



不同磷肥品种在石灰性土壤中的磷形态差异

吉冰洁, 李文海, 徐梦洋, 牛金璨, 张树兰, 杨学云✉

西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100

摘要:【目的】研究不同磷肥品种在壤土中磷形态转化及有效性差异, 有助于选择合适的磷肥品种从而减少土壤磷素累积和提高磷素有效性, 为该区域磷肥-作物-土壤匹配提供理论依据。【方法】以壤土长期定位试验有效磷含量较低的耕层(0—20 cm)土壤为供试土壤, 玉米(郑单958)为供试作物进行盆栽试验。试验共设8个处理: 不施磷肥(Control); 过磷酸钙(SSP); 钙镁磷肥(CaMg P); 磷酸一铵(MAP); 磷酸二铵(DAP); 聚磷酸铵(Poly P); 磷酸脲(Urea P); 过磷酸钙加硫酸铵(SSP+ASA)。用蒋柏藩-顾益初无机磷分级法测定土壤无机磷组分, 并分析其与玉米植株吸磷量、土壤有效磷之间的关系。【结果】不同磷肥品种均可显著影响土壤有效磷含量, 但随时间变化其动态特点有所不同。在玉米种植期间, 施不同磷肥品种土壤有效磷平均含量大小为: DAP>Urea P>Poly P>MAP>SSP+ASA>SSP>CaMg P>Control。不同磷肥品种均可显著提高玉米植株干物质量、吸磷量及肥料利用率, 较Control处理分别提高了64.8%—221.3%、114.1%—593.0%、2.1%—11.0%, 其中DAP和Poly P处理相似且增幅最大。土壤有效磷含量与玉米植株吸磷量和干物质量均呈极显著的正相关关系。不同施磷处理均可显著增加土壤Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P和Fe-P含量, 增幅分别为36.9%—610.0%、21.7%—85.5%、57.2%—83.0%和28.5%—77.8%, 0-P和Ca₁₀-P增加不明显。其中, MAP、DAP、Poly P和Urea P可显著提高石灰性土壤中Ca₂-P和Ca₈-P的含量; Al-P和Fe-P增加较大的是SSP+ASA和SSP处理; CaMg P处理显著提高了0-P和Ca₁₀-P含量。Poly P处理土壤Ca₂-P含量显著高于MAP和Urea P, 仅次于DAP处理, 但土壤Ca₈-P含量显著低于DAP、MAP和Urea P。与SSP相比, SSP+ASA显著增加了Ca₂-P和Al-P含量, 分别增加了24.9%和11.9%, 有效磷含量提高了11.4%。土壤无机磷组分中Ca₂-P、Ca₈-P和Al-P与土壤有效磷和植株吸磷量呈显著正相关关系。【结论】供试土壤条件下, 磷酸二铵(DAP)的磷素固定较低、有效磷含量高, 聚磷酸铵(Poly P)降低了土壤Ca₂-P向Ca₈-P的转化, 可减少磷在石灰性土壤中的沉淀, 磷素有效性与施磷酸二铵的相当, 这两种肥料是适合该区施用的磷肥品种; 在石灰性土壤中施用酸性肥料硫酸铵不仅可以提高土壤有效磷含量, 而且减少了磷素的累积。

关键词: 磷肥品种; 壤土; 玉米; 无机磷组分; 土壤有效磷

Varying Synthetic Phosphorus Varieties Lead to Different Fractions in Calcareous Soil

Ji BingJie, Li WenHai, Xu MengYang, Ni JinCan, Zhang ShuLan, Yang XueYun✉

College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi

Abstract:【Objective】Synthetic phosphorus fertilizers may vary in their behavior when applied to soil because of their inherent differences in nature. In order that the phosphate fertilizers could well match the crops' P requirement, the selection of appropriate types of P sources are of paramount importance in practice. To achieve this, it is necessary to make a thorough investigation on phosphorus distribution among different soil P fractions and their bioavailability when P applied to soil in various varieties of synthetic phosphate fertilizers.【Method】We conducted a pot experiment on a calcareous tier soil with a lower Olsen P level, which

收稿日期: 2020-08-11; 接受日期: 2020-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0200205)

联系方式: 吉冰洁, E-mail: ji.bj@nwfau.edu.cn。通信作者杨学云, E-mail: xueyunyang@hotmail.com

was collected from a plot without P addition for 20 years. Eight treatments were established: (1) no phosphate fertilizer (Control); (2) superphosphate (SSP); (3) calcium magnesium phosphate (CaMg P); (4) mono-ammonium phosphate (MAP); (5) di-ammonium phosphate (DAP); (6) ammonium poly-phosphate (Poly P); (7) Urea phosphate (Urea P); (8) superphosphate plus ammonium sulfate (SSP+ASA). A maize variety ‘Zhengdan 958’ was used as a test crop. We analyzed the correlations between P uptake in above-ground biomass of maize, soil Olsen P and the content of soil P fractions, which were determined with a P fractionation method modified by Jiang & Gu. 【Result】 Results showed that the contents of soil available P (Olsen P) and its dynamics varying with treatments. The average Olsen P contents followed an order of DAP>Urea P>Poly P>MAP>SSP+ASA>SSP>CaMg P>Control based on their statistical significance during the experimental period of two months. Compared with the control treatment, all treatments receiving P significantly increased the above-ground biomass, phosphorus uptake and phosphorus use efficiency of maize by 64.8%-221.3%, 114.1%-593.0% and 2.1%-11.0%, respectively. The largest increase was observed in treatments receiving DAP and poly P. Both the phosphorus uptake and above-ground biomass of maize were positively and significantly correlated with soil Olsen P. Phosphorus fractions of $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P and Fe-P were enhanced by 36.9%-610.0%, 21.7%-85.5%, 57.2%-83.0%, 28.5%-77.8% in all phosphorus application treatments except O-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$, which remained unchanged except in CaMg P treatment. Of which, the greatest increases in $\text{Ca}_2\text{-P}$ and $\text{Ca}_8\text{-P}$ were observed in treatments given MAP, DAP, poly P and Urea P; the largest increases in Al-P and Fe-P were found in SSP+ASA and SSP treatments; significant increases in O-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ were only obtained in CaMg P treatment. The Poly P treatment had the significantly greater $\text{Ca}_2\text{-P}$ than MAP and Urea P treatments, only lower than DAP treatment, but it contained a significantly lower $\text{Ca}_8\text{-P}$ relative to DAP, MAP and Urea P treatments. Compared with SSP, SSP+ASA significantly increased the contents of $\text{Ca}_2\text{-P}$ and Al-P by 24.9% and 11.9%, respectively, and the available phosphorus content increased by 11.4%. The inorganic P fractions of $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$ and Al-P showed a significant and positive correlations with soil available phosphorus and phosphorus uptake by plants. 【Conclusion】 Under the tested soil conditions, DAP had a lower phosphorus fixation and thus a greater available phosphorus pool. Poly P inhibited the transformation of $\text{Ca}_2\text{-P}$ to $\text{Ca}_8\text{-P}$ and therefore reduced the precipitation of phosphorus. The results suggested that Poly P is equivalent to DAP in bioavailability, and these two varieties of phosphate fertilizers could be used where there is an urgent need to improve and maintain soil Olsen P. The application of physiological acidic fertilizer ammonium sulfate combined with SSP in calcareous soil not only increased the content of available phosphorus, but also reduced the fixation of phosphorus.

Key words: variety of synthetic phosphate fertilizer; tier soil; maize; inorganic phosphorus fractions; soil available phosphorus

0 引言

【研究意义】磷是作物生长发育不可缺少的主要营养元素，也是北方石灰性土壤作物增产的主要限制因子之一^[1]。在某些条件下，尽管土壤的全磷含量较高，但可供植物吸收利用的有效磷仍然很低^[2]，只有施磷才能满足作物需要。施入到石灰性土壤中的磷，大部分与 Ca^{2+} 等发生沉淀反应^[3]，有近 75%—90% 的磷转化为难溶性磷酸盐而累积在土壤中，致使主要农作物的磷肥当季利用率仅为 10%—25%^[4-5]。统计结果表明，至 2010 年中国土壤磷的盈余量已增长到 $\text{P } 40.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[6]。这不仅浪费了有限的磷矿资源，还可能带来潜在的环境问题。因此，提高土壤磷素有效性是减少土壤磷素累积的关键，对于提高磷肥利用率和减少环境污染，实现农业可持续发展具有重要意义。【前人研究进展】有报道指出，土壤磷素有效性与磷肥品种密切相关。目前，市面上的磷肥品种繁多，如水溶性、弱酸溶性和难溶性的；生理酸性、碱性和中

