



doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.24018

不同品种磷肥对冬小麦苗期磷素吸收及地上部磷形态的影响

周文利*, 何依龙, 徐晓峰, 李亚娟

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为进一步了解施用不同品种磷肥对冬小麦苗期磷素吸收的影响, 为合理施肥提供依据。采用土壤培养的方法, 研究了在潮褐土上施用过磷酸钙 (SSP)、磷酸一铵 (MAP)、磷酸二铵 (DAP)、钙镁磷肥 (CMP) 以及聚磷酸铵 (APP) 对冬小麦苗期磷素吸收以及小麦地上部磷组分的影响。结果表明, 施用磷肥均能显著增加冬小麦地上部生物量。其中 SSP 处理冬小麦地上部生物量最高, 较不施磷处理提高 70.66%。施磷能提高冬小麦地上部和根系的磷含量, 不同磷肥处理冬小麦地上部和根系磷含量均表现为 APP>SSP>MAP>DAP>CMP。其中 APP 处理冬小麦地上部和根系磷含量最高, 显著高于 DAP 和 CMP 处理。施磷能增加冬小麦对磷的吸收, 不同磷肥处理冬小麦对磷的吸收量表现为 SSP>APP>MAP>DAP>CMP, 其中 SSP、APP 和 MAP 处理冬小麦的磷吸收量显著高于 DAP 和 CMP 处理。5 种施肥处理小麦磷肥表观利用率表现为 SSP>APP>MAP>DAP>CMP。随着小麦地上部全磷含量的增加, 磷酸糖和核酸磷含量呈线性增加, 当全磷含量达到 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右磷酸糖和核酸磷逐渐稳定, 不溶性磷复合物开始随着全磷含量的增加而呈线性增加。综上所述, 施用不同品种磷肥均能增加冬小麦苗期磷素吸收。过磷酸钙、磷酸一铵及聚磷酸铵处理冬小麦有较高的生物量和磷肥利用效率, 因此, 是冬小麦苗期适宜施用的磷肥种类。

关键词: 小麦; 磷肥; 磷肥利用率; 磷组分

磷是作物生长必需的营养元素, 同时也是限制作物生长最常见的养分之一^[1]。施用磷肥能够增加土壤有效磷含量, 从而改善作物生长状况, 因此, 在农业生产中磷肥被广泛应用^[2]。但是, 随着磷肥用量的增加, 磷肥利用率降低, 同时增加环境污染的风险^[3]。我国普遍存在磷肥过量施用的现象, 磷肥利用率仅有美国的一半^[4]。因此, 合理施用磷肥对农业绿色发展有重要的意义。

在低磷土壤上, 施用不同品种磷肥均有增产效果^[5-7]。不同品种磷肥在土壤中的转化不同, 导致其有效性不同。不同品种磷肥施入石灰性土壤后主要转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$, 其中水溶性磷肥施入土壤后土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量迅速增加, 之后迅速向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化。弱酸溶性磷肥施入土壤后, 土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量均表现出缓慢上升的趋

势^[8]。因此, 水溶性磷肥施入石灰性土壤后使土壤有效磷含量迅速上升, 并能保持一定时间的供给, 而弱酸溶性磷肥施入土壤后的磷素供给相对较弱, 导致过磷酸钙及磷铵类等水溶性磷肥在石灰性土壤中的肥效高于钙镁磷肥等弱酸溶性磷肥^[9-11]。研究表明, 在中性土壤中施用磷酸二铵, 玉米的干物质积累、产量和磷的吸收效率均高于施用钙镁磷肥^[12]。在石灰性土壤中, 施用磷酸二铵和过磷酸钙, 小麦的产量、磷吸收量及磷肥利用效率也均高于施用沉淀磷肥^[5]。在冬小麦-夏玉米 (大豆) 一年两熟长期试验中, 施用过磷酸钙磷肥利用率最高, 磷酸二铵最小, 钙镁磷肥居中^[11]。由于聚磷酸盐等缓释型磷肥需要转化为正磷酸盐才能被作物吸收或土壤固定, 因此肥效缓长^[8, 13]。研究表明, 聚磷酸铵施入土壤后, 土壤有效磷随着时间的延长逐渐升高^[14]。在碱性土壤中施用聚磷酸铵, 比施用磷酸二铵能显著增加玉米对磷素的吸收利用, 从而促进玉米的生长^[13]。为了获得较高的作物产量, 植物在生长早期阶段就需要充足的磷^[15]。小麦苗期是磷的营养临界期, 苗期磷素营养直接影响了小麦的生长。小麦苗期的磷素营养状况可以通过地上部植株全磷含量来反映。一般认为, 小麦苗期地上

收稿日期: 2024-01-11; 录用日期: 2024-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200205); 河南科技大学博士科研启动基金 (13480073); 河南省高等教育教学改革研究与实践项目 (2024SJGLX0321); 河南科技大学高等教育教学改革研究与实践项目 (2024BK026)。

