

天津黄潮土剖面磷素分布特征及其影响因素研究

于 丹, 张克强, 王 风, 李军幸

(农业部环境保护科研监测所资源再生研究室, 天津 300191)

摘 要:采用野外采样及室内分析方法,研究了不同磷素形态在旱地黄潮土 0~120 cm 土壤剖面中的分布特征。结果表明,经过长期施肥,供试土壤剖面 100~120 cm 的底层土壤中全磷、速效磷、各无机磷形态均有不同程度的积累。土壤剖面速效磷与全磷含量的相关系数(0.813 9)达到显著水平($P<0.05$)。无机磷形态中 Fe-P 和 O-P 的含量分别达到 52.03 和 53.57 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别高于 0~20 cm 的表层土壤的含量,达到 5% 的差异显著水平。但总体上看,由于供试土壤下层质地较为粘重以及高达 10% 的 CaCO_3 含量,促使磷在剖面的移动得以放缓,还不足以影响到地下水的质。

关键词:黄潮土;磷的垂向迁移;无机磷分级;质地;深层累积

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)03-0518-04

Distribution Characteristics of Phosphorus and Its Influencing Factors in Profile of the Yellow Moist Soil in Tianjin City

YU Dan, ZHANG Ke-qiang, WANG Feng, LI Jun-xing

(Agro-waste to Resource, Institute of Agro-environmental Protection, MOA, China, Tianjin 300191, China)

Abstract: The distribution characteristics of soil phosphorus at the depth of 0~120 cm in yellow moist soil profile were studied through field sampling analysis in Tianjin City. Results showed that soil total P, available P, and four forms of inorganic P were all accumulated at the depth of 100~120 cm after long-term fertilization, with a significant correlation coefficient of 0.8139 ($P<0.05$) between the available P and total P. The concentrations of Fe-P and O-P were 52.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 53.57 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively, higher than those at the depth of 0~20 cm, and their differences were significant at 0.05 level. Overall, the transportation of soil phosphorus in vertical direction was decreased with the increase of soil clay content and its adsorption capacity to phosphorus, further more with the CaCO_3 content up to 10%, which was not enough to influence on the quality of groundwater.

Keywords: yellow moist soil; downward transport of P; fractionation of soil inorganic P; soil texture; accumulation in deep layer

磷是植物必需的营养元素,由于土壤对磷元素有着很强的化学固定能力,故磷在土壤中的移动能力很弱^[1]。施入土壤的磷不能完全被当季作物吸收利用,大部分未被利用的磷素则以不同形态残留于土壤中。积累在土壤中的磷,一部分逐年缓慢释放供作物吸收利用,另一部分尤其是积累在土壤表层的磷,则可能通过地表径流和土壤侵蚀等方式向水体迁移,从而极易造

成附近水体的富营养化。尽管目前人们对于磷素在田间条件下是否可以发生垂直迁移的观点还不统一,但磷素在土壤剖面下层中的积累现象确有很多报道^[2-4]。

磷肥一般主要在旱季施用,国外对磷素在土壤中的分布移动研究较早,有长期施肥试验,且多集中在旱地^[2,5-6]。国内有关土壤无机磷组分的植物有效性和在地表的迁移已有一些报道^[7-8],但对长期施磷后旱地土壤各无机磷组分的垂直分布特征研究不多。本研究选择华北地区具有代表性的黄潮土,揭示其在长期施肥耕作条件下,磷素在土壤剖面垂直分布状况,探索土壤理化条件等因素对土壤磷素剖面分布的影响,为合理施用磷肥、提高磷肥利用率和维护农业生态环境提供参考依据。

收稿日期:2008-05-26

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAD17B02)“养殖废水资源化与安全回灌关键技术研究”;中央级公益性科研院所基本科研业务专项(农业部环境保护科研监测所)