性的，以及不同养分含量的。不同磷肥品种由于其组成、溶解性、酸碱性等性质的差异，在不同土壤中的肥效也不尽相同^[7-9]。一般认为过磷酸钙适用于石灰性土壤，如王少仁等^[10]研究表明，在施用等量磷的条件下，石灰性土壤上不同磷肥利用效率表现为过磷酸钙 > 钙镁磷肥 > 磷酸二铵；而钙镁磷肥在酸性土壤上的施肥效果与水溶性肥料相当甚至更高^[11]。朱宏斌等^[8]研究表明，在酸化的石灰性砂姜黑土上，磷肥对玉米生长和产量的影响均表现为钙镁磷肥 > 磷酸二铵 > 过磷酸钙。近年来，聚磷酸铵、磷酸脲等作为新型高效磷肥品种逐渐受到关注。尤其在新疆地区，磷酸脲、聚磷酸铵等水溶性肥料被广泛用于膜下滴灌棉花，对于促进棉花的生长、提高棉花品质都发挥了很好的作用，肥效优于可溶性磷铵^[12]。因而根据土壤和作物施用不同种类磷肥有助于提高磷肥利用效率，减少磷肥施用。磷肥的有效性不仅与磷肥的组成、形态及作物有关，而且取决于与土壤反应产物的形态和有效性^[13]。在判断土壤磷肥力时，一般习惯于将有效磷作为最重

要的一个衡量指标,而忽略了磷在土壤中的化学行为和存在形态^[14-15]。磷素在土壤中的存在形态和转化直接影响作物对磷素的吸收利用^[16-18]。土壤中磷素形态复杂,且处于动态平衡之中,一般采用土壤磷素分级法来定性、定量地评价。1989年,蒋柏藩和顾益初提出了适用于石灰性土壤磷的分级方法,把土壤无机磷分为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 六种形态^[19]。研究表明, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是作物最有效的磷源, Al-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 可视为缓效磷源, O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 短期内难以被植物吸收利用,被视为潜在磷源^[20-21]。长期施化学磷肥可以不同程度地增加土壤有效态和缓效态磷含量^[22]。【本研究切入点】**塿土**是关中平原地区特有的主要土壤类型之一,关中平原是陕西省乃至西北地区最主要的粮食生产基地。关于提高磷肥利用率的研究,大多集中于单一品种磷肥的长期定位试验、磷肥施用量、肥料管理措施以及土地管理方式等^[23-26],如何匹配磷肥-作物-土壤,使其发挥最大效率,目前研究相对很少。因此,搞清不同磷肥品种在**塿土**中磷形态转化及有效性差异,是合理选用磷肥品种的前提条件,对提高**塿土**磷素有效性,实现农业可持续生产和环境保护具有重要意义。【拟解决的关键问题】本试验选用目前市场上主要的6种磷肥品种,通过盆栽试验初步探讨了不同种类磷肥进入石灰性**塿土**后的土壤磷形态转化及其有效性。旨在选择合适的磷肥品种来提高土壤有效态和缓效态磷,减弱固定态磷的累积,从而提高土壤磷素利用率,为该区域磷肥-作物-土壤匹配提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本盆栽试验于2019年7—9月在“国家黄土肥力与肥料效益监测基地”进行,基地位于黄土高原南部的陕西省关中平原杨凌示范区($34^{\circ}17'51''\text{N}$ 、 $108^{\circ}00'48''\text{E}$),海拔534 m,年平均气温 12.9°C ,年降水量为550—600 mm,降雨量主要集中在6—9月份。年均蒸发量993 mm,无霜期184—216 d,属于暖温带大陆性季风气候。供试土壤为旱耕土垫人为土,黄土母质,采自长期定位试验地低有效磷含量的耕层(0—20 cm)土壤。土壤质地为粉砂黏壤土、土壤pH(1:2.5)8.37、有机质 $16.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $6.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $236.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验共设8个处理,4次重复,共32盆,培养

时采取完全随机排列。8个肥料处理分别为:(1)不施磷肥(Control);(2)过磷酸钙(SSP);(3)钙镁磷肥(CaMg P);(4)磷酸一铵(MAP);(5)磷酸二铵(DAP);(6)聚磷酸铵(Poly P);(7)磷酸脲(Urea P);(8)过磷酸钙加硫酸铵(SSP+ASA)。各磷肥处理施肥量为 $100\text{ mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$ 风干土,按含磷量折算施入。硫酸铵施用量为 $50\text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$ 风干土。试验开始前,将土壤风干,所有土壤过2 mm筛混匀备用。称3.5 kg土壤放入塑料袋中,将下述养分分别单独配成营养液,按(1)—(7)顺序依次加入(钙镁磷肥、过磷酸钙等不完全溶解磷肥研磨过2 mm筛均匀混入)。土壤N、P、K及中微量元素等养分加入量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 风干土)和顺序为:(1)尿素,补齐氮素调节在同一氮水平,即 $200\text{ mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$ 风干土;(2) K_2SO_4 335.10;(3) CaCl_2 125.67;(4) $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 43.34;(5)EDTA-FeNa 5.80;(6) $\text{MnSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 6.67, $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 10, $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2, H_3BO_3 0.67, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.26;(7)磷肥(表1)。充分混匀土壤,风干1 d后根据需要再过2 mm筛,将土从塑料袋中转移到陶瓷盆(直径18 cm,高19 cm)中,加水至田间持水量的50%后平衡2 d左右播种。供试作物选用郑单958,提前萌发种子,待种子长出1 cm左右的芽后,选取萌发状况相对一致的种子播种。每盆播种5粒,待出苗5 d左右间苗,保留2株长势相对一致的幼苗。播种后浇适量水,开始盆栽试验(60 d)。试验期间采用称重法浇水,使含水量保持在田间持水量的70%—80%,以满足作物对水分的需求。定期通过称重法(忽略植株干重的差异)将所有盆的含水量调节一致(至少每周一次)。

1.3 样品采集与分析

用手钻(内径1.6 cm,长20 cm)均匀采集盆内土样,每盆3个取样点,取土约50 g/pot,分别在播种后第0、7、15、30、60天取土壤样品测定有效磷含量,并于第60天采集土样,测定磷组分。土样仔细挑拣出所有根系之后,再将土壤充分混匀,风干后按照不同测定指标的要求过筛。有效磷测定过1 mm筛,磷组分测定过0.15 mm筛。植株培养60 d收获(从播种当天开始计),收获时用剪刀将植株从茎基部剪断,收取植株地上部装入信封,收获的地上部植株在 105°C 下杀青30 min后,在 65°C 烘干至恒重。称重后研磨粉碎并过筛,测定植株吸磷量。土壤有效磷(Olsen P)采用pH 8.5的 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ 溶液浸提,植物样品全磷采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消煮^[27]。无机磷形态分组

表 1 盆栽试验肥料性质及用量

Table 1 Characteristics and application amount of fertilizer in the pot experiment

磷肥品种 Phosphorus fertilizer varieties	酸碱性 pH	溶解性 Solubility	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	肥料用量 Fertilizer rate (g/pot)
过磷酸钙 SSP	酸性 Acidic	水溶性 (80%-95%) Water-soluble	0	16.3	4.91
钙镁磷肥 CaMg P	碱性 Alkaline	弱酸溶性 Weak acid soluble	0	12.3	6.54
磷酸一铵 MAP	酸性 Acidic	水溶性 Water-soluble	12.0	58.6	1.37
磷酸二铵 DAP	碱性 Alkaline	水溶性 Water-soluble	15.0	40.4	1.98
聚磷酸铵 Poly P	中性 Neutral	水溶性 Water-soluble	18.0	58.6	1.37
磷酸脲 Urea P	酸性 Acidic	水溶性 Water-soluble	17.0	43.3	1.85
硫酸铵 ASA	酸性 Acidic	水溶性 Water-soluble	21.0	0	0.83

按照蒋柏藩和顾益初提出的石灰性土壤无机磷分级法^[19]，将土壤无机磷形态分为 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca₁₀-P，分别用 0.25 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 溶液 (pH 7.5)、0.5 mol·L⁻¹ NH₄OAc 溶液 (pH 4.2)、0.5 mol·L⁻¹ NH₄F 溶液 (pH 8.2)、0.1 mol·L⁻¹ NaOH-0.1 mol·L⁻¹ Na₂CO₃ 溶液、0.3 mol·L⁻¹ 柠檬酸钠溶液+0.5 mol·L⁻¹ NaOH 溶液、0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 溶液连续浸提、振荡、离心。所有浸提液及消煮液中磷含量用钼锑抗比色法测定^[27]。

1.4 计算方法

磷肥利用效率用以下公式计算^[24]。

差减法：磷肥利用率 (PUE, %) = (U-U₀) / F × 100 (1)

平衡法：磷肥利用率 (PUE, %) = U/F × 100 (2)

式中，U 代表施磷肥处理作物地上部吸磷总量 (mg/pot)，U₀ 代表未施磷肥处理作物地上部吸磷总量 (mg/pot)，F 为磷肥施用量 (mg/pot)。

1.5 数据处理与统计分析

试验数据用 Excel 2016 和 SPSS 25.0 软件进行统计分析，用单因素方差分析 (One-way ANOVA) Duncan (P<0.05) 法进行多重比较，采用 Origin 2020 软件制作图。

