

肥料 – 土壤 – 作物系统镁 – 磷营养互作研究进展

朱希茹, 姜 润, 连祎雯, 黄成东*

(中国农业大学资源与环境学院, 国家农业绿色发展研究院, 植物 – 土壤相互作用教育部重点实验室, 北京 100193)

摘 要: 镁和磷是植物生长所必需的营养元素, 当前镁营养缺乏和磷利用效率低已成为限制我国种植业绿色发展的关键养分管理问题。镁、磷养分供应不能满足作物生育期的养分需求, 导致作物产量下降和品质降低, 在南方酸性土壤中表现尤为明显。镁 – 磷营养间存在着复杂的交互作用, 在肥料中, 镁 – 磷互作影响镁、磷养分在肥料中的生物有效性; 在土壤中, 镁 – 磷互作影响镁、磷养分的固定与释放; 在作物生长过程中, 镁 – 磷互作促进了作物对镁、磷养分高效吸收和利用, 提高作物产量并改善作物品质。综上所述, 镁和磷在肥料 – 土壤 – 作物系统中存在着不同类型的交互作用, 需要系统地认知和理解二者在肥料、土壤和作物中的交互过程及作用机制, 为绿色高效肥料产品创新设计和农田养分高效管理与利用提供科学依据。

关键词: 镁 – 磷互作; 养分有效性; 养分固定与释放; 养分高效利用

镁和磷均是植物生长所必需的大量营养元素, 二者在叶绿素合成、光合磷酸化、光合产物分配等过程中具有不可替代的作用^[1-2]。在我国农业生产中, 镁营养缺乏问题近年来受到了很大的关注, 但生产中镁肥的施用很少, 且以硫酸镁为主, 在大水漫灌或高降雨量条件下易发生淋洗和径流损失^[3-5]; 而磷在土壤中易被固定, 加之我国农田磷肥投入过量, 三大粮食作物的磷肥当季利用率较低, 其中小麦的磷肥利用率仅为 19%^[6]; 尤其在南方酸性土壤中, 镁和磷的缺乏问题更加突出^[7-9], 严重制约了区域农业的绿色发展。

作物吸收利用镁和磷的养分形态分别为 Mg^{2+} 、 $H_2PO_4^-$ 和 HPO_4^{2-} , 二者分别属于阳离子和阴离子。从化学反应上来讲, 二者易发生反应, 形成弱酸溶性物质; 从作物吸收上来讲, 二者并不存在竞争吸收位点。随着镁养分在我国南方酸性土壤地区农业生产中的作用越来越重要, 需要深入理解镁与其他

营养元素的相互作用, 为解决区域作物养分管理关键问题提供思路。镁是容易被忽视的重要营养元素, 且与氮、钾、钙等其他营养元素之间存在着养分交互作用^[2, 10]。近年来, 已有研究表明镁和磷之间也存在相互作用, 主要集中在作物的养分吸收上^[11-16], 但尚欠缺对镁 – 磷在肥料、土壤和作物中相互作用的深入理解。本文从肥料 – 土壤 – 作物系统出发, 介绍镁 – 磷营养互作研究进展, 以期对镁 – 磷营养在作物养分高效利用和肥料产品创新研究及生产应用方面提供参考。

1 肥料中的镁 – 磷交互作用

镁作为作物生长必需的营养元素之一, 生产中镁肥的应用受到越来越多的关注。根据土壤镁营养状况估算, 我国农田土壤每年需要补充 980 万 t 以上的 MgO ^[17]。而目前主要的镁肥产品是硫酸镁、硫酸钾镁等单质镁或钾镁肥料, 每年施用量约为 10 万 t MgO ^[18], 远远不能满足农业生产的真正需求。由于单质镁肥施用量较少, 除水肥一体化外, 单独施用或与氮磷钾复合肥掺混施用易造成肥料在田间分布不均匀的问题, 而且增加了额外的劳动力。因此, 合成含镁复合肥能够有效解决上述问题, 实现养分在肥料内部的均匀分布, 同时做到田间高效便捷施用。

收稿日期: 2021-01-27; 录用日期: 2021-05-30

基金项目: 国家重点研发计划“作物专用高效复混肥料研制与产业化”(2016YFD0200401); 长江经济带磷资源高效利用创新平台开放课题“磷酸二铵肥料评价体系建设”(201905510310517)。

