

不同种植年限苹果园土壤磷状况和无机磷组分特征

贾志航, 吕明露, 张鑫, 朱占玲, 姜远茂, 葛顺峰

(作物生物学国家重点实验室, 山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 通过采集胶东地区不同年限苹果园 0—100 cm 土层土壤, 分析了不同种植年限苹果园土壤全磷、有效磷、无机磷含量和无机磷组分特征, 以为苹果园科学施用磷肥提供依据。结果表明: 胶东地区苹果园 0—40 cm 土层土壤全磷、无机磷、有效磷平均含量为 0.76 g/kg, 681.10 mg/kg, 73.05 mg/kg。种植年限显著影响了苹果园土壤磷含量, 随着种植年限的增加耕层土壤全磷、有效磷和无机磷含量呈上升趋势。不同种植年限的苹果园土壤全磷、有效磷及各无机磷组分均随着土层的加深整体呈递减趋势。无机磷组分主要以 Al—P、O—P 的形式存在, 其次为 Fe—P、Ca—P。种植年限明显影响了无机磷各组分的组成, 11~15 年苹果园 Al—P 比例最高, 而 16~20 年苹果园 O—P 比例最高。相关性分析及通径分析结果表明, Al—P 是该地区相对较为有效的磷源。

关键词: 苹果; 种植年限; 全磷; 有效磷; 无机磷组分

中图分类号: S661.1; S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0308-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.042

Phosphorus Status and Inorganic Phosphorus Fractions in Apple Orchards Soil with Different Planting Years

JIA Zhihang, LÜ Minglu, ZHANG Xin, ZHU Zhanling, JIANG Yuanmao, GE Shunfeng

(State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: In order to provide scientific basis for phosphorus fertilizer application in apple orchard in Jiaodong region, total phosphorus, available phosphorus, inorganic phosphorus and inorganic phosphorus fractions in 0—100 cm layer soil of apple orchards with different planting years were analyzed. The average contents of total phosphorus, inorganic phosphorus, and available phosphorus in the 0—40 cm soil layer were 0.76 g/kg, 681.10 mg/kg, 73.05 mg/kg respectively. The planting years had a significant effect on the soil phosphorus contents. The total soil phosphorus, available phosphorus and inorganic phosphorus fractions decreased with the deepening of soil layer. The inorganic phosphorus mainly existed in the form of Al—P and O—P, followed by Fe—P and Ca—P. The planting years significantly affected the composition of inorganic phosphorus fractions, and the proportion of Al—P was the highest in 11~15 years apple orchards, while the proportion of O—P was the highest in 16~20 years apple orchards. The results of correlation analysis and path analysis showed that Al—P was a relatively effective source of phosphorus in this region.

Keywords: apple; planting years; total phosphorus; available phosphorus; inorganic phosphorus fractions

磷是植物生长所必须的三大元素之一, 在能量转移和储存、光合作用、酶活性调节以及碳水化合物的代谢和运输中起着至关重要的作用。磷在土壤中的扩散速率低, 且易与土壤中 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 反应生成作物难以利用的形态, 使其生物有效性降低, 因此需要持续的磷肥投入以维持作物的产量。2018 年,

我国磷肥(P_2O_5)表观消费量达到 $1\ 180.3 \times 10^7$ kg^[1], 但是磷肥的当季利用率仅为 10%~25%^[2], 造成磷在土壤中的大量累积, 不仅导致了磷资源的浪费, 还增加了磷淋失带来的水体富营养化等环境风险。已有研究^[3-5]表明, 我国大部分果园土壤磷素年际平均盈余量在 269~468 kg/hm², 80%以上的果园土壤磷

收稿日期: 2020-01-15

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200200/08, 2016YFD0201100); 国家现代农业产业技术体系建设资金项目(CARS-27); 国家自然科学基金项目(31501713); 山东省泰山学者工程专项(TSPD20181206)

第一作者: 贾志航(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事苹果磷素营养研究。E-mail: 814874035@qq.com

通信作者: 姜远茂(1964—), 男, 教授, 主要从事果树营养生理和果园土壤肥力研究。E-mail: gsyj@sdau.edu.cn

葛顺峰(1985—), 男, 副教授, 主要从事土壤碳氮磷循环和果树营养研究。E-mail: geshunfeng210@126.com

素处于盈余,河北省、山东省和北京市分别有 33.6%, 56.69%, 33.6% 的果园面临较高的土壤磷淋失风险。因此,合理施用磷肥对实现苹果园磷肥高效利用以及减少环境污染具有重要意义。

