

黄土旱塬长期施磷对土壤磷素空间分布及有效性的影响

慕韩锋¹, 王俊^{1,2*}, 刘康¹, 刘文兆², 党廷辉², 王兵²

(1 西北大学环境科学系, 陕西西安 710127; 2 中国科学院、水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100)

摘要:对黄土旱塬定位施肥 20 年后土壤中不同磷素形态在土层中的空间分布及有效性进行了研究。结果表明,在不同施磷水平上,磷素在土壤表层发生累积。随着磷肥用量的增加,表层的全磷和有效磷的含量逐渐增加;而在下层土壤中虽有微量增加,但增幅不明显。说明长期合理施用磷肥可显著扩大土壤中的有效磷库。黄土旱塬区长期定位试验土壤表层中无机磷以 Ca-P 为主,占无机磷总量的 80% 以上。随着施磷量的增加,无机磷组分 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 在土壤中的含量总体上都呈增加的趋势。通过有效磷与无机磷各组分的相关性分析及通径分析看出,Ca₂-P 和 Ca₈-P 可称为有效磷源,O-P 与 Ca₁₀-P 为潜在磷源,而 Al-P 和 Fe-P 介于二者之间。其中,Fe-P 主要是通过影响其它组分而间接影响有效磷的含量。

关键词:磷素;长期定位施肥;空间分布;有效性;无机磷组分

中图分类号:S153.6+1

文献标识码:A

文章编号:1008-505X(2008)03-0424-07

Effect of long-term fertilization on spatial distribution and availability of soil phosphorus in Loess Plateau

MU Han-feng¹, WANG Jun^{1,2*}, LIU Kang¹, LIU Wen-zhao², DANG Ting-hui², WANG Bing²

(1 Department of Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MOWR, Northwest A & F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

Abstract: The spatial distribution and availability of soil phosphorus (P) in Loess Plateau after 20 years of phosphate fertilization was investigated in this study. Phosphorus mainly accumulated in the surface layer after long-term fertilization. Soil total P and Olsen-P increased gradually with fertilization rate, which indicated that long-term continuous fertilization could increase the available phosphorus storage significantly. Ca-P was the main fraction in soil inorganic P, which accounted for above 80% of the inorganic P. The contents of soil Ca₂-P, Ca₈-P, Al-P and Fe-P increased with the phosphate fertilization rate. Correlation analysis and path analysis showed that soil Olsen-P was significantly correlated with soil inorganic P, Ca₂-P and Ca₈-P, which can be the source of soil available P. Soil O-P and Ca₁₀-P, the potential sources of soil available P, had low correlations with soil Olsen-P. Soil Al-P and Fe-P had a medium correlation with soil Olsen-P, and in particular, Fe-P affected soil Olsen-P indirectly through other fractions.

Key words: phosphorus; long-term positional fertilization; spatial distribution; availability; inorganic P fraction

磷素作为植物必需的元素,不仅是植物体内许多重要化合物的组分,且还以多种途径参与植物体内的各种代谢过程,影响着植物的生长发育,许多土壤中磷是限制植物生长的一个主要因子^[1]。然而,

土壤的磷大都以缓效磷源和潜在磷源存在。所以,研究磷素的各个组分在土层中的分布及有效性就显得十分重要。就土壤磷素的移动性而言,磷的下移将影响其在土壤中的垂直分布,长期定位施肥在这

收稿日期:2007-05-09 接受日期:2007-08-23

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2005CB121102);国家自然科学基金项目(30500077)资助。