作者简介:于 丹(1981—),女,天津市人,硕士生,主要从事废水生物处理及资源化利用研究。E-mail:to_yudan20@yahoo.com.cn

通讯作者:张克强 E-mail:kqzhang68@126.com

1 试验材料与方法

1.1 土样采集

供试土壤是华北地区具有代表性的黄潮土,取自天津市西青区杨柳青镇益利来养殖场附近长期施用无机磷肥的菜田,面积为 1 000 m²(长×宽=100 m×10 m),地下水埋深约 6 m。采样时间为 2007 年 10 月 14 日,土样采集采用“S”形布点采样,共选取 16 个样点,样点间距 12 m,每个样点以 20 cm 土层作为一个土样,直至 120 cm 深处,同层次土样混合均匀后于室内风干、研磨、过筛(1 mm 和 0.25 mm)后进行测试分析,每个指标重复 3 次。同时,在地块两端各挖 1 个 1.2 m 深的土壤剖面,每 20 cm 为一层用 100 cm³ 环刀采集原装土样,测定土壤容重,用烘干法测定土壤含水量,每个土层重复 4 次。剖面土样基本理化性状见表 1。

表 1 土壤剖面基本理化性状

Table 1 Physicochemical characteristics of tested soil

土层深度/ cm	容重/ g·cm ⁻³	pH (H ₂ O)	有机质/ %	CaCO ₃ / %	粒径组成/%			质地 (美国制)
					砂粒	粉粒	黏粒	
0~20	1.39	8.03	1.12	6.19	62.2	29.5	8.3	砂壤土
20~40	1.43	7.86	0.93	5.78	42.9	51.9	5.2	粉壤土
40~60	1.44	7.84	0.61	5.61	62.2	30.7	7.1	砂壤土
60~80	1.40	7.80	0.51	5.66	36.2	53.3	10.5	粉壤土
80~100	1.44	7.91	0.52	6.91	16.3	68	15.7	粉壤土
100~120	1.43	7.88	0.90	10.71	22.1	47.1	30.8	粘壤土

1.2 测定方法

土壤全磷的测定采用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮法^[9],土壤速效磷的测定采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提法^[9],无机磷各形态的测定采用石灰性土壤无机磷分级的测定方法^[10]连续提取,磷的测定用钼锑抗比色法,土壤有机质用重铬酸钾氧化法^[9],碳酸钙测定方法采用快速滴定法^[9],土壤机械组成采用吸管法^[11],土壤容重采用环刀法^[12]。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面磷素分布特征

土壤全磷是指土壤中各种形态磷素的总和,它在一定程度上可以反映土壤潜在的供磷能力,其含量的高低受土壤母质、成土作用和耕作施肥的影响很大。土壤速效磷含量的高低是衡量土壤供磷能力的重要指标,通常认为这部分磷素是作物可以吸收利用的。

分析结果表明(表 2),0~80 cm 土层范围内,土壤全磷含量随深度增加逐渐减少,0~20 cm 土层全磷含量最高,达到 0.6 g·kg⁻¹,在 60~80 cm 土层处达到最小值 0.42 g·kg⁻¹。之后,在 80~120 cm 土层内,随土层加深呈现增加的趋势。土壤速效磷在剖面的分布状况与全磷类似,在 0~20 cm 含量最大,20 cm 以下土层显著减少,并在 40~60 cm 土层含量最小;在 40~120 cm 土层内,土壤速效磷含量随土层加深逐渐增加。土壤耕层速效磷含量为 41.05 mg·kg⁻¹,旱地土壤耕层有效磷均大多在 20 mg·kg⁻¹ 以上,由于该区农田多为一年多茬的菜地,化肥施用量较大,故土壤速效磷含量充足,同时,过多的速效磷形态转换成全磷。表现出土壤速效磷与全磷的相关系数(0.813 9)达到显著水平($P<0.05$)。用速效磷与全磷比值作为土壤磷素活化系数(Phosphorus activation coefficient,简称 PAC)可以表征全磷与有效磷的变异状况。有研究表明^[13],PAC 低于 2.0 说明全磷不易转化为速效磷。根据测定结果(见表 2),供试土壤磷素活化系数仅在耕层达到 6.84,耕层之下的土壤磷素活化系数均小于 2.0,土壤磷素活化系数随深度增加在剖面中呈先降低(0~60 cm 土层)后缓慢升高(60~120 cm 土层)的趋势。耕层以及亚耕层土壤磷素活化系数高对植物的磷素营养有重要意义,但值得注意的是 100 cm 以下土层 PAC 值有所升高,意味着磷素在土壤深层的高活性将给地下水的污染带来潜在风险。