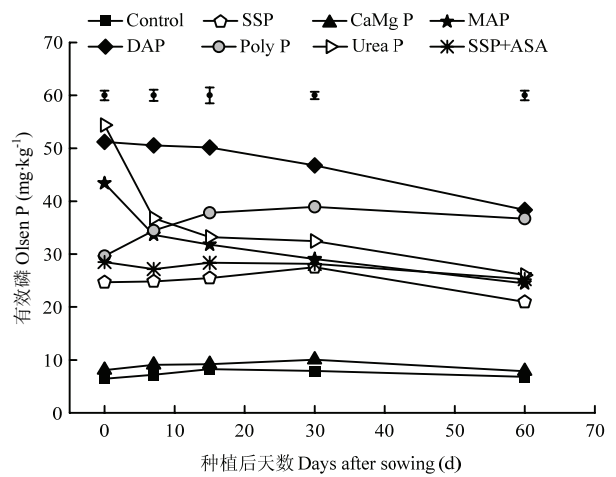
2 结果

2.1 不同磷肥品种对土壤有效磷动态的影响

由于磷肥性质不同，等量施用不同品种的磷肥对石灰性土壤有效磷的影响存在显著差异 (图 1)。各磷肥品种土壤有效磷含量较对照均有显著增加，平均提高了 1.52—40.08 mg·kg⁻¹。DAP、Urea P、Poly P 和 MAP 处理土壤平均有效磷含量范围为 32.47—47.40 mg·kg⁻¹，SSP 和 SSP+ASA 处理土壤平均有效磷含量

分别为 24.68 和 27.49 mg·kg⁻¹，CaMg P 处理土壤平均有效磷含量为 8.84 mg·kg⁻¹。在玉米种植期间，施不同磷肥品种的土壤平均有效磷含量大小顺序为：DAP>Urea P≥Poly P>MAP>SSP+ASA>SSP>CaMg P>Control。

土壤有效磷 (Olsen P) 含量因磷肥品种 (处理) 而产生显著差异，且随施入土壤时间而发生不同变化 (图 1)。钙镁磷肥 (CaMg P) 处理土壤 Olsen P 较 Control 提高约 2 mg·kg⁻¹ 左右，且这两个处理土壤 Olsen P 含量在作物生长期均维持在一个很低的水



Control: 不施磷肥 No phosphate fertilizer; SSP: 过磷酸钙 Superphosphate; CaMg P: 钙镁磷肥 Calcium magnesium phosphate fertilizer; MAP: 磷酸一铵 Mono-ammonium phosphate; DAP: 磷酸二铵 Di-ammonium phosphate; Poly P: 聚磷酸铵 Ammonium poly-phosphate; Urea P: 磷酸脲 Urea phosphate; SSP+ASA: 过磷酸钙加硫酸铵 Superphosphate plus ammonium sulfate. 下同 The same as below

图 1 不同磷肥品种的土壤有效磷动态
Fig. 1 Dynamics of Olsen P in soils subjected to different varieties of phosphorus fertilizers

平，变化幅度不大且均显著低于其他施磷处理。SSP 和 SSP+ASA 处理土壤 Olsen P 含量较对照提高约 18—22 mg·kg⁻¹，表现为在 0—30 d 时稳定，30—60 d 时开始缓慢下降，与初始值相比，分别减少了 15.1% 和 11.3%；在整个生长期，SSP+ASA 处理土壤 Olsen P 始终高于 SSP 处理，平均约为 11.4%，且 SSP+ASA 处理土壤有效磷含量下降速度低于 SSP 处理，说明石灰性土壤施硫酸铵酸化后有助于减缓磷素的固定。Poly P 施入后，土壤 Olsen P 含量和 SSP+ASA 一样，但在 0—30 d 时一直提高，在 15 d 后 Olsen P 显著高于除 DAP 外的其他所有处理，至播种 30 d 时提高幅度达 31.3%，此后开始缓慢下降。MAP 和 Urea P 施入土壤后 Olsen P 分别达到 43.39 和 54.38 mg·kg⁻¹，较 Control 分别提高 576.6%和 747.9%，且均随时间一直降低，其中 0—7 d 时均迅速下降、7—60 d 时下降幅度变缓。与初始值相比，不同施磷处理中 Urea P 处理土壤有效磷含量下降幅度最大，为 52.1%，MAP 处理土壤有效磷含量降幅仅次于 Urea P，为 43.6%。二者在 7 d 时有效磷和 Poly P 相当，15 d 时显著低于 Poly P 处理，30—60 d 时大体与 SSP+ASA 处理一致。DAP 处理土壤有效磷含量较 Control 提高 44.78 mg·kg⁻¹，且在 0—15 d 时无显著性变化、15—60 d 时呈下降趋势，在播种 60 d 时下降了 25.1%。除刚施入土壤时低于 Urea P 外，几乎在整个作物生长期 Olsen P 均显著高于其他所有处理。

2.2 不同磷肥品种对玉米植株干物质及吸磷量的影响

所有磷肥品种均可显著提高玉米植株干物质和

吸磷量（表 2），分别较 Control 提高了 2.40—8.18 g/plant（64.8%—221.3%）和 3.69—19.19 mg/plant（114.1%—593.0%）。不同磷肥品种中，DAP 和 Poly P 处理玉米植株干物质和吸磷量最高，分别较 Control 增加了 2.17 和 2.21 倍、5.93 和 5.87 倍，且两个处理无显著差异。MAP 处理玉米植株干物质、吸磷量仅次于 DAP 和 Poly P 处理。CaMg P 处理玉米植株干物质、吸磷量增加幅度最小，为 64.8%和 114.1%。SSP+ASA、Urea P 和 SSP 处理玉米植株干物质及吸磷量差异不显著，但均高于 CaMg P 处理。等量施磷情况下，不同磷肥品种磷肥利用率表现为：DAP≥Poly P > MAP > SSP+ASA≥Urea P≥SSP > CaMg P。

在本研究中，土壤有效磷含量与玉米植株吸磷量和干物质均呈极显著的正相关关系（ $P<0.01$ ），线性关系决定系数分别为 0.8987 和 0.7795（图 2）。

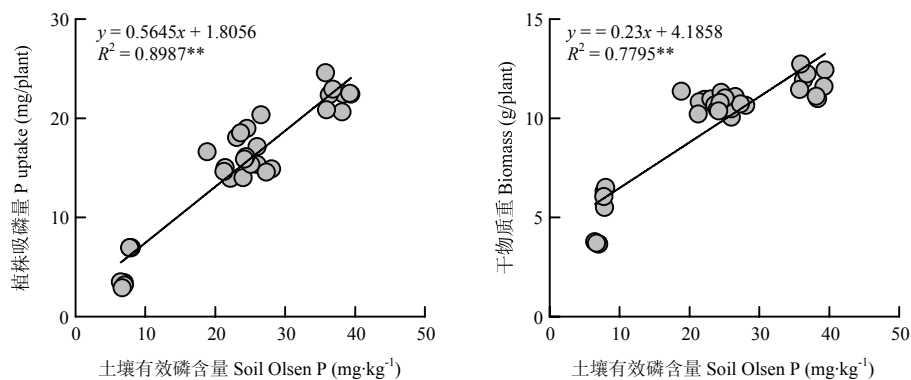
2.3 不同磷肥品种对土壤无机磷形态的影响

有效态、缓效态和固定态磷分别表征土壤的高活性、中等活性和低活性磷^[28]。由图 3 可知，不同磷肥品种对土壤各形态无机磷有显著影响。不同磷肥品种土壤中总无机磷含量变化范围为 487.62—574.85 mg·kg⁻¹，所有磷肥品种均较对照（Control）显著提高了总无机磷的含量，但各施磷处理间无显著差异（ $P<0.01$ ）。

土壤中有效态磷（Ca₂-P）含量在 2.50—17.75 mg·kg⁻¹之间，各施磷处理土壤 Ca₂-P 含量均较对照显著增加，增幅达 36.9%—610.0%。依其显著性各处理 Ca₂-P 依次为 DAP>Poly P>Urea P>MAP≥SSP+ ASA

表 2 不同磷肥品种对玉米植株干物质、吸磷量及磷肥利用率的影响				
Table 2 Effects of different varieties of phosphorus fertilizers on above-ground biomass, P uptake of maize, and P use efficiency				
处理 Treatment	干物质 Biomass (g/plant)	植株吸磷量 P uptake of plant (mg/plant)	磷肥利用率 PUE (%)	
			差减法 Subtraction method	平衡法 Balanced method
Control	3.70±0.06 e	3.24±0.27 e	—	—
SSP	10.83±0.48 c	15.05±1.14 c	6.75 c	8.60 c
CaMg P	6.09±0.43 d	6.93±0.02 d	2.11 d	3.96 d
MAP	11.01±0.27 bc	18.97±0.99 b	8.99 b	10.84 b
DAP	11.73±0.60 ab	22.43±0.06 a	10.97 a	12.82 a
Poly P	11.88±0.74 a	22.23±1.87 a	10.85 a	12.70 a
Urea P	10.40±0.26 c	15.35±1.33 c	6.92 c	8.77 c
SSP+ASA	10.73±0.27 c	15.47±0.69 c	6.99 c	8.84 c

表中数值均为 4 次重复的平均值±标准偏差；同列不同小写字母表示不同施磷处理间差异显著（ $P<0.05$ ）
The values presented are mean ± standard deviation of 4 replicates; Different small-case letters in the same column denote significant difference between treatments at 0.05 probability level