作者简介:慕韩锋(1982—)男,陕西吴堡人,硕士研究生,主要从事农业生态研究。E-mail: murongmeihuan@163.com

* 通讯作者 E-mail: wangj@nwu.edu.cn

方面表现的尤为明显。磷素的这种垂直分布在生产上表现出两个方面的意义,一是如果养分下移超过根系吸收的范围,将造成养分的淋失;二是养分适度下移,将丰富底土的养分含量,这对于土壤肥力很有利。许多学者研究发现,土壤磷素的空间分布特征为:表层土壤磷素含量高于底层土壤,即磷素含量一般随土壤层次的加深而降低。对于磷素各组分的有效性,沈仁芳^[2]应用蒋-顾分级体系对 16 种石灰性土壤各形态无机磷进行了研究。结果表明, Ca_2 -P 是土壤中最有效的磷源, Ca_8 -P、Al-P、Fe-P 有效性也较高,O-P、 Ca_{10} -P 只可作为潜在磷源。邵煌庭^[3]在灌漠土上的研究表明, Ca_2 -P、Al-P、 Ca_8 -P 均是作物利用的主要磷源。党廷辉^[4]在研究黑垆土无机磷的有效性时认为,在不同施磷水平下, Ca_2 -P、Al-P、Fe-P 是作物的有效磷源; Ca_8 -P、O-P、 Ca_{10} -P 对当季作物无效,属于潜在磷源。本试验通过对长期定位施肥条件下不同施磷水平的土壤全磷、有效磷及无机磷组分的空间分布进行了研究,以探讨合理施肥对土壤有效磷库的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于黄土高原南部的长武塬区中科院长武农业生态试验站十里铺轮作与肥料长期定位试验场(107°44.703'E,35°12.787'N),海拔 1220 m。塬面地势平坦,属暖温带半湿润大陆性季风气候。农业生产主要依赖生育期的天然降水和前期土壤蓄水,属于典型的旱作农业区。多年平均降水 584 mm,且季节性分布不均,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d。土壤属黄盖粘黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,土层深厚,土质疏松,肥力中等,田间持水量为 22.4%,凋萎湿度 9%。

1.2 试验设计

长期定位试验于 1984 年秋季开始,布置试验时,耕层土壤有机质含量 10.5 g/kg,全氮 0.8 g/kg,有效磷 4.58 mg/kg,速效钾 129.3 mg/kg,地下水埋深 60 m。试验包括肥料试验和轮作培肥试验两部分。本研究在中等氮肥水平(N 90 kg/hm²)基础上针对不同施磷水平选取其中 5 个处理,即:不施磷和施磷 45、90、135、180 kg/hm²,分别以 CK、P45、P90、P135、P180 表示,3 个重复,小区面积为 22 m²。试验作物为冬小麦,小麦品种 1984、1985 年用秦麦 4 号,1986~1995 年用长武 131 号,1996 年以后用长武

134 号。小麦期于 9 月中下旬播种,6 月下旬收获,试验管理措施同大田。试验于 2005 年 7 月小麦收获后采 0—100 cm 土壤,每 20 cm 分层取土,土样风干后进行测定。

1.3 测定方法

全磷测定采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮法,有效磷采用 Olsen 法^[5]测定,无机磷分级采用蒋顾法^[6]。数据使用 SAS 统计软件进行方差分析(ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 土壤全磷

图 1 看出,0—20 cm 土壤全磷表层含量最高,处理 CK、P45、P90、P135 和 P180 的值分别为 0.75、0.79、0.87、1.03 和 1.13 g/kg。随着土壤深度的增加,至 60 cm 处下降至最低值,5 个处理全磷含量分别为 0.51、0.54、0.52、0.52、0.51 g/kg。此后,又开始缓慢回升,最终在 100 cm 左右达到稳定。可以认为 0—20 cm 为土壤全磷显著累积层,20—80 cm 为全磷含量累积-亏损交错层,80—100 cm 为全磷含量轻度累积层。这与他人研究的结果一致^[7-10]。图 1 还看出,土壤全磷在表层的含量高于底层,这是因为磷素向下的移动性很小。

经过长期定位施肥处理,土壤全磷表层含量发生了变化。与 CK 相比,P180 表层全磷的增加量最大,比 CK 增加了 0.38 g/kg,增加了 49.82%;P45、P90 和 P135 分别增加了 4.23%、15.02% 和 36.54%。表明土壤全磷表层的含量随着施磷量的增加而增加,且因磷素的移动性很小,所以磷素在表层大量累积。统计结果表明,处理 P135 和 P180 表层(0—20 cm)全磷含量并没有差异,但其全磷含量显著高于其他 3 处理。而 20—100 cm 的土层中各处理之间则没有差异。