有机态和无机态是土壤磷素存在的主要形式,土壤中的有机磷需要经过矿化成无机磷后才能被植物吸收利用^[6],而不同形态的无机磷植物有效性也存在很大差异,土壤中磷的存在形态和比例决定了土壤磷素的供应能力。因此,通过土壤磷素化学分级方法研究土壤磷不同组分的含量及比例,对于分析土壤磷库特征及磷素供应状况至关重要。李若楠等^[7]分析了陕西关中平原冬小麦—夏玉米种植区等有机质土有效磷和无机磷形态的关系发现,耕层土壤的无机磷以钙磷为主,约占无机磷总量的 66.67%,在有机质相同或相近条件下,Ca₂-P 为最有效的磷源。史静等^[8]通过 33 年长期施肥试验研究了不同施磷处理对中原红壤中磷素形态转化及含量的影响表明,土壤中无机磷组分以 Fe-P 为主,Al-P、Fe-P 对速效磷的相对有效性高;林诚等^[9]发现,施肥显著影响了福建黄泥田土壤有效磷、全磷及磷库组分,施肥均降低了土壤 O-P(被铁铝氧化物包裹的闭蓄态磷)比例,但提高了 Al-P、Ca-P 在无机磷中的比重。余海英等^[10]分析了不同使用年限温室土壤剖面全磷及无机磷各组分含量指出,Al-P 和 Fe-P 是温室栽培耕层土壤(0—20 cm)磷素养分的主要累积形态,但迁移、转化的主要存在形态均以有效性较低的 Ca₁₀-P、O-P、Fe-P 为主。此外,长期高负荷肥料投入下果园土壤 pH、微生物、团聚体、酶活等都会发生变化^[11],这些因素对土壤中磷素转化及不同磷形态的有效性也会产生影响。

关于不同种植年限对果园土壤养分特征的影响,主要集中在氮磷钾等养分含量及酶活的变化^[4,11-12],而对土壤无机磷组分含量及垂直分布特征的研究鲜有报道。因此本研究通过采集胶东地区不同种植年限苹果园土壤,分析不同土层土壤磷素状况以及无机磷组分含量及分布特征,以期为该地区苹果园制定科学施磷策略提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

于 2017 年 9 月,在山东省烟台市栖霞(120°50'N,37°17'E)、牟平(121°35'N,37°23'E)、蓬莱(120°45'N,37°48'E)、莱阳(120°43'N,36°58'E)、招远(120°23'N,37°21'E)选取当地常规管理条件下具有代表性的苹果园作为采样点,综合考虑调查区域苹果园总面积和地形来确定每个区域的调查点数量和密度,确保选定的调查点的地形和土壤类型的分布频率基本一致,按照不同树龄分为 0~5

年($n=22$)、6~10 年($n=37$)、11~15 年($n=15$)、16~20 年($n=21$)4 类果园,共计 95 个。根据每个果园地形和具体面积,采取“S”形随机五点取样法在树冠投影处钻取 0—100 cm 土层,每层 20 cm。土壤样品置室内风干后,过 60 目筛用于磷含量测定。

1.2 测定项目

土壤有效磷(Olsen-P)采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法^[13]测定;全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮,钼锑抗比色法^[13]测定。无机磷组分采用 Chang 等^[14]提出的方法测定,步骤为:(1)1 mol/L NH₄Cl 浸提疏松态 P;(2)0.5 mol/L NH₄F(pH=8.2)浸提 Al-P;(3)0.1 mol/L NaOH 浸提 Fe-P;(4)0.3 mol/L 柠檬酸钠+0.5 g Na₂S₂O₄ 水浴,0.1 mol/L NaOH 浸提闭蓄态磷(O-P);(5)0.5 mol/L H₂SO₄ 浸提 Ca-P。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 和 Origin 2017 软件进行数据、图表整理;数据分析采用 SPSS 19.0 软件进行 Pearson 相关性分析,选择双侧检验, $p < 0.05$ 显著相关, $p < 0.01$ 极显著相关;通径分析方法参照杜家菊等^[15]的方法,首先进行正态分布检验,然后使用 SPSS“Analyze→Regression→Linear”得到直接通径系数,进而根据公式计算间接通径系数。

