 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 籽粒硒含量也有 $0.185 \sim 0.311 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 满足富硒稻谷国家标准 ($0.04 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。APP 和 MAP 处理颖壳和籽粒硒含量显著高于 AP、DAP 和 CK 处理。

2.1.2 小麦硒累积量

S、P 以及 S \times P 对植株硒累积量的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。SE 处理的茎叶、颖壳、籽粒和总硒累积量均显著高于 SE0 处理。SE0 条件下, 各磷肥处理的植株总硒累积量为 $0.008 \sim 0.054$

$\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ (表3)。APP处理的籽粒和总硒累积量均显著高于AP、MAP、DAP和CK处理。SE条件下,各磷肥处理植株总硒累积量达到了1.185 ~ 3.180 $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。MAP处理总硒累积量、茎叶和颖壳硒累积量均显著高于其他处理。籽粒硒累积量最多的是MAP和APP处理。

表2 施硒及不同磷肥对小麦植株硒含量的影响

处理		硒含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
硒肥	磷肥	茎叶	颖壳	籽粒
SE0	CK	0.001c	0.001b	0.001a
	AP	0.005b	0.003a	0.001a
	APP	0.008a	0.003a	0.002a
	MAP	0.007a	0.002b	0.001a
	DAP	0.003c	0.002b	0.001a
	平均	0.005B	0.002B	0.001B
SE	CK	0.132b	0.122c	0.185d
	AP	0.149b	0.189b	0.260b
	APP	0.201a	0.225a	0.305a
	MAP	0.203a	0.224a	0.311a
	DAP	0.207a	0.194b	0.230c
	平均	0.178A	0.191A	0.258A
硒肥 (S)		**	**	**
磷肥 (P)		**	**	**
S × P		**	**	**

注: 同列相同小写字母表示不同磷肥处理间差异不显著 ($P>0.05$), 相同大写字母表示不同硒肥处理间差异不显著 ($P>0.05$)。显著性水平: *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ns, $P>0.05$ 。下同。

表3 施硒及不同磷肥对小麦植株硒累积量的影响

处理		硒累积量 ($\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)			
硒肥	磷肥	茎叶	颖壳	籽粒	总计
SE0	CK	0.004d	0.002b	0.002b	0.008d
	AP	0.024b	0.008a	0.005ab	0.037b
	APP	0.036a	0.009a	0.009a	0.054a
	MAP	0.031a	0.003b	0.002b	0.037b
	DAP	0.012c	0.003b	0.003b	0.018c
	平均	0.022B	0.005B	0.005B	0.031B
SE	CK	0.457d	0.213d	0.515c	1.185e
	AP	0.633c	0.402c	0.813b	1.848d
	APP	0.920b	0.505b	0.960a	2.385b
	MAP	1.348a	0.797a	1.035a	3.180a
	DAP	1.011b	0.440c	0.746 b	2.198c
	平均	0.874A	0.472A	0.814A	2.159A
硒肥 (S)		**	**	**	**
磷肥 (P)		**	**	**	**
S × P		**	**	**	**

2.2 施硒及不同磷肥对小麦植株硒富集系数的影响

由表4可知, S、P以及S × P对植株硒富集系数的影响均达到极显著水平 ($P<0.01$)。SE处理的

茎叶、颖壳以及籽粒硒富集系数均显著高于SE0处理。SE0条件下, 磷肥处理的硒富集系数大小为0.005 ~ 0.208。APP处理的茎叶、颖壳和籽粒硒富集系数表现出显著高于AP、MAP、DAP和CK处理的现象。SE条件下, 各磷肥处理植株硒富集系数较高, 大小普遍介于0.269 ~ 0.564之间, 籽粒的硒富集系数相较于茎叶和颖壳要高。茎叶硒富集系数较高的是MAP和DAP处理, 籽粒硒富集系数, AP、APP和MAP处理显著高于DAP和CK处理, 但前三者之间无差异。