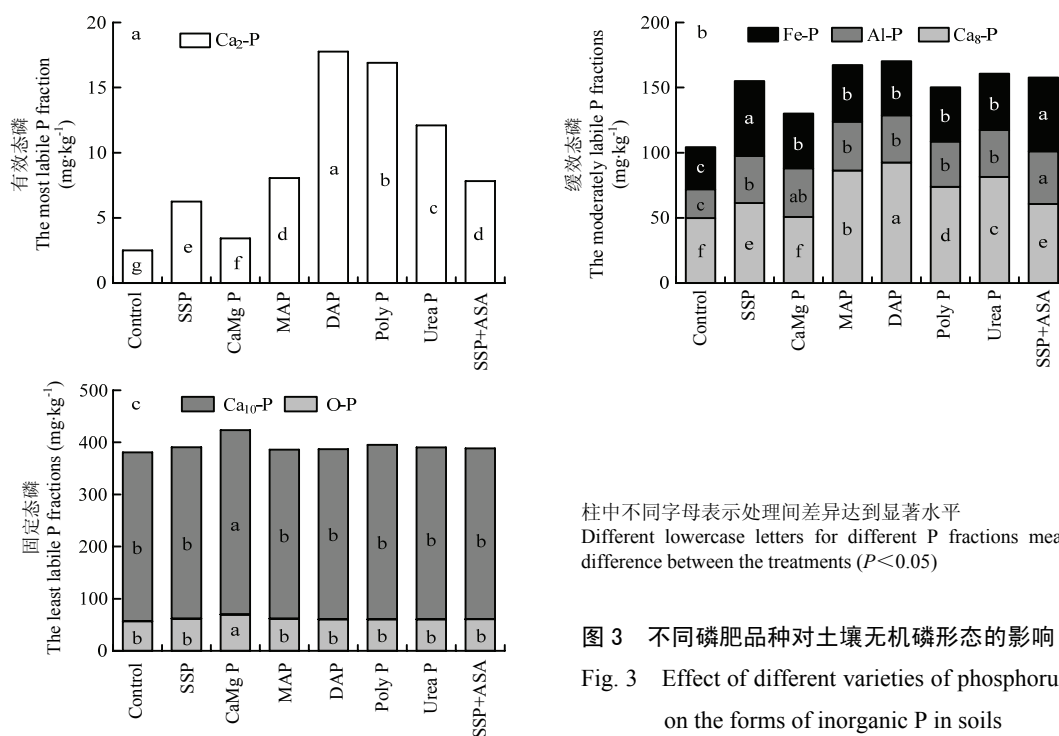


此处土壤有效磷含量为第 60 天取样测定的数值。下同

The data presented are obtained from soils sampled at the 60th day of the pot experiment. The same as below

图 2 土壤有效磷含量与玉米吸磷量及植株干物质量的关系

Fig. 2 The correlations between soil Olsen P concentration and P uptake and above-ground biomass of maize



柱中不同字母表示处理间差异达到显著水平

Different lowercase letters for different P fractions mean significant difference between the treatments ($P < 0.05$)

图 3 不同磷肥品种对土壤无机磷形态的影响

Fig. 3 Effect of different varieties of phosphorus fertilizers on the forms of inorganic P in soils

>SSP>CaMg P>Control (图 3-a)。与 MAP 处理相比, DAP、Poly P 和 Urea P 处理土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量分别增加了 9.70、8.85 和 4.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。SSP+ASA 处理土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量显著高于 SSP 处理, 增加了 24.9%。各施磷处理中, CaMg P 处理土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量最低, 仅为 3.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

土壤中缓效态磷 ($\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P) 含量介于 104.25—170.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 各施磷处理土壤该形

态磷含量均较 Control 显著增加, 增幅达 24.7%—63.3%, 依其显著性 $\text{DAP} \geq \text{MAP} > \text{Urea P} > \text{SSP} + \text{ASA} \geq \text{SSP} > \text{Poly P} > \text{CaMg P} > \text{Control}$ 。其中, 土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 变幅为 49.84—92.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 除 CaMg P 外的其余施磷处理 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 均显著增加, 增加幅度为 21.7%—85.5%。与 DAP 处理相比, MAP、Poly P 和 Urea P 处理土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量分别减少了 6.5%、20.1%和 11.8%。各施磷处理中, SSP 和 SSP+ASA 处理土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量

增加幅度较小, 分别为 23.2%和 21.7%, 二者无显著性差异。土壤 Al-P 含量范围为 22.09—40.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 SSP+ASA 处理增幅最大, 为 83.0%, 显著高于除 CaMg P 外的其他处理; Poly P 处理增加最小, 为 57.2%; 除 SSP+ASA 处理外, 其余处理间无显著差异, 但均显著高于 Control; 与 SSP 处理相比, SSP+ASA 处理 Al-P 含量显著增加了 11.9%。土壤 Fe-P 含量在 32.32—57.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 各磷肥品种均较 Control 显著提高了 Fe-P 含量, 其中 SSP 和 SSP+ASA 处理增幅最高, 分别增加了 77.8%和 75.0%, 且均显著高于其他处理。CaMg P、MAP、DAP、Poly P 和 Urea P 处理增幅为 28.5%—34.4%, 且处理间差异不显著(图 3-b)。

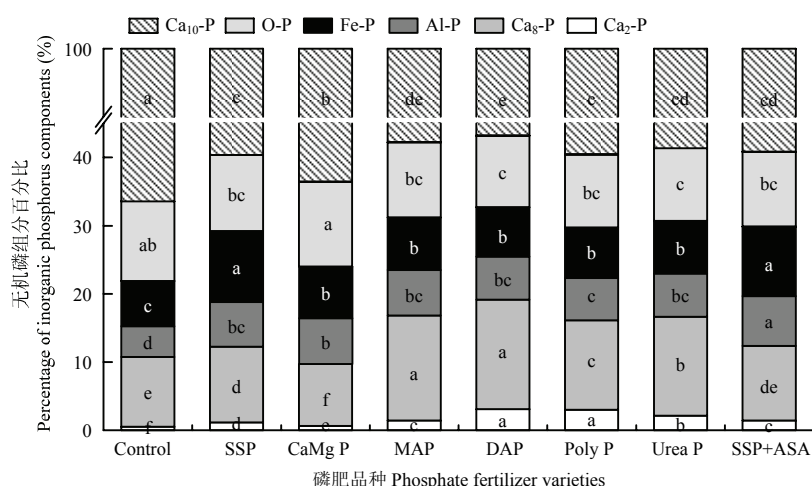
土壤中固定态磷(O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$) 含量变化范围为 380.87—423.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, CaMg P 处理的 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量均显著高于其他处理, 分别较 Control 增加了 22.2%、9.2%, 其他施磷处理和 Control 相比略有增加, 但均未达到显著水平(图 3-c)。

在土壤无机磷各组分中, 难以被植株吸收利用的固定态磷($\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P) 占无机磷的比例最大, 为 67.3%—78.1%。与 Control 相比, 除 CaMg P 处理的 O-P 百分比没有降低外, 其余施磷处理均降低了 O-P 的百分比, 为 4.4%—9.8%, 其中 DAP 和 Urea P 处理达到显著水平; 各施磷处理均减少了 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的百分比, 为 4.4%—14.6%, 其中 DAP 处理降幅最大。土壤中缓效态磷($\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P 和 Fe-P) 占无机磷的

比例分别为 9.1%—16.1%、4.5%—7.3%和 6.6%—10.4%。与 Control 相比, 各施磷处理显著提高了 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P 和 Fe-P 的百分比, 分别提高了 7.2%—57.4%、36.3%—61.0%和 9.0%—57.0%, 而 CaMg P 处理的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占无机磷的比例比 Control 显著降低了 11.0%。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 被视为作物最有效的磷源, 其在无机磷中所占比例最小, 约为 0.5%—3.1%。与 Control 相比, 各施磷处理均显著提高了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的百分比, 为 20.6—506.0%, 其中 DAP 和 Poly P 处理增加最大(图 4)。各级磷组分占总无机磷的比例平均依次为: $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (60.2%) > $\text{Ca}_8\text{-P}$ (12.6%) > O-P (11.2%) > Fe-P (8.1%) > Al-P (6.3%) > $\text{Ca}_2\text{-P}$ (1.7%)。说明在石灰性土壤中无机磷主要以有效性较低的固定态磷($\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P) 存在, 而高活性的有效态磷($\text{Ca}_2\text{-P}$) 很少。

2.4 土壤磷组分与土壤有效磷及植株吸磷量的相关关系

将不同磷肥品种的土壤磷组分与土壤有效磷含量进行相关性分析(图 5), 可以看出土壤有效磷含量和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P 含量之间均呈显著正相关关系($P<0.05$), 其决定系数分别为 0.8925、0.6307 和 0.1634。植株吸磷量与不同磷肥品种土壤磷组分的关系显示植株吸磷量和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P 含量极显著正相关($P<0.01$), 斜率大小为 $\text{Ca}_2\text{-P}>\text{Al-P}>\text{Ca}_8\text{-P}$ (图 6)。土壤有效磷含量及植株吸磷量均与 Fe-P、O-P、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量无显著相关关系(图 5, 图 6)。