2 结果与分析

2.1 不同种植年限苹果园耕层土壤全磷、无机磷和有效磷含量变化

由图 1 可知,苹果园耕层(0—40 cm)土壤全磷、无机磷、有效磷含量的变化范围分别为 0.19~2.71 g/kg,382.45~935.59 mg/kg,11.27~192.66 mg/kg,平均含量为 0.76 g/kg,681.10 mg/kg,73.05 mg/kg。随着种植年限的增加,土壤全磷和速效磷均不断增加,其中 16~20 年苹果园土壤全磷和有效磷含量分别高达 0.96 g/kg 和 86.08 mg/kg。土壤无机磷总量也随种植年限增加而增加。土壤中无机态磷是磷素的主要形态,占全磷的比例平均为 89.0%,土壤无机磷占全磷的比例随栽植年限的增加呈现先上升后下降的趋势。耕层土壤全磷和有效磷含量与其对应的种植年限的 Pearson 相关性分析表明,土壤全磷和有效磷与种植年限均呈极显著相关($p < 0.01$)。对照果园土壤磷素含量的分级标准^[16],胶东地区苹果园耕层土壤有效磷处于极高水平(>50 mg/kg)。

2.2 不同种植年限苹果园 0—100 cm 土壤剖面全磷和有效磷含量变化

不同种植年限苹果园土壤全磷、有效磷剖面分布存在差异。0—20 cm 土层中全磷含量表现为 16~20

年>6~10年>11~15年>0~5年,有效磷则以11~15年苹果园最高,其次为16~20年。20—60 cm土层6~10年与11~15年苹果园土壤的全磷含量差异较小,而16~20年则明显大于种植年限小的果园;