表4 施硒及不同磷肥对小麦植株硒富集系数的影响

处理		硒富集系数		
硒肥	磷肥	茎叶	颖壳	籽粒
SE0	CK	0.008e	0.008d	0.005c
	AP	0.056d	0.037c	0.015bc
	APP	0.208a	0.072a	0.035a
	MAP	0.163b	0.040c	0.024ab
	DAP	0.099c	0.059b	0.029ab
	平均	0.107B	0.043B	0.022B
SE	CK	0.290b	0.269d	0.406b
	AP	0.294b	0.374b	0.515a
	APP	0.303b	0.464a	0.564a
	MAP	0.369a	0.405b	0.564a
	DAP	0.357a	0.335c	0.397b
	平均	0.323A	0.369A	0.489A
硒肥 (S)		**	**	**
磷肥 (P)		**	**	**
S × P		**	**	**

2.3 施硒及不同磷肥对小麦植株磷吸收和磷肥利用率的影响

2.3.1 小麦磷吸收

S对茎叶和籽粒磷吸收的影响分别达到极显著水平 ($P<0.01$) 和显著水平 ($P<0.05$)。P以及S × P对植株磷吸收的影响均达到极显著水平 ($P<0.01$)。SE0处理的茎叶磷吸收显著低于SE处理, 而籽粒磷吸收规律恰好与之相反 (表5)。SE0条件下, 施不同形态磷肥均提高了植株磷吸收量。各器官磷吸收量之和从大到小依次为: APP>AP>MAP>DAP>CK。APP处理的籽粒磷吸收量最大, 分别较AP、MAP和DAP处理高10.82%、17.81%和84.18%。SE条件下, 磷总吸收量、籽粒、颖壳和茎叶磷吸收量均表现为MAP处理最高且显著高于AP、APP、DAP和CK处理。CK处理的磷总吸收量分别较MAP、DAP、APP和AP处理低71.74%、21.69%、21.11%和17.53%。

表 5 施硒及不同磷肥对小麦植株磷吸收的影响

处理		磷吸收量 (mg · kg ⁻¹)			
硒肥	磷肥	茎叶	颖壳	籽粒	总计
SE0	CK	21.60b	10.85d	15.70e	48.16d
	AP	24.02b	15.60b	33.19b	72.81b
	APP	20.99b	19.47a	36.78a	77.24a
	MAP	25.68b	11.59cd	31.22c	68.49c
	DAP	31.59a	12.94c	19.97d	64.50c
	平均	24.78B	14.10A	27.37A	66.24A
SE	CK	22.92c	13.68c	21.27e	53.44c
	AP	26.92b	12.43c	23.46d	62.81b
	APP	26.14b	10.16d	28.42b	64.72b
	MAP	37.86a	20.49a	33.42a	91.78a
	DAP	22.68c	16.38b	25.97c	65.03b
	平均	27.30A	14.63A	26.51B	67.55A
硒肥 (S)		**	ns	*	ns
磷肥 (P)		**	**	**	**
S × P		**	**	**	**

2.3.2 小麦磷肥利用率

从图 1 可以看出, S、P 以及 S × P 对植株磷肥利用率的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。SE0 条件下, AP、MAP 和 DAP 处理的磷肥利用率较 APP 处理分别低 2.49、4.86 和 7.07 个百分点。SE 条件下, MAP 处理磷肥利用率最高, 比 AP、APP 和 DAP 处理高出 16.10、15.04 和 14.86 个百分点, AP、APP 和 DAP 三者之间磷肥利用率无差异。

2.4 施硒及不同磷肥对小麦产量的影响

S 对产量的影响不显著, P 以及 S × P 对产量的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。SE0 条件下, 施磷肥处理产量显著高于 CK, 具体表现为 APP、MAP、DAP 和 AP 处理产量分别较 CK 处理增加 55.73%、49.74%、35.26% 和 23.86%。SE 条件下, 也是施磷肥处理产量明显高于不施磷肥处理, MAP、DAP、AP 和 APP 处理分别较 CK 处理增产 56.70%、49.62%、33.13% 和 31.04%。