作者简介: 周文利 (1978-), 博士, 副教授, 主要从事养分资源管理方面的研究。E-mail: zwli12@163.com。同时为通讯作者。



部适宜的全磷含量约为 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [16]。研究还表明,在不同磷素供应水平条件下,植物可以通过调节叶片无机磷和有机磷组分比例对土壤磷有效性做出响应 [17]。在磷素奢侈吸收的条件下,植物叶片全磷含量线性增加,无机磷组分所占比重增加 [18]。研究冬小麦施用不同品种磷肥条件下,苗期磷肥利用效率以及冬小麦幼苗全磷及磷组分的变化,对合理施用磷肥有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤来自河南省洛阳市偃师区高龙镇农田 ($34^{\circ} 39' 46'' \text{N}$, $112^{\circ} 21' 24'' \text{E}$) $0 \sim 20 \text{ cm}$ 耕层土壤,为潮褐土。基本理化性状: pH (水:土 = 2.5:1) 8.05、碱解氮 $68.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $6.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $223 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验用土风干后过 2 mm 筛备用。所用磷肥品种分别为过磷酸钙 (SSP, P_2O_5 12%)、磷酸一铵 (MAP, P_2O_5 61%)、磷酸二铵 (DAP, P_2O_5 53%)、钙镁磷肥 (CMP, P_2O_5 12%)、聚磷酸铵 (APP, P_2O_5 43%),磷肥均磨碎备用,氮肥为尿素 (N 46%),钾肥为硫酸钾 (K_2O 52%)。供试小麦为孟麦 32,该品种属半冬性多穗型中晚熟品系,苗期生长较好,分蘖力强。

1.2 试验设计

采用盆栽的试验方法。试验设 6 个处理,分别为 CK (不施磷肥)、SSP、MAP、DAP、CMP 和 APP。每个处理重复 4 次,共 24 盆。每盆装土 250 g ,氮、磷、钾肥施用量分别为 $\text{N } 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 P_2O_5 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\text{K}_2\text{O } 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中 MAP、DAP 和 APP 含有氮素,因此尿素用量相应减少,以保证各个处理氮肥用量一致。将土壤与对应处理肥料混合均匀,调节土壤含水量至 20% (重量含水量)。平衡一周后,将同一处理土壤样品混合均匀,再次重新分装至 4 个盆中,调节含水量至 20% (重量含水量)。小麦催芽至露白后播种,每盆播种 5 粒小麦,出苗后间苗,每盆保留长势一致的 3 株。小麦生长期间每 2 d 浇水 20 mL ,温室中培养 30 d 后收获。试验期间,温室采用自然光照,平均日最高温度 18°C ,最低温度 8°C 。

1.3 样品采集及测试

盆栽试验结束后,将小麦地上部小心剪下,用蒸馏水洗净,将小麦根系小心拣出,用蒸馏水洗净之后与地上部一起放入烘箱, 90°C 杀

青 30 min 后于 75°C 烘至恒重,用 $1/1000$ 天平称重,测定地上部和根系干重,之后用研钵磨碎备用。烘干磨碎的植株样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,钼锑抗比色法测定全磷含量 [19]。用 Close 和 Beadle (2004 年) 改进的三氯乙酸 (TCA) 浸提的方法测定地上部样品磷形态 [20]。过程如下:烘干磨碎的植物样品用 $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 三氯乙酸在 4°C 下浸提 1 h,期间每隔 10 min 摇匀一次,之后离心。一部分清液用钼锑抗比色法测定磷含量,其结果为植株无机磷含量;另一部分清液蒸干后用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮 (360°C),之后用钼锑抗比色法测定磷含量,结果为无机磷与磷酸糖含量之和。残渣用 $0.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 三氯乙酸在 90°C 下浸提 1 h,期间每隔 10 min 摇匀一次,之后离心。清液用钼锑抗比色法测定磷含量,结果为核酸磷含量。植株全磷含量减去无机磷、磷酸糖和核酸磷 3 种组分含量即为不溶性磷复合物含量。

1.4 数据处理及分析

小麦植株磷吸收量 = 地上部磷浓度 $\times$ 地上部生物量 + 根系磷浓度 $\times$ 根系生物量
磷肥表观利用率 = (施磷处理磷吸收量 - 不施磷处理磷吸收量) / 施磷量 $\times 100\%$