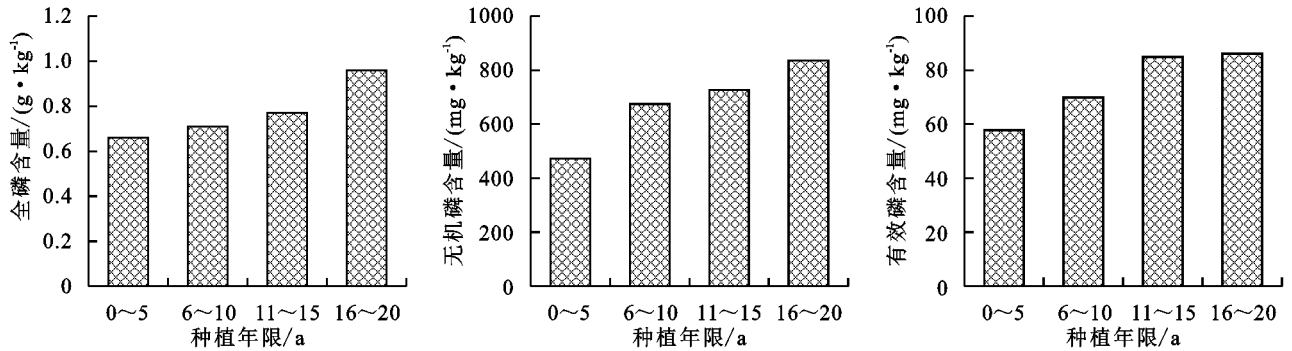


图1 不同种植年限苹果园耕层土壤(0—40 cm)全磷、无机磷、有效磷含量

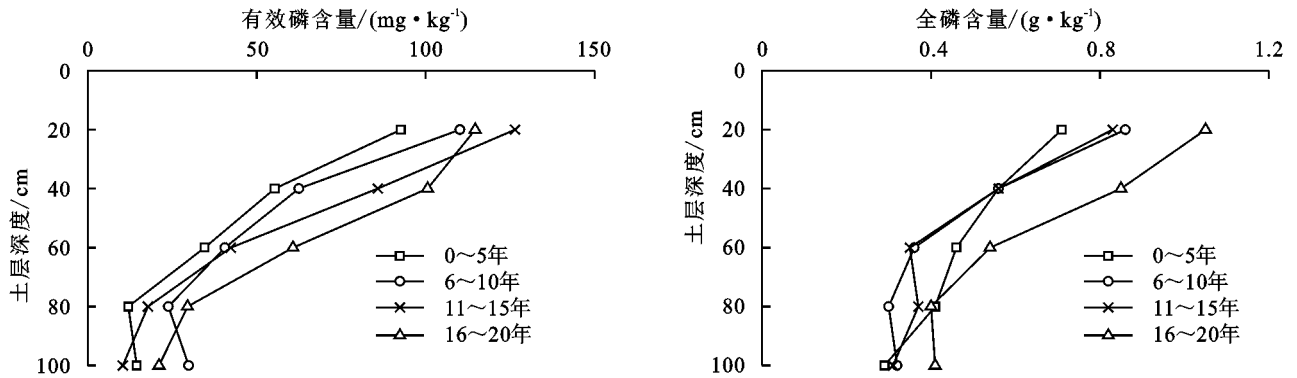


图2 不同年限苹果园不同土层土壤有效磷、全磷含量

2.3 不同种植年限苹果园0—100 cm土壤剖面无机磷组分

由图3可知,除11~15年苹果园土壤Fe—P外,其他无机磷组分均随土层深度的增加而降低。Al—P含量在0—40 cm土层表现出11~15年>16~20年>6~10年>0~5年,40 cm以下土层则以16~20年最高;除了11~15年苹果园20 cm和11~15年100 cm外,Fe—P含量均随种植年限的增加而增加;Ca—P含量在种植5年以上的苹果园变化不明显,但0~5年果园各土层均为最低;0—60 cm土层O—P含量以16~20年苹果园最高,显著高于其他年种植年限苹果园。

从图4可以看出,不同种植年限土壤无机磷组分比例不同。0~5年苹果园土壤无机磷以O—P和Al—P为主,6~10年和11~15年的苹果园土壤Al—P占无机磷的比例最高,16~20年则以O—P为主。0~15年的范围内,随着种植年限的增加土壤Al—P占无机磷的比例不断增加,Fe—P和O—P大致呈下降趋势,Ca—P变化较小,16~20年苹果园土壤无机磷组分比例变化较大,与11~5年苹果园相比,Al—P、Fe—P、Ca—P比例出现下降,Al—P下降幅度最大,下降了7.09%,而O—P增加了8.63%。

20—60 cm土层中有效磷含量随种植年限的增加表现出增加的趋势;60—100 cm土层各年限间无明显差异(图2)。不同年限苹果园中土壤有效磷和全磷均随土层的加深而降低,表现出明显的表层聚集现象。

2.4 耕层土壤磷组分与有效磷的关系

有效磷和无机磷组分相关性分析(表1)表明,耕层(0—40 cm)土壤有效磷含量和Al—P呈显著正相关关系($p < 0.05$),相关性系数为0.491,而其他磷组分与有效磷之间无显著关系。此外,Fe—P与Al—P、Ca—P也均呈显著正相关关系。

通径分析结果(表2)表明,各形态无机磷对有效磷的直接通径系数大小顺序为Al—P(0.337)>Fe—P(0.224)>Ca—P(0.106)>O—P(-0.058)。Al—P对有效磷的直接影响最大(0.337),且Al—P在Fe—P、Ca—P的间接通径系数中均为最大(分别为0.166,0.113),O—P对有效磷的贡献为负值(-0.058),但O—P通过Al—P也有较大的正通径链系数(0.102),表明这些无机磷组分均可通过Al—P对有效磷产生间接作用。可见,Al—P是苹果园土壤中相对较为有效的磷源,其次是Fe—P。

3 讨论

土地利用类型不同显著影响了土壤磷素累积状况,据报道^[4]京郊平谷区果园土壤磷素年际盈余量达到了468 kg/hm²,远大于粮田的磷素盈余(38 kg/hm²),这主要归因于果园磷肥用量高。本研究发现,与0~5年

苹果园相比,16~20 年苹果园土壤全磷、无机磷和有效磷含量显著增加,表明长期施肥会造成土壤磷的大量积累,这与李中阳等^[17]的研究结果一致。前人^[18-19]研究表明,土壤吸附磷素的能力具有一定的限度,长期过量的化肥或有机肥投入,使土壤磷的吸附度逐渐达到饱和,土壤固磷能力下降,当土壤有效磷含量超过磷素淋失临界值时,会显著加大土壤磷素流失的风险。刘晶晶^[20]对山东栖霞苹果园土壤磷素淋失风险进行了评估指出,0—40 cm 土层磷淋失的有效磷临界值为 45 mg/kg,当 >60 mg/kg 时会发生高强度淋洗。王海云等^[16]于

