



等有机质塋土有效磷和无机磷形态的关系

李若楠, 王政培, BATBAYAR Javkhlan, 张东杰, 张树兰, 杨学云

(西北农林科技大学资源环境学院/农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】在有机质含量相同的土壤上探讨土壤无机磷组分对有效磷的贡献, 为合理的磷肥管理提供决策依据。【方法】采集并筛选陕西关中平原冬小麦-夏玉米种植区塋土有机质含量相近 ($10.03\text{--}10.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 有效磷含量梯度 (平均分别为 10.73 、 18.06 、 20.61 、 24.01 、 30.73 、 43.69 和 $58.58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的土壤样品, 采用蒋柏藩-顾益初改进的 Chang 和 Jackson 无机磷分级方法进行磷组分测定。【结果】西北冬小麦-夏玉米种植区耕层土壤的无机磷以钙磷为主, 约占无机磷总量的 66.67% , 其中磷酸二钙 ($\text{Ca}_2\text{-P}$), 磷酸八钙 ($\text{Ca}_8\text{-P}$) 和磷灰石 ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$) 分别占 2.80% 、 16.80% 和 47.09% ; 铝结合的磷酸盐 (Al-P), 铁结合的磷酸盐 (Fe-P) 和闭蓄态磷酸盐 (O-P) 分别占 16.28% 、 5.23% 和 11.81% 。随着 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和 O-P 含量的增加, Olsen P 呈显著线性增加; 磷活化系数 (土壤有效磷与全磷之比, PAC) 与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和 O-P 呈显著线性正相关关系。通径分析结果表明, 该区域土壤无机磷对土壤有效磷 (Olsen P) 的贡献依次为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ (0.974) $>$ Al-P (0.186) $>$ $\text{Ca}_8\text{-P}$ (0.182) $>$ Fe-P (0.150) $>$ $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (0.007) $>$ O-P (-0.074), 各形态无机磷对磷活化系数 (PAC) 的贡献为: $\text{Ca}_2\text{-P}$ (0.768) $>$ Al-P (0.082) $>$ $\text{Ca}_8\text{-P}$ (0.071) $>$ Fe-P (-0.018) $>$ $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (-0.055) $>$ O-P (-0.388), 与土壤磷组分对有效磷的贡献大体一致。逐步回归分析结果表明, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 对 Olsen P 贡献最大, 但仅 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 对 PAC 的贡献最大。【结论】在有机质相同或相近条件下, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是陕西关中平原小麦-玉米种植区塋土最有效的磷源。土壤磷有效性的提高主要通过增加高有效性的磷形态比 (例如 $\text{Ca}_2\text{-P}$) 和缓效磷形态 (如 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P), 降低土壤中有效性极低的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的比例来实现的。由此看来, 关中平原长期施用磷肥土壤磷仍主要以有效性相对较高的磷素形态存在。

关键词: 无机磷形态; 冬小麦-夏玉米体系; 塋土; 磷有效性; 有效磷梯度

Relationship Between Soil Available Phosphorus and Inorganic Phosphorus Forms Under Equivalent Organic Matter Condition in a Tier Soil

LI RuoNan, WANG ZhengPei, BATBAYAR Javkhlan, ZHANG DongJie, ZHANG ShuLan, YANG XueYun

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: 【Objective】Investigating the contribution of inorganic phosphorus (P) fractions to soil available phosphorus under equivalent soil organic matter content might be helpful in development of phosphate fertilizer management strategy whereby to improve phosphorus use efficiency in a given soil. 【Method】We collected and screened the soils with a gradient of Olsen P level but the quite similar soil organic matter content (SOC ranges from 10.03 to $10.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) in a Tier soil under winter wheat-summer maize cropping in Guanzhong Plain of Shaanxi Province. The Olsen P contents of the selected soil samples were 10.73 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 18.06

收稿日期: 2019-06-06; 接受日期: 2019-09-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200205)

联系方式: 李若楠, E-mail: liruonan0104@163.com. 通信作者杨学云, E-mail: xueyunyang@hotmail.com

mg·kg⁻¹, 20.61 mg·kg⁻¹, 24.01 mg·kg⁻¹, 30.73 mg·kg⁻¹, 43.69 mg·kg⁻¹, and 58.58 mg·kg⁻¹, respectively. We then analyzed the soil inorganic phosphorus forms with the phosphorus fractionation method developed by Chang & Jackson and modified by Jiang & Gu.

【Result】The results showed that the calcium bounded phosphorus fraction was the dominant form in the cultivated soil in the northwestern winter wheat-summer maize planting area, accounting for 66.67% of the total amount of inorganic phosphorus, of which dicalcium phosphate (Ca₂-P), octa-calcium phosphate (Ca₈-P) and apatite (Ca₁₀-P) account for 2.80%, 16.80% and 47.09%, respectively, on average; and aluminum bounded phosphate (Al-P), iron bounded phosphate (Fe-P) and occluded phosphate (O-P) composed of 16.28%, 5.23% and 11.81%, respectively. Soil Olsen P was increased significantly and linearly with the increasing content of Ca₂-P, Ca₈-P, Ca₁₀-P, Al-P, Fe-P and O-P; while the phosphorus activation coefficients, defined as the ratio of soil Olsen P to total P, were correlated significantly positively and linearly to the content of Ca₂-P, Ca₈-P, Al-P, Fe-P and O-P. The results of path analysis showed that the contribution of inorganic phosphorus to soil available phosphorus (Olsen P) in Guanzhong Plain area of Shaanxi Province was in the order of Ca₂-P (0.974) > Al-P (0.186) > Ca₈-P (0.182) > Fe-P (0.150) > Ca₁₀-P (0.007) > O-P (-0.074), the contribution of inorganic phosphorus to phosphorus activation coefficient (PAC) was Ca₂-P (0.768) > Al-P (0.082) > Ca₈-P (0.071) > Fe-P (-0.018) > Ca₁₀-P (-0.055) > O-P (-0.388), which was consistent with the contribution of soil phosphorus component to available phosphorus. The results of stepwise regression analysis showed that Ca₂-P and Ca₈-P were the major two contributors to Olsen P, but the Ca₂-P contributed the most to PAC.【Conclusion】Under the same or similar soil organic matter condition, Ca₂-P was the most effective phosphorus source in Tier soil of wheat-maize growing area in Guanzhong Plain of Shaanxi Province. The increase of soil phosphorus availability was mainly achieved by increasing the proportion of phosphorus forms of readily available and relatively high availability such as Ca₂-P, Ca₈-P and Al-P, and reducing the proportion of very low availability forms, i.e. Ca₁₀-P. Generally, under current cropping system, the application of phosphate fertilizers mainly kept the soil phosphorus in pools of available forms in the Guanzhong Plain.

Key words: forms of inorganic phosphorus; winter wheat summer maize cropping; tier; phosphorus availability; Olsen P gradient

0 引言

【研究意义】磷是植物生长所必需的营养元素之一, 在植物生理代谢和能量转化过程中都起着关键作用, 促进植物的生长和发育^[1]。直到 20 世纪 80 年代初, 我国北方地区缺磷现象仍然十分普遍, 实践证明施用磷肥是提高农作物产量最有效和直接的举措, 作物生长所需的磷素大部分靠磷肥投入获取。而磷肥一旦施入土壤后可与土壤组分发生反应从而形成难以被作物吸收利用的形态^[2], 从而使磷素有效性降低, 因此一般施磷量都高于作物可利用磷量很多, 导致我国的磷肥当季作物利用率普遍较低, 平均仅为 10%—20%^[3]。据调查我国陕西省关中平原冬小麦-夏玉米种植区在小麦和玉米季施磷量过高的农户分别占了六成和两成^[4]。大量磷肥投入导致磷素在土壤中累积, 不仅浪费了磷肥资源, 也增加了磷素通过地表径流或亚地表径流(淋溶)流失从而造成水体富营养化的风险^[5-6]。因此, 合理施用磷肥对保证该地区小麦/玉米高产、磷肥资源高效利用以及防止潜在的环境污染都十分重要。【前人研究进展】长期持续施磷可能导致土壤磷形态和磷素有效性发生改变^[7]。土壤中的磷素主要以有机和无机形态存在^[8], 土壤类型和土地利