2.2 土壤有效磷

土壤有效磷在 0—20 cm 土壤表层含量最高,CK、P45、P90、P135 和 P180 处理为 2.27、5.98、7.43、13.47 和 22.92 mg/kg(图 2)。这同样是因为土壤磷素在土壤表层大量累积,使得磷素中的有效磷在土壤表层累积,导致有效磷的含量在表层达到了最大值。在 40—60 cm 左右有效磷降到了最小值,随后略有升高并在 60 cm 以下逐渐稳定在较低的水平上,各处理分别为 0.46、0.35、0.78、0.47 和 0.87 mg/kg。主要是这个区域主要为植物的根系区,且磷素很少下移。可以称 0—40 cm 为显著累积层,40—60 cm 为累积-亏损交错层,60 cm 以下为轻度累积

层。经过长期定位施肥处理,土壤表层的有效磷含量发生了变化。与 CK 相比,P180 处理的表层土壤有效磷的含量增加量最大,达到了 20.65 mg/kg;而 P135、P90 和 P45 的增加量分别为 11.20、5.15 和 3.70 mg/kg。由统计结果表明,在土壤表层,P180 的土壤有效磷含量最高,P135、P90 和 P45 处理间差异不明显;CK 处理含量则显著低于其他处理。说明长期施磷肥可以提高土壤表层有效磷的含量,且有

随施磷量的增加而迅速积累。20—40 cm 土层中,P180 处理的有效磷含量也显著高于其他处理;40—80 cm 土壤中,P180 的有效磷含量与 CK、P45 和 P135 差异极显著,但与处理 P90 之间没有差异。80—100 cm 土壤中,P180 与其它处理之间也没有差异。这说明施肥对土壤有效磷的影响深度一般不会超过 80—100 cm。

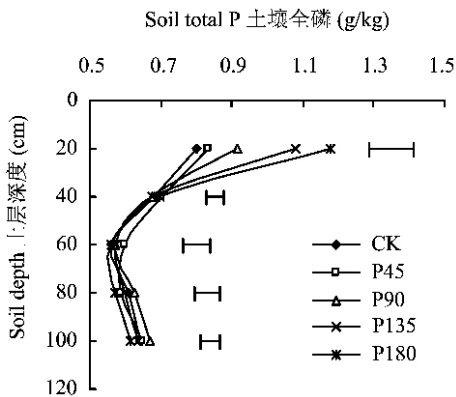


图 1 土壤全磷剖面分布

Fig.1 The profile distribution of total P

(图中横线表示 LSD:即同一深度两点之间的距离大于横线表示两处理之间有显著差异 ($P = 0.05$),下同。

The lines in the figure express LSD: The distance between two points in the same level exceeds the line length means that the two treatments are significantly different at 0.05 level. The same below.)

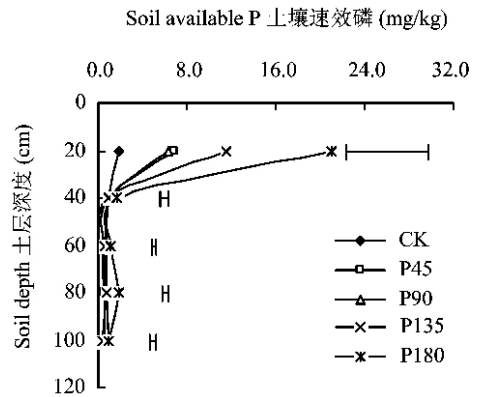


图 2 土壤有效磷剖面分布

Fig.2 The profile distribution of available

2.3 土壤无机磷

2.3.1 土壤无机磷剖面分布 土壤无机磷占到全磷的 54.36%~63.08%。其中无机磷中 Ca-P 含量最高,占到无机磷总量的 80.78%~84.94%,而 Ca-P 中 Ca_{10} -P 又占据主导地位,为无机磷总量的 61.45%~74.51%; Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 分别为 0.95%~2.11% 和 9.48%~17.22%。 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 在表层的含量随着施磷量的增加而增加,与有效磷显现出相同的趋势。在剖面分布上, Ca_2 -P (图 3a) 在 0—40 cm 表现出减少的趋势,但在 40—100 cm 之间差异不大; Ca_8 -P (图 3b) 则在 0—100 cm 之间表现出较为明显的递减趋势; Ca_{10} -P (图 3f) 在 0—60 cm 土层中递减,60—80 cm 处出现最小值,随后表现出缓慢增加的趋势。

在无机磷组分中,Al-P、Fe-P 和 O-P 分别占到无机磷总量的 2.73%~5.10%、6.46%~7.31% 和 5.31%~6.81%。Al-P (图 3c) 和 Fe-P (图 3d) 在表层的含量最高,分别为无机磷表层总量的 2.58%~7.61% 和 6.72%~7.80%,且都表现出随施磷量增加