表 2 土壤剖面磷素分布状况

Table 2 Characteristic of phosphorus distributed in experimental soil profile

土样深度/cm	全磷/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	土壤磷素活化系数
0~20	0.60±0.03a	41.05±0.39a	6.84
20~40	0.49±0.04c	5.06±0.17b	1.03
40~60	0.45±0.02d	0.30±0.00d	0.07
60~80	0.42±0.03e	0.61±0.07d	0.15
80~100	0.49±0.03c	0.72±0.00d	0.15
100~120	0.54±0.03b	3.32±0.15c	0.61

注:数据为平均值±标准差。同列数据中的不同字母表示差异达到 5% 的显著水平。

2.2 土壤剖面不同无机磷形态的分布特征

由供试土壤剖面无机磷不同形态含量(表 3)可以看出,在土壤剖面中,无机磷含量总的趋势是表层含量较高。0~20 cm 土层 Ca₂-P 占无机磷总量的 5.28%,在 80~100 cm 土层含量最低,但是 20~100 cm 各土层 Ca₂-P 含量无显著差异;Ca₈-P 含量在土壤剖

表 3 供试土壤剖面不同无机磷形态含量
Table 3 Forms of inorganic phosphorus in experimental soil profile

土层/cm	无机磷形态/mg·kg ⁻¹						无机磷/mg·kg ⁻¹
	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	
0~20	26.44±0.31a	69.85±0.36a	27.19±0.10a	41.45±0.80b	25.62±0.28b	309.53±0.77b	500.09
20~40	8.09±0.44b	26.05±0.25b	12.06±0.25b	27.85±0.42b	21.17±0.14c	309.57±0.55b	404.80
40~60	5.03±0.40b	13.16±0.50cd	6.42±0.30d	18.71±0.50d	17.40±0.07d	314.99±0.71ab	375.71
60~80	5.52±0.47b	10.92±0.03d	6.10±0.33d	18.73±0.43d	12.76±0.35e	309.21±0.92b	363.25
80~100	5.52±0.49b	12.54±0.35cd	8.04±0.18c	24.06±0.65cd	23.55±0.52bc	320.02±0.29a	393.73
100~120	6.64±0.33b	13.80±0.43c	12.05±0.25b	52.03±0.69a	53.57±0.55a	227.33±0.45c	365.43

注:数据为平均值±标准差。同列数据中的不同字母表示差异达到 5%的显著水平。

面的变化趋势与 Ca₂-P 极为接近;Al-P 和 Fe-P 含量在土壤剖面的变化趋势接近,在耕层含量最高,之后随土层深度增加而降低,在 60~80 cm 土层含量最低,随后呈现随土壤深度增加而增加。值得注意的是 Fe-P 在 100~120 cm 土层的含量高于 0~20 cm 土层,达到 5%的显著水平;土壤剖面中各土层 O-P 含量与 Fe-P 的分布特征一致;供试土壤剖面中各形态无机磷含量趋势为 Ca₁₀-P>Fe-P>O-P>Ca₈-P>Al-P>Ca₂-P。