用方式不同, 无机磷和有机磷的含量和各自所占的比例也有所不同, 有机磷需要转化成无机磷后才能被植物吸收利用^[9]。无机磷(Pi)是石灰性土壤磷的主要组分, 占土壤全磷的 75%—85%^[10]。国内外研究结果表明各形态的无机磷都对作物磷素营养有重要作用, 但是只有其中的一小部分对作物来说是直接有效的, 并且不同形态的无机磷其有效性也不尽相同, 从而导致土壤供磷能力的差异^[11-12]。由于直接测定土壤中磷的各种形态化合物很困难, 目前多采用土壤磷素化学分级方法来研究土壤磷的各形态及其构成比例与土壤有效磷的关系, 再进一步分析土壤磷素的有效性^[13], 这样的方法对评价土壤磷库大小和磷素供应状况至关重要^[14-15]。土壤磷的有效性是指土壤中存在的磷能为植物吸收利用的程度, 不同土壤中磷素的有效性不同主要取决于土壤中磷的存在形态^[16]。除此之外, 土壤磷素有效性还与土壤 pH、黏粒、CEC、有机质含量等因素密切相关^[17-18], 尤其是有机质调节磷素有效性的作用是至关重要的^[19], 研究结果表明, 长期施用有机肥能显著提高土壤磷活化系数^[20], 提高土壤有机质水平相应地会增加土壤中的有效和缓效磷源容量^[21], 从而改善土壤的供磷条件、提高土壤的供磷潜力^[22]。目前关于磷素形态对有效磷的贡献及其与磷素有效性的

关系的研究大多数基于长期定位施肥试验,主要集中在不同土地利用方式、不同土壤类型及不同施肥处理等方面^[23-25],这种条件下土壤有机质含量会有很大差异且随着试验年限不断地变化^[26],因此,无机磷形态研究结果的解读可能因有机质含量差异对磷吸附位点的掩蔽不同^[27]而存在一些不确定性。赵晓齐和鲁如坤利用双氧水氧化去除土壤有机碳的方法研究了有机物添加对磷吸附的影响,表明有机质对磷素的吸附位点存在掩蔽作用,从而减少磷的吸附。主要由于土壤中的有机质可以提供大量阴离子,这些有机阴离子参与竞争结合金属氧化物钙、铁及铝等固磷基质上的吸附点位,从而抑制磷的吸附固定。同时,有机物分解过程中产生的有机酸能溶解土壤中难溶态的磷酸盐,对磷起活化作用^[22,28]。【本研究切入点】目前了解的文献,在有机质相同的同一类土壤上,利用有效磷水平梯度的土壤研究无机磷组分及其对土壤有效磷贡献的研究较少。【拟解决的关键问题】由此,本文采集陕西关中平原小麦-玉米种植区壤土有机质含量相近但 Olsen P 含量不同的土壤样品,采用蒋柏藩-顾益初改进的无机磷分级方法进行磷组分测定,研究无机磷形态及其对有效磷的贡献,以期为合理施用磷肥及提高磷的植物有效性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为陕西省中部的关中平原冬小麦-夏玉米一年两熟区,该区属暖温带半湿润气候,平均海拔约 500 m,年均降水量约 500—650 mm。冬小麦于 10 月初播种,次年 6 月中旬收获,夏玉米在小麦收获后即时播种,于当年 9 月底 10 月初收获。土壤为土垫旱耕人为土,多为石灰性土壤。耕层土壤有机质含量平均为 $16.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $95.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 (Olsen P) $20.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,可交换钾 $169.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 样品采集

土壤样品采集于 2011 年 8—10 月,根据地(市)小麦-玉米种植面积选择代表性县(区)。涉及陕西关中地区 3 个地(市)的 10 个具有代表性的县(区),包括宝鸡市的陈仓区、岐山县和扶风县;咸阳市的兴平县、泾阳县、三原县和武功县及渭南市的临渭区、蒲城县和富平县(图 1)。每个县(区)选择 4—18 个乡(镇),每个乡(镇)选择 3—10 个村,每个村选择 4—5 个地块为采样区(点),每个采样区(点)

约 $0.5—0.8 \text{ hm}^2$ 。用直径约 2.8 cm 土钻按棋盘格在采样区(点)采集耕层(0—20 cm)土样 20 钻,混合均匀,装入布袋带回实验室,拣去石砾和动植物残体,风干并过 2 mm 及 100 目筛备用。共采集壤土样品 458 个。在分析基本化学性质的基础上,选择有机碳含量介于 $10.03—10.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤样品,并在其中选择有效磷梯度 (Olsen P 含量 $10.73—58.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤样品 7 组 (S1、S2、S3、S4、S5、S6 和 S7),各组土壤 Olsen P 水平分别为: 10.73、18.06、20.61、24.01、30.73、43.69 和 $58.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1)。每个 Olsen P 水平土壤选择 3 个 Olsen P 含量基本相等(变异系数小于 3.39%) 的土壤样本做重复,共有土壤样品 21 个。



图 1 陕西省关中平原冬小麦-夏玉米种植区土壤样品采集点分布图

Fig. 1 The distribution of soil sampling sites in Guanzhong Plain of Shaanxi Province under winter wheat-summer maize cropping

1.3 样品分析

采用 Olsen 法测定土壤速效磷含量、重铬酸钾-外加热法测定土壤有机碳含量^[8]。土壤无机磷分级用蒋柏藩-顾益初法^[29],分别测定土壤样品的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 等各形态无机磷含量。供试土壤基本化学性质见表 1。

表 1 陕西关中平原供试²土壤基本化学性质

Table 1 Soil chemical properties of investigated tier soil collected in Guanzhong Plain of Shaanxi Province

土壤样品	有效磷含量	有机碳含量	酸度(1 : 2.5)	全磷含量
Soil sample	Olsen P	SOC	pH	Total P
	(mg·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)		(g·kg ⁻¹)
S1	10.73	10.68	7.41	0.95
S2	18.06	10.34	7.29	0.96
S3	20.61	10.21	7.10	0.86
S4	24.01	10.54	7.86	1.08
S5	30.73	10.06	8.04	1.01
S6	43.69	10.49	7.54	1.24
S7	58.58	10.03	7.87	1.47

1.4 数据处理与分析

数据分析采用 SPSS 软件进行单因素方差分析，当方差分析显著时，采用 LSD 法进行多重比较，显著水平 $P<0.05$ ，采用通径分析和逐步回归分析无机磷组分对有效磷的贡献。

2 结果

2.1 不同有效磷水平下土壤各形态无机磷含量

图 2 为不同有效磷梯度²土壤各形态无机磷含量。有效磷含量从 10.73 mg·kg⁻¹ 增加到 58.58 mg·kg⁻¹ 时，各形态无机磷均有不同程度的增加。Ca-P 变幅为

455.71—684.92 mg·kg⁻¹ (图 2-D)，其中 Ca₂-P 的变化范围为 10.55—46.07 mg·kg⁻¹ (图 2-A)；Ca₈-P 为 96.5—231.17 mg·kg⁻¹ (图 2-B)；Ca₁₀-P 为 347.73—446.32 mg·kg⁻¹ (图 2-C)；Al-P: 81.02—258.65 mg·kg⁻¹ (图 2-E)；Fe-P: 35.89—62.00 mg·kg⁻¹ (图 2-F)；O-P: 76.39—124.03 mg·kg⁻¹ (图 2-G)。土壤样品 S1—S5 各形态无机磷含量由高到低的顺序为 Ca₁₀-P>Ca₈-P>Al-P>O-P>Fe-P>Ca₂-P；S6、S7 稍有不同，Al-P>Ca₈-P (图 2)。