柱中同一磷形态不同字母表示处理间差异达到显著水平

Different lowercase letters inside the bars with the same color mean significant difference in that P fraction between the treatments ($P<0.05$)

图 4 不同磷肥品种的土壤磷组分百分比

Fig. 4 Percentage of phosphorus fractions in soils treated with different varieties of phosphorus fertilizers

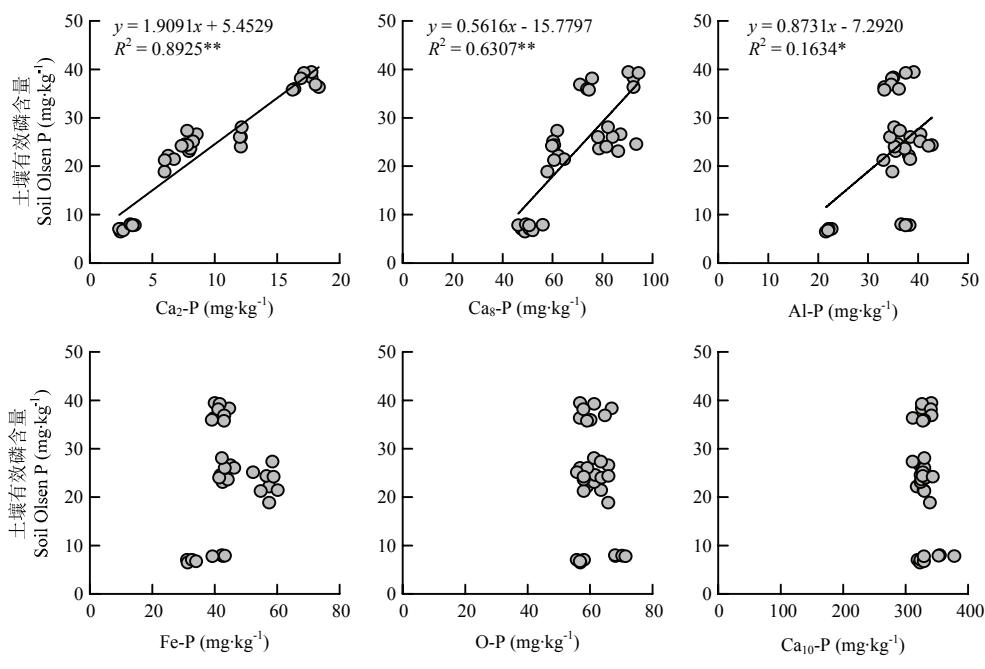


图 5 不同磷肥处理土壤有效磷含量与土壤磷组分的关系

Fig. 5 The relationship between Olsen P concentrations and P fractions in soils treated with different varieties of phosphorus fertilizers

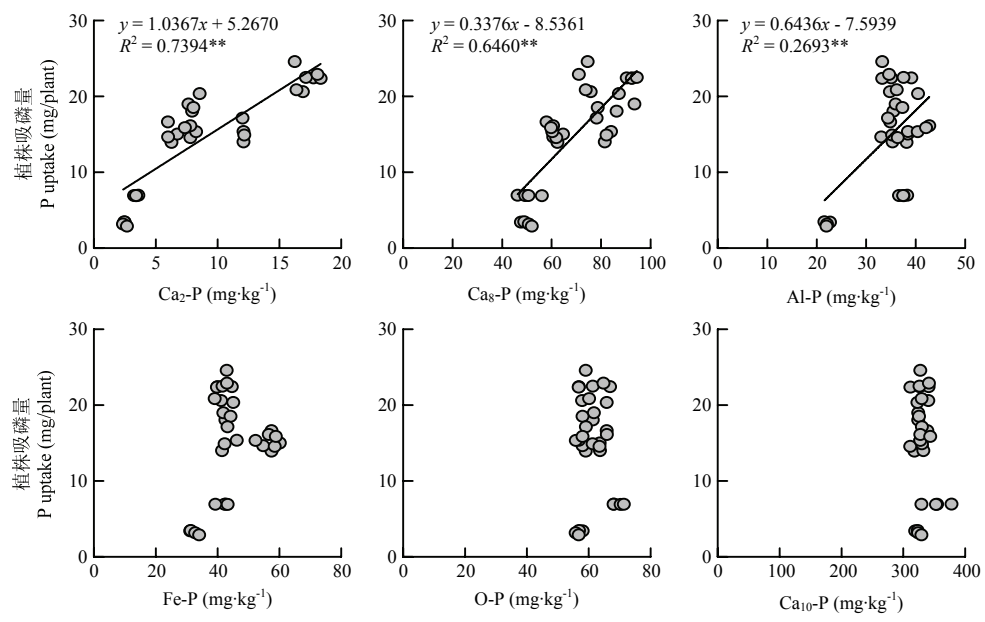


图 6 不同磷肥处理植株吸磷量与土壤磷组分的关系

Fig. 6 The relationship between P uptake by plant and P fractions in soils treated with different varieties of phosphorus fertilizers

3 讨论

3.1 不同磷肥品种与土壤有效磷及其生物有效性

试验开始时 Poly P 处理土壤有效磷含量低于 MAP,

DAP 和 Urea P, 在 15 d 后 Poly P 处理的 Olsen P 含量显著高于除 DAP 外的其他所有处理 (图 1)。这主要归因于聚磷酸盐的缓释作用。Poly P 是由正磷酸盐、焦磷酸盐和多聚磷酸盐组成,正磷酸盐可以被作物直

接吸收利用,多聚磷酸盐可逐步水解为正磷酸盐后供作物吸收^[29-31]。据报道,焦磷酸盐在水环境中经过 15 d 可完全水解为正磷酸盐^[31]。此外,多聚磷酸盐与磷酸根竞争吸附和络合位点,减少了土壤黏粒对正磷酸盐的吸附以及正磷酸盐与土壤金属离子的化学沉淀,从而提高了土壤有效磷的含量^[32]。

本研究发现,正磷酸盐肥料由于其本身的形态和性质,自施入土壤后有效磷含量就很高(此时正磷酸盐还未来得及和 Ca^{2+} 等结合),随着时间的变化,正磷酸盐与 Ca^{2+} 等结合发生固定,因其性质、酸碱性等的差异,有效磷动态存在显著差异。DAP 处理土壤有效磷含量在 15 d 后才开始缓慢下降,而 Urea P 和 MAP 施入土壤后前两周有效磷快速下降,尤其是 Urea P 处理最为明显,三者固定率大小为 Urea P (52.1%) > MAP (43.6%) > DAP (25.1%) (图 1)。本结果和李书田等^[33]研究一致,他们通过室内培养试验也观察到了类似的结果,相同时间内土壤对 MAP 的固定较强,显著大于 DAP。这可能是因为 Urea P 和 MAP 均为酸性肥料 (pH: Urea P < MAP),对肥际微域碳酸盐的溶解破坏促进了磷酸钙盐的形成,使有效磷被大量固定^[34]。虽然 DAP 是弱碱性肥料,但同时也是生理酸性磷肥,铵态氮硝化过程会产生 H^+ 局部酸化肥际土壤,同样促进了钙磷形成和磷固定。

SSP 为非正磷酸盐肥料,其为磷灰石经硫酸高温熔融冷却制得,主要成分为一水磷酸一钙,有效磷含量在一开始施入土壤时就不高,仅大于 CaMg P。虽然 SSP 的饱和溶液 pH 为最低,一方面可以促进碳酸钙的溶解,使磷酸一钙进一步转化为磷酸二钙、磷酸八钙等;另一方面 SSP 的酸性是来自于肥料制作过程中的硫酸,而不是它本身,硫酸也可以促进磷的溶解。而且它的有效磷含量也只能在短时间内维持不降,随着作物对磷的吸收,土壤有效磷开始下降。

CaMg P 施入土壤后的土壤 Olsen P 含量较对照有所提高,达到约 $9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1),低于 $14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的玉米农学磷阈值^[35-36],但其玉米地上部生物量及吸磷量均较对照提高约一倍(表 2),尽管大大低于其他所有处理。这是因为其磷主要以枸溶态存在,溶解度很低,加之供试土壤 Olsen P 低于玉米生长磷阈值,同时玉米苗期虽然吸磷能力弱,但其根系可以分泌质子,活化利用一部分肥料磷。

有研究表明,施用硫酸铵可以降低土壤 pH,提高土壤有效磷含量^[37],并且可以为作物提供必需营养元素氮和硫^[38]。也有研究表明,施用酸性物质可以提高

植株吸磷量^[39]。本研究发现,SSP+ASA 处理土壤有效磷和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量分别比 SSP 处理提高了 11.4% 和 24.9%。且添加硫酸铵后减缓了土壤有效磷的固定(图 1)。这主要是因为生理酸性肥料硫酸铵通过植物的代谢产生分泌酸降低了植物根际 pH,从而促进了钙磷的溶解。但本试验中施用硫酸铵对植株干物质量及植株吸磷量没有显著影响(表 2)。这可能与玉米生育时期有关,玉米苗期吸磷量少可能是一个重要原因^[40]。本研究表明,施用酸性物质硫酸铵显著提高了 Al-P 的含量(图 3-b),也与土壤的酸化有关。黄运湘和周雨舟等^[41-42]研究表明,土壤交换性 Al^{3+} 含量与土壤 pH 呈极显著负相关关系。周雨舟等^[43]研究发现,土壤 pH 的降低可以增加 Al-P 的含量,土壤 Al-P 与 pH 呈显著负相关关系。