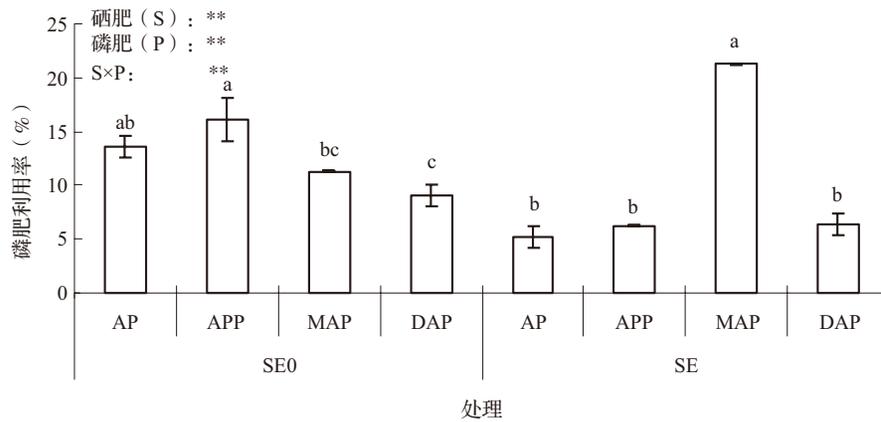


图 1 施硒及不同磷肥对小麦磷肥利用率的影响

注: 相同小写字母表示不同磷肥处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。显著性水平: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ns, $P > 0.05$ 。下同。

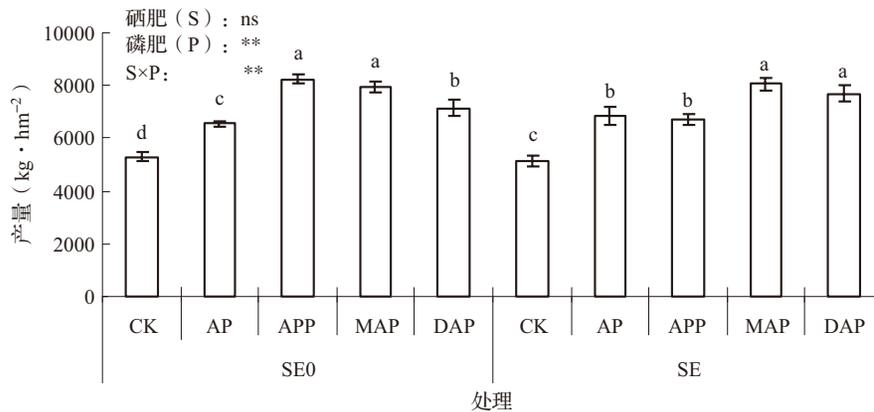


图 2 施硒及不同磷肥对小麦产量的影响

3 讨论

从本研究得知,施硒肥可以提高小麦各器官硒含量、硒累积量和硒富集系数,但对提高小麦产量并没有显著影响。赵文龙等^[16]研究表明,施硒肥能提高小白菜吸收和累积硒的能力且提高程度明显,直接表现为施硒肥的小白菜地上部和下部的硒浓度、硒吸收量以及硒富集系数均会随施硒浓度的升高而逐渐升高。盆栽试验中硒的施用量为 $0 \sim 10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,冬小麦各器官硒的累积量最大的是籽粒,其次是茎叶,再者是根,硒累积量最小的是颖壳(不施硒处理除外)。随着施硒量的增加,冬小麦各部位硒累积量均呈现缓慢提高的现象。与不施硒处理比较发现,施硒肥后的冬小麦籽粒硒累积量提高的倍数达 $11.35 \sim 88.80$ 。籽粒硒累积量较其他部位都高,但根部硒累积量的增幅最大^[17]。在低硒($0.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)水平下,穗、籽粒和颖壳的硒浓度因氮素促进硒向生殖器官转运而升高。低硒水平高氮($200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)会增加转运到小麦籽粒中硒的量,使籽粒中硒占的比例提高 18.4% 。小麦生殖生长过程中,低硒处理的硒从茎叶转运到颖壳和籽粒中是可以提高氮素水平来实现的,而高硒处理($5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)主要出现的结果是促进了硒到颖壳的转运^[18]。根部施用外源硒肥后,茶叶硒含量明显增加,硒肥的用量大小不会显著影响茶叶产量和品质^[19]。施用外源硒处理后不会降低两个品种的稻谷产量^[20]。