Ca₂-P 的含量随着有效磷浓度的升高显著增加，土壤 Olsen P 为 58.58 mg·kg⁻¹ (S7) 的 Ca₂-P 含量最大为 46.07 mg·kg⁻¹，显著高于其他处理 (图 2-A)。依次为 S7>S6>S5>S4≈S3≥S2≥S1。Ca₈-P 和 Al-P 表现为 S7>S6>S1-5，有效磷低于 S6 的几个土壤样品随有效磷的增加 Ca₈-P 或 Al-P 有增加趋势但彼此间均无明显差异。Ca₁₀-P 各个土壤样品均无差异。Ca-P 总量和 O-P 均为 S6 和 S7 无差异但均显著高于其他土壤，后者则无差异 (图 2)。

2.2 不同有效磷水平下土壤各形态无机磷相对含量

表 2 列出了不同有效磷水平下土壤无机磷相对含量。由表 2 可知，不同有效磷含量下不同形态的磷所占无机磷的比例有所差异：Ca₂-P 约占无机磷总量的 1.63%—4.08%，平均 2.80%；Ca₈-P 平均占 16.80%，变幅为 13.92%—20.43%；Al-P 为 16.28%，变幅 12.32%—22.97%，和 Ca₈-P 几乎相同；Fe-P 为 5.23%，

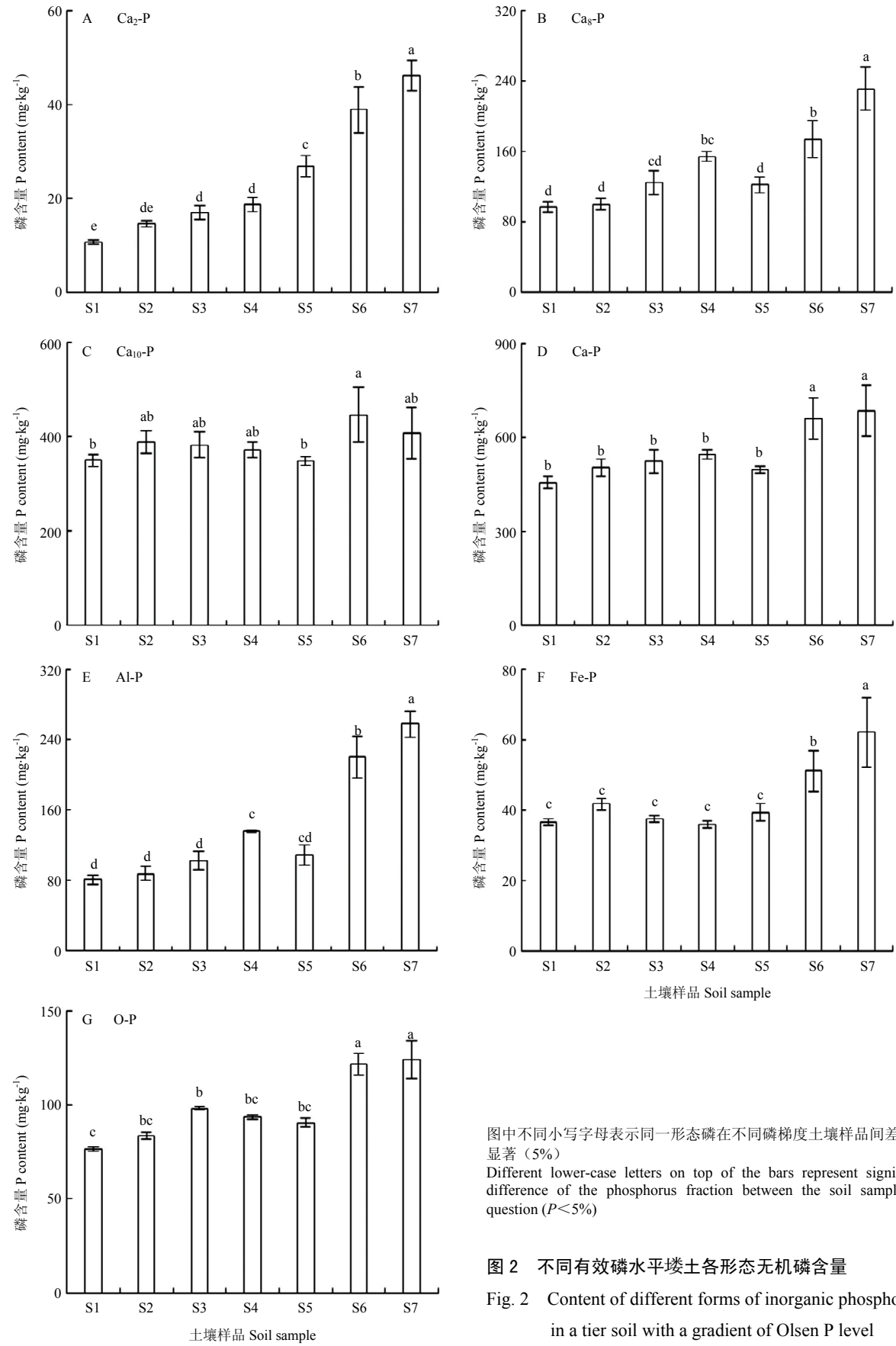
表 2 ²土壤不同有效磷水平下土壤无机磷相对含量 (%)

Table 2 The proportion of different forms of inorganic phosphorus to total inorganic phosphorus in soils with a gradient of Olsen P level of a tier soil

土壤样品	各形态无机磷占总无机磷的百分比 Proportion of inorganic phosphorus fraction to total (%)						
	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Ca-P	Al-P	Fe-P	O-P
S 1	1.63c	14.84bc	53.65a	70.12a	12.50c	5.63ab	11.76a
S 2	2.02bc	13.92c	54.24a	70.19a	12.32c	5.84a	11.65a
S 3	2.23b	16.26b	50.17ab	68.66a	13.46c	4.93ab	12.95a
S 4	2.31b	19.05a	45.83bc	67.18a	16.84b	4.44b	11.54a
S 5	3.64a	16.61b	47.30b	67.54a	14.83bc	5.36ab	12.27a
S 6	3.69a	16.48b	42.39c	62.57b	21.02a	4.84ab	11.56a
S 7	4.08a	20.43a	35.95d	60.46b	22.97a	5.60ab	10.97a
Mean	2.80	16.80	47.08	66.67	16.28	5.23	11.81

同列数据后不同小写字母表示同一无机磷组分相对含量在不同土壤样品间差异显著 (5%)

Different lowercase letters within a column indicate significant differences of the relative content of phosphorus fraction between soil samples at the 5% probability level



图中不同小写字母表示同一形态磷在不同磷梯度土壤样品间差异达显著 (5%)
Different lower-case letters on top of the bars represent significant difference of the phosphorus fraction between the soil samples in question ($P<5\%$)

图 2 不同有效磷水平壤土各形态无机磷含量
Fig. 2 Content of different forms of inorganic phosphorus in a tier soil with a gradient of Olsen P level

变幅 4.44%—5.84%；O-P 平均占 11.81%，变幅 10.97%—12.95%；而 Ca₁₀-P 约占总量的 47.08%，变幅 35.95%—54.24%，是含量最高的一个组分。Ca-P 仍是无机磷的主要形态，约占总量的 60%—70%，Al-P、Fe-P、O-P 这 3 种形态的无机磷大致占总无机磷的 30%—40%。随着有效磷含量升高，Ca₂-P、Ca₈-P 和 Al-P 占无机磷比重有提高，Fe-P 和 O-P 维持在一个水平，而 Ca₁₀-P 占比降低。

2.3 土壤各形态无机磷含量及相对含量和有效磷含量的关系

为了进一步探讨土壤有效磷含量和各形态无机磷

组分间的关系，对土壤 Olsen P 含量和各组分无机磷做散点图（图 3），可以看出耕层（0—20 cm）土壤 Olsen P 含量和 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P 之间均呈极显著正相关关系（ $P<0.01$ ），其决定系数 R^2 分别为 0.95、0.80、0.88、0.69、0.70。Olsen P 含量与 Ca₁₀-P 呈显著正相关关系（ $P<0.05$ ），其决定系数 R^2 为 0.20（图 3）。