作者简介: 朱希茹(1999-), 硕士研究生, 研究方向为镁 – 磷互作的高效肥料设计与验证, E-mail: xiruzhu99@163.com。

通讯作者: 黄成东, E-mail: chengdonghuang@cau.edu.cn。

在欧美等国家和地区,氮磷钾大量元素肥料产品中添加镁肥成为了常态,初步估算有一半以上的产品添加镁肥,平均添加养分含量达到了2.4% MgO,且以水溶性硫酸镁的添加为主^[19],能够满足大部分作物生长对镁的需求,也充分说明了镁在肥料产品升级中的重要性。相比较而言,我国目前集中在水溶肥产品研发方面,含镁大量元素肥料产品较少,这可能与产品定位差异化、销售价格高、对镁营养认识不足等因素有关。

在我国肥料产品发展过程中,含有镁、磷养分的肥料产品主要有磷矿粉、鸟粪石(磷酸铵镁)和钙镁磷肥等低浓度磷肥,其中的镁养分含量差异较大(表1)。磷矿粉主要含有磷和钙,镁(MgO)含量一般不超过10%,且不同矿区生产的磷矿粉中镁含量差异较大^[20-21]。我国曾经在20世纪70~80年代使用过磷矿粉,每年平均施用量为26万t P₂O₅^[22]。磷矿粉具有不溶于水、难溶于弱酸的特点,其中的镁主要以CaCO₃·MgCO₃(白云石)形式存在,属于难溶性的养分;磷矿粉中的镁和磷养分均属于缓慢释放型,不能够瞬时大量供应给作物,目前只在局部地区少量使用^[23-24],其一般适用于强酸性土壤兼根系分泌酸性强或吸磷能力强的作物,如澳洲坚果、油菜、萝卜、豆科作物等^[25],且一般在高降雨量和气温较低的气候条件下效果较好^[26]。相较于磷矿粉,鸟粪石属于弱酸溶性磷

肥,含镁量较高,可达8% MgO以上。其中最为著名的是秘鲁鸟粪石,目前天然合成的鸟粪石储量少,以利用镁盐[MgCl₂、Mg(OH)₂、MgSO₄等]回收废水中的氮和磷产生的鸟粪石为主,属于废水环保处理的副产品,但存在工业生产成本较高的问题^[27-30],在一些发达国家得到了很好的应用,我国也有一些企业从废水中回收。钙镁磷肥也具有弱酸溶性的特点,产品呈碱性,镁和磷养分分别以硅酸镁和磷酸钙的形式存在,其镁含量较前两者要高一些,兼有钙养分,可起到为作物提供镁、磷、钙、硅等多种养分和改良酸化土壤的作用^[31]。钙镁磷肥在我国应用较多,主要分布在磷矿产区,如云南、湖北、四川等地,由于其具有呈粉末状、磷养分含量低、工业生产效益低等特点,其产量呈下降趋势,从2010到2018年全国钙镁磷肥生产企业数量约降低了一半,年产量从151万减至106万t,目前年产量基本维持在90万~100万t水平^[32]。总体来说,3种含有镁、磷的肥料产品均呈碱性,适用于南方酸性土壤,近年来的许多研究也证实其在农田中施用具有很好的应用效果^[33-38],而且能够在一定程度上改良酸化土壤,充分证明了其在我国农业生产中的应用价值,但受限于价格、产品特性、施用技术等多方面因素的影响,3种含镁、磷的肥料产品在农业生产中应用较少。

表1 3种低浓度含镁、磷肥产品的基本特性

名称	主要成分	MgO 含量 (%)	P ₂ O ₅ 含量 (%)	酸碱性	溶解性
磷矿粉	氟 / 羟基 / 高磷石灰石	0.2 ~ 10	10 ~ 38	碱性	难溶
鸟粪石	MgNH ₄ PO ₄ · 6H ₂ O	8 ~ 11	15 ~ 19	碱性	弱酸溶
钙镁磷肥	Ca ₃ (PO ₄) ₂ 、CaSiO ₃ 、MgSiO ₃	8 ~ 18	12 ~ 25	碱性	弱酸溶