用 Excel 2013 计算平均值,用 SAS 8.01 对数据进行多重比较分析和线性加平台模型参数计算,用 Origin 2021 做图。

2 结果与分析

2.1 不同磷肥处理对土壤有效磷的影响

由图 1 可见,施用磷肥能显著增加土壤有效磷含量。不同磷肥处理土壤有效磷含量不同,其中

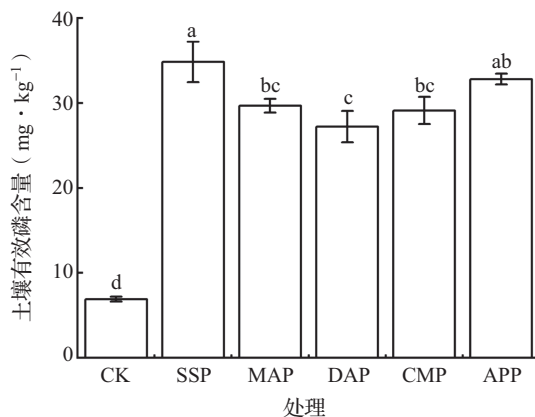


图 1 不同处理土壤有效磷含量

注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

SSP 处理土壤有效磷含量最高达 34.84 mg · kg⁻¹，显著高于 DAP、CMP 和 MAP 处理，但与 APP 处理差异不显著。DAP 处理土壤有效磷含量最低，为 27.22 mg · kg⁻¹，显著低于 SSP 和 APP 处理，但与 CMP 和 MAP 处理间差异不显著。

2.2 不同磷肥处理对冬小麦生物量及磷素吸收的影响

由表 1 可见，施磷能显著增加小麦地上部生物量，其中 SSP、MAP、DAP、CMP 和 APP 处理分别较不施磷处理地上部生物量显著增加 70.66%、48.46%、45.53%、40.61% 和 35.76%。不同肥料处

理中 SSP 处理地上部生物量分别显著高于 MAP、DAP、CMP 和 APP 处 理 14.96%、17.27%、21.37% 和 25.71%。而 MAP、DAP、CMP 和 APP 之间没有显著性差异。不同处理间小麦根系生物量差异不显著。施用磷肥能显著降低小麦根冠比，其中 SSP、MAP、DAP、CMP 和 APP 处理较不施磷处理根冠比分别显著降低 47.6%、40.5%、38.0%、26.2% 和 35.2%。不同肥料处理中 SSP 和 MAP 处理根冠比分别显著低于 CMP 处理 29.0% 和 19.4%。SSP、MAP、DAP 和 APP 处理间没有显著差异，DAP、CMP 和 APP 处理间没有显著差异。

表 1 不同处理小麦生物量和根冠比

处理	地上部生物量 (mg · 盆 ⁻¹)	根系生物量 (mg · 盆 ⁻¹)	根冠比
CK	199.25 ± 4.23c	88.80 ± 5.63a	0.45 ± 0.02a
SSP	340.05 ± 11.93a	79.78 ± 11.62a	0.23 ± 0.03c
MAP	295.80 ± 8.27b	78.53 ± 6.72a	0.26 ± 0.02c
DAP	289.98 ± 7.34b	80.20 ± 10.23a	0.28 ± 0.03bc
CMP	280.18 ± 9.03b	91.08 ± 8.75a	0.33 ± 0.04b
APP	270.50 ± 11.28b	78.50 ± 14.31a	0.29 ± 0.05bc

注：不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。下同。

施磷能显著增加小麦地上部磷含量 (表 2)，小麦地上部磷含量随着土壤有效磷含量的增加而增加 (图 2)。其中 SSP、MAP、DAP、CMP 和 APP 处理分别较不施磷处理地上部磷含量显著增加 2.12、2.07、1.25、1.15 和 2.51 倍。不同磷肥处理间表现为 APP 处理地上部磷含量最高，达到 6.63 g · kg⁻¹，分别显著高于 DAP 和 CMP 处理 55.76% 和 62.88%；虽然较 SSP 和 DAP 处理高，但差异不显著。施肥处理中 CMP 处理地上部磷含量最低，为 4.07 g · kg⁻¹。

施磷同样显著增加了小麦根系磷含量，其中 SSP、MAP、DAP、CMP 和 APP 处理分别较不施磷处理根系磷含量显著增加了 97.8%、75.9%、69.0%、61.8% 和 110.5%。不同肥料处理中，APP 处理根系磷含量最高，达到 2.13 g · kg⁻¹，分别显著高于 MAP、DAP 和 CMP 处理 19.7%、24.6% 和 30.1%，MAP、DAP 和 CMP 处理间差异不显著。SSP 处理显著高于 CMP 处理 22.2%，而与 MAP、DAP、APP 之间差异不显著。

表 2 不同处理小麦地上部和根系磷含量、磷吸收量及磷素利用率

处理	地上部磷含量 (g · kg ⁻¹)	根系磷含量 (g · kg ⁻¹)	磷吸收量 (mg · 盆 ⁻¹)	磷肥表观利用率 (%)
CK	1.89 ± 0.31c	1.01 ± 0.07d	0.47 ± 0.07d	—
SSP	5.90 ± 0.74ab	2.00 ± 0.13ab	2.17 ± 0.24a	1.70 ± 0.27a
MAP	5.80 ± 0.68ab	1.78 ± 0.09bc	1.87 ± 0.24ab	1.40 ± 0.28ab
DAP	4.25 ± 0.21b	1.71 ± 0.05bc	1.37 ± 0.10bc	0.90 ± 0.12bc
CMP	4.07 ± 0.69b	1.64 ± 0.18c	1.30 ± 0.22c	0.83 ± 0.29c
APP	6.63 ± 1.45a	2.13 ± 0.14a	1.91 ± 0.33ab	1.44 ± 0.37ab