尽管各形态无机磷和土壤 Olsen P 含量均呈现显著或极显著正相关，但随着 Olsen P 升高，只有 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 相对含量显著升高，Ca₁₀-P 含量显著降低。Fe-P 和 O-P 则维持原有水平（图 4）。

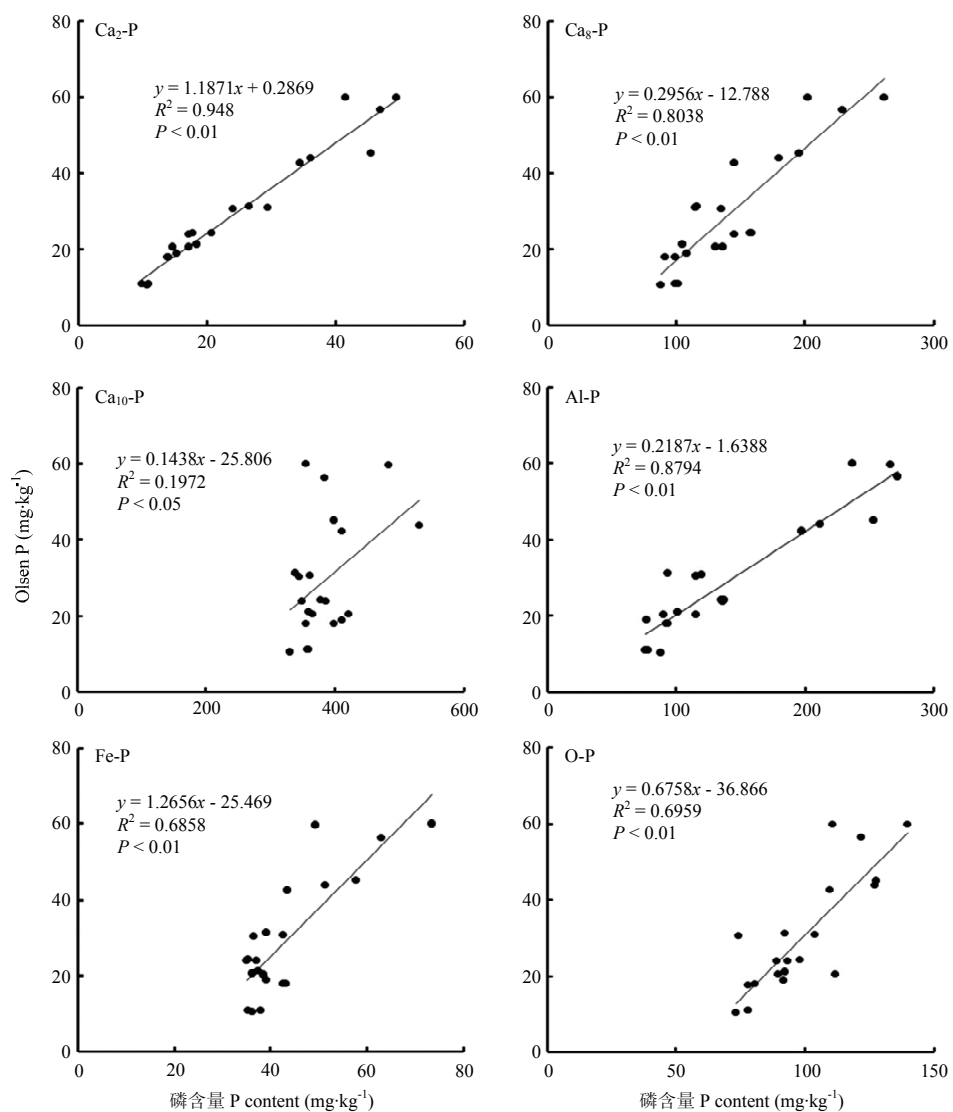


图 3 不同有效磷水平₂土各组分无机磷含量与有效磷含量的关系

Fig. 3 The relationship between the content of different forms of inorganic phosphorus and the content of Olsen P in a tier soil with a gradient of Olsen P level

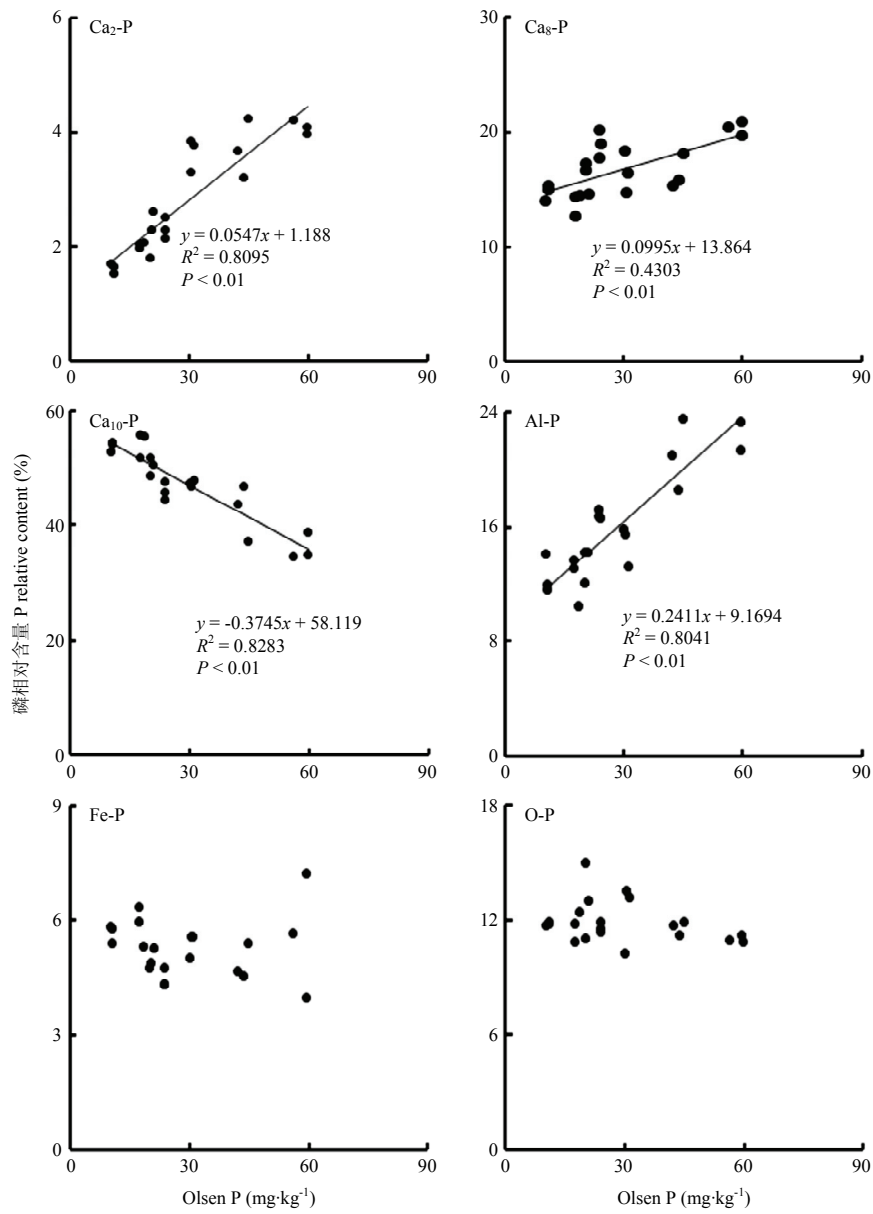


图 4 不同有效磷水平壤土各形态无机磷相对含量与有效磷的关系

Fig. 4 The relationship between the relative content of inorganic phosphorus fractions and the content of Olsen P in a tier soil with a gradient of Olsen P level

2.4 土壤磷组分与磷活化系数（PAC）的关系

土壤有效磷是全磷中活性最高的一部分，土壤有效磷与全磷之比被定义为磷素活化系数（phosphorus activation coefficient），用以表征土壤磷素有效性。由于仅仅研究有效磷和土壤磷组分之间的相关关系不能充分地说明磷素有效性与各形态无机磷的关系^[30]，为进一步阐明土壤各组分磷对磷素有效性的影响，进行了磷活化系数与土壤磷组分的相关分析（图 5）。由