目前我国复合肥施用量占到了化肥施用量的40%以上^[39],借鉴国外含镁复合肥发展的经验,可将单质镁肥与复合肥混合造粒,在一定程度上能够有效地解决单质镁肥在田间施用不方便以及养分分布均匀性差的问题。在镁肥与复合肥料合成过程中,需要解决两个问题:一是镁盐与磷酸盐共存的问题,二者在肥料合成过程中可能会发生化学反应,形成了微溶于水的磷酸镁盐,如MgHPO₄、MgNH₄PO₄等,其存在可能会降低磷养分的有效性,也可能导致加入的镁养分退化失效;已有的研究表明,在磷酸一铵中添加硫酸镁不会影响磷养分的有效性,而在

磷酸二铵中添加硫酸镁则会发生化学反应,生成弱酸溶性或难溶性磷酸盐,降低了磷在水中的溶解性^[40]。二是速效镁与缓效镁养分结合的问题,镁在酸性土壤兼高降雨量地区,容易发生淋洗或径流损失^[41-43];在室内的模拟研究结果表明,即便只有30 mm的降雨量,也会造成硫酸镁有25%以上的淋洗损失,而难溶性白云石粉(碳酸钙镁)几乎没有淋洗损失^[44];在1000 mm降雨量的黄壤上,易溶性硫酸钾镁和硫酸镁淋失率可达40%~60%,而难溶性氧化镁肥料在35%左右^[45]。由此可见,在南方酸性土壤高降雨量地区(常年降雨量在1000 mm

以上),施用水溶性含镁复合肥会造成大量的镁淋洗或径流损失,降低了镁肥肥效,尤其是在砂质土壤条件下;而施用难溶性镁肥,如氧化镁、白云石粉等,虽然能够有效降低镁淋洗损失^[46],但其养分供应缓慢,并不能有效满足作物生育期内镁营养的需求。因此,必须从长远角度来考虑,设计出兼具速效与缓效释放镁养分效果和低生产成本的复合肥产品,既能保证作物生育期镁营养需求,又能有效减少高降雨量地区农田镁养分损失,最终实现镁肥资源的高效利用,助推农业种植业绿色生产。

2 土壤中的镁-磷交互作用

镁是农田生态系统生产力的主要限制养分之一,我国农田缺镁面积较大,导致作物产量损失较大,一般能够造成8%左右的减产^[17, 47-48],由此可见,镁营养在我国农业绿色发展中的重要作用。施磷虽然能够改善作物的镁营养状况^[12-14],但是施磷并不能解决土壤镁养分不足造成的作物镁营养缺乏问题,仍然需要投入镁肥来实现营养缺乏矫正^[47]。因此,有必要深入理解镁-磷在土壤中的互作过程,为含有镁、磷养分的肥料科学施用提供参考。

以往的研究更多关注了酸性土壤铁、铝和碱性土壤钙等与磷的互作,而镁与磷在土壤中的互作也是不应忽视的^[49-50]。在元素周期表中,镁与钙属同族元素,因此镁与磷酸盐的反应可参考钙与磷酸盐的反应。借鉴钙与磷的交互作用,在土壤中,钙离子(Ca^{2+})易与磷酸盐发生反应形成Ca-P沉淀,显著降低了磷养分的有效性,在 $\text{pH}>6$ 开始生成沉淀, pH 为8时生成大量沉淀^[49, 51],可见,Ca-P沉淀与 pH 有着很大的关系^[52]。受限于镁与钙在元素周期表中的位置,质子数不同决定了镁元素生成物更活泼,同等条件下镁与磷生成物的溶解度应该会较高一些^[52]。

已有的研究表明,镁与磷在土壤的互作过程与磷肥种类、磷肥用量、镁肥用量、水溶性钙/镁等因素密切相关,其关键原因可能是受到 pH 变化的驱动^[50, 53-56]。从磷肥种类上来说,在土壤培养条件下,添加一定量不同酸碱性的磷肥(酸性:磷酸二氢钾和磷酸一铵;碱性:磷酸氢二钾和磷酸二铵),形成的镁-磷物质具有不同的溶解性,在酸性磷肥作用下,易于形成相对溶解性较高的三水磷酸氢镁,而在碱性磷肥作用下,趋向于形成较难溶