在一定范围内,植株吸磷量及生物量随着土壤 Olsen P 的增加而增加^[44]。本试验结果也显示,植株吸磷量和干物质量与土壤有效磷含量呈极显著正相关关系(图 2)。然而本研究中 DAP 处理 ($47.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤平均有效磷含量大于 Poly P ($35.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),且一直维持在一个很高水平(图 1),但和 Poly P 处理玉米吸磷量及生物量无显著性差异(表 2)。一方面是因为聚磷酸盐释放的磷与作物对磷的需求同步^[31]。表明磷肥的有效性不仅决定于土壤有效磷的含量,还取决于被作物吸收一部分磷之后,有效磷库能否迅速得到补充,继续保持植物所需磷的最佳浓度。另一方面,玉米植株吸磷量与土壤速效磷含量仅在一定范围直线相关,一般呈现二次曲线关系。张立花等^[45]在低磷土壤 (Olsen P $4.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 上的研究表明,玉米地上部对磷的吸收是有限的,当土壤有效磷达到一定值后,玉米地上部吸磷量不再进一步增加。植物吸收的磷主要是正磷酸形态的磷,其中以 H_2PO_4^- 最易吸收, HPO_4^{2-} 次之, PO_4^{3-} 吸收较差^[46]。Urea P 磷形态为 PO_4^{3-} ,只有转化为 H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-} 才能供作物吸收,但只有部分转化,且转化的过程需要一定时间,不利于作物的吸收。MAP 含有一定量的铵态氮,铵态氮会酸化根际土壤,促进作物的磷素吸收,这可能是 Urea P 处理土壤有效磷含量在整个生育期内均大于 MAP 处理,但肥效却不如 MAP 的原因。此外,当 pH 较高时,根系吸收 HPO_4^{2-} 较多^[46],DAP 处理土壤有效磷含量较高,保证了苗期磷素充分供应,因此 DAP 处理肥效较高。

3.2 不同磷肥品种与土壤无机磷组分

当磷肥进入石灰性土壤后,并不以原有形态存在

于土壤中,而是发生各种化学反应转化成另一些新的磷酸盐形态,结果使磷肥以各种形态固定在土壤中^[13]。本研究表明,不同施磷处理均可显著增加土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 含量,其增幅大小为 $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P}$, O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 增加不明显(图3)。这与其他研究者在石灰性土壤上报道的结果一致^[1,47]。吕家珑等^[48]在红油土上的研究结果表明,长期施肥能够明显地提高 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 含量,其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的增幅最大, Fe-P 增幅最小, O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 也均有所增加;在短期室内模拟实验中,施磷对 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 没有影响。这说明施入石灰性土壤中的磷肥主要转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P , 短期内没有 O-P 的形成, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 也不会转化为 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。

磷肥品种不同,其对土壤无机磷组分的影响也存在显著差异。从图3可以看出,水溶性强的磷酸盐肥料 MAP、DAP、Poly P 和 Urea P 可在短时间内显著提高石灰性土壤高中活性磷($\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$)含量, SSP 和 SSP+ASA 处理可显著提高中活性磷(Al-P 和 Fe-P)含量, CaMg P 处理可显著提高石灰性土壤中固定态磷(O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)含量。也进一步表明不同磷肥品种影响土壤磷形态进而影响到其有效性。蒋柏藩^[13]在石灰性土壤中也报道了类似的结果。其研究表明,过磷酸钙主要成分为一水磷酸一钙,由于其异成分溶解的特性,初期产物中除了生成二水和无水磷酸二钙外,主要是磷酸铁、铝化合物。此外,过磷酸钙在生产过程中,一水磷酸一钙与磷矿本身带入的铁、铝杂质发生反应,形成不溶性的磷酸铁铝沉淀;水溶性磷肥(MAP 和 DAP)施入石灰性土壤后,反应初期主要是磷酸二钙或磷酸八钙以及含镁的磷酸盐。 CaMg P 处理对 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量增加可能与磷肥本身性质有关。据报道,钙镁磷肥是由磷灰石和橄榄石等含镁矿物按一定比例,在高炉中经高温熔融,然后加水骤冷,再经磨细而成的肥料^[49]。磷灰石本身的形态就是 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$, 因此钙镁磷肥施入土壤后本身带入一部分 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。刘世亮等^[9]在黄潮土上研究发现, DAP、SSP 和 CaMg P 处理间相比,对 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 O-P 增加量最大的是 DAP 处理,对 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 含量 SSP 处理增幅最大, CaMg P 处理的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量显著高于其他处理。部分结果的差异可能与土壤肥力、土壤类型和施肥时间等不同有关。

正磷酸盐与土壤金属离子发生沉淀反应的速率显著高于焦磷酸盐^[50]。MCBEATH 等^[51]在多种澳大利亚土壤上的试验表明,焦磷酸盐提供的磷比正磷酸盐具

有更强的吸附亲和力。本试验结果表明,磷酸盐肥料中 Poly P 处理土壤有效态磷($\text{Ca}_2\text{-P}$)含量显著高于 MAP 和 Urea P 处理,仅次于 DAP 处理,但土壤缓效态磷($\text{Ca}_8\text{-P}$)含量显著低于 DAP、MAP 和 Urea P 处理。与陈小娟等^[52]发现 Poly P 处理较 MAP 处理降低了土壤低活性磷(HCl-P)和中活性磷(NaOH-P)含量,提高了土壤高活性磷含量的结果相似。高艳菊等^[53]在灌耕灰漠土上的研究也表明聚磷酸磷肥增加了土壤高活性磷(Resin-P , $\text{NaHCO}_3\text{-P}$)含量,降低了土壤中活性磷(NaOH-P)与低活性磷(HCl-P , Residue-P)含量。说明 Poly P 可减少磷在石灰性土壤中的沉淀。

3.3 土壤无机磷组分的供磷能力及其生物有效性

土壤无机磷组分与土壤有效磷含量及植株吸磷量相关性分析结果显示,土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 与土壤有效磷和植株吸磷量之间均呈显著正相关关系,单位组分增加对玉米的贡献大小为 $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P}$ (图5、图6)。表明 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 是石灰性土壤中有效磷的重要来源,也是植物磷吸收的主要来源。土壤有效磷含量及植株吸磷量均随着 Fe-P 含量的增加而增加,但未达到显著水平。反映出在本试验供试土壤条件下, Fe-P 对土壤有效磷及作物生长有一定贡献,但低于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 。土壤有效磷含量及植株吸磷量随着 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量的增加而减小,但均未达到显著性水平。说明 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 难以被作物吸收利用。本研究结果与蒋柏藩、沈仁芳和林治安等^[13, 20, 54]的报道一致。冯固等^[55]用 ^{32}P 示踪法研究5种形态磷酸盐对玉米的有效性依次为 $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。李若楠等^[56]通过通径分析表明,在瘠土上不同磷水平下无机磷各组分对有效磷的贡献(直接通径系数)依次为: $\text{Ca}_2\text{-P}$ (0.974) $> \text{Al-P}$ (0.186) $> \text{Ca}_8\text{-P}$ (0.182) $> \text{Fe-P}$ (0.150) $> \text{Ca}_{10}\text{-P}$ (0.007) $> \text{O-P}$ (-0.074)。张英鹏等^[57]研究表明 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 是土壤有效磷的主要磷源。刘世亮^[58]研究发现,土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 在小麦的不同生育时期表现出不同的有效性。结果的差异一方面与土壤类型和施磷水平有关,另一方面可能与作物有关。

4 结论

等磷量施用不同品种磷肥对石灰性土壤有效磷及其生物有效性、磷肥利用率和无机磷组分的影响均存在显著差异,其中磷酸二铵(DAP)处理土壤平均有

效磷含量和磷肥利用率均为最高, 短期内土壤对该肥料磷固定较低, 且土壤无机磷组分中有效性较高的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量及比例显著提高, 固定态磷 (O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$) 的比例降低; 聚磷酸铵 (Poly P) 由于其缓释作用, 能迅速补充土壤磷消耗, 继续保持玉米所需磷的最佳浓度, 其肥效与 DAP 相当, 且 Poly P 处理降低了土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的转化, 可减少磷在石灰性土壤中的固定。因此, 在瘠土-玉米体系上施用 DAP 和 Poly P, 既可以保证玉米对磷的需求, 又提高了土壤中有效态和缓效态磷, 减弱固定态磷的累积, 从而提高磷肥利用率。