施磷显著增加了小麦地上部磷吸收量，SSP、MAP、DAP、CMP 和 APP 处理分别较不施磷处理显著提高 4.28、3.55、2.26、2.03 和 3.60 倍。施磷处理间 SSP 处理小麦地上部磷吸收量最高，为 2.00 mg · 盆⁻¹，分别显著高于 DAP 和 CMP 处理 62.13%

和 74.26%。CMP 处理地上部磷吸收量最小，为 1.15 mg · 盆⁻¹，分别显著低于 SSP、MAP 和 APP 处理 42.62%、33.43% 和 34.06%。施磷显著增加了小麦根系磷吸收量，SSP、MAP、DAP、CMP 和 APP 处理分别较不施磷处理显著增加 78.5%、55.6%、

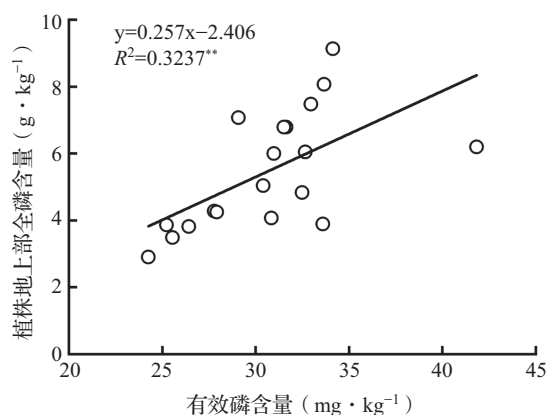


图2 小麦地上部全磷含量与土壤有效磷含量的关系

注: **表示 0.01 水平相关性极显著。下同。

52.0%、66.7% 和 80.9%，但各施磷处理间差异不显著。从整株小麦磷吸收量来看，SSP、MAP、DAP、CMP 和 APP 处理分别较不施磷处理显著增加 3.61、2.97、1.92、1.77 和 3.06 倍。不同施磷处理中 SSP 处理每盆小麦吸磷量为 2.17 mg，显著高于 DAP 和 CMP 处理 57.6% 和 66.4%，而与 MAP 和 APP 处理间差异不显著。MAP 和 APP 处理分别显著高于 CMP 处理 43.6% 和 46.6%。DAP 与 CMP 处理间差异不显著。

不同磷肥处理磷肥表观利用率表现为 SSP>APP>MAP>DAP>CMP。SSP、APP 和 MAP 磷肥表观利用率均较高，且处理间差异不显著。SSP 处理最高，达到 1.70%，分别显著高于 DAP 和 CMP 处理 87.6% 和 95.3%。

2.3 不同磷肥处理对冬小麦地上部磷组分的影响

由图 3 可见，5 种磷肥处理小麦植株中无机磷含量没有显著差异，均高于不施磷处理。其中 SSP、DAP、CMP 和 APP 处理植株无机磷含量显著高于不施磷处理 84.8%、91.6%、78.6% 和 66.7%，虽然 MAP 处理较不施磷处理增加 59.1%，但差异不显著。施用不同磷肥小麦植株中磷酸糖含量表现为 MAP>SSP>DAP>APP>CMP>CK。5 个施磷处理较不施磷处理植株磷酸糖含量均提高了 1.5 倍以上，其中磷酸糖含量最高的 MAP 处理较不施磷处理提高了 3.2 倍。经方差分析，除了 CMP 处理与不施磷处理差异不显著外，其余 4 个处理均显著高于不施磷处理。在 5 个施磷处理中，MAP 处理显著高于 APP 和 CMP 处理，与 SSP 和 DAP 处理间差异不显著。施用不同品种磷肥小麦植株核酸磷含量也有不同程度的提高。其中 SSP、MAP、APP 和 CMP 4 个

处理植株核酸磷含量分别显著高于不施磷处理 4.0、4.0、3.9 和 2.2 倍。虽然 DAP 处理较不施磷处理提高了 1.7 倍，但差异不显著。较不施磷处理，APP 处理能显著增加小麦植株不溶性磷复合物的含量。施用其余 4 种磷肥，虽然不溶性磷复合物有所增加，但差异不显著。从小麦植株中不同形态磷所占全磷的比例（图 4）来看，不施磷肥处理无机磷所占比例高于 5 个施磷肥处理，而核酸磷所占比例较少。在 5 个施磷处理中，SSP、MAP 和 APP 处理各形态磷所占比例较为接近，无机磷和磷酸糖之和约为 50% 左右，核酸磷约为 33%。DAP 和 CMP 处理较为接近，无机磷和磷酸糖之和均超过了 60%。