2003—2006 年采集山东苹果主产区烟台、威海主要县市 1 105 个土壤样品分析发现,该地区有效磷平均为 40.09 mg/kg;王富林等^[21]2013 年通过对中国环渤海地区 15~20 年的苹果园土壤养分进行诊断后发现,环渤海地区土壤有效磷均值已经提高为 70.22 mg/kg;本研究发现,胶东地区苹果园耕层(0—40 cm)土壤有效磷含量平均为 73.05 mg/kg,15~20 年苹果园土壤有效磷高达 84.91 mg/kg,远远超过了土壤磷淋失风险阈值。可见,长期的高磷投入造成了胶东地区苹果园土壤有效磷的大量累积,土壤磷向深层土壤淋溶风险较大。

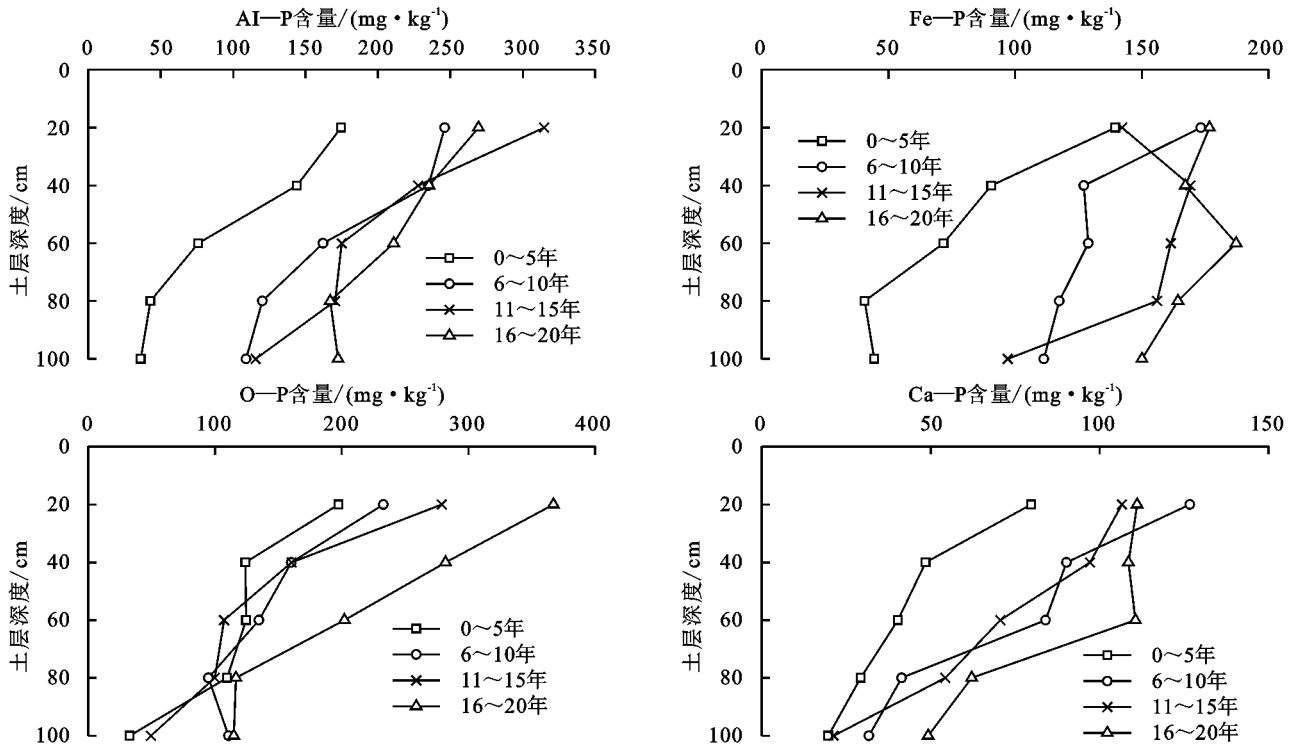


图 3 不同种植年限苹果园不同土层土壤各无机磷形态含量

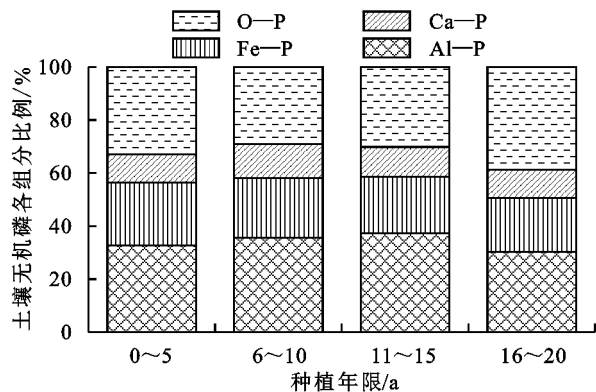


图 4 不同种植年限土壤无机磷各组分百分比

表 1 土壤磷组分与有效磷的相关性分析

磷组分	Al-P	Fe-P	Ca-P	O-P	Olsen-P
Al-P	1.000	0.465*	0.334	0.303	0.491*
Fe-P		1.000	0.435*	0.267	0.424
Ca-P			1.000	0.201	0.311
O-P				1.000	0.125

注: * 表示显著相关 ($p < 0.05$)。

土壤中有有效磷易被植物吸收利用,且总量较低,土壤磷素累积的主体往往是无机磷^[22]。土层深度和种植年限显著影响了不同形态无机磷的累积。相同种植年限土壤剖面无机磷组分分布结果表明,0—40 cm 土层土壤中 Ca-P、Al-P、Fe-P、O-P 表层聚集现象明显;0—60 cm 土层土壤无机磷的累积形态以 Al-P、O-P 为主,两者占无机磷总量的 56.42%~72.29%,其中 0~15 年间的苹果园下层土壤 Al-P 的增长较快,是主要的无机磷累积形态,O-P 在 16~20 年苹果园 0—60 cm 土层中的累积量比 11~15 年苹果园显著提高,增长量远高于 Al-P、Fe-P、Ca-P,可见此时 O-P 成为无机磷累积的主要形态。除 0~5 年苹果园 60—80 cm 土壤无机磷以 Al-P、O-P 为主要累积形态外,深层土壤(60—100 cm)无机磷累积的主要形态是 Al-P、Fe-P,两者的相对含量可达 61.82%~76.20%。可见,不同种植年限影响了土壤剖面无机磷组分分布,也影响了不同无