而增加的趋势。Al-P 在 0—80 cm 表现出递减的趋势,随后略微上升;Fe-P 在 0—100 cm 也出现较为微弱的下降;O-P (图 3e) 在 0—40 cm 土层表现为略微的上升,在 40—60 cm 土层附近达到一个峰值,随后开始缓慢降低,但总体趋势并不明显。

由此可得, Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P 和 Fe-P 的剖面分布均呈先迅速降低,后逐渐稳定的趋势; Ca_{10} -P 的剖面分布呈现先降低,后升高的趋势;O-P 的变化趋势并不明显,有待进一步的研究。

2.3.2 长期定位施肥对土壤无机磷组分的影响 经过长期定位施肥处理,无机磷各组分在土层中的含量产生了变化。与对照相比(表 1),无机磷总量随着土壤表层施磷量的增加而迅速累积,说明加大施磷量可以提高土壤表层无机磷含量。对照处理中, Ca_2 -P 在表层的含量为 4.53 mg/kg,20—100 cm 的其含量为表层的 58.87%~65.64%;P45 和 P90 处理在 20—100 cm, Ca_2 -P 各层含量只为表层的 21.19%~29.12%;而 P135 和 P180 处理各层含量只为表层的 10.58%~17.43%,表现出了明显的降低

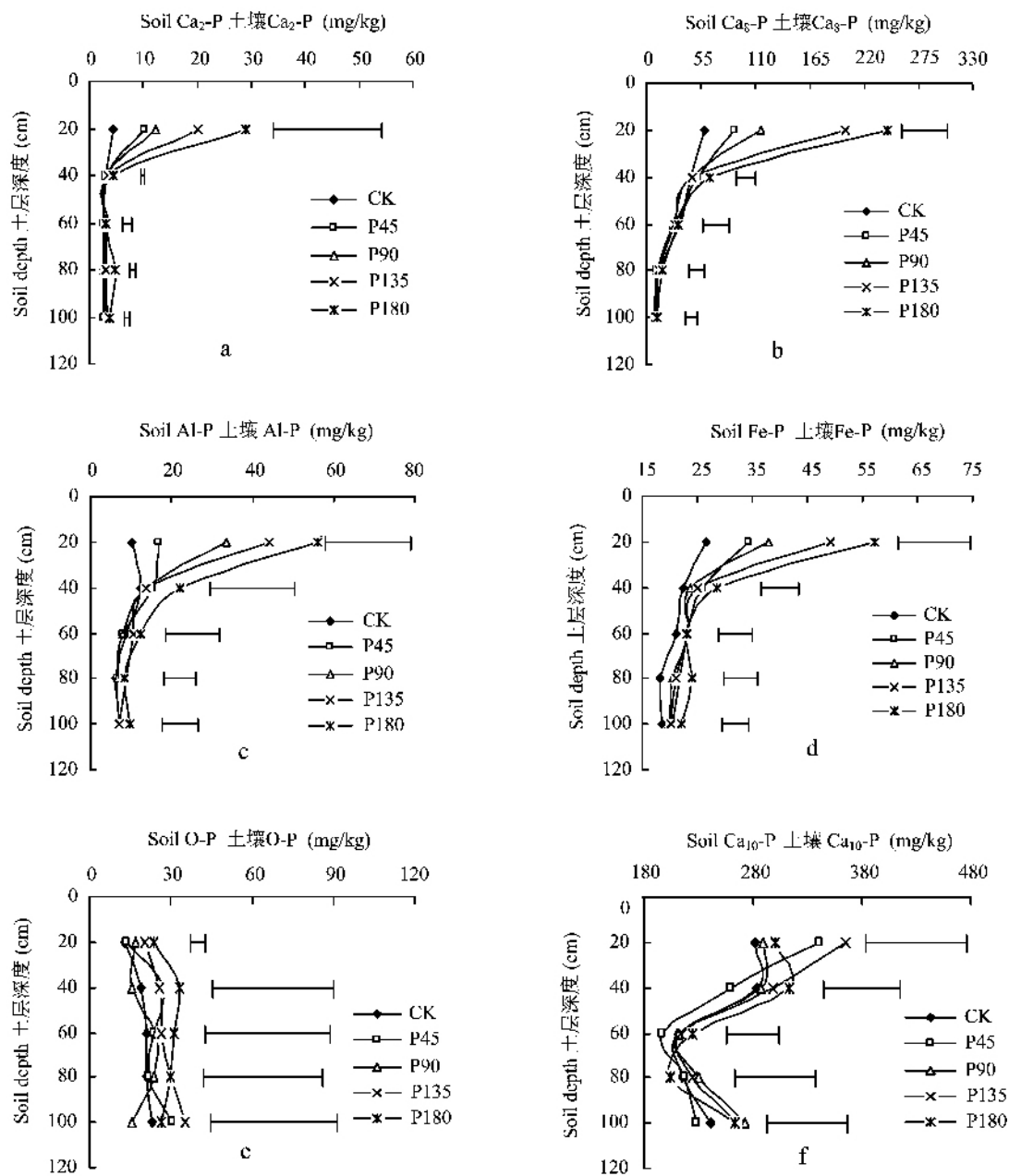


图3 土壤无机磷组分剖面分布

Fig.3 The profile distribution of inorganic P fractions

趋势。说明 Ca_2 -P 的含量随施磷量的提高而迅速的增加。 Ca_8 -P、Al-P 和 Fe-P 也表现出了相同的趋势。统计结果表明,在表层,P45、P90、P135 和 P180 处理的 Ca_2 -P 含量与 CK 之间的差异并不显著;但是在 20—100 cm 的土层中,处理 P180 在 60—80 cm 与其它处理达到极显著水平,表明 Ca_2 -P 在表层有一定累积,下层土壤 20—80 cm 受施磷影响较少。另外, Ca_8 -P、Al-P 和 Fe-P 都表现出随着施磷量的增加,各施磷处理与 CK 之间的差异显著。可见,经过 20 年长期定位施肥处理,土壤中的无机磷组分 Ca_2 -P、

Ca_8 -P、Al-P 和 Fe-P 与 CK 相比在表层大量累积,且随着施磷量的增加而增加;但在 20—100 cm 的土层中并没有表现出很明显的增加趋势,说明磷素向下的移动性很小。