图 5 可知，磷活化系数和 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P 之间呈极显著正相关关系（ $P < 0.01$ ），其决定系数 R^2 分别为 0.72、0.50、0.58、0.45、0.50。磷活化系数（PAC）与 Ca₁₀-P 之间不相关。

2.5 土壤磷组分对有效磷的贡献

简单的相关分析只是表明某一种形态的无机磷和有效磷之间的相关程度，并没有把其他形态磷素的影响考虑进去，而土壤各形态的无机磷之间是处于一个

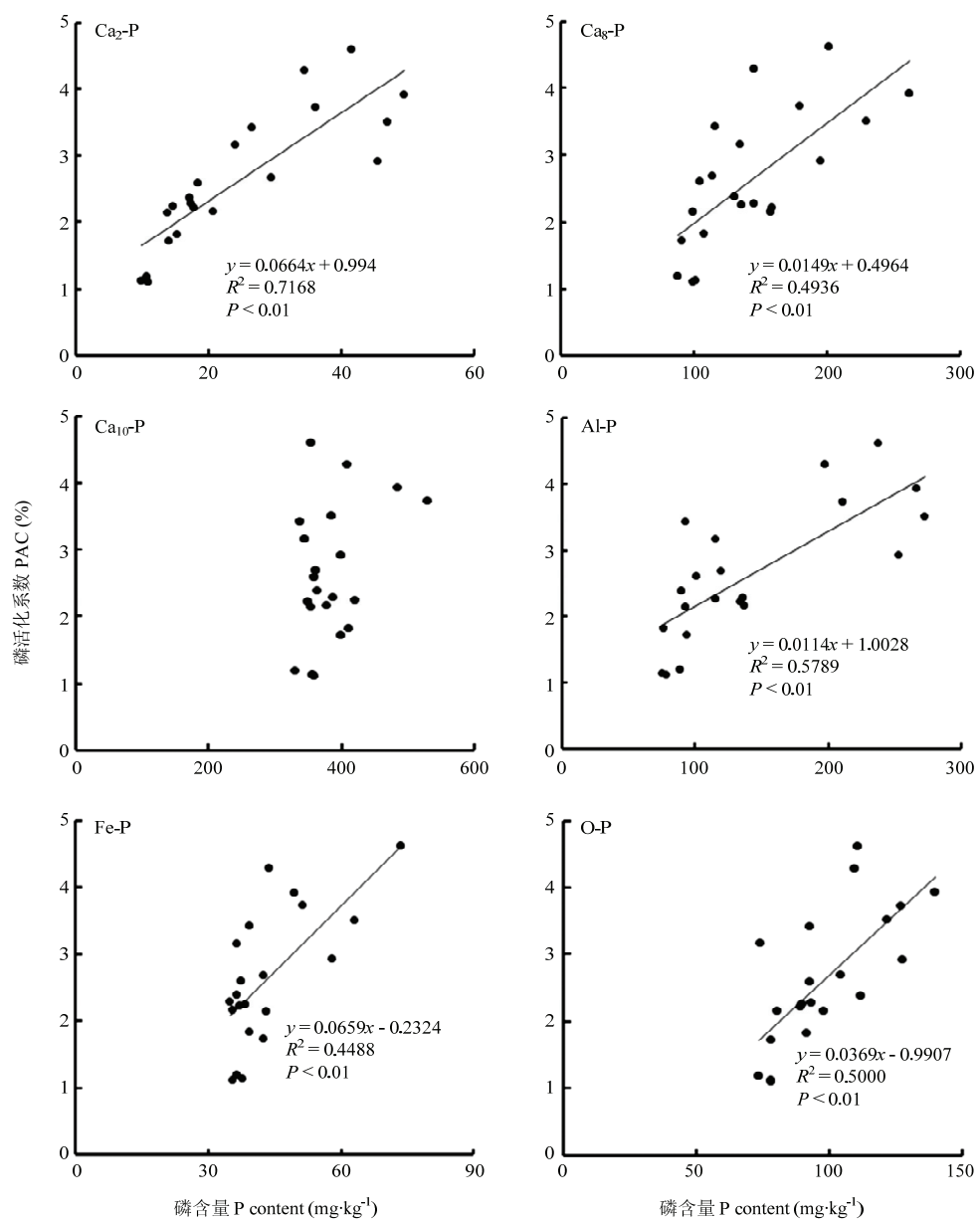


图 5 不同有效磷水平¹土各组分无机磷含量与磷活化系数（PAC）的关系

Fig. 5 Phosphorus activation coefficient (PAC) as a function of the concentration of different forms of inorganic phosphorus in a tier soil with a gradient of Olsen P level

动态平衡之中。简单相关分析无法完全了解土壤各组分磷对有效磷的贡献大小。为此采用通径分析研究土壤磷组分对有效磷的贡献。通径分析可以说明不同无机磷形态对土壤有效磷的影响是直接（直接通径系数），还是该形态通过其他形态的无机磷对有效磷的影响是间接影响（间接通径系数）。土壤无机磷组分与有效磷含量之间的通径分析结果如表 3 所示。由表 3 可知土壤无机磷形态对有效磷的直接影响（直接

通径系数）大小顺序为：Ca₂-P（0.974）>Al-P（0.186）>Ca₈-P（0.182）>Fe-P（0.150）>Ca₁₀-P（0.007）>O-P（-0.074）。其中有效磷与 Ca₂-P 的相关系数最大，说明它们的相关程度最高，表明 Ca₂-P 是作物最有效的磷源。O-P 对有效磷的贡献为负值，Ca₁₀-P 虽然也与有效磷呈显著正相关关系（图 3），但是其直接通径系数非常小，仅为 0.007，并且其他形态的无机磷通过 Ca₁₀-P 的通径系数也非常小，所以 Ca₁₀-P 和

O-P 为作物较难利用的磷源。虽然 Ca₈-P、Al-P、Fe-P 与有效磷呈极显著正相关,但直接作用较小,而它们和 Ca₂-P 间接通径系数较大,表明这些无机磷组分通过对影响其他形态的无机磷对有效磷产生间接起作用。

为了进一步检验各形态无机磷对有效磷影响的显著性,采用了逐步回归分析,分析结果表明 Ca₁₀-P、Fe-P、O-P 这 3 种形态的磷对有效磷影响不显著(表 4),Ca₂-P、Al-P、Ca₈-P 这 3 种形态的无机磷对有效磷影响都达到显著水平。综合相关分析和通径分析可以看出,无机磷组分的变化都或多或少地影响到土壤有效磷水平,但影响程度存在差异。

表 3 土壤无机磷组分与有效磷含量之间的通径分析

Table 3 Path analysis for soil available phosphorus content (Olsen P) as a function of soil inorganic phosphorus fractions

作用因子 Factor	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect						与 y 的相关系数 Correlation coefficient with y
		x ₁ →y	x ₂ →y	x ₃ →y	x ₄ →y	x ₅ →y	x ₆ →y	
Ca ₂ -P (x ₁)	0.974		0.160	0.003	0.175	0.119	-0.065	0.974
Ca ₈ -P (x ₂)	0.182	0.855		0.004	0.174	0.103	-0.063	0.897
Ca ₁₀ -P (x ₃)	0.007	0.439	0.093		0.094	0.039	-0.048	0.444
Al-P (x ₄)	0.186	0.917	0.170	0.004		0.121	-0.063	0.938
Fe-P (x ₅)	0.150	0.773	0.125	0.002	0.151		-0.047	0.828
O-P (x ₆)	-0.074	0.852	0.154	0.005	0.158	0.095		0.834

y 为有效磷含量。表 4 同 y: Denotes soil available phosphorus content. The same as Table 4

表 4 土壤无机磷组分与有效磷含量之间的逐步回归分析

Table 4 Stepwise regression analysis between soil inorganic phosphorus fractions and available phosphorus content