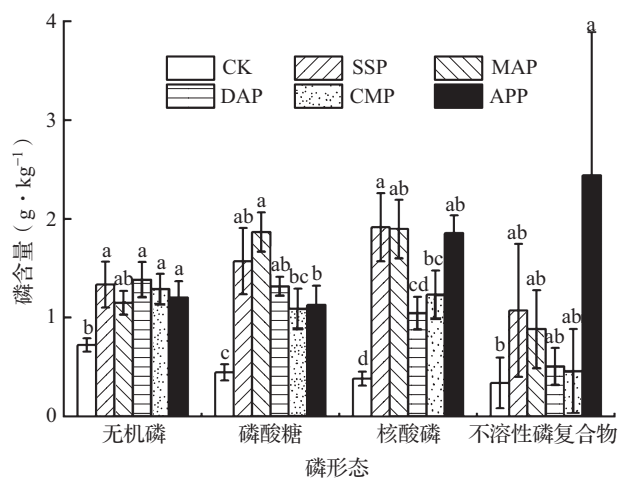


图3 不同处理小麦植株地上部不同形态磷的差异

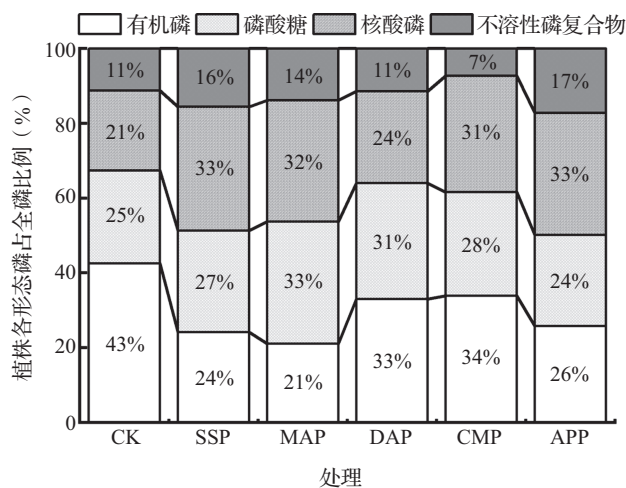
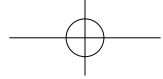


图4 不同处理下小麦植株中不同形态磷占全磷的比例

从小麦植株地上部不同磷组分与全磷的关系（图 5）来看，小麦植株地上部无机磷含量与全磷之间没有显著的相关关系。磷酸糖和核酸磷含量均先随着全磷含量增加而增加，当全磷含量增加



到一定量时,磷酸糖和核酸磷含量不再增加,其转折点时的全磷含量分别为 5.19 和 $6.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不溶性磷复合物的含量起初不随着全磷含量的增加而

发生变化,当全磷含量超过 $5.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后,不溶性磷复合物含量随着全磷含量的增加呈线性增加的趋势。