表 1 还看出,O-P 和 Ca_{10} -P 没有表现出与 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P 和 Fe-P 相同的变化趋势。与 CK 相比,不同施磷处理 O-P 含量在土壤各层次上都有一定的增加。CK 表层的 O-P 为 13.08 mg/kg,处理 P45、P90、P135 和 P180 比 CK 表层分别增加了 2.24%、31.60%、56.18% 和 83.14%;而在 20—100

cm 土层上,处理 P45、P90、P135 和 P180 比 CK 分别增加了 6.35%~44.83%、-34.29%~31.60%、23.75%~56.18%和 14.05%~83.04%。统计分析

表明,在土壤表层,处理 CK 与 P45 和 P90 之间没有差异,但是与 P135 和 P180 间差异达显著水平。 Ca_{10} -P 在各个处理间的变化不明显。

表 1 不同处理土壤耕层磷素组分含量 (mg/kg)

Table 1 Different types of P in cultivated layers of different treatments

项目 Item	速效磷 Avail. P	Ca_2 -P	Ca_8 -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca_{10} -P	全磷 Total P
CK	2.27 a	4.53	59.21 a	10.22 a	26.59	13.08 a	281.75	752.78 a
P45	5.98 a	10.18	88.21 ab	16.59 ab	34.23	13.39 ab	341.99	784.59 a
P90	7.43 ab	12.30	114.75 b	33.74 bc	37.76	17.22 bc	288.44	865.83 b
P135	13.47 b	20.25	200.01 c	44.38 cd	49.05	20.43 c	365.51	1027.88 b
P180	22.92 c	29.13	242.22 c	55.99 d	57.36	23.96 c	301.16	1127.85 b

注 (Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values in a column followed by different letters mean significant at 5% level.