的四水磷酸镁^[50];从磷肥用量上来说,随着供磷水平的增加,种植小麦的红壤中镁浓度呈现逐渐降低的趋势,这种作用可能是由于磷离子在土壤溶液中的无机配体和土壤中的镁离子形成络合物,导致镁在土壤中的有效性降低^[56]。从镁肥用量上来讲,以氧化镁为例,在土壤溶液培养条件下,探究氧化镁添加量对磷酸盐有效性的影响,总体结果表明,氧化镁用量越大,作用时间越长,越易生成较难溶性含镁磷酸盐,这可能与氧化镁呈碱性,增加了土壤 pH 有关^[53];从钙/镁上来讲,目前报道的结果表明,影响钙/镁与磷酸根发生反应的因素主要是水溶性钙/镁,当土壤溶液中水溶性钙/镁 ≥ 1.5 时,向土壤中添加正磷酸盐,由于水溶性钙含量较高,磷酸盐会优先与钙离子发生反应生成二水磷酸氢钙,而当其比值小于1.5时,则会生成含二水磷酸氢钙和三水磷酸氢镁中的1种或2种磷酸盐,当镁含量丰富时,会生成磷酸镁盐^[50],类似的结果在白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 与磷酸盐研究中也得到了证实^[53]。以上研究结果说明,在土壤中,磷酸根会优先与土壤溶液中的钙离子发生反应,但需要注意,当水溶性镁含量较高时,磷酸根也可能与镁离子发生反应,形成弱酸溶或难溶性磷酸镁盐,在一定条件下,这些含镁磷酸盐可以缓慢分解释放出其中的镁和磷养分,供植物吸收利用。

目前关于镁-磷在土壤中的互作研究较少,这可能与反应强度较低有关,并不像钙、铁、铝等可以与磷酸盐发生快速固定,今后需要从土壤 pH 、镁-磷肥种类等多个方面厘清镁、磷在土壤中存在的形态和转化中的互作过程及机制,为作物高效吸收利用养分提供基础。

3 作物生长过程中的镁-磷交互作用

作物从土壤中以 Mg^{2+} 和 PO_4^{3-} 的形式获取镁和磷养分,而 Mg^{2+} 和 H_2PO_4^- 或 HPO_4^{2-} 分别是阳离子和阴离子,在土壤-根系界面上的吸收不存在拮抗作用。 Mg^{2+} 以质流方式进入到根系内部,进而供作物吸收利用;而 H_2PO_4^- 或 HPO_4^{2-} 主要是通过扩散途径供作物吸收,菌根途径也大大增加了作物根系磷的供应^[57]。镁和磷在韧皮部的移动性较强,再利用程度高,易从老叶转移到生长的幼嫩组织中^[58]。

镁磷之间的协同作用表现在促进了作物对磷、

镁养分的吸收。在低磷和低 pH 的土壤条件下, 葡萄藤叶片同时表现出缺磷和缺镁的症状, 施用外源磷后能够刺激镁从根部向地上部的转运能力, 从而提高叶片中的镁含量^[59-60]。无论叶片处于缺镁还是正常的营养状态, 磷营养都会显著影响叶片镁含量, 随着供磷水平的增加, 叶片镁含量也随之增加^[61]。因此, 磷的供应能够在一定程度上缓解作物镁营养的缺乏, 施磷能够有效改善作物镁营养, 在水稻、小麦、玉米、南瓜、苜蓿等作物上均得到了证实^[12-16]。而随着施镁量的增加, 在甘蓝和马铃薯块茎中发现磷的吸收量也相应增加, 表明镁的施用也促进了作物对磷养分的吸收^[62-63]。

镁-磷的交互作用在促进养分吸收的同时, 有利于作物的生长, 进而提高了作物的产量。利用磷效率不同的 2 个大豆基因型探究其对磷-镁互作的响应中发现, 适当供磷可以缓解大豆缺镁的症状, 并且只有磷低效大豆品种的地上部镁含量与磷含量之间呈显著正相关关系, 而在磷高效大豆中没有显著相关关系, 说明镁-磷互作效应在大豆中主要体现在地上部, 且存在基因型依赖性^[64]。在磷-镁互作条件下探究对甘蔗生长效应的影响, 结果表明在一定供磷状态下, 增施镁肥能促进甘蔗生长和生物量的积累, 提高甘蔗的根冠比, 但施镁过量则会抑制根系的生长, 降低根冠比^[65]。在长期磷肥试验中发现, 施磷肥有利于增加作物体内矿物质元素含量, 改善作物生长, 促进根系对矿质养分的吸收, 其中增加土壤有效磷含量可在增加水稻生物量的同时增加其秸秆和籽粒中镁的含量^[66]。