机磷组分向下迁移的速度,这一方面与施磷时期长短影响了无机磷组分有关^[8-9],也与长期施肥改变了土壤理化性质有关^[11-12]。

土壤类型显著影响了无机磷组分,酸性土壤中磷酸根离子主要以 $H_2PO_4^-$ 形态与活性铁、铝或交换性铁、铝以及赤铁矿、针铁矿等发生化合作用,形成化合物。在本研究中胶东地区苹果园土壤偏酸,Al-P 含量最多,O-P 和 Fe-P 含量次之,这与史静等^[8]对酸性土壤无机磷组分的研究结果相似。种植年限也影响了各无机磷组分的比例。随着种植年限的增加,Al-P 呈现先增加后降低的趋势,在 11~15 年的苹果园最高,原因可能是在于该研究地区偏酸性土居多,Al³⁺ 含量相对丰富,种植初期投入的磷素与土壤中的活性铝或交换性铝发生化合作用。而 O-P 占比变化与 Al-P 相反,一开始略微下降,当种植年限达到 16~20 年时快速增加,可能的原因:一方面土壤中铝与磷之间的结合已呈现饱和;另一方面由于长期肥料高投入,土壤风化速度加快,而 O-P 的形成与土壤风化强度呈正相关^[23],同时长期的化肥施用也进一步加剧了土壤酸化,也有利于 O-P 的形成^[24]。

表 2 土壤无机磷组分含量与有效磷含量之间的通径分析

影响因子	直接影响	间接影响				与 y(有效磷)相关系数
		$x_1 \rightarrow y$	$x_2 \rightarrow y$	$x_3 \rightarrow y$	$x_4 \rightarrow y$	
Al-P(x_1)	<u>0.337</u>		0.110	0.035	-0.017	0.465
Fe-P(x_2)	<u>0.224</u>	<u>0.166</u>		0.049	-0.015	0.377
Ca-P(x_3)	<u>0.106</u>	<u>0.113</u>	<u>0.104</u>		-0.012	0.316
O-P(x_4)	<u>-0.058</u>	<u>0.102</u>	<u>0.060</u>	<u>0.021</u>		0.139