2.3.3 土壤有效磷与全磷和无机磷组分的相关性分析与通径分析 土壤无机磷组分与土壤有效磷之间存在一定的相关关系。鉴于有效磷对作物养分的贡献以及其与无机磷各组分的关系,探讨有效磷与无机磷组分间的相关性对提高土壤有效磷含量显得尤为重要。如表 2 所示,土壤有效磷与 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P、Fe-P、O-P 和全磷之间呈极显著正相关,与 Ca_{10} -P 无相关性;但是,由于闭蓄态磷(O-P)是以氧化铁胶膜包被的磷酸盐,其溶解度小,在没有除去其外层铁质包膜前,很难发挥其效用^[11-12],所以 O-P 对有效磷的影响很小。土壤无机磷各组分对有效磷

的重要性依次为 Ca_2 -P > Ca_8 -P > Al-P > Fe-P > Ca_{10} -P > O-P,其中, Ca_{10} -P 与其它组分都无相关性。在土壤无机磷组分之间, Ca_2 -P 与 Ca_8 -P 达到了极显著相关,与 Al-P 和 O-P 之间达到了显著相关; Ca_8 -P 与 Ca_2 -P、Al-P、Fe-P 和 O-P 之间达到了极显著正相关;Al-P 与 Fe-P、O-P 为显著相关;全磷与 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P、Fe-P 和 O-P 达到了极显著正相关。表明在土壤磷库中,全磷的无机磷各组分之间存在一定的相互影响与制约,而土壤有效磷含量的高低则取决于土壤各组分磷之间的分布状况和转化方向^[13]。

表 2 有效磷和各无机磷素形态间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients among P constituents

项目 Item	速效磷 Avail. P	Ca_2 -P	Ca_8 -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca_{10} -P	全磷 Total P
Ca_2 -P	0.8829**							
Ca_8 -P	0.8817**	0.7515**						
Al-P	0.7771**	0.5761*	0.7194**					
Fe-P	0.6795**	0.4548	0.8939**	0.6299*				
O-P	0.7185**	0.6196*	0.9263**	0.6128*	0.8899**			
Ca_{10} -P	0.3535	0.4865	0.2856	0.0213	0.0685	0.0901		
全磷 Tot. P	0.8653**	0.7398**	0.9450**	0.7384**	0.8559**	0.8958**	0.1862	

注 (Note): * 和 ** 分别表示显著和极显著相关 Indicate the correlation significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

土壤磷素各组分之间处于一个动态平衡过程。在因子较多且因子间影响较大的情况下,简单相关系数无法说明多因子间的复杂关系。作为介于回归系数和相关系数之间的一种统计量,通径分析可将某一因子对有效磷的影响分为直接效应和该因子通过其它因子对有效磷的间接效应,并用二者的代数

和表示该因子对有效磷的总效应,其大小表示该因子和其它因子对有效磷的综合贡献的大小。所以用通径分析来比较磷素各组分的相对有效性比较合理。

表 3 看出,通径分析的直接通径系数显示,土壤各磷素形态对有效磷的重要性依次为: Ca_8 -P

(0.7263) > O-P (-0.5015) > Ca₂-P (0.4695) > Al-P (0.1682) > 全磷 (0.1149) > Ca₁₀-P (-0.0664) > Fe-P (0.0632)。Fe-P 与有效磷有一个较大的相关系数 (0.9796), 但是对有效磷的直接影响却很小, 它是通过影响其它组分而间接影响有效磷的含量。对土壤磷组分与有效磷进行回归分析, 得多元回归方程:

$$Y = 0.3112 + 0.0059X_1 + 0.2990X_2 + 0.0798X_3 +$$

$$0.0678X_4 + 0.0404X_5 - 0.8296X_6 - 0.0099X_7$$

其中, Y 代表土壤有效磷; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 分别代表土壤全磷、Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P。

由途径分析和相关性分析可以得出: 土壤无机磷中 Ca₂-P 和 Ca₈-P 可称为土壤的有效磷源; O-P 和 Ca₁₀-P 可称为潜在磷源。

表 3 土壤有效磷和各磷素形态间的通径系数

Table 3 Path coefficient between available P and the various P forms in soil

项目 Item	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	全磷 Tot. P	R ²
Ca ₂ -P	0.4695 ⁺	0.5458	0.0969	0.0288	-0.3107	-0.0323	0.0850	0.8829
Ca ₈ -P	0.3528	0.7263 ⁺	0.1210	0.0565	-0.4645	-0.0190	0.1086	0.8817
Al-P	0.2704	0.5225	0.1682 ⁺	0.0398	-0.3073	-0.0014	0.0848	0.7771
Fe-P	0.2135	0.6492	0.1060	0.0632 ⁺	-0.4462	-0.0046	0.0983	0.6795
O-P	0.2909	0.6727	0.1031	0.0563	-0.5015 ⁺	-0.0060	0.1029	0.7184
Ca ₁₀ -P	0.2284	0.2074	0.0036	0.0043	-0.0452	-0.0664 ⁺	0.0214	0.3535
全磷 Tot. P	0.3473	0.6863	0.1242	0.0541	-0.4492	-0.0124	0.1149 ⁺	0.8653