因子 Factor	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect			与 y 的相关系数 Correlation coefficient with y	显著水平 Significant level
		x ₁ →y	x ₂ →y	x ₅ →y		
Ca ₂ -P(x ₁)	0.684		0.166	0.123	0.974	0.000
Ca ₈ -P(x ₂)	0.189	0.601		0.106	0.897	0.064
Fe-P(x ₅)	0.155	0.543	0.130		0.828	0.054

表 5 土壤无机磷组分与磷活化系数(PAC)之间的通径分析

Table 5 Path analysis for phosphorus activation coefficient (PAC) as a function of soil inorganic phosphorus fractions

作用因子 Factor	直接作用 Direct effect	间接作用地 Indirect effect						与 y 的相关系数 Correlation coefficient with y
		x ₁ →y	x ₂ →y	x ₃ →y	x ₄ →y	x ₅ →y	x ₆ →y	
Ca ₂ -P (x ₁)	0.768		0.062	-0.025	0.077	-0.014	-0.339	0.767
Ca ₈ -P (x ₂)	0.071	0.674		-0.028	0.077	-0.012	-0.328	0.690
Ca ₁₀ -P (x ₃)	-0.055	0.346	0.036		0.042	-0.005	-0.250	0.302
Al-P (x ₄)	0.082	0.723	0.066	-0.028		-0.015	-0.330	0.732
Fe-P (x ₅)	-0.018	0.609	0.049	-0.014	0.066		-0.245	0.602
O-P (x ₆)	-0.388	0.672	0.060	-0.035	0.070	-0.011		0.579

y 为磷活化系数(PAC) y: Phosphorus activation efficient (PAC)

2.6 土壤磷组分对磷活化系数(PAC)的贡献

表 5 可知,各形态无机磷对磷活化系数(PAC)直接影响的大小顺序为:Ca₂-P(0.768)>Al-P(0.082)>Ca₈-P(0.071)>Fe-P(-0.018)>Ca₁₀-P(-0.055)>O-P(-0.388),这与土壤磷组分对有效磷的贡献大体一致。由表 5 还可以看出 Ca₂-P、Al-P、Ca₈-P 对磷活化系数(PAC)的直接影响为正效应,Fe-P、Ca₁₀-P、O-P 对磷活化系数(PAC)的直接影响为负效应,但是 Fe-P、O-P 的相关系数表现为正相关,这主要是受到 Ca₂-P、Al-P、Ca₈-P 的间接影响。表明土壤各形态无机磷对磷活化系数的影响除了自身的直接效应的影

响外, 间接效应的影响也是不可忽视的。在对磷活化系数 (PAC) 的影响上, 各形态无机磷之间的间接影响决定着各形态无机磷对磷活化系数最终的相关关系的显著性。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 不仅其自身的通径系数高, 而且 Al-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 通过 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 影响 PAC 的通径系数也很高, 对土壤磷组分和磷活化系数进行的逐步回归分析结果表明只有 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与磷活化系数具有显著相关关系, 进一步验证了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是最有效的磷源。

3 讨论

3.1 壤土区无机磷形态含量的分布

近年来国内学者采用蒋-顾磷素分级的方法在土壤的磷素状况等方面做了大量的研究工作, 结果表明我国北方石灰性土壤的无机磷含量主要以 Ca-P 为主, 平均占无机磷总量的 70%, 其中又以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占绝对优势, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 次之, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量最低, 仅为无机磷总量的 2% 左右, 其他 3 种形态 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 占无机磷总量的 30% 左右^[31-33]。本研究土壤无机磷的各组分所占比例大小依次为 $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Al-P} > \text{O-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$, 陕西关中平原地区石灰性土壤中 Ca-P 是无机磷的主要形态, 占无机磷总量的 60%—70%, 这与上述研究结果基本吻合。在沙特阿拉伯, AHMAD^[34]等在农用石灰性土壤上测定的 Ca-P 为无机磷总量的 69.66%, 有效磷仅占 1.75%, 也得到了相似的结论。

随着有效磷含量不断增加, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 占无机磷总量的比例也在增加 (图 4), 这与柴博等^[35]的研究结果相似, 他们在灌耕灰钙土上的研究表明, 随着施磷量的增加, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 所占的比例一直在增加, O-P 基本保持不变。在本研究中, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 所占的比例随着有效磷含量的增加呈显著下降趋势 (图 4), 这与张英鹏等^[36]在山东褐土上的研究结果一致。 Fe-P 和 O-P 占无机磷的比例随着有效磷含量的增加基本无变化 (图 4), 与以往在石灰性土壤的研究略有不同。王海龙^[37]在山东潮土上的研究结果表明随着施磷量的增加 O-P 所占的比例在逐渐减少, Fe-P 在上升, 这可能与供试土壤性质及环境因素等有关。本研究所选用的土壤有机质含量平均为 $17.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较¹壤土 24 年长期施用 NP (K) 处理 (约 $18.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 稍低^[38], 再者其土壤 Olsen P 含量最高值 $< 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可推知, 这些土壤磷素肥力的提高应该主要是长期过量施用化学磷肥的结果。显然, 长期施磷肥主要通过提高可供作物直接利用的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和具有缓效作用 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 的比例, 降低土壤中难溶性 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$

的比例从而增加了有效磷含量, 从而提升了土壤潜在供磷能力^[36-37]。

3.2 不同磷水平下无机磷各组分对有效磷的贡献

在整个土壤磷素循环过程中, 各种磷的形态相互转化一直处于一个动态平衡过程, 磷素任何形态的变化, 都会或多或少地引起有效磷含量的波动^[36,39]。本研究区域农田土壤除 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与 Olsen P 呈显著正相关关系, 其他形态的无机磷与 Olsen P 都呈极显著正相关关系 (图 3), 这与韩晓日等^[40]的研究结果一致, 他们对棕壤 26 年长期定位试验的无机磷分级表明 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与 Olsen P 相关性达到 5% 的显著水平, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 与 Olsen P 之间达到 1% 的极显著水平。与 WANG 等^[41]的研究结果部分一致, 作者对¹壤土 21 年长期定位试验的无机磷与有效磷的相关分析结果表明, 除 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与 Olsen P 不相关外, 其他形态的无机磷与 Olsen P 呈极显著的正相关关系。通径分析的结果表明, 无论是 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的直接通径系数, 还是其他形态通过 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的间接系数都比较大, 说明 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 对有效磷的贡献最大, 验证了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是作物最有效的磷源^[42]。 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和有效磷的直接作用较小, 这几种磷组分与有效磷含量呈极显著正相关关系是因为它们通对其他形态, 特别是通过 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 对有效磷起间接作用。沈仁芳等^[43]通过土壤磷组分与作物吸磷量的相关分析, 得出了在石灰性土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 及 Al-P 、 Fe-P 对作物都有不同程度的有效性的结论。 O-P 虽然也和有效磷显著正相关, 且其通过 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 对有效磷有较大贡献 (表 3), 这一点和张海军^[44]在苏打碱土上的研究结果一致, 但其机理可能和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 等几个形态不尽相同, 可能只在某些还原条件下, 其包被铁膜被还原时发挥其作用^[45]。尽管 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 也和 Olsen P 相关, 但 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 对有效磷的直接通径系数很小, 表明其对有效磷的贡献很小 (表 3), 其对有效磷的贡献也是通过 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 等实现的, 这与 WANG^[41]在¹壤土上的研究结果一致。逐步回归分析结果表明, 本研究中对有效磷贡献最主要的是 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 3 个组分, 和吕家珑等^[46]在陕西杨凌同一类型的土壤上有机无机肥长期试验的研究结果部分一致, 所不同的是他们的结果由 O-P 替代了本结果中的 Fe-P , 可能是土壤有机碳等性质差异所致。张英鹏等^[36]在不同施磷量下的山东褐土耕层土壤中的研究结果也表明了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 是速效磷的主要磷源。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 是该区域农田土壤速效磷的主要来源这一点而言, 与大部分石灰性土壤上