参考文献 References

- [1] 杨毅, 赵文婷. 不同施肥制度对北方石灰性土壤无机磷形态影响研究. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 28-33.
YANG Y, ZHAO W T. Influences of inorganic phosphorus forms on calcareous soil under different fertilization systems in northern China. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(7): 28-33. (in Chinese)
- [2] TETIANA M, DIRK F, THOMAS R. Changes in soil phosphorus balance and phosphorus-use efficiency under long-term fertilization conducted on agriculturally used Chernozem in Germany. Canadian Journal of Soil Science, 2018, 98(4): 650-662.
- [3] HEDLEY M, MCLAUGHLIN M. Reactions of phosphate fertilizers and by products in soils. Phosphorus: Agriculture and the Environment, 2005, 181-252.
- [4] 李川, 乔江方, 朱卫红, 黄璐, 代书桃, 刘京宝. 不同磷肥处理对夏玉米干物质积累量及磷素吸收量的影响. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 107-114.
LI C, QIAO J F, ZHU W H, HUANG L, DAI S T, LIU J B. Effects of different phosphorus fertilizer treatments on dry matter accumulation and phosphorus absorption of summer maize. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(12): 107-114. (in Chinese)
- [5] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, CUI Z L, MA W Q, CHEN X P, JIANG R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [6] ZHU Q C, VRIES W D, LIU X J, HAO T X, ZENG M F, SHEN J B, ZHANG F S. Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980-2010. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1497-1505.
- [7] 秦永林, 田艳花, 樊明寿, 石晓华, 贾立国, 陈杨, 于静. 磷肥种类对石灰性土壤马铃薯产量和磷肥利用率的影响. 中国蔬菜, 2019(5): 70-75.
QIN Y L, TIAN Y H, FAN M S, SHI X H, JIA L G, CHEN Y, YU J. Effect of different phosphorous fertilizer kinds on potato yield and phosphorus use efficiency in calcareous soil. China Vegetables, 2019(5): 70-75. (in Chinese)
- [8] 朱宏斌, 王晓波, 蒋光月, 房运喜, 郭志彬, 何传龙. 不同品种磷肥运筹对砂姜黑土玉米生长及产量的影响. 中国农学通报, 2014, 30(30): 209-212.
ZHU H B, WANG X B, JIANG G Y, FANG Y X, GUO Z B, HE C L. Influences of different varieties of phosphate management on corn growth and yield in Shajiang Black Soil. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(30): 209-212. (in Chinese)
- [9] 刘世亮, 介晓磊, 李有田, 谭金芳, 安志装. 不同磷源在石灰性土壤中的供磷能力及形态转化. 河南农业大学学报, 2002, 36(4): 370-373.
LIU S L, JIE X L, LI Y T, TAN J F, AN Z Z. Study on bio-availability and transformation of different phosphates in calcareous soils. Journal of Henan Agricultural University, 2002, 36(4): 370-373. (in Chinese)
- [10] 王少仁, 夏培桢. 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. 土壤通报, 2008, 39(6): 1363-1368.
WANG S R, XIA P Z. The use efficiency and slow-release rate of various P fertilizers with different application rates on calcareous soil. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(6): 1363-1368. (in Chinese)
- [11] 邹茸, 王秀斌, 霍文敏, 迟克宇, 范洪黎. 不同磷肥品种对苋菜镉累积的影响. 中国土壤与肥料, 2018(1): 37-42.
ZOU R, WANG X B, HUO W M, CHI K Y, FAN H L. Effects of different phosphorus fertilizers on cadmium accumulation in *Amaranthus mangostanus* L.. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(1): 37-42. (in Chinese)
- [12] 张皓禹, 张君, 张凤麟, 刘地, 危常州. 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. 水土保持学报, 2019, 33(2): 189-195.
ZHANG H Y, ZHANG J, ZHANG F L, LIU D, WEI C Z. Effects of different phosphorus fertilizer soil phosphorus availability and maize yield under drip irrigation. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 189-195. (in Chinese)
- [13] 蒋柏藩. 磷肥在土壤中的形态转化及其有效性. 土壤学进展, 1981(2): 1-11.
JIANG B F. Form transformation and availability of phosphate fertilizer in soil. Progress in Soil Science, 1981(2): 1-11. (in Chinese)
- [14] OPALA P A, OKALEBO J R, OTHIENO C O, KISINYO P. Effect of

- organic and inorganic phosphorus sources on maize yields in an acid soil in western Kenya. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86(3): 317-329.
- [15] WANG X, TANG C, GUPPY C N, SALE P W G. Phosphorus acquisition characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and white lupin (*Lupinus albus* L.) under P deficient conditions. *Plant and Soil*, 2008, 312: 117-128.
- [16] WANG Y, MARSCHNER P, ZHANG F S. Phosphorus pools and other soil properties in the rhizosphere of wheat and legumes growing in three soils in monoculture or as a mixture of wheat and legume. *Plant and Soil*, 2012, 354(1/2): 283-298.
- [17] TERRY J R, BINGAH H, ZED R. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 159-170.
- [18] BOL R, JULICH D, BRODLIN D, SIEMENS J, KAISER K, DIPPOLD M A. Dissolved and colloidal phosphorus fluxes in forest ecosystems—Almost blind spot in ecosystem research. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016(179): 425-438.
- [19] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究. *中国农业科学*, 1989, 22(3): 58-66.
- JIANG B F, GU Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(3): 58-66. (in Chinese)
- [20] 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性. *土壤学报*, 1992, 29(1): 80-86.
- SHEN R F, JIANG B F. Distribution and availability of various forms inorganic phosphorus in calcareous soils. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(1): 80-86. (in Chinese)
- [21] 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷有效性的研究. *土壤*, 1992(2): 61-64.
- JIANG B F. Study on availability of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Soils*, 1992(2): 61-64. (in Chinese)
- [22] 李新乐, 侯向阳, 穆怀彬, 李西良, 郭丰辉. 连续 6 年施磷肥对土壤磷素积累、形态转化及有效性的影响. *草业学报*, 2015, 24(8): 218-224.
- LI X L, HOU X Y, MU H B, LI X L, GUO F H. P fertilization effects on the accumulation, transformation and availability of soil phosphorus. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(8): 218-224. (in Chinese)
- [23] 杨学云, 孙本华, 古巧珍, 李生秀, 张树兰. 长期施肥对壤土磷素状况的影响. *植物营养与肥科学报*, 2009, 15(4): 837-842.
- YANG X Y, SUN B H, GU Q Z, LI S X, ZHANG S L. The effects of long term fertilization on soil phosphorus status in manural loessial soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(4): 837-842. (in Chinese)
- [24] 姚珊, 张东杰, Batbayar Javkhlan, 刘琳, 李若楠, 周江香, 张树兰, 杨学云. 冬小麦-夏玉米体系磷效率对壤土磷素肥力的响应. *植物营养与肥科学报*, 2018, 24(6): 1640-1650.
- YAO S, ZHANG D J, BATBAYAR J, LIU L, LI R N, ZHOU J X, ZHANG S L, YANG X Y. Responses of phosphorus use efficiency to soil phosphorus fertility under winter wheat-summer maize cropping in loess soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1640-1650. (in Chinese)
- [25] 金欣, 姚珊, Batbayar Javkhlan, 贾丽洁, 张树兰, 杨学云. 冬小麦—夏休闲体系作物产量和土壤磷形态对长期施肥的响应. *植物营养与肥科学报*, 2018, 24(6): 1660-1671.
- JIN X, YAO S, BATBAYAR J, JIA L J, ZHANG S L, YANG X Y. Response of wheat yield and soil phosphorus fractions to long-term fertilization under rainfed winter wheat-summer fallow cropping system. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1660-1671. (in Chinese)
- [26] 贾莉洁, 李玉会, 孙本华, 杨学云. 不同管理方式对土壤无机磷及其组分的影响. *土壤通报*, 2013, 44(3): 612-616.
- JIA L J, LI Y H, SUN B H, YANG X Y. Effect of diverse soil managements on inorganic phosphorus and its fractions in a loess soil from a long-term experiment. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 612-616. (in Chinese)
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [28] WANG J, CHU G X. Phosphate fertilizer form and application strategy affect phosphorus mobility and transformation in a drip-irrigated calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178: 914-922.
- [29] MCBEATH T M, SMERNIK R J, LOMBI E, MCLAUGHLIN M J. Hydrolysis of pyrophosphate in a highly calcareous soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(3): 856-862.
- [30] HAMILTON J G, HILGER D, PEAK D. Mechanisms of tripolyphosphate adsorption and hydrolysis on goethite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 491: 190-198.
- [31] TORRES-DORANTE L O, CLAASSEN N, STEINGROBE B, OLFS H W. Fertilizer use efficiency of different inorganic polyphosphate sources: effects on soil P availability and plant P acquisition during early growth of corn. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169(4): 509-515.
- [32] GAO Y J, WANG X W, SHAH J A, CHU G X. Polyphosphate fertilizers increased maize (*Zea mays* L.) P, Fe, Zn, and Mn uptake by decreasing P fixation and mobilizing microelements in calcareous soil.