注(Note): + 前数据表示直接通径系数, 其余为间接通径系数. Value followed by “+” is direct path coefficient, and the others express indirect path coefficient. R² = 0.9442.

3 结论

1) 土壤磷素剖面分布结果表明, 长期定位施肥使得磷素在土壤表层大量累积, 全磷含量在土壤剖面的分布呈先迅速降低, 再缓慢升高, 最后达到稳定的分布趋势。有效磷、Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 的剖面分布均呈先迅速降低, 后逐渐稳定的趋势; Ca₁₀-P 的剖面分布呈现降低, 后升高的趋势; O-P 的变化趋势不明显, 须进一步研究。

2) 对土壤全磷和有效磷 0—100 cm 土层的显著性分析表明, 长期定位施肥土壤表层的磷素含量随着施磷量的增加而提高, 5 种处理表层的全磷和有效磷含量基本上达到了极显著差异; 但是在较深层次的土壤中, P180 和 P90 之间的差异并不明显。而小麦较深层次的根系对提高小麦产量有很大的帮助^[14-17], 所以从经济的角度考虑, 采用 P90 施肥处理是合理的。由于磷向下的移动性很小, 所以深耕施肥更有利于小麦产量的提高。

3) 进行相关分析和途径分析表明, 不同形态无机磷对有效磷的贡献率依次为: Ca₈-P (0.7263) > O-P (-0.5015) > Ca₂-P (0.4695) > Al-P (0.1682) > Ca₁₀-P (-0.0664) > Fe-P (0.0632)。所以, 土壤无机磷中 Ca₂-P 和 Ca₈-P 可称为土壤的有效磷源; O-P 和 Ca₁₀-P 可称为潜在磷源。Al-P 和 Fe-P 介于二者之

间, 其中, Fe-P 主要是通过影响其它组分而间接影响有效磷的含量。由多元回归分析得到回归方程:

$$Y = 0.3112 + 0.0059X_1 + 0.2990X_2 + 0.0798X_3 + 0.0678X_4 + 0.0404X_5 - 0.8296X_6 - 0.0099X_7$$

其中, Y 代表土壤有效磷; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 分别代表土壤全磷、Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P。

参 考 文 献:

- [1] 林德喜, 范晓晖, 胡锋. 长期施肥后简育湿润均腐土中磷素形态特征的研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 605-610.
Lin D X, Fan X H, Hu F. Forms of phosphorus in Hapli-Udic isohumusols soils after long-term fertilization[J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(4): 605-610.
- [2] 沈仁芳. 石灰性土壤磷的有效性研究[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所硕士论文, 1989.
Shen R F. A study on phosphorus availability of Calcareous soil[D]. Nanjing: MS Dissertation, Institute of Soil Science, CAS, 1989.
- [3] 邵煜庭, 甄清香. 灌漠土磷素形态及其有效性的研究[J]. 中国农业科学, 1991, 24(6): 51-57.
Shao Y T, Zhen Q X. A study on phosphorus form and its availability in irrigated desert soil[J]. Sci. Agric. Sin., 1991, 24(6): 51-57.
- [4] 党廷辉, 郝明德, 李青. 定位施肥对黑垆土剖面养分的影响[J]. 水土保持通报, 1995, 15(6): 28-33, 59.
Dang T H, Hao M D, Li Q. Effect of position fertilization on soil nutrient of Helu soil profile[J]. Bull. Soil Water Conserv., 1995, 15(6): 28-33, 59.