由土壤不同形态无机磷含量变化趋势之间的相关分析(表 4)可知,Ca₂-P 与 Ca₈-P、Al-P 之间均呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为 0.991 和 0.973;Ca₈-P 与 Al-P 之间也达到极显著正相关,相关系数为 0.970。O-P 与 Fe-P、Ca₁₀-P 之间的相关系数分别为 0.900 和 0.939,分别达到 5%和 1%的显著水平。

表 4 供试土壤剖面无机磷不同形态含量相关系数
Table 4 Correlation coefficient matrix of various phosphorus forms in soil profile

磷素形态	二钙磷	八钙磷	铝磷	铁磷	闭蓄态磷
八钙磷	0.991**				
铝磷	0.973**	0.970**			
铁磷	0.449	0.409	0.615		
闭蓄态磷	0.037	0.007	0.231	0.900*	
十钙磷	0.137	0.191	0.037	0.797	0.939**

注:* 表示达到 5%的显著水平;** 表示达到 1%的极显著水平。

2.3 土壤中固磷基质的含量对磷迁移的影响

土壤酸碱性是影响土壤养分有效性的重要因素之一。大多数养分在 pH6.5~7.0 时有效性最高或接近最高。对于磷素而言,如土壤 pH 大于 7 时,水溶性磷酸盐倾向于与土壤中游离的钙离子作用,生成磷酸二钙盐,但其有效性较高,如土壤中游离的钙离子数量较大,磷酸二钙盐可进一步形成磷酸八钙以及磷灰石等难溶性盐,使磷素有效性大大降低。总之,土壤的

pH 值不同,就会引起土壤中固磷基质含量的变化,从而影响土壤磷形态分布。

供试土壤各层土壤 pH 在 7.8~8.0 之间,属于碱性土壤,且各土层 pH 值变化不大,在这种碱性环境下,土壤中的铁大部分形成了氢氧化铁沉淀,与磷酸根结合而形成 Fe-P 的量相对于 Ca-P 而言要小,供试土壤剖面 Fe-P 和 O-P 之和占全磷的 11.3%,而 Ca-P 的比例达到 65.1%,可见土壤剖面中碳酸钙含量是影响石灰性土壤中磷素形态的重要因素。通过进一步测定,供试土壤剖面碳酸钙含量均达到 5.6%以上,在 100~120 cm 土层增加至 10.71%,该土层较大的碳酸钙含量可能是磷素在此土层出现累积的主要原因。

2.4 土壤质地对磷迁移的影响

土壤中氧化铁、氧化铝和有机质对磷都有一定的固定作用,除此之外,土壤质地和结构,特别是黏粒也能影响土体内磷素的迁移和转化。施于表土的磷素在迁移的过程中,易被土壤固定,通常认为土壤中的磷沿剖面垂直向下淋溶的可能性不大。有研究表明^[14-15],相对于质地较轻的沙土而言,土壤黏粒对磷素有较强的吸附作用,结合表 1 供试土壤各层土壤质地分析结果,随着剖面深层土壤黏粒含量的增加,对土壤磷素的吸附能力增强,限制了磷素向下层土壤的迁移,也促使了磷素在土壤深层的累积。

3 结论

(1)旱地黄潮土土壤剖面在 0~80 cm 土层内全磷的含量随深度增加呈现降低的趋势,在 80~120 cm 土层逐渐升高;剖面速效磷和全磷具有相似的变化特征。土壤剖面速效磷与全磷含量的相关系数达到 5%显著水平。

(2)磷素在土壤剖面迁移转化的过程中,Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca₁₀-P 各无机磷素形态在

土壤剖面下层中含量较高,表现出积累的特征,特别是 Fe-P 和 O-P 在 100~120 cm 土层的含量显著高于 0~20 cm 的表层土壤。剖面 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 三者浓度均呈极显著正相关,而 O-P 与 Fe-P、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 之间也达到显著相关水平。