- Journal of Soils and Sediments, 2019, 20(1): 1-11.
- [33] 李书田, 黄德明. 磷酸一铵与磷酸二铵在石灰性土壤上的行为. 土壤肥料, 1994(4): 33-35.
- LI S T, HUANG D M. Behavior of monoammonium phosphate and diammonium phosphate in calcareous soil. Soils and Fertilizers, 1994(4): 33-35. (in Chinese)
- [34] 金亮, 周健民, 王火焰, 陈小琴, 杜昌文. 石灰性土壤肥力磷酸一铵的转化及其机制探讨. 中国土壤与肥料, 2008(6): 5-10.
- JIN L, ZHOU J M, WANG H Y, CHEN X Q, DU C W. Transformation and translocation of fertilizer-P with monoammonium phosphate application in fertisphere in calcareous soil. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008(6): 5-10. (in Chinese)
- [35] KHAN A, LU G Y, AYAZ, ZHANG H T, WANG R J, LV F L, YANG X Y, SUN B H, ZHANG S L. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, (256): 1-11.
- [36] BAI Z H, LI H G, YANG X Y, ZHOU B K, SHI X J, WANG B R, LI D C, SHEN J B, CHEN Q, WEI Q, OENEMA O, ZHANG F S. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. Plant and Soil, 2013, 372(1/2): 27-37.
- [37] THOMSON C J, MARSCHNER H, ROMHELD V. Effect of nitrogen fertilizer form on pH of the bulk soil and rhizosphere, and on the growth, phosphorus, and micronutrient uptake of bean. Journal of Plant Nutrition, 1993, 16(3): 493-506.
- [38] CHIEN S H, GEARHART M M, VILLAGARCIA S. Comparison of ammonium sulfate with other nitrogen and sulfur fertilizers in increasing crop production and minimizing environmental impact: a review. Soil Science, 2011, 176 (7): 327-335.
- [39] LI G H, LI H G, LEFFELAAR P A, SHEN J B, ZHANG F S. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of fababean (*Vicia faba* L.) and maize (*Zea mays* L.) grown in calcareous and acid soils. Crop and Pasture Science, 2015, 66(11): 1151-1160.
- [40] 黄致华, 王娟, 李言言, 侯建伟, 李留仁, 危常州. 复配酸化对滴灌条件下石灰性土壤 pH、磷有效性及玉米吸收的影响. 新疆农业科学, 2017, 54(4): 660-666.
- HUANG Z H, WANG J, LI Y Y, HOU J W, LI L R, WEI C Z. Effects of complex acidic materials application on the growth of maize, soil pH and available P in calcareous soil under drip irrigation. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(4): 660-666. (in Chinese)
- [41] 黄运湘, 曾希柏, 张杨珠, 林志灵, 孙楠, 王道龙. 湖南省丘岗茶园土壤的酸化特征及其对土壤肥力的影响. 土壤通报, 2010, 41(3): 633-638.
- HUANG Y X, ZENG X B, ZHANG Y Z, LIN Z L, SUN N, WANG D L. Tea garden soil acidification and its impact on soil fertility in hillock of hunan province. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 633-638. (in Chinese)
- [42] 周雨舟, 曹胜, 黄兰, 刘双, 甘思铭, 苏婷. 湖南省柑橘园土壤酸度与交换性氢、铝的关系. 浙江农业科学, 2019, 60(7): 1120-1122.
- ZHOU Y Z, CAO S, HUANG L, LIU S, GAN S M, SU T. Relationship between soil acidity and exchangeable hydrogen and aluminum in Citrus Orchards of Hunan Province. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, 60(7): 1120-1122. (in Chinese)
- [43] 周雨舟, 刘沛, 谭洁, 曹胜, 黄兰. 湖南柑橘园土壤无机磷素组分及其生物有效性. 湖南农业科学, 2019(7): 55-57, 60.
- ZHOU Y Z, LIU P, TAN J, CAO S, HUANG L. Inorganic phosphorus components of soil and bioavailability in citrus orchard of Hunan Province. Hunan Agricultural Sciences, 2019(7): 55-57, 60. (in Chinese)
- [44] 王永刚. 我国北方土壤速效磷测定值与植物吸收的相关性研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2010.
- WANG Y G. Study on correlation of measured values of soil available phosphorus and plant uptake in northern China[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2010. (in Chinese)
- [45] 张立花, 张辉, 黄玉芳, 叶优良, 张占胜, 詹宗立. 施磷对玉米吸磷量、产量和土壤磷含量的影响及其相关性. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 801-809.
- ZHANG L H, ZHANG H, HUANG Y F, YE Y L, ZHANG Z S, ZHAN Z L. Effect of phosphorus application on soil available phosphorus and maize phosphorus uptake and yield. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7): 801-809. (in Chinese)
- [46] 范晓晖, 刘芷宇. 根际 pH 环境与磷素利用研究进展. 土壤通报, 1992, 23(5): 238-241.
- FAN X H, LIU Z Y. Advances in Rhizosphere pH environment and phosphorus utilization. Chinese Journal of Soil Science, 1992(5): 238-241. (in Chinese)
- [47] 赵靛, 侯振安, 柴颖, 张扬, 黄婷, 毛家双. 长期施磷对灰漠土无机磷形态的影响. 水土保持学报, 2014, 28(3): 236-242.
- ZHAO J, HOU Z A, CHAI Y, ZHANG Y, HUANG T, MAO J S. Effects of P rate on soil inorganic phosphorus forms in grey desert soil. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 236-242. (in Chinese)
- [48] 吕家珑, 刘文革, 王旭东, 李祖荫. 长期施肥对土壤无机磷形态组成的影响. 西北农业大学学报, 1995, 23(3): 51-54.
- LÜ J L, LIU W G, WANG X D, LI Z Y. Effects of long term fertilization on inorganic-P form composition in soil. Acta University Agriculture Boreali-Occidentalis 1995, 23(3): 51-54. (in Chinese)

- [49] 匡晓静. 利用黄磷尾气窑炉法生产钙镁磷肥技术. 磷肥与复肥, 2018, 33(1): 20-22.
- KUANG X J. Production technology of FCMP by kiln process with yellow phosphorus tail gas. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2018, 33(1): 20-22. (in Chinese)
- [50] PHILEN O D, LEHR J R. Reactions of ammonium polyphosphates with soil minerals. *Soil Science Society of America Journal*, 1967, 31(2): 196-199.
- [51] MCBEATH T M, LOMBI E, MCLAUGHLIN M J, BUNEMANN E. Pyrophosphate and orthophosphate addition to soils: sorption, cation concentrations, and dissolved organic carbon. *Soil Research*, 2007, 45(45): 237-245.
- [52] 陈小娟, 陈煜林, 林净净, 杨依彬, 胡克纬, 张承林. 不同聚合度的聚磷酸铵对土壤磷动态转化及有效性的影响. 浙江农业学报, 2019, 31(10): 1681-1688.
- CHEN X J, CHEN Y L, LIN J J, YANG Y B, HU K W, ZHANG C L. Conversion dynamics and effectiveness of ammonium polyphosphate with different polymerization degrees to soil phosphorus. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(10): 1681-1688. (in Chinese)
- [53] 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. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1294-1302.
- GAO Y J, KANG L F, CHU G X. Polymerization degree and rate of polyphosphate fertilizer affected the availability of phosphorus, Fe, Mn and Zn in calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1294-1302. (in Chinese)
- [54] 林治安, 谢承陶, 张振山, 张雪瑶. 旱作农田石灰性土壤磷素形态、转化与施肥. 土壤肥料, 1996(6): 26-28.
- LIN Z A, XIE C T, ZHANG Z S, ZHANG X Y. Forms, transformation and fertilization of phosphorus in calcareous soil of dryland. *Soils and Fertilizers*, 1996(6): 26-28. (in Chinese)
- [55] 冯固, 杨茂秋, 白灯莎, 黄全生. 用 ^{32}P 示踪法研究石灰性土壤中磷素的形态及有效性变化. 土壤学报, 1996, 33(3): 301-307.
- FENG G, YANG M Q, BAI D S, HUANG Q S. Study on changes in fractions and availability of phosphorus in calcareous soil by ^{32}P tracer method. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(3): 301-307. (in Chinese)
- [56] 李若楠, 王政培, BATBAYAR Javkhlán, 张东杰, 张树兰, 杨学云. 等有机质壤土有效磷和无机磷形态的关系. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3852-3865.
- LI R N, WANG Z P, BATBAYAR J, ZHANG D J, ZHANG S L, YANG X Y. Relationship between soil available phosphorus and inorganic phosphorus forms under equivalent organic matter condition in a tier soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3852-3865. (in Chinese)
- [57] 张英鹏, 陈清, 李彦, 李国生, 孙明, 刘兆辉. 不同磷水平对山东褐土耕层无机磷形态及磷有效性的影响. 中国农学通报, 2008, 24(7): 245-248.
- ZHANG Y P, CHEN Q, LI Y, LI G S, SUN M, LIU Z H. Effect of phosphorus levels on form and bioavailability of inorganic P in plough layer of cinnamon soil in Shandong province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(7): 245-248. (in Chinese)
- [58] 刘世亮. 不同磷源在石灰性土壤作物根际的形态转化与有效性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2000.
- LIU S L. Studies on transformation and availability of different phosphorus in crop rhizosphere in calcareous chao soils[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2000. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)