- [5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京 : 国农业科学出版社 ,1999 ,133-135.
Lu R K. Analysis methods of soil agricultural chemistry [J]. Beijing : Chinese Agricultural Sciencetech Press ,1999 ,133-135.
- [6] 蒋柏藩 , 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究 [J]. 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 [J]. Sci. Agric. Sin. , 1989 ,22(3): 58-66.
- [7] 来璐 , 郝明德 , 彭令发. 黄土区旱地苜蓿连作条件下施肥对土壤磷素的影响 [J]. 西北植物学报 ,2003 ,23(8): 1471-1474.
Lai L , Hao M D , Peng L F. The effect on soil phosphorus in long-term continuous cropping of alfalfa in the arid loess regions [J]. Acta Bot. Boreal-Occident. Sin. 2003 ,23(8): 1471-1474.
- [8] 彭令发 , 郝明德 , 来璐. 黄土旱塬区长期施肥对土壤剖面养分分布的影响 [J]. 水土保持学报 ,2003 ,23(1): 36-38.
Peng L F , Hao M D , Lai L. Effect of long-term fertilization on nutrients distribution of soil profiles in arid highland of Loess Plateau [J]. Bull. Soil Water Conserv. ,2003 ,23(1): 36-38.
- [9] 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 [J]. 水土保持研究 ,2003 ,10(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 [J]. Res. Soil Water Conserv. ,2003 ,10(1): 68-70.
- [10] 樊军 , 郝明德 , 党廷辉. 长期定位施肥对黑垆土剖面养分分布特征的影响 [J]. 植物营养与肥料学报 ,2001 ,7(3): 249-254.
Fan J , Hao M D , Dang T H. Effect of long-term fertilization on nutrient distribution in profiles of black loessial soil [J]. Plant Nutr. Fert. Sci. ,2001 ,7(3): 249-254.
- [11] 董小平 , 凌天珊. 塔里木垦区石灰性土壤无机磷形态及有效性 [J]. 新疆农业科学 ,1995(1): 21-23.
Dong X P , Ling T S. A study on phosphorus form and its availability in reclamation area of Tarim river [J]. Xinjiang Agric. Sci. , 1995 (1): 21-23.
- [12] 王艳玲 , 王杰 , 赵兰坡. 黑土无机磷形态及其有效性研究 [J]. 水土保持学报 ,2004 ,18(3): 85-89.
Wang Y L , Wang J , Zhao L P. Study on forms of inorganic phosphates and their usefulness in black soils in Jilin Province [J]. J. Soil Water Conserv. ,2004 ,18(3): 85-89.
- [13] 刘树堂 , 韩晓日 , 迟睿. 长期定位施肥对无石灰性潮土磷素状况的影响 [J]. 水土保持学报 ,2005 ,19(5): 43-46.
Liu S T , Han X R , Chi R. Effects of long-term located fertilization on status of phosphorus in non-calcareous fluoro-aquic soil [J]. J. Soil Water Conserv. ,2005 ,19(5): 43-46.
- [14] 张永清 , 李华 , 苗果园. 施肥深度对春小麦根系分布及后期衰老的影响 [J]. 土壤 ,2006 ,38(1): 110-112.
Zhang Y Q , Li H , Miao G Y. Effect of fertilization depth on distribution and late senescence of root system of spring wheat [J]. Soils ,2006 ,38(1): 110-112.
- [15] 刘浩 , 段爱旺 , 高阳. 间作种植模式下冬小麦根系生长的时空分布及变化规律研究 [J]. 灌溉排水学报 ,2006 ,25(1): 20-24.
Liu H , Duan A W , Gao Y. Temporal and spatial distribution and variation of root system growth of the inter planted winter wheat [J]. J. Irrig. Drain. ,2006 ,25(1): 20-24.
- [16] 王俊娟 , 杨兆生 , 张立桢. 麦棉两熟种植条件下小麦根系生长及空间分布规律的初步研究 [J]. 麦类作物学报 ,2000 ,20(1): 51-54.
Wang J J , Yang Z S , Zhang L Z. Wheat root growth and distribution under the condition of wheat and cotton intercropping system [J]. J. Trit. Crops ,2000 ,20(1): 51-54.
- [17] 张永清 , 苗果园. 冬小麦根系对施肥深度的生物学响应研究 [J]. 中国生态农业学报 ,2006 ,14(4): 72-75.
Zhang Y Q , Miao G Y. Biological response of winter wheat root system to fertilization depth [J]. Chin. J. Eco-Agric. ,2006 ,14(4): 72-75.