土培盆栽试验中,供试富硒土壤为赤红壤和红壤时,不同用量的磷肥施入后(磷酸二氢钠)均促进了小白菜对硒的吸收^[21]。水培试验研究结果表明,磷肥为磷酸二氢钠(0.31 、 3.1 、和 $31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,随着磷肥浓度的增加,冬小麦各器官硒的浓度和积累显著降低^[22]。张栋^[23]通过盆栽试验发现,土壤硒含量分别为 0.308 和 $1.153 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,磷酸一铵和磷酸二铵处理显著提高小麦对硒的吸收,而磷酸脲和聚磷酸铵对小麦的硒吸收量没有影响。本研究通过田间微区试验发现,不施硒肥条件下,聚磷酸铵处理促进小麦硒吸收的效果要明显好于磷酸、磷酸一铵和磷酸二铵处理,施硒肥条件下,小麦硒吸收量最好的是磷酸一铵处理。

本研究表明,不施硒肥条件下,磷肥利用率最高的是聚磷酸铵处理,施硒肥条件下,磷肥利

用率表现为磷酸一铵处理显著高于其他磷肥处理。秦永林等^[24]研究发现,施磷量都为 $160 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,磷酸二铵的磷肥利用率明显比磷酸一铵处理低。施用磷肥(P_2O_5)的量为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的小区试验中,水溶性聚磷酸铵处理的籽粒产量和磷肥利用率显著高于磷酸脲和磷酸一铵处理^[25]。施用磷肥有助于水稻生长,促进水稻分蘖,提高水稻产量构成因素,并显著增加稻谷产量^[26]。磷肥施用量增加会直接影响小麦粒重、每穗粒数和穗数等产量构成因素,小麦产量提高程度明显^[27]。因此,施硒肥和不同形态磷肥能促进小麦硒吸收,提高籽粒硒含量,施磷肥还能提高小麦产量。

4 结论

不施硒肥条件下,聚磷酸铵处理的小麦硒含量、磷肥利用率和产量均显著高于磷酸、磷酸一铵和磷酸二铵处理。施硒肥条件下,小麦植株硒含量提高程度明显,籽粒硒含量达到富硒水平。磷酸一铵处理的小麦硒含量、磷肥利用率和产量高于其他磷肥处理。因此,硒肥配合施用磷酸一铵能促进小麦硒吸收,增加籽粒硒含量,提高磷肥利用率和产量。

参考文献:

- [1] Pieczyńska J, Grajeta H. The role of selenium in human conception and pregnancy [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2015, 29: 31-38.
- [2] 罗杰,温汉辉,吴丽霞,等. 自然富硒与人工施硒肥的比较[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(33): 90-97.
- [3] 赵书军,陈红华,李锡宏,等. 恩施烟区土壤硒分布特征及其与烟叶硒的关系[J]. *中国烟草科学*, 2011, 32(S1): 63-66.
- [4] 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): 288-293.
- [5] 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.
- [6] Nakamaru Y M, Sekine K. Sorption behavior of selenium and antimony in soils as a function of phosphate ion concentration [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, 54(3): 332-341.
- [7] Li H F, Megrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite [J]. *New Phytologist*, 2008, 178(1): 92-102.
- [8] 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.
- [9] 聂兆君, 李金峰, 赵鹏, 等. 磷硒配施对冬小麦幼苗磷硒吸收和转运的影响 [J]. 西南农业学报, 2019, 32 (1): 122-127.
- [10] 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.
- [11] 陈娥, 陈永波, 李卫东, 等. 土壤有效硒测定方法的研究 [J]. 湖北农业科学, 2018, 57 (21): 22-26, 30.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第3版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 董石峰, 孙敏, 赵剑敏, 等. 花期喷施亚硒酸钠对小麦生长特性及硒积累的影响 [J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 2019, 39 (6): 13-18.
- [14] 徐聪, 刘媛媛, 孟凡乔, 等. 农产品硒含量及与土壤硒的关系 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (7): 96-103.
- [15] 戴娟. 水稻氮磷钾肥料利用率试验 [J]. 安徽农学通报, 2019, 25 (19): 83-84.
- [16] 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.
- [17] 刘红恩, 李金峰, 赵鹏, 等. 施硒对冬小麦产量及硒吸收转运的影响 [J]. 麦类作物学报, 2017, 37 (5): 694-699.
- [18] 陈玉鹏, 梁东丽, 宋卫卫, 等. 氮素对不同生育期小麦植株累积硒的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (2): 395-402.
- [19] 王朝阳, 刘运华, 孙乐, 等. 根施硒肥对茶叶硒含量及品质成分的影响研究 [J]. 陕西农业科学, 2019, 65 (10): 31-33.
- [20] 韦叶娜, 杨国涛, 范永义, 等. 外源硒处理对优质地方水稻品种产量及稻米硒氮磷钾含量的影响 [J]. 中国农学通报, 2017, 33 (36): 14-19.
- [21] 邢颖, 刘永贤, 梁潘霞, 等. 磷对富硒赤壤与红壤上小白菜硒吸收及土壤硒形态的影响 [J]. 土壤, 2018, 50 (6): 1170-1175.
- [22] Liu H G, Shi Z W, Li J F, et al. The impact of phosphorus supply on selenium uptake during hydroponics experiment of winter wheat (*Triticum aestivum*) in China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 373.
- [23] 张栋. 施磷对土壤硒形态及小麦硒吸收转运的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
- [24] 秦永林, 田艳花, 樊明寿, 等. 磷肥种类对石灰性土壤马铃薯产量和磷肥利用率的影响 [J]. 中国蔬菜, 2019 (5): 70-75.
- [25] 张皓禹, 张君, 张凤麟, 等. 滴灌条件下不同磷肥品种对土壤磷有效性及玉米产量的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33 (2): 189-195.
- [26] 陈世平, 陈金团. 不同施磷量对水稻产量、品质及磷肥利用率的影响 [J]. 安徽农学通报, 2019, 25 (13): 57-58, 109.
- [27] 姜宗庆, 封超年, 黄联联, 等. 施磷量对不同类型专用小麦产量和品质的调控效应 [J]. 麦类作物学报, 2006 (5): 113-116.

Effects of selenium application and different forms of phosphate fertilizer on wheat selenium absorption and phosphorus use efficiency

AN Jun-mei, FAN Xiao-fang, HOU Zhen-an, MIN Wei, YE Jun*, SUO Chang-kai, AN Ying-he, WANG Zong-wei (College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi Xinjiang 832003)

Abstract: The effects of applying selenium fertilizer and four different forms of phosphorus fertilizer on selenium absorption and phosphorus use efficiency of wheat were studied through field micro-region experiments. The selenium fertilizer was provided with two treatments of no selenium (SE0) and selenium (SE), and five phosphate fertilizer treatments were set up under each selenium fertilizer treatment, namely, no phosphorus fertilizer (CK), phosphate (AP), ammonium polyphosphate (APP), monoammonium phosphate (MAP) and diammonium phosphate (DAP). The results showed that: in the absence of selenium fertilizer, different forms of phosphate fertilizer promoted the absorption of selenium in wheat, but the selenium content of wheat grains did not meet the national standard of selenium-rich rice. Among them, APP treatment had the highest use efficiency of phosphate fertilizer, which increased by 2.49, 4.86 and 7.07 percentage points compared with AP, MAP and DAP treatments, respectively. The selenium content of wheat grains increased significantly under the application of selenium fertilizer. Among them, the selenium content and yield of wheat treated with MAP increased by 68.11% and 56.70%, respectively, compared with CK treatment, and the use efficiency of phosphate fertilizer was increased by 16.09, 15.03 and 14.86 percentage points compared with AP, APP and DAP treatment, respectively. Therefore, the combined application of selenium fertilizer and monoammonium phosphate can increase the selenium content of wheat grains, improve the use efficiency of phosphate fertilizer and yield.

Key words: selenium fertilizer; phosphate fertilizer; wheat; absorption; phosphate use efficiency