

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.005

颜晓军, 苏达, 郑朝元, 等. 长期施肥对酸性土壤磷形态及有效性的影响. 土壤, 2020, 52(6): 1131–1136.

长期施肥对酸性土壤磷形态及有效性的影响^①

颜晓军^{1,2}, 苏达^{2,3}, 郑朝元^{1,2}, 叶德练^{2,3}, 吴良泉^{1,2*}

(1 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2 福建农林大学国际镁营养研究所, 福州 350002; 3 福建农林大学作物科学学院, 福州 350002)

摘要: 为明确长期施肥对集约化果园土壤磷形态、分布特征及其有效性的影响, 本研究对琯溪蜜柚主产区 29 个果园的土壤进行调查研究, 采用张守敬和 Jackson 的酸性土壤无机磷分级方法, 研究蜜柚果园土壤磷素累积对土壤磷形态及有效性的影响。结果表明: 在集约化蜜柚果园中, 土壤磷素累积丰富, 随树龄增加土壤有效磷含量上升显著, 且土壤磷形态在不同土层存在显著性差异; 当全磷含量 ≤ 0.5 g/kg 时, 土壤磷形态主要以有机磷、铁磷为主, 随着全磷含量的上升, 铝磷含量、占比均显著上升; 多元线性回归和逐步回归分析结果表明本试验中铝磷与有效磷相关性最好。果园土壤已经形成一个巨大的磷库, 且有效性较高, 可适当减少磷肥投入, 降低土壤磷含量, 减少经济成本, 提高生态效益。

关键词: 酸性土壤; 磷表观平衡; 磷形态; 磷有效性

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Effects of Long-term Fertilization on Phosphorus Forms and Availability in Acid Soils

YAN Xiaojun^{1,2}, SU Da^{2,3}, ZHENG Chaoyuan^{1,2}, YE Delian^{2,3}, WU Liangquan^{1,2*}

(1 College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2 International Magnesium Institute, Fujian Agriculture and Forestry University Fuzhou 350002, China; 3 College of Crop Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to understand the effects of long-term fertilization on the forms, distribution and availability of phosphorus (P) in acid orchard soils, 87 soil samples were collected from pomelo orchards in Guanxi to investigate the effects of soil P accumulation on P forms and availability by using Chang and Jackson's inorganic phosphorus forms method. The results showed that soil P was abundant in intensive pomelo orchard, and soil available P increased significantly with tree age. In addition, there were significant differences in P forms among different depths. When soil total P was less than 0.5 g/kg, the main forms of P were organic-P and Fe-P, but with the increase of soil total P, Al-P ratio and content increased significantly. Multiple linear regression and stepwise regression analyses showed the significant correlation between Al-P and available P. In conclusion, orchard soil has formed a huge phosphorus pool with high availability, reducing P input properly can effectively reduce soil P content and economic cost, and improve ecological benefit.

Key words: Acid soil; Phosphorus balance; Phosphorus forms; Phosphorus availability

磷是植物生长发育所必需的大量元素之一, 同时也是一种不可再生资源^[1]。在过去几十年里, 磷肥投入在一定程度上改善了土壤肥力, 提升了作物产量。然而过量施肥也导致土壤磷素大量累积, 同时还引发一系列生态环境问题, 如水体富营养化等^[2-5]。

土壤磷素大量累积的一个显著特点是土壤有效磷含量显著上升。据统计, 从 1980—2007 年间, 我国农作物种植体系中土壤磷(P)累积量高达 242 kg/hm²,

其中有效磷由原来的 7.4 mg/kg 上升至 24.7 mg/kg^[6]。而在经济作物体系中, 土壤磷素累积和土壤有效磷的增幅更大。彭智平等^[7]在湛江市辣椒种植区发现土壤有效磷平均含量为 72.5 mg/kg。全智等^[8]研究表明, 种植 30 a 以上的蔬菜地土壤有效磷含量甚至高达 220.0 mg/kg; 卢树昌等^[9]研究也发现河北果园的磷素(P₂O₅)年盈余量为 270 kg/hm², 其中土壤有效磷含量超过 50 mg/kg 的占到样本总量的 33.6%。前人的相

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200200, 2017YFD0200207)资助。

* 通讯作者(liangquan01@163.com)

作者简介: 颜晓军(1994—), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要从事养分资源管理研究。E-mail: 16565710@qq.com