镁-磷的交互作用对作物品质的影响主要体现在糖含量上。施磷过多时减少了多种作物的糖含量, 这可能与引起的作物养分吸收不平衡有关。其中, 增加磷供应量会降低菠萝叶片中的钾和镁含量^[67], 而缺钾和缺镁都不利于光合产物向贮藏器官的转运^[68], 从而减少了贮藏器官的糖和淀粉含量。在种植甘蔗的酸性硅质砂壤土上, 施用含有钾、镁、硫的肥料能提高蔗糖糖分含量, 一方面是由于镁促进了甘蔗植株对磷的吸收, 另一方面与镁有利于提高甘蔗叶绿素含量、增强与蔗糖合成和转运有关的酶活性、促进蔗糖合成和转运有关^[69]。

目前, 有一些报道从生理角度初步探究了镁-磷的互作效益, 对于互作的分子机理研究较少, 还需要进一步探究。在不同外源镁和磷养分供应条件

下发现, 拟南芥的根长随着磷水平的增加而增加, 但随着镁水平的增加而减少, 且低镁高磷导致初生根的生长偏离垂直方向, 深入研究表明, 镁-磷互作通过 *AUX1*、*PIN2*、*PIN3* 的信号途径影响根的生长和方向性, 通过生长素的再分配和累积, 加速了细胞延展和根偏向性, 进而调节主根的伸长和定向生长^[70]。

综上所述, 在作物体内, 镁-磷交互作用促进了作物对养分的高效吸收和利用, 但镁-磷在作物上的互作研究还需要对地上部运输的生理和分子机理进行深入的挖掘, 进而为作物养分管理和镁-磷肥料创新提供科学参考。

4 展望

镁、磷对作物生长、产量和品质形成有着重要的作用, 二者具有协同作用, 能够有效提升养分资源利用效率, 为农业绿色发展提供很好的肥料产品支持, 尤其是解决南方酸性土壤镁缺乏严重、磷利用效率低等关键生产问题。今后需要加强镁-磷营养互作研究, 在肥料中, 推进镁-磷肥料产品的创新研发设计, 解决养分可能存在退化的问题, 以及区域作物-土壤与镁-磷肥料匹配性问题; 在土壤中, 关注 pH 与其他因素结合对互作过程的影响, 为肥料在土壤中的释放与养分高效供应提供理论基础; 在作物中, 进一步揭示互作的生理机制和分子机制, 为作物养分管理提供科学依据; 在肥料-土壤-作物系统上, 目前缺乏相应的案例研究, 需要综合多学科交叉技术与方法的构建, 在系统层面上深入了解镁-磷互作过程与机制。

参考文献:

- [1] Taiz L, Zeiger E, Møller I M, et al. Fundamentals of plant physiology [M]. New York: Oxford University Press, 2018.
- [2] Cakmak I, Yazici A M. Magnesium: a forgotten element in crop production [J]. Better Crops with Plant Food, 2010, 94 (2): 23-25.
- [3] 陈星峰. 福建烟区土壤镁素营养与镁肥施用效应的研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2005.
- [4] Alt D, Ladebusch H, Melzer O. Long-term trial with increasing amounts of phosphorus, potassium and magnesium applied to vegetable crops [J]. Acta Horticulturae, 1999 (506): 29-36.
- [5] Ylä-ranta T, Uusi-kämpä J, Jaakkola A. Leaching of phosphorus, calcium, magnesium and potassium in barley, grass and fallow lysimeters [J]. Acta agriculturae Scandinavica