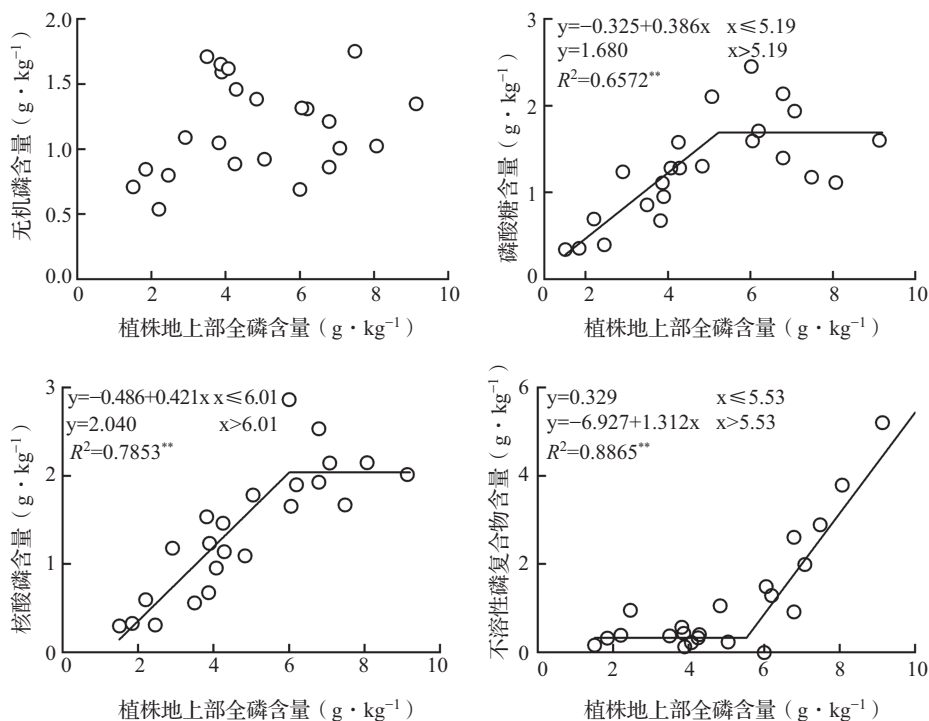


图5 小麦地上部各形态磷组分与植株全磷的关系

3 讨论

在低磷土壤上施用磷肥能显著增加小麦苗期地上部生物量、磷含量和磷素累积量^[21-22]。施用不同品种磷肥对小麦地上部生物量的影响不同。一般认为,在石灰性土壤上,水溶性磷肥 SSP、DAP 和 MAP 肥效相当,大于钙镁磷肥的肥效^[9, 12, 23]。本试验结果与之类似,SSP 处理小麦地上部生物量不仅显著高于 CMP 处理,还显著高于 MAP 和 DAP 处理。SSP、DAP 和 MAP 处理小麦生物量存在差异可能与不同肥料性质有关,这 3 种肥料虽然都是水溶性磷肥,但 SSP 水溶液为酸性,MAP 为微酸性,DAP 为碱性,施入石灰性土壤后,土壤有效磷含量也表现为 SSP>MAP>DAP。另外,不同氮素供应形态也可能是引起小麦生物量不同的原因之一,研究表明,在相同施氮量下,铵态氮肥处理的小麦各生育期生物量均小于硝态氮肥和酰胺态氮肥处理^[24]。SSP 处理的氮肥形态为酰胺态氮肥,而 MAP 和 DAP 中均含有铵态氮肥,不足的氮肥用酰胺态氮肥补充,因此,不同的氮肥形态也可能导

致小麦生物量出现差异。有研究表明,APP 在钙质土壤上肥效显著高于磷铵类肥料^[25-26],本研究结果与之不同,与磷铵类肥料相比,APP 处理小麦地上部生物量差异不显著。其原因可能是,APP 是缓效性磷肥,聚磷酸盐需要水解为正磷酸盐才能被植物吸收利用^[27],聚磷酸的水解需要一定时间,而小麦苗期由于根系相对较小,对磷的吸收利用能力相对较弱,同时聚磷酸铵中的氮肥供应也有部分铵态氮肥,因此,聚磷酸铵并不能在小麦苗期表现出更高的优势。但是,由于聚磷酸相对于正磷酸盐来说,不容易被土壤固定,能在相对较长的时间内稳定供磷^[7, 13, 28-29],因此,在整个生育期较磷铵类的正磷酸盐有较高的肥效^[30]。总之,从生物量、磷素吸收及磷肥表观利用率的角度来看,小麦苗期较为适宜施用水溶性磷肥和聚磷酸铵。

叶片磷含量及磷组分能反映植物磷营养状况。叶片磷可以分为 5 部分,无机磷、磷脂、代谢磷、核酸磷和残余态磷^[31]。在磷供应不足的条件下,有些植物可以用非磷酸化的半乳糖脂替代



磷脂从而释放出无机磷^[32]。在本试验中不施磷处理无机磷所占比例显著高于施磷处理,可能就是 这个原因。随着供磷量的增加,植物叶片总磷含量增加。其中无机磷部分增加最多,当植物产生磷素奢侈吸收后,磷素会以无机磷的形态储存于液泡中,导致无机磷随着叶片总磷含量的增加而增加,而核酸磷等结构磷含量增加到一定程度不再增加^[18]。本试验有类似的结果,小麦植株全磷含量随着土壤有效磷含量的增加而增加(图3)。但小麦植株地上部无机磷含量虽然有随着植株全磷含量增加而增高的趋势,但两者之间没有显著的相关关系。小麦苗期地上部适宜的磷含量约为 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16]。由植株地上部全磷与土壤有效磷的关系(图2)可以推断出,此时土壤有效磷含量约为 $33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

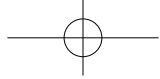
本试验中不同磷肥品种施磷量相同,由于磷肥性质不同引起了土壤有效磷含量发生了变化。其中,SSP处理土壤有效磷含量最高,达到 $38.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其次是APP处理,再次是MAP和CMP处理,DAP处理土壤有效磷含量最低,为 $27.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图1)。由此可见,在本试验中,所有施肥处理土壤有效磷含量均在 $33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,为小麦苗期适宜土壤供磷量。不同施肥处理小麦植株地上部全磷含量虽有所差别(分布在 $4.07 \sim 6.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),但均没有显著高于小麦苗期地上部适宜的磷含量,因此,没有出现无机磷随着植株全磷的增加而产生显著的线性累积的现象。有研究表明,低磷胁迫会通过影响细胞内多倍性进程而影响核酸含量^[33],相对于不施磷处理,常规施磷小麦旗叶中的核酸含量显著提高^[34]。本试验中,小麦植株地上部有机磷中的磷酸糖和核酸磷随着全磷含量的增加先呈增加趋势,当到达一定含量后不再增加,其拐点对应的全磷含量分别为 5.19 和 $6.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图5)。这说明,在一定程度上随着小麦植株全磷量的增加,核酸含量增加,核酸磷含量随之增加。随着全磷含量的增加不溶性磷复合物起初不随植株全磷的变化而变化,一直稳定在较低的水平,约为 $0.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当植株全磷含量超过 $5.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后,不溶性磷复合物随着植株全磷含量的增加呈线性增加的趋势(图5)。这说明,小麦吸收磷后首先同化为核酸磷和磷酸糖,之后进一步形成不溶性磷复合物,最后才会以无机磷形态富集。