的研究结果一致^[40,43,46]。

3.3 不同磷水平下无机磷各组分与磷活化系数(PAC)的关系

土壤磷活化系数(PAC)是有效磷占全磷的比值,反映了全磷向有效磷的转化程度^[21]。由于土壤磷有效性并不总是和土壤有效磷含量直接相关^[47],因此需要结合磷活化系数(PAC)来表征磷素有效性。大多数研究学者认为施磷肥能够提高土壤磷素活化效率^[48]。沈浦^[49]认为对于同一土壤,外源磷肥投入越大,土壤的有效磷和磷活化系数增加越多。各组分无机磷与PAC的相关分析结果显示除Ca₁₀-P与PAC不相关外,其他形态的无机磷与PAC都呈极显著正相关关系(图5)。通径分析结果表明,Ca₂-P对PAC直接作用最高,而Al-P、Ca₈-P主要通过Ca₂-P间接的贡献于PAC。WU等^[50]在3种土壤(黑土、潮土、红壤)上PAC与磷组分的相关分析结果表明NaHCO₃-Pi(相当于Ca₂-P)与PAC呈极显著正相关关系。在本研究中进行进一步采用逐步回归分析只留下了Ca₂-P这一个组分,也验证了Ca₂-P对磷素有效性贡献最大^[42-43],而有效磷与各组分磷之间的通径分析和逐步回归分析的结果却表明Ca₂-P、Ca₈-P、Fe-P都对Olsen P有较大贡献,这是因为PAC不仅和有效磷含量相关,还与全磷含量相关^[51],有研究表明只有在PAC>2.0%才能说明全磷易转化成有效磷,PAC<2.0%时全磷不容易转化为有效磷,磷素有效性低^[36]。在此次研究中随着有效磷水平的提高,PAC并不全都是随之提高,所以PAC与各组分磷之间的通径分析结果和Olsen P与各组分磷的通径分析结果存在差异,除此之外可能因为气候条件、磷投入和土壤性质都对PAC有影响^[30],但毋庸置疑的一点是Ca₂-P对PAC和Olsen P的贡献都很大,从而说明了Ca₂-P是该研究区域土壤上作物最有效的磷源。

4 结论

西北冬小麦-夏玉米种植区耕层土壤磷素主要以Ca-P为主,其中Ca₁₀-P平均47.1%,其次为Ca₈-P和Al-P约各占16.8%和16.3%,O-P和Fe-P相对很稳定,变幅很小,分别占11.8%和5.2%;Ca₂-P含量最低,约为2.8%。有效磷(Olsen P)和磷活化系数(PAC)与Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、O-P、Fe-P等5种形态无机磷都呈极显著正相关关系($P<0.001$),而Ca₁₀-P仅与有效磷显著正相关。通径分析和逐步回归结果表明,Ca₂-P对有效磷和磷活化系数贡献均最大;Ca₈-P对有

效磷也有很大贡献。表明在有机质相同或相近条件下,Ca₂-P是小麦-玉米种植区土壤最有效的磷源。增加土壤有效磷的含量可以丰富土壤无机磷库,增加可供作物直接利用的Ca₂-P和具有缓效作用Ca₈-P、Al-P比例,减少土壤中难溶性Ca₁₀-P的比例,促进土壤磷素向有效态转化,提升土壤潜在供磷能力。

References

- [1] DEBICKA M, KOCOWICZ A, WEBER J, ELŻBIETA J. Organic matter effects on phosphorus sorption in sandy soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(6): 1-16.
- [2] 向万胜, 黄敏, 李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 663-670.
XIANG W S, HUANG M, LI X Y. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops in soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2004, 10(6): 663-670. (in Chinese)
- [3] 程明芳, 何萍, 金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展. 作物杂志, 2010(1): 12-14.
CHENG M F, HE P, JIN J Y. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops. *Crops*, 2010(1): 12-14. (in Chinese)
- [4] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 孙本华, 张树兰, 杨学云. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 51-61.
CHANG Y L, LIU J M, LI Y H, SUN B H, ZHANG S L, YANG X Y. Investigation and evaluation of fertilization under winter wheat and summer maize rotation system in Guanzhong Plain, Shaanxi Province. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(8): 51-61. (in Chinese)
- [5] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-6.
LU R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4-6. (in Chinese)
- [6] BROCK E H, KETTERINGS Q M, KLEINMAN P J A. Phosphorus leaching through intact soil cores as influenced by type and duration of manure application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77(3): 269-281.
- [7] 来璐, 郝明德, 彭令发. 黄土旱塬长期施肥条件下土壤磷素变化及管理. 水土保持研究, 2003(1): 68-70.
LAI L, HAO M D, PENG L F. The variation of soil phosphorus of long-term continuous cropping and management on Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003(1): 68-70. (in Chinese)

- Chinese)
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005. (in Chinese)
- [9] BAI J, YE X, JIA J, ZHANG G, ZHAO Q, CUI B. Phosphorus sorption-desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions. *Chemosphere*, 2017: S0045653517313413.
- [10] 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, 20(3): 58-66. (in Chinese)
- [11] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨. 长期定位施肥条件下紫色土无机磷形态演变研究. 草业学报, 2016, 25(4): 63-72.
- HAN X F, GAO M, XIE D T, WANG Z F, CHEN C. Inorganic phosphorus in a regosol (purple) soil under long-term phosphorus fertilization. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(4): 63-72. (in Chinese)
- [12] ESCUDEY M, GALINDO G, JUANE F, MARGARITA B, PATRICIA D, ANDREW C. Chemical forms of phosphorus of volcanic ash derived soils in Chile. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(5/6): 16.
- [13] YANG X J, POST W M. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences*, 2011(10): 2907-2916.
- [14] 林利红, 韩晓日, 刘小虎, 战秀梅. 长期轮作施肥对棕壤磷素形态及转化的影响. 土壤通报, 2006, 37(1): 80-83.
- LIN L H, HAN X R, LIU X H, ZHAN X M. Effects of long-term fertilization on phosphorus forms and transformation in Brown soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 80-83. (in Chinese)
- [15] LUO L, MA Y, SANDERS R L, XU C, LI J, MYNENI S C B. Phosphorus speciation and transformation in long-term fertilized soil: evidence from chemical fractionation and PK-edge XANES spectroscopy. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 107(2): 215-226.
- [16] BOL R, JULICH D, BRÖDLIN D, SIEMENS J, KAISER K, DIPPOLD M. A, SPIELVOGEL S, ZILLA T, MEWES D. Dissolved and colloidal phosphorus fluxes in forest ecosystems-an almost blind spot in ecosystem research. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016(179): 425-438.
- [17] XAVIER F A D S, OLIVEIRA T S D, ANDRADE F V, MENDONÇA E D S. Phosphorus fractionation in a sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil. *Geofisica Internacional*, 2009, 151(3): 417-423.
- [18] AULAKH M S, GARG A K, KABBA B S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term applications in the subtropics. *Soil Use and Management*, 2007, 23: 417-427.
- [19] 展晓莹, 任意, 张淑香, 康日峰. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4728-4737.
- ZHAN X Y, REN Y, ZHANG S X, KANG R F. Changes in Olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in main types of soil in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4728-4737. (in Chinese)
- [20] 黄晶, 张杨珠, 徐明岗, 高菊生. 长期施肥下红壤性水稻土有效磷的演变特征及对磷平衡的响应. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1132-1141.
- HUANG J, ZHANG Y Z, XU M G, GAO J S. Evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to soil phosphorus balance in paddy soil derived from red earth under long-term fertilization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 1132-1141. (in Chinese)
- [21] 胡宁, 袁红, 蓝家程, 袁道先, 傅瓦利, 文志林. 岩溶石漠化区不同植被恢复模式土壤无机磷形态特征及影响因素. 生态学报, 2014, 34(24): 7393-7402.
- HU N, YUAN H, LAN J C, YUAN D F, FU W L, WEN Z L. Factors influencing the distribution of inorganic phosphorus fractions in different vegetation restoration areas in karst rocky desertification areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(24): 7393-7402. (in Chinese)
- [22] MANNA M C, SWARUP A, WANJARI R H, MISHRA B, SHAHI D K. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(2): 397-409.
- [23] 杨慧, 曹建华, 孙蕾, 栾会妮, 侯彦林. 岩溶区不同土地利用类型土壤无机磷形态分布特征. 水土保持学报, 2010, 24(2): 135-140.
- YANG H, CAO J H, SUN L, YI H N, HOU Y L. Fractions and distribution of inorganic phosphorus in different land use types of Karst Area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 135-140. (in Chinese)
- [24] 于群英, 李孝良, 李粉茹, 汪建飞. 安徽省土壤无机磷组分状况及施肥对土壤磷素的影响. 水土保持学报, 2006(4): 57-61.
- YU Q Y, LI X L, LI F R, WANG J F. Content of soil inorganic phosphorus fractions in Anhui Province and effects of fertilization on soil phosphorus. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006(4): 57-61. (in Chinese)
- [25] GUO S L, DANG T H, HAO M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 248-256.