注:标注下划线的 0.337,0.229,0.106,-0.058 为各形态无机磷对有效磷的直接通径系数;其余 6 个标注下划线的数据为间接通径系数。

不同类型土壤的无机磷组分对有效磷的影响不同。介晓磊等^[25]对石灰性潮土小麦根际无机磷组分分析结果显示,Ca₂-P 与土壤速效磷间的相关性达极显著水平,Ca₈-P、Al-P、Fe-P 达显著水平,O-P、Ca₁₀-P 不显著。Wang 等^[26]对崂土 21 年长期定位试验的结果表明,Ca₁₀-P 与 Olsen-P 相关性较差,其他形态的无机磷与 Olsen-P 均呈极显著正相关关系;史静等^[8]发现,Fe-P、Al-P 为山原红壤的有效磷源。胶东地区苹果园土壤大多为棕壤土,少数为褐土和潮土。前人^[27]研究对棕壤土中无机磷的有效性已有报道指出,棕壤土中 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P 均与有效磷呈显著或极显著正相关,Al-P、Fe-P 对有效磷的相对有效性高。本研究发现,Al-P 与土壤有效磷呈显著正相关关系,且 Al-P 对有效磷的直接贡献最大,这与前人^[27]研究结果略有不同。推测其原因,可能是由于土地利用类型不同,施肥用量和方式有差异,影响了土壤无机磷累积

和转化;其次栽植作物不同,不同作物对各无机磷组分的溶解、利用能力差别较大,导致土壤无机磷有效性存在差异。

4 结论

(1)胶东地区苹果园耕层土壤磷素含量丰富,种植年限越长深层土壤磷素累积现象越严重。

(2)胶东地区苹果园土壤磷以无机磷为主,主要是 Al-P 和 O-P,11~15 年苹果园 Al-P 比例最高,而 16~20 年苹果园 O-P 比例最高。相关性分析及通径分析结果表明,Al-P 是该地区相对较为有效的磷源。

参考文献:

- [1] 王莹,方俊文,王焕喜,等.2018 年我国磷复肥行业运行情况与发展趋势[J].磷肥与复肥,2019,34(6):1-8.
- [2] 王永壮,陈欣,史奕.农田土壤中磷素有效性及影响因素[J].应用生态学报,2013,24(1):260-268.
- [3] 卢树昌,陈清,张福锁,等.河北果园主分布区土壤磷素投入特点及磷负荷风险分析[J].中国农业科学,2008,41(10):3149-3157.
- [4] 柏兆海,万其宇,李海港,等.县域农田土壤磷素积累及淋失风险分析:以北京市平谷区为例[J].农业环境科学学报,2011,30(9):163-170.
- [5] 朱占玲,夏晋,刘晶晶,等.山东省苹果园磷素投入调查及磷环境负荷风险分析[J].园艺学报,2017,44(1):97-105.
- [6] Bai J H, Ye X F, Jia J, et al. Phosphorus sorption-desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions [J]. Chemosphere,2017,188:677-688.
- [7] 李若楠,王政培,Batbayar J,等.等有机质峻土有效磷和无机磷形态的关系[J].中国农业科学,2019,52(21):3852-3865.
- [8] 史静,张誉方,张乃明,等.长期施磷对山原红壤磷库组成及有效性的影响[J].土壤学报,2014,51(2):351-359.
- [9] 林诚,王飞,何春梅,等.长期不同施肥对南方黄泥田磷库及其形态的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):541-549.
- [10] 余海英,李廷轩,张树金,等.温室栽培条件下土壤无机磷组分的累积、迁移特征[J].中国农业科学,2011,44(5):956-962.
- [11] 陈金星.不同种植年限苹果园土壤特性比较[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [12] 胥继东,王益权,刘军,等.渭北旱塬不同树龄果园土壤营养状况演化趋势[J].安徽农业科学,2008,36(31):13722-13724.
- [13] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:166-185.