4 结论

在本试验盆栽条件下,施磷能显著增加冬小麦地上部生物量,减小小麦根冠比,其中SSP处理冬小麦地上部生物量显著高于其他处理。施磷能提高冬小麦地上部磷素的吸收,其中,SSP、APP和MAP处理冬小麦磷素吸收量及磷肥表观利用率高于DAP和CMP处理。不同磷肥处理冬小麦地上部磷形态不同,SSP、APP和MAP处理小麦地上部核酸磷及不溶性磷复合物所占比例高于CMP和DAP处理。由此可见,SSP、APP和MAP是冬小麦苗期较为适宜的磷肥品种。小麦地上部各形态磷随着小麦地上部全磷含量的增加而变化,其中磷酸糖和核酸磷呈线性增加,当全磷含量达到 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右磷酸糖和核酸磷逐渐稳定,不溶性磷复合物开始随着全磷含量的增加而呈线性增加。

参考文献:

- [1] Yang Z, Zhou W, Sun B, et al. Combined application of calcium-magnesium phosphate fertilizer with soluble phosphorus improves maize growth in a calcareous soil [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23 (1): 778-789.
- [2] Zou T, Zhang X, Davidson E A. Global trends of cropland phosphorus use and sustainability challenges [J]. *Nature*, 2022, 611 (7934): 81-87.
- [3] Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review [J]. *Plant and Soil*, 2011, 349: 157-167.
- [4] 王庆仁,李继云,李振生. 不同磷肥对石灰性土壤磷效率小麦基因型生长发育的影响 [J]. *土壤通报*, 2000, 31 (2): 127-129.
- [5] 邱慧珍,张福锁. 活化钙镁磷肥对不同磷效率基因型冬小麦生长及磷效率的影响 [J]. *土壤通报*, 2002, 33 (4): 295-299.
- [6] 周文利. 不同品种磷肥对土壤有效磷及玉米苗期生长的影响 [J]. *磷肥与复肥*, 2022, 37 (11): 45-48.
- [7] 周文利,宋盼盼,吴军. 不同品种磷肥对土壤无机磷组分及磷有效性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2023, 51 (17): 197-203.
- [8] 周伟金,刘光崧. 钙镁磷肥在淮北石灰性土壤上的肥效 [J]. *土壤学报*, 1965, 13 (1): 89-91.
- [9] 吉冰洁,李文海,徐梦洋,等. 不同磷肥品种在石灰性土壤中的磷形态差异 [J]. *中国农业科学*, 2021, 54 (12): 2581-2594.
- [10] 王少仁,夏培楨. 石灰性土壤上三种磷肥不同用量的磷肥利用率及其缓效率 [J]. *土壤通报*, 2008, 30 (6): 1363-1368.