- [26] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 刘选卫, 刘利花. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 I. 有机质、全磷和速效磷. 应用生态学报, 2004, 15(5): 787-789.
- XIE L H, LV J L, ZHANG Y P, LIU X W, LIU L H. Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil I. Organic matter, total phosphorus and available phosphorus. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 787-789. (in Chinese)
- [27] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响. 土壤学报, 1991, 28(1): 7-15.
- ZHAO X Q, LU R K. Effects of organic manure on soil phosphorus adsorption. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(1): 7-15. (in Chinese)
- [28] 夏海勇, 王凯荣. 有机质含量对石灰性黄潮土和砂姜黑土磷吸附-解吸特性的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1303-1310.
- XIA H Y, WANG K R. Effects of soil organic matter on characteristics of phosphorus adsorption and desorption in calcareous yellow fluvo-aquic soil and lime concretion black soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1303-1310. (in Chinese)
- [29] 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 fraction scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(3): 58-66. (in Chinese)
- [30] 吴启华. 长期不同施肥下三种土壤磷素有效性和磷肥利用率的差异机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- WU Q H. Mechanisms of difference in phosphorus availability and fertilizer P use efficiency in three soils under long-term fertilizations[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [31] 曹莹菲, 张红, 刘克, 代允超, 吕家珑. 不同施肥方式对壤土土壤磷素各组分含量的影响. 干旱地区农业研究, 2015(5): 115-120.
- CAO Y F, ZHANG H, LIU K, DAI Y C, LV J L. Effects of different fertilization implementations on phosphorus fraction of manural loessial soil. *Agricultural research in the Arid Areas*, 2015(5): 115-120. (in Chinese)
- [32] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 刘选卫, 刘利花. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 II. 无机磷和有机磷. 应用生态学报, 2004, 15(5): 790-794.
- XIE L H, LV J L, ZHANG Y P, LIU X W, LIU L H. Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil II. Inorganic and organic phosphorus. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 790-794. (in Chinese)
- [33] 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)
- [34] AHMAD M, AHMAD M, HEL-NAGGAR A, RAUSMAN A, ABDULJABBAR A, VITHANAGE M. Aging effects of organic and inorganic fertilizers on phosphorus fractionation in a calcareous sandy loam soil. *Pedosphere*, 2018, 28(6): 873-883.
- [35] 柴博, 李隆, 杨思存, 陈英, 王成宝, 姜万礼. 玉米/鹰嘴豆间作条件下不同施磷量对灌耕灰钙土无机磷组分的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 85-90.
- CHAI B, LI L, YANG S C, CHEN Y, WANG C B, JIANG W L. Effects of different P applications on inorganic-P components in irrigated sierozems under maize /chickpea intercropping. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(1): 85-90. (in Chinese)
- [36] 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)
- [37] 王海龙, 张民, 刘之广, 于小晶, 赵洪猛, 陈海宁. 多年定位试验条件下不同施磷水平对土壤无机磷分级的影响. 水土保持学报, 2018, 32(5): 321-327.
- WANG H L, ZHANG M, LIU Z G, YU X J, ZHAO H M, CHEN H N. Efferent of different phosphorus application levels on the inorganic phosphorus fraction under multi-year location experiment. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 321-327. (in Chinese)
- [38] 杨文静, 张树兰, 杨学云. 不同管理措施壤土无机碳储量及其与有机碳含量的关系. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 74-82.
- YANG W J, ZHANG S L, YANG X Y. Effect of long-term soil management and fertilization on storage of soil inorganic carbon and its relationship with soil organic carbon content in plough layer of manual loess soil. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(9): 74-82. (in Chinese)
- [39] 张林, 吴宁, 吴彦, 罗鹏, 刘琳, 陈文年. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展. 应用生态学报, 2009(7): 1775-1782.
- ZHANG L, WU N, WU Y, LUO P, LIU L, CHEN W N. Advances in the study of soil phosphorus forms and their classification methods. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009(7): 1775-1782. (in Chinese)
- [40] 韩晓日, 马玲玲, 王晔青, 王颖, 战秀梅. 长期定位施肥对棕壤无机磷形态及剖面分布的影响. 水土保持学报, 2007, 21(4): 51-55.

- HAN X R, MA L L, WANG Y Q, WANG Y, ZHAN X M. Effects of long-term fertilization on inorganic phosphorus forms and profile distribution in Brown soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 51-55. (in Chinese)
- [41] WANG J, LIU W Z, MU H F, DANG T H. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 304-310.
- [42] 顾益初, 蒋柏藩, 鲁如坤. 风化对土壤粒级中磷素形态转化及其有效性的影响. *土壤学报*, 2011, 21(2): 134-143.
- GU Y C, JIANG B F, LU R K. Effects of weathering on phosphorus form transformation and its availability in soil fractions. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 21(2): 134-143. (in Chinese)
- [43] 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. Morphological distribution and availability of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(1): 80-86. (in Chinese)
- [44] 张海军, 石发庆, 戴建军, 王兆荣. 黑龙江省西部草地苏打盐渍土无机磷的转化及其对有效磷的影响. *土壤通报*, 2002, 33(1): 39-43.
- ZHANG H J, SHI F Q, DAI J J, WANG Z R. Inorganic phosphorus transformation in soda saline soil in Western Heilongjiang Province and its effect on available phosphorus. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1): 39-43. (in Chinese)
- [45] 马利民, 张明, 滕衍行, 赵建夫. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响. *环境科学*, 2008, 29(4): 1035-1039.
- MA L M, ZHANG M, TENG Y X, ZHAO J F. Characteristics of phosphorous release from soil in periodic alternately waterlogged and drained environments at WFZ of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2008, 29(4): 1035-1039. (in Chinese)
- [46] 吕家珑, 张一平, 陶国树, 韩新宁. 23 年肥料定位试验 0~100 cm 土壤剖面中各形态磷之间的关系研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 48-50.
- LV J L, ZHANG Y P, TAO G S, HAN X N. Relationship among phosphorus forms in 0~100cm soil profiles after 23 year application of fertilizers. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 48-50. (in Chinese)
- [47] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究. *中国土壤与肥料*, 2011(6): 76-82.
- JIA X Y, LI J M. Study on soil phosphorus availability and its relation to the soil properties in 14 soils from different sites in China. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(6): 76-82. (in Chinese)
- [48] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 周兴, 谢坚, 杨曾平. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应. *土壤学报*, 2017(6): 161-175.
- LU Y H, LIAO Y L, NIE J, ZHOU X, XIE J, YANG Z P. Evolution of phosphorus in long-term fertilized red paddy soil and its response to phosphorus deficiency. *Acta Pedologica Sinica*, 2017(6): 161-175. (in Chinese)
- [49] 沈浦. 长期施肥下典型农田土壤有效磷的演变特征及机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- SHEN P. Evolution characteristics and mechanism of soil available phosphorus in typical farmland under long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [50] WU Q H, ZHANG S X, ZHU P, HUANG S M, WANG B R, ZHAO L P, XU M G. Characterizing differences in the phosphorus activation coefficient of three typical cropland soils and the influencing factors under long-term fertilization. *PloS One*, 2017, 12(5): e0176437.
- [51] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 260-268.
- WANG Y Z, CHEN X, SHI Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 260-268. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)