- Section B—Soil and Plant Science, 1996, 46 (1): 9–17.
- [6] 农业部. 中国三大粮食作物肥料利用率研究报告[R]. 北京, 2013.
- [7] 李伏生. 土壤镁素和镁肥施用的研究[J]. 土壤学进展, 1994, 22 (4): 18–25, 47.
- [8] Zheng S J. Crop production on acidic soils: overcoming aluminium toxicity and phosphorus deficiency [J]. *Annals of Botany*, 2010, 106 (1): 183–184.
- [9] Zhao X Q, Chen R F, Shen R F. Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils [J]. *Soil Science*, 2014, 179 (10–11): 503–513.
- [10] Guo W L, Nazim H, Liang Z S, et al. Magnesium deficiency in plants: an urgent problem [J]. *The Crop Journal*, 2016, 4 (2): 83–91.
- [11] Fageria V D. Nutrient interactions in crop plants [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24 (8): 1269–1290.
- [12] Fageria N K, Zimmermann F J P, Baligar V C. Lime and phosphorus interactions on growth and nutrient uptake by upland rice, wheat, common bean, and corn in an Oxisol [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 18 (11): 2519–2532.
- [13] Reinbott T M, Blevins D G. Phosphorus nutritional effects on root hydraulic conductance, xylem water flow and flux of magnesium and calcium in squash plants [J]. *Plant and Soil*, 1999, 209 (2): 263–273.
- [14] Rodríguez L H, Morales D A, Rodríguez E R, et al. Minerals and trace elements in a collection of wheat landraces from the Canary Islands [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24 (8): 1081–1090.
- [15] Oko A O, Ubi B E, Efiuse A A, et al. Comparative analysis of the chemical nutrient composition of selected local and newly introduced rice varieties grown in Ebonyi State of Nigeria [J]. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 2012, 2 (2): 16–23.
- [16] James D W, Hurst C J, Tindall T A. Alfalfa cultivar response to phosphorus and potassium deficiency: Elemental composition of the herbage [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 18 (11): 2447–2464.
- [17] 白由路, 金继运, 杨俐苹. 我国土壤有效镁含量及分布状况与含镁肥料的应用前景研究[J]. 土壤肥料, 2004 (2): 3–5.
- [18] 黄高强. 全国镁肥消费在农业生产中区域分布及市场前景[J]. 中国农资, 2018 (41): 12.
- [19] 鲁振亚, 籍婷婷, 王好斌, 等. 国外含镁大量元素肥料产品现状分析[J]. 现代化工, 2021, 41 (3): 1–5.
- [20] 杨翠红. 磷矿粉的品位与化学组分对活化效果的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007.
- [21] 奚振邦, 黄培钊, 段继贤. 现代化学肥料学(增订版)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013. 186–187.
- [22] IFADATA. Phosphate statistics of China [DB]. 2020–10–03, <http://ifadata.fertilizer.org/ucSearch.aspx>.
- [23] 胡红青, 李学垣, 刘景福, 等. 红壤上直接施用磷矿粉的增产效果和改土作用[J]. 热带亚热带土壤科学, 1994, 3 (4): 219–225.
- [24] 周杰, 郭海超, 罗雪华, 等. 磷矿粉在橡胶园不同母质砖红壤中溶解特性研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20 (9): 1119–1126.
- [25] 中国科学院土壤研究所磷矿粉工作组. 哪些土壤适宜施用磷矿粉[J]. 土壤学报, 1966, 14 (1): 85–87.
- [26] Hammond L L, Chien S H, Mkwunye A U. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics [J]. *Advances in Agronomy*, 1986, 40: 89–140.
- [27] 林明. 鸟粪石沉淀法去除和回收废水中氨氮和磷的实验研究[D]. 广州: 暨南大学, 2012.
- [28] 吴健, 平倩, 李咏梅. 鸟粪石结晶成粒技术回收污泥液中磷的中试研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37 (3): 941–947.
- [29] Latifian M, Holst O, Liu J. Nitrogen and phosphorus removal from urine by sequential struvite formation and recycling process [J]. *Clean-Soil Air Water*, 2014, 42 (8): 1157–1161.
- [30] Sena M, Hicks A. Life cycle assessment review of struvite precipitation in wastewater treatment [J]. *Resource Conservation and Recycling*, 2018, 139: 194–204.
- [31] 皇甫秋雁, 苗俊艳, 张宇, 等. 钙镁磷肥中主要营养元素的功能及其施用效果[J]. 河南化工, 2020, 37 (6): 1–3.
- [32] 侯翠红, 苗俊艳, 谷守玉, 等. 以钙镁磷肥产品创新促进产业发展[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (12): 2162–2169.
- [33] 余小兰, 杨福锁, 周丹, 等. 钙镁磷肥对水稻土和砖红壤土壤化学性状的动态影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34 (5): 1042–1047.
- [34] 凌秋平, 周文灵, 陈迪文, 等. 不同种类磷肥对甘蔗的有效性研究[J]. 热带作物学报, 2021, 42 (6): 1613–1618.
- [35] 王薇, 张晓松, 孟春玲, 等. 施用超微细磷矿粉对玉米生长发育及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2017 (6): 27–32.
- [36] 代明, 谭天水, 廖宗文. 活化磷肥在水稻上的肥效研究[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25 (5): 83–84.
- [37] 周龙, 吕玉, 普正仙, 等. 两种含磷复合肥配合不同添加剂对玉米产量及养分吸收的影响[J]. 贵州农业科学, 2016, 44 (12): 78–82.
- [38] 胡育化, 王仁宗, 詹水华, 等. 缓释微肥包裹复(混)合肥在水稻上的应用效果[J]. 磷肥与复肥, 2016, 31 (12): 47–49.
- [39] 国家统计局. 农用化肥使用量[DB]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>, 2021–04–11.
- [40] 章明洪, 商照聪, 房朋, 等. 硫酸镁对含磷肥料中水溶性磷含量影响的研究[J]. 化肥工业, 2019, 46 (5): 12–15, 45.
- [41] 王伯仁, 游有文, 高菊生, 等. 湘南几种土壤钾、镁形态淋失及施用效果研究[J]. 广西农业科学, 1999, (2): 68–71.
- [42] Maguire M E, Cowan J A. Magnesium chemistry and