关研究多集中于对表层土壤的分析,而关于磷素投入对不同土层影响的分析还相对较少。因此,明确土壤磷素累积及土壤有效磷分布特征,将有助于指导磷肥的合理运筹。

前人的研究表明,磷素累积除影响土壤有效磷外,对磷的形态组分也会产生相应的影响^[10-15]。各磷形态的变异同时还受到了土壤和作物类型等特异性的影响。如在小麦/玉米轮作中,潮土中磷形态主要以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 累积为主^[10],砂姜土中主要以 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为主,其次是 Al-P 、 Fe-P 和 O-P ^[11],而在黑垆土中以 Al-P 和 Fe-P 累积最高^[12]。蔬菜施肥定位研究表明,长期施用磷肥明显增加土壤中无机磷积累,且 Ca-P 、 Al-P 积累程度高于 O-P 和 Fe-P ^[13];而在甘蔗种植中,红壤上磷形态累积以 Fe-P 和 Al-P 为主,分别占土壤全磷含量的 31.86% 和 19.80%^[14];在咖啡种植下,砖红壤上磷形态累积以 O-P 为主, Fe-P 、 Al-P 次之, Ca-P 最少^[15]。这些研究多集中于磷肥投入对土壤各磷形态累积和分布特征的研究,揭示磷肥投入在不同土壤、作物类型上对土壤磷形态的影响,而缺少定量土壤磷累积对土壤磷素去向及各磷形态的影响,尤其是在 $\text{pH}<5.0$ 酸性土壤上。

近年来,不同磷形态的有效性也是目前的研究热点。土壤 pH 是影响土壤磷有效性的重要因素。前人研究表明,在碱性土壤不同磷形态中, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 易被作物吸收,是作物的第一有效磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 是作物的第二有效磷源,而 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 被认为是作物的潜在磷源^[16]。设施蔬菜种植上(pH 为 6.75) Ca-P 、 Al-P 、 Fe-P 与有效磷呈显著正相关,为有效磷源^[13]。而在酸性山原红壤上(pH 为 6.10)的不同无机磷形态中, Fe-P 、 Al-P 是有效磷源,而 O-P 的有效性较低^[17]。同样是酸性土壤,白浆土上(pH 为 6.05)各磷形态以 Fe-P 和 Al-P 对有效磷的贡献大, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 次之^[18]。综观前人的研究主要集中在碱性土壤或微酸性的土壤上,而关于酸性土壤上各磷形态有效性的探究仍少见报道。

本研究采集了集约化蜜柚果园 87 个土壤样品,主要研究磷素累积对土壤有效磷、各磷形态的累积分布特征及其有效性的影响,研究对于指导果园合理施肥和管理及磷肥高效可持续利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

平和县地处漳州西南部,地理位置 $116^{\circ}54' \sim 117^{\circ}31'\text{E}$, $24^{\circ}02' \sim 24^{\circ}35'\text{N}$;属亚热带季风气候,

全年平均气温 $17.5 \sim 21.3^{\circ}\text{C}$,温差小,气候温暖,夏季较长;全年平均降雨量 $1\,600 \sim 2\,000\text{ mm}$,受季风影响年季间降雨差异较大,主要集中在 6—9 月,干湿季明显;土壤类型以红壤、水稻土为主。

1.2 农户调研及土样采集

对平和琯溪蜜柚主产区的农户调研及土样采集在 2016 年 7 月集中进行,选取安厚镇、坂仔镇、文峰镇、南胜镇、霞寨乡、崎岭乡、小溪镇、大溪镇、国强乡的 29 个具有代表性农户为调研对象(图 1),通过问卷调研的方式了解农户磷肥的施肥方式、施肥时间、施肥量和蜜柚产量;每个农户果园采取 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 和 $40 \sim 60\text{ cm}$ 土层的 87 个土样,土样采集按 S 形设置 5 个采样点均匀混合成一个土样,四分法分取约 500 g 土壤为 1 个土壤样品,采样时避开施肥点。