- 社,1999.
- [13] Zhang Y, Wei L Y, Wei X R, et al. Long-term afforestation significantly improves the fertility of abandoned farmland along soil clay gradient on the Chinese Loess Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2018,29:3521-3533.
- [14] Guidi C, Vesterdal L, Gianelle D, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen following forest expansion on grassland in the Southern Alps[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014,328:103-116.
- [15] Li D F, Gao G Y, Lu Y H, et al. Multi-scale variability of soil carbon and nitrogen in the middle reaches of the Heihe River basin, northwestern China[J]. *Catena*, 2016,137:328-339.
- [16] Liu Y, Yu D S, Wang N, et al. Impacts of agricultural intensity on soil organic carbon pools in a main vegetable cultivation region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013,134(8):25-32.
- [17] Zhao L P, Sun Y J, Zhang X P, et al. Soil organic carbon in clay and silt sized particles in Chinese mollisols; Relationship to the predicted capacity[J]. *Geoderma*, 2006,132(3/4):315-323.
- [18] 张梦,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2018,32(1):85-90.
- [19] 吴东,黄志霖,肖文发,等.三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J]. *环境科学*, 2015,36(10):3825-3831.
- [20] Kisić I, Bogunović I, Zgorelec Z, et al. Effects of soil erosion by water under different tillage treatments on distribution of soil chemical parameters[J]. *Soil and Water Research*, 2018,13(1):36-43.
- [21] Merloti L F, Mendes L W, Pedrinho A, et al. Forest-to-agriculture conversion in Amazon drives soil microbial communities and N-cycle[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019,137:188-196.
- [22] 刘丹,丁明军,文超,等.赣南红壤丘陵区¹³⁷Cs示踪土壤侵蚀对土壤养分元素的影响[J]. *水土保持学报*, 2019,33(1):64-69.
- [23] Jiang Y L, Zheng F L, Wen L L, et al. Effects of sheet and rill erosion on soil aggregates and organic carbon losses for a Mollisol hillslope under rainfall simulation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019,19(1):467-477.
- [24] 吴海勇,曾馥平,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地土壤有机碳和氮素空间变异特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009,15(5):1029-1036.
- [25] Yin C H, Shi Q M, Zhao X, et al. The role of tamarisk in the spatial heterogeneity of soil resources in the northern Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. *Plant and Soil*, 2017,420(1/2):523-538.

(上接第 312 页)

- [14] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorous[J]. *Soil Science*, 1957,84:133-144.
- [15] 杜家菊,陈志伟.使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. *生物学通报*, 2010,45(2):4-6.
- [16] 王海云,姜远茂,彭福田,等.胶东苹果园土壤有效养分状况及与产量关系研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2008,39(1):31-38.
- [17] 李中阳,徐明岗,李菊梅,等.长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征[J]. *土壤通报*, 2010,41(6):160-165.
- [18] 戚瑞生,党廷辉,杨绍琼,等.长期定位施肥对土壤磷素吸持特性与淋失突变点影响的研究[J]. *土壤通报*, 2012,43(5):1187-1194.
- [19] 席雪琴,孙本华,陈勇,等.塿土区作物和土壤淋溶磷临界值研究及推荐施磷建议[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(6):34-40.
- [20] 刘晶晶.苹果主产区土壤磷素状况、淋失阈值及阻遏技术研究[D].山东泰安:山东农业大学,2018.
- [21] 王富林,门永阁,葛顺峰,等.两大优势产区‘红富士’苹果园土壤和叶片营养诊断研究[J]. *中国农业科学*, 2013,46(14):2970-2978.
- [22] 张邦喜,李渝,秦松,等.长期施肥下黄壤无机磷组分空间分布特征[J]. *华北农学报*, 2016,31(3):212-217.
- [23] 张树金,余海英,李廷轩,等.温室土壤磷素迁移变化特征研究[J]. *农业环境保护*, 2010,29(8):1534-1541.
- [24] Lydia P O, Peter M V. Biological and geochemical sinks for phosphorus in soil from a wet tropical forest[J]. *Ecosystems*, 2004,7(4):404-419.
- [25] 介晓磊,杨先明,黄绍敏,等.石灰性潮土长期定位施肥对小麦根际无机磷组分及其有效性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2007(2):53-58.
- [26] Wang J, Liu W Z, Mu H F, et al. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application[J]. *Pedosphere*, 2010,20(3):304-310.
- [27] 程艳丽,程希雷,邹德乙,等.棕壤长期定位施肥 15 年后磷素形态及有效性[J]. *土壤通报*, 2009,40(6):1362-1366.