- biochemistry [J]. *BioMetals*, 2002, 15 (3): 203–210.
- [43] Gransee A, Fuhrs H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions [J]. *Plant and Soil*, 2013, 368 (1–2): 5–21.
- [44] Senbayram M, Gransee A, Wahle V, et al. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant–soil continuum [J]. *Crop and Pasture Science*, 2015, 66 (12): 1219–1229.
- [45] 李丹萍, 刘敦一, 张白鸽, 等. 不同镁肥在中国南方三种缺镁土壤中的迁移和淋洗特征 [J]. *土壤学报*, 2018, 55 (6): 1513–1524.
- [46] Heming S D, Hollis J F. Magnesium availability from kieserite and calcined magnesite on five soils of different pH [J]. *Soil Use and Management*, 1995, 11 (3): 105–109.
- [47] 王正. 镁肥对我国经济作物提质增效的效果评价 [D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
- [48] Wang Z, Hassan M U, Nadeem F, et al. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 1727.
- [49] Weil R R, Brady N C. The nature and properties of soils 15th edition [M]. 15th ed. Harlow England: Pearson Education Limited, 2017.
- [50] Racz G J, Sope R J. Reaction products of orthophosphates in soils containing varying amounts of calcium and magnesium [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1967, 47 (3): 223–230.
- [51] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册: 无机卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [52] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review [J]. *Plant and Soil*, 2001, 237 (2): 173–195.
- [53] Lindsay W L, Frazier A W, Stephenson H F. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils [J]. *Soil Science of Society America Journal*, 1962, 26 (5): 446–452.
- [54] Taylor A W, Frazier A W, Gurney E L, et al. Solubility products of di- and trimagnesium phosphates and the dissociation of magnesium phosphate solutions [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1963, 59: 1585–1589.
- [55] Taylor A W, Gurney E L, Frazier A W. Solubility products of magnesium ammonium and magnesium potassium phosphates [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1963, 59: 1580–1584.
- [56] 邵继锋, 陈荣府, 董晓英, 等. 不同磷水平对红壤溶液中锰、铝、镁和钙浓度变化以及小麦生长的影响 [J]. *土壤*, 2016, 48 (1): 36–41.
- [57] Havlin J L, Tisdale S L, Nelson W L, et al. Soil fertility and fertilizers 8th edition [M]. Pearson Education, 2013.
- [58] 陆景陵. 植物营养学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003. 205–209.
- [59] Skinner P W, Cook J A, Matthews M A. Phosphorus requirements of winegrapes: vegetative and reproductive growth responses of Chenin blanc and Chardonnay cvs. to phosphorus fertilizer applications [J]. *Vitis*, 1988, 27: 95–101.
- [60] Skinner P W, Matthews M A. A novel interaction of magnesium translocation with the supply of phosphorus to roots of grapevine (*Vitis vinifera* L.) [J]. *Plant Cell and Environment*, 1990, 13 (8): 821–826.
- [61] Bould C, Parfitt R I. Leaf analysis as a guide to the nutrition of fruit crops. X. Magnesium and phosphorus sand culture experiments with apple [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1973, 24 (2): 175–185.
- [62] 丁玉川, 焦晓燕, 聂督, 等. 不同氮源与镁配施对甘蓝产量、品质和养分吸收的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20 (8): 996–1002.
- [63] 丁玉川, 焦晓燕, 聂督, 等. 不同氮源与镁配施对马铃薯产量、品质及养分吸收的影响 [J]. *农学学报*, 2012, 2 (6): 49–53.
- [64] 覃金转, 王秀荣. 不同基因型大豆磷镁养分互作效应初探 [J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41 (2): 217–225.
- [65] 郑超, 李奇伟, 黄振瑞, 等. 磷镁营养互作对甘蔗生长状况的影响 [J]. *甘蔗糖业*, 2011 (4): 11–17.
- [66] Saleque M A, Abedin M J, Ahmed Z U, et al. Influences of phosphorus deficiency on the uptake of nitrogen, potassium, calcium, magnesium, sulfur, and zinc in lowland rice varieties [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24 (10): 1621–1632.
- [67] Mustafa M M. Effect of phosphorus application on fruit yield, quality and leaf nutrient content of Kew pineapple [J]. *Fruits*, 1989, 44 (5): 253–257.
- [68] Fischer E S, Bussler W. Effects of magnesium deficiency on carbohydrates in *Phaseolus vulgaris* [J]. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1988, 151 (5): 295–298.
- [69] 孙秀廷, 曾璧容. 钾镁硫复肥生物学效应的研究 I. 钾镁硫复肥对甘蔗产量和品质的影响 [J]. *土壤*, 2001 (6): 312–315.
- [70] Niu Y F, Jin G L, Li X, et al. Phosphorus and magnesium interactively modulate the elongation and directional growth of primary roots in *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66 (13): 3841–3854.