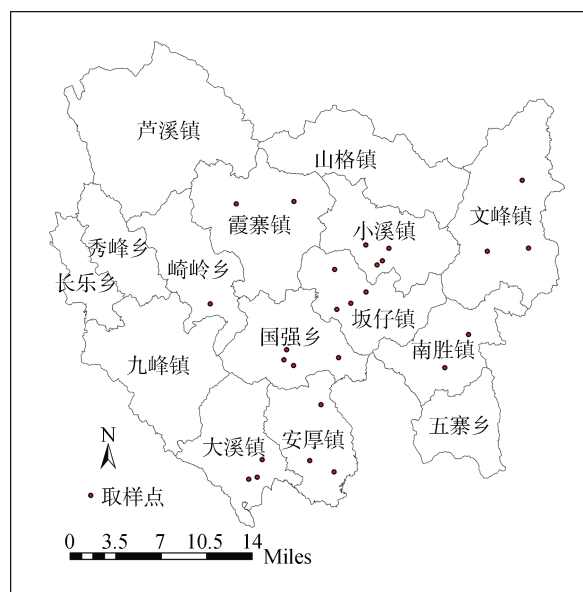


图 1 取样位点图

Fig. 1 Sampling sites

1.3 测定项目与方法

土壤无机磷组分是根据 Chang 和 Jackson^[19]提出的酸性土壤无机磷分级方法测定;有机磷采用灼烧法分离测定;有效磷含量用盐酸-氟化铵法浸提,钼蓝比色法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效钾含量用 $1.0\text{ mol/L NH}_4\text{OAC}(\text{pH}7.0)$ 浸提-火焰光度计法测定;土壤 pH 采用电位法测定(土水比为 1:2.5);有机碳含量用碳氮分析仪测定^[20]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行数据处理,用 SPSS 21.0 软件进行数据统计和分析,进行方差分析,不同处理间数据的多重比较采用 Duncan 新复极差法检验 ($P<0.05$),利用 Excel 2010 软件作图。

2 结果与分析

2.1 蜜柚果园土壤磷素累积状况

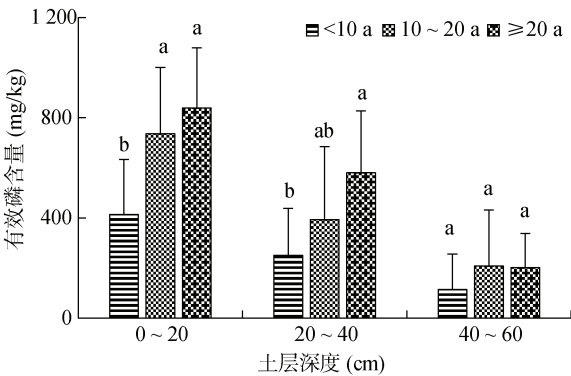
通过对蜜柚果园土壤基本理化性质分析可知(表 1), 表层(0~20 cm)土壤 pH 介于 3.46~5.89, 平均值为 4.56, 根据柑橘园土壤 pH 分级标准^[21], 71.4% 的土壤 pH 偏酸, 不适宜于柑橘生长。中层(20~40 cm)土壤、底层(40~60 cm)土壤 pH 平均值分别为 4.19 和 4.15。不同土层的土壤有效磷含量存在显著性差

异, 随着土层深度的增加, 有效磷含量呈现下降趋势。表层土壤有效磷含量丰富且变异大, 平均含量 638.9 mg/kg, 变异系数 46.51%; 中层、底层土壤有效磷平均含量分别为 384.9 和 171.7 mg/kg, 变异系数分别为 69.9%、102.2%。随着蜜柚种植年限的增加, 土壤磷素盈余上升, 有效磷含量也随之增加(图 2), <10 a、10~20 a、≥20 a 有效磷含量分别为 414.2、736.2、839.2 mg/kg; 表层土壤树龄<10 a 的果园土壤有效磷含量显著低于树龄>10 a 的果园, 底层土壤之间没有显著性差异。

表 1 土壤基本理化性质
Table 1 Soil physiochemical properties

土层深度(cm)	pH	有机碳(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
0~20	4.56±0.63 a	13.1±2.9 a	131.3±39.7 a	638.9±297.2 a	192.2±84.4 a
20~40	4.19±0.46 b	8.3±2.2 b	83.7±23.5 b	384.9±269.2 b	144.4±60.7 b
40~60	4.15±0.32 b	6.3±2.2 c	66.7±20.3 c	171.7±175.5 c	138.9±60.1 b

注：同一列中小写字母不同表示不同土层间差异达新复极差检验 $P<0.05$ 显著水平，下表同。



(同一土层深度中小写字母不同表示不同年限间差异达到新复极差检验 $P<0.05$ 显著水平)