(3)石灰性土壤垂直迁移能力主要受土层碳酸钙含量的影响,随着下层土壤碳酸钙含量的增加,对磷酸盐吸附能力增强,土壤磷素垂直迁移能力随之减小,是在深层土壤中得以累积的主要原因。总体上看,由于供试土壤下层质地较为黏重,磷在剖面的移动得以放缓,还不足以影响到地下水的质。但过量地施用磷肥或不协调地施肥,不仅不能增加作物产量,而且由于多余的磷素转化为作物不能吸收利用的 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 造成肥料的浪费,增加农业成本;另一方面,土壤表层磷素含量过高,增加了磷素随径流流失的风险,也加大了磷的淋溶渗漏趋势,对周围水体的质量构成威胁。

参考文献:

- [1] 单艳红, 杨林章, 沈明星, 等. 长期不同施肥处理水稻土磷素在剖面的分布与移动[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 970-976.
SHAN Yan-hong, YANG Lin-zhang, SHEN Ming-xing. Accumulation and downward transport of phosphorus in paddy soil in long-term fertilization experiments[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 970-976.
- [2] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24: 904-910.
- [3] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2689-2701.
LV Jia-Long. Phosphorus leaching from agricultural soils and its prediction[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2689-2701.
- [4] 杨学云, Brookes P C, 李生秀. 土壤磷淋失机理初步研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 479-482.
YANG Xue-yun, Brookes P C, LI Sheng-xiu. Preliminary study on mechanism of phosphorus leaching in cumelic cinnamon soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(5): 479-482.
- [5] Chardon W J, Schoumans O F. Soil texture effects on the transport of phosphorus from agricultural land in river deltas of Northern Belgium, The Netherlands and North-West Germany. 2007 British Society of Soil Science[J]. *Soil Use and Management*, 23(Suppl. 1): 16-24.
- [6] Faruk Djodjic, Katarina Börling, et al. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33: 678-684.
- [7] 章明奎, 王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 282-285.
ZHANG Ming-kui, Wang Li-ping. Study on mechanisms of phosphorus downward transfer in arable soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 282-285.
- [8] 向万胜, 童成立, 吴金水, 等. 湿地农田土壤磷素的分布、形态与有效性及磷素循环[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2067-2075.
XIANG Wan-Sheng, TONG Cheng-Li, WU Jin-shui. Chemical forms, availability and cycling of soil phosphorus in wetland farming systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2067-2075.
- [9] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1990: 80-83.
Nanjing Agricultural University. Analytical techniques of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1990: 80-83.
- [10] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2): 101-102.
GU Yi-chu, JIANG Bo-pan. Measurement method of soil inorganic-P fractionation on calcareous soil[J]. *Soil*, 1990, 22(2): 101-102.
- [11] Jacob H D, Clarke T G. Method of soil analysis part 4-physical methods[M]. USA: Soil Science Society of America, 2002: 229-240.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学出版社, 1978.
Institute of Soil Science Chinese Academy of Sciences. Analytical techniques of soil agricultural chemistry[M]. Shanghai: Shanghai Science Press, 1978.
- [13] 陈新, 梁成华, 张恩平, 等. 长期定位施肥对蔬菜保护地土壤磷素空间分布的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(12): 209-212.
CHEN Xin, LIANG Cheng-hua, ZHANG En-ping, et al. Effect of long-term located fertilization on spatial distribution characteristics of phosphorus in vegetable soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(12): 209-212.
- [14] 周涛, 尚红莺, 梁锦绣. 风沙土磷素转化与酿酒葡萄对磷素吸收利用的研究[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(2): 67-70.
ZHOU Tao, SHANG Hong-ying, LIANG Jin-xiu. The transfer of phosphorus resource in sand soil and its utilization by wine-grapes[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(2): 67-70.
- [15] 张志红, 赵成刚, 李涛. 污染物在土壤、地下水及粘土层中迁移转化规律研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 176-180.
ZHANG Zhi-hong, ZHAO Cheng-gang, LI Tao. Research on contaminant transport and transform in soil, underground water and clay soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 176-180.