[下转第 250 页]

Determination of Cr, Ni, Cu and Pb in soil samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry in the standard mode

JI Tian-wei¹, YU Dan-hong², ZHONG Hang¹, WANG Yu-lei¹, CHE Si-li¹ (1. General Station of Cultivated Land Quality and Fertilizer Management in Zhejiang Province, Hangzhou Zhejiang 310020; 2. Zhejiang Agricultural Products Quality Supervision and Testing Center, Hangzhou Zhejiang 310020)

Abstract: According to the standard HJ 832-2017, the contents of chromium (Cr), nickel (Ni), copper (Cu) and lead (Pb) in the solution was prepared and then determined by ICP-MS in the standard mode. The experiments were divided into three stages. The repeatability test of two soil reference materials were determined at the first stage from June to July in 2019. The accuracy and precision of the two soil reference materials were further verified and analyzed at the second stage from April to May in 2020. The performance of the instrument was adjusted, and the signal values of Mg, In and U were optimized to determine the content of Pb in soil at the third stage from July to August in 2020. The detection limit and recovery rate of ICP-MS (DRC- II) for Cr, Ni, Cu and Pb in soil were analyzed. The results showed that the accuracy and precision of ICP-MS (DRC- II) for determination of total contents of Ni, Cu, Cr and Pb in soil met the analytical requirements. The detection limits of Ni, Cu, Cr and Pb were 0.060, 0.010, 0.045 and 0.015 mg · kg⁻¹, respectively, with the recoveries from 89.6% to 112.3%.

Key words: soil; heavy metal; standard mode; inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS)

[上接第 216 页]

Review of the interactions between magnesium and phosphorus nutrients in Fertilizer-Soil-Crop System

ZHU Xi-ru, JIANG Run, LIAN Yi-wen, HUANG Cheng-dong* (College of Resources and Environmental Sciences, National Academy of Agriculture Green Development, Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: Magnesium and phosphorus are critical macronutrients for plant growth. At present, magnesium deficiency and low phosphorus use efficiency are becoming the key limited factors for nutrient management in green crop production in China. The nutrient supply of magnesium and phosphorus in soil barely meets the demand of crops which can result in low crop yield and poor quality, especially in acidic soils in the south of China. There are complex interactions between magnesium and phosphorus nutrients. For fertilizers, it affects the phytoavailability of magnesium and phosphorus. For soil, it works on the nutrient fixation and release of magnesium and phosphorus. For crops, it does not only promote the absorption and utilization of magnesium and phosphorus nutrients effectively, but also improves crop yield and quality. As mentioned above, there are various types of interactions between magnesium and phosphorus nutrients in the fertilizer-soil-crop system which requires recognizing and understanding the processes and mechanisms of Mg-P interactions systematically, thus can provide scientific basis for innovative design of green and high efficiency fertilizers and efficient nutrient management practices.

Key words: interactions between magnesium and phosphorus; nutrient availability; nutrient fixation and release; efficient use of nutrients