图 2 不同种植年限和不同深度土壤有效磷含量

Fig. 2 Soil availability P contents in different depths under different tree ages

2.2 土壤磷素累积对不同磷形态的影响

全磷和各磷形态均随土壤深度的增加呈现下降趋势, 且不同全磷含量条件下土壤各磷形态含量占比差异较大。如表 2 可知, 不同土层土壤全磷含量介于 0.48~1.41 g/kg, 土层之间存在显著性差异; 表层土壤各磷形态含量表现为 Al-P>Org-P>Fe-P>O-P>

Ca-P, 底层土壤 Org-P 含量最高。为进一步分析土壤磷累积对土壤磷形态的影响, 本试验将全磷含量分为 4 级: ≤ 0.50 、0.51~1.00、1.01~1.50、 >1.50 g/kg。由图 3 所示, 随着全磷含量的变化, 各磷形态含量及其构成占比也相应发生变化。随着全磷含量增加, 无机磷含量明显增加, 全磷含量由 ≤ 0.50 g/kg 上升到 >1.50 g/kg 时, 无机磷含量由 156.07 mg/kg 上升至 1762.26 mg/kg, 占全磷比重由 55.47% 增加到 76.82%; 有机磷含量由 125.30 mg/kg 上升至 531.61 mg/kg, 增加了 4.2 倍, 占全磷比重由 44.53% 下降至 23.18%。在无机磷中, Al-P 增量居首位, Al-P 含量由 25.15 mg/kg 增加至 918.89 mg/kg, 增加了 36.53 倍, 占全磷比重由 8.94% 上升至 40.06%; 其次为 Fe-P, 含量由 56.92 mg/kg 上升至 409.80 mg/kg, 增加了 7.2 倍, 占全磷比重由 20.23% 下降至 17.87%; 再者是 O-P 含量由 49.83 mg/kg 上升至 286.03 mg/kg, 增加了 5.7 倍, 占全磷比重由 17.71% 下降至 12.47%; Ca-P 增加较小, 由 24.16 mg/kg 上升至 147.54 mg/kg, 增加了 6.1 倍, 占全磷比重由 8.59% 下降至 6.43%。

表 2 不同深度土壤全磷及磷各形态含量
Table 2 Contents of total P and various P forms in different depths

土层深度(cm)	全磷(g/kg)	Al-P (mg/kg)	Fe-P (mg/kg)	O-P (mg/kg)	Ca-P (mg/kg)	Org-P (mg/kg)
0~20	1.41±0.81 a	514.7±357.8 a	264.9±156.0 a	174.2±214.1 a	114.5±121.2 a	367.6±243.3 a
20~40	0.82±0.59 b	254.1±273.9 b	185.5±137.5 b	122.1±153.0 ab	59.1±62.3 b	205.9±138.0 b
40~60	0.48±0.29 c	91.7±155.9 c	101.5±76.0 c	70.8±70.1 b	45.6±59.9 b	183.6±101.0 b