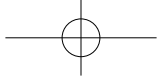


- [11] Zhao Y, Li R, Huang Y, et al. Effects of various phosphorus fertilizers on maize yield and phosphorus uptake in soils with different pH values [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022, 68 (12): 1746–1754.
- [12] 熊子怡, 邱焯, 郭琳钰, 等. 聚磷酸铵在土壤中有效性的变化及其影响因素 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (8): 1473–1480.
- [13] 王小华, 闫宁, 张营, 等. 聚磷酸铵对石灰性土壤有效磷含量和无机磷形态分布的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (10): 1–9.
- [14] Cynthia G, Shabtai B, Marcia M, et al. Effects on plant P supply and mycorrhizal development [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2005, 85 (1): 3–14.
- [15] 张国平. 小麦磷素营养和磷素的营养诊断 [J]. 作物杂志, 1987, 3 (4): 17–18.
- [16] Yan L, Zhang X, Han Z, et al. Responses of foliar phosphorus fractions to soil age are diverse along a 2 Myr dune chronosequence [J]. New Phytologist, 2019, 223 (3): 1621–1633.
- [17] Suriyagoda L D B, Ryan M H, Gille C E, et al. Phosphorus fractions in leaves [J]. New Phytologist, 2022, 237 (4): 1122–1135.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] Close D C, Beadle C L. Total, and chemical fractions, of nitrogen and phosphorus in Eucalyptus seedling leaves: Effects of species, nursery fertiliser management and transplanting [J]. Plant and Soil, 2004, 259: 85–95.
- [20] Epie K E, Maral E. Shoot and root biomass, phosphorus and nitrogen uptake of spring wheat grown in low phosphorus and moisture content conditions in a pot experiment [J]. Journal of Plant Nutrition, 2018, 41 (17): 2273–2280.
- [21] 蒲子天, 张弛, 张佳崎, 等. 供磷水平对苗期小麦地上和地下部性状关联性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28 (9): 1594–1602.
- [22] 刘世亮, 介晓磊, 李有田, 等. 不同磷源在石灰性土壤中的供磷能力及形态转化 [J]. 河南农业大学学报, 2002, 36 (4): 370–373.
- [23] 代新俊, 杨珍平, 陆梅, 等. 不同形态氮肥及其用量对强筋小麦氮素转运、产量和品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (5): 710–720.
- [24] Venugopalan M V, Prasad R. Relative efficiency of ammonium polyphosphate and orthophosphates for wheat and their residual effects on succeeding cowpea fodder [J]. Fertilizer Research, 1989, 20 (2): 109–114.
- [25] Holloway R E, Bertrand I, Frischke A J, et al. Improving fertiliser efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn [J]. Plant and Soil, 2001, 236 (2): 209–219.
- [26] 杨旭, 张承林, 胡义熬, 等. 农用聚磷酸铵在土壤中的有效性研究进展及在农业上的应用 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (3): 1–6.
- [27] 高艳菊, 亢龙飞, 褚贵新. 不同聚合度和聚合率的聚磷酸磷肥对石灰性土壤磷与微量元素有效性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (5): 1294–1302.
- [28] 王雪薇, 王冲, 褚贵新. 短链聚磷酸磷肥对土壤无机磷转化及铁锰锌有效性的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29 (9): 2970–2978.
- [29] 郭大勇, 袁玉玉, 曾祥, 等. 石灰性土壤施用不同磷肥对玉米苗期生长和土壤无机磷组分的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35 (1): 243–249.
- [30] Hayes P E, Adem G D, Pariasca-Tanaka J, et al. Leaf phosphorus fractionation in rice to understand internal phosphorus-use efficiency [J]. Annals of Botany, 2022, 129 (3): 287–302.
- [31] Poirier Y, Jaskolowski A, Clúa J. Phosphate acquisition and metabolism in plants [J]. Current Biology, 2022, 32 (12): R623–R629.
- [32] Zeng Z, Huang H, Han N, et al. Endopolyploidy levels in barley vary in different root types and significantly decrease under phosphorus deficiency [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 118: 11–21.
- [33] 邱悦, 徐婷, 魏波, 等. 不同磷素水平对小麦旗叶和穗部叶绿素及核酸含量的影响 [J]. 石河子大学学报 (自然科学版), 2022, 40 (1): 27–33.

Effects of different varieties of phosphorus fertilizer on phosphorus uptake and above-ground phosphorus form of winter wheat at seedling stage

ZHOU Wen-li*, HE Yi-long, XU Xiao-feng, LI Ya-juan (College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471023)

Abstract: In order to further understand the effects of different varieties of phosphorus fertilizer on phosphorus absorption of winter wheat at seedling stage, and to provide the basis for optimal fertilization, the effects of application of superphosphate (SSP), monoammonium phosphate (MAP), diammonium phosphate (DAP), calcium magnesium phosphate (CMP) and ammonium polyphosphate (APP) on phosphorus uptake and above-ground phosphorus composition in winter wheat seedlings were studied by soil culture. The results showed that no matter which type of phosphorus fertilizer was applied, it could significantly increase the aboveground biomass of winter wheat. Among them, SSP treatment had the highest aboveground biomass of winter wheat, which increased by 70.66%, compared to non-phosphorus treatment.



Applying phosphorus fertilizer increased the phosphorus concentration in the shoot and root of winter wheat, and the phosphorus concentration in the shoot and root of winter wheat under different phosphorus fertilizer treatments showed as APP>SSP>MAP>DAP>CMP. Among them, APP treatment had the highest phosphorus concentration in the shoot and root of winter wheat, which was significantly higher than DAP treatment and CMP treatment. Applying phosphorus could increase the absorption of phosphorus by winter wheat. The absorption of phosphorus by winter wheat under different phosphorus fertilizer treatments was ranked as SSP>APP>MAP>DAP>CMP. Among them, the absorption of phosphorus by winter wheat under SSP, APP and MAP treatments was significantly higher than that under DAP and CMP treatments. The apparent utilization efficiency of phosphorus fertilizer in wheat under five fertilization treatments was shown as SSP>APP>MAP>DAP>CMP. As the total phosphorus content in the aboveground part of wheat increased, the phosphate sugar and nucleic acid phosphorus increased linearly. After the total phosphorus content reached about $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, phosphate sugar and nucleic acid phosphorus gradually stabilized, and insoluble phosphorus complexes began to increase linearly with the increase of total phosphorus content. To sum up, applying phosphorus fertilizer could increase phosphorus uptake by winter wheat seedlings. Winter wheat applied with superphosphate, monoammonium phosphate, and ammonium polyphosphate had higher biomass and phosphorus fertilizer utilization efficiency, and these three phosphorus fertilizers were suitable for winter wheat at seedling stage.

Key words: wheat; phosphorus fertilizer; phosphorus fertilizer utilization efficiency; phosphorus fraction