注：Al-P：铝磷；Fe-P：铁磷；O-P：闭蓄态磷；Ca-P：钙磷；Org-P：有机磷。

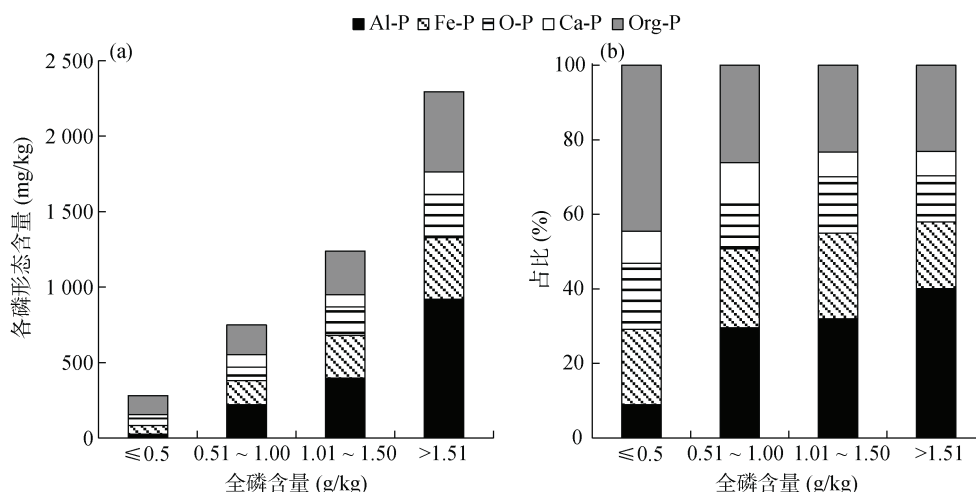


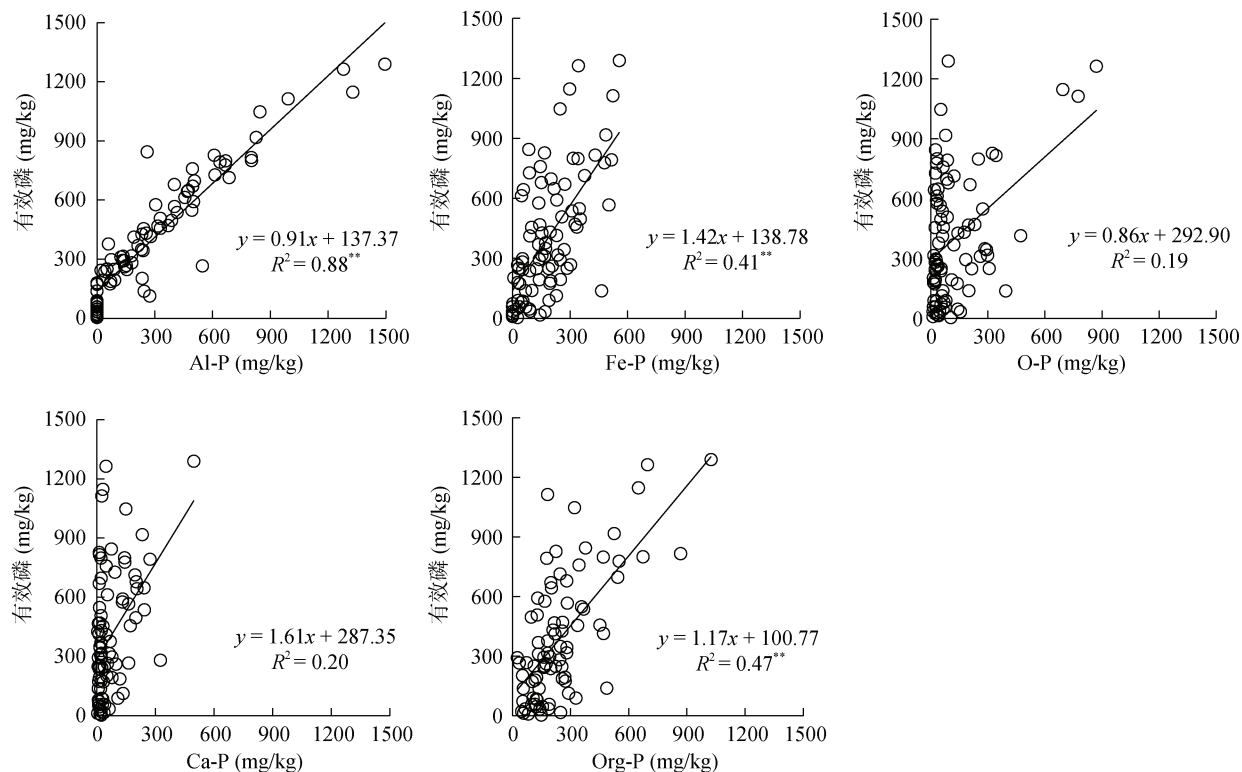
图 3 不同全磷含量下土壤各磷形态组成(A)及占比(B)

Fig. 3 Compositions (A) and proportions (B) of soil P forms under different total P contents

2.3 不同磷形态与土壤有效磷的关系

本研究中用 Bray I-P 来表示土壤磷的有效性(图 4),结果表明,Al-P 与有效磷之间具有显著的相关关系,其决定系数 $R^2 = 0.88^{**}$ ($n = 87$);其次,Fe-P 和 Org-P 与有效磷也有明显的相关关系,决定系数分别为 0.41 和 0.47 ($n = 87$);而 Ca-P、O-P 与有效磷决定系数较小。将土壤各磷形态(X)与有效磷(Y)进行多元线性回归分

析,得出如下方程式: $Y = 137.651 + 0.925X_1 + 0.090X_2 - 0.107X_3 - 0.101X_4 + 0.002X_5$, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 分别代表 Al-P、Fe-P、O-P、Ca-P、Org-P。再进行逐步多元回归分析,得出如下方程式: $Y = 136.909 + 0.912X$ ($R^2 = 0.876$), Y 代表有效磷, X 代表 Al-P。由多元线性回归和逐步回归可知,在平和蜜柚果园中,Al-P 为土壤中有效磷的显著作用项,是有效磷的主要来源。

图 4 有效磷与不同磷形态的相关性($n = 87$)Fig. 4 Relationship between available P and various P forms ($n = 87$)

3 讨论

本研究结果表明, 在当前的生产条件下, 平和果园蜜柚年平均产量为 53 t/hm^2 , 磷素投入量却高达 P_2O_5 971 kg/hm^2 , 是果实吸收量(P_2O_5 17.5 kg/hm^2)的 55.4 倍^[22]。而同样是生产 55 t 鲜果, 美国佛罗里达州柑橘生产的一般磷肥推荐用量仅为 P_2O_5 50 kg/hm^2 ^[23], 产量相近的情况下, 平和蜜柚果园的磷肥投入量是佛罗里达州磷肥推荐用量的 19.6 倍, 说明平和果园的磷肥投入量明显偏高, 磷肥使用效率却显著偏低。过量磷肥投入导致的直接结果是土壤中盈余了大量磷素, 直接导致表层土壤有效磷的平均含量升至 638.9 mg/kg (表 1), 大大超出了平和土壤磷素环境敏感临界值(山地果园: 96.3 mg/kg , 耕地果园: 62.3 mg/kg)^[24]。已有的研究表明, 土壤磷含量与土壤磷素表观平衡状况关系紧密。Blake 等^[25]在洛桑试验站的研究结果表明, 土壤有效磷含量随着土壤磷盈余呈增加趋势; 对我国 7 种不同类型土壤研究结果表明, 在红壤上每 100 kg/hm^2 的磷素盈余, 会造成土壤有效磷含量上升 2.75 mg/kg 。磷表观平衡与土壤有效磷变化呈极显著正相关关系^[26]。与预期设想一致, 本研究表明土壤磷素的盈余所导致的有效磷含量会随着蜜柚种植年限的增加持续性累积(图 2)。虽然各磷形态含量总体均随着土层深度的增加而下降, 但下层土壤有效磷含量依然高达 171.7 mg/kg (表 1), 推测可能与磷素累积已经超出土壤饱和阈值并向下迁移有关。

而关于磷素累积对土壤磷形态构成的影响, 前人已做了较为广泛的研究, 结果表明其不同土壤类型上存在明显差异^[27-28]。1989 年宋淑琼^[29]的研究表明在 4 种类型的红壤上, O-P 是主要的磷素组成成分, 占全磷平均为 46.2%; 林地红壤、赤红壤上 O-P 占全磷比例分别为 47.9%、55.9%^[30]。同时, 土壤中磷素的转化受到土壤全磷含量的影响。在全磷含量 0.60 g/kg 的条件下, 红壤中 O-P 占全磷含量的 30.9%^[31]; 也有研究表明在红壤中全磷含量为 0.85 g/kg 的条件下, Fe-P 占全磷的 31.86%^[14]。而在本研究中, 在 pH 平均为 4.3 的条件下, 当全磷含量低于 0.50 g/kg , 主要以 Fe-P 为主; 但随着全磷含量的上升, Al-P 占比显著提高, 当全磷含量介于 $0.50 \sim 1.00 \text{ g/kg}$, Al-P 占比达到 29.60%, 占比超过 Fe-P; 当全磷含量高于 1.50 g/kg , Al-P 占比高达 40.1%, 成为最主要的无机磷形态。长期磷肥大量的投入, 导致土壤磷库相比于 20 世纪八九十年代有了比较明显的变化, 林地与耕

地也有显著性差异。此外, 由于 pH 影响着土壤溶液中 Fe、Al 离子的强度, 对土壤各磷形态起着决定性的作用, 且南方气候原因导致雨热同期, 土壤富铝化作用强烈, 导致 Fe、Al 离子大量溶出^[32]。因此红壤中施入的磷肥首先转化为 Al-P、Fe-P, 而部分 Al-P 会继续向 Fe-P 转化^[33], 这可能是本研究中当全磷含量较低时, 磷形态主要以 Fe-P 为主的原因(图 3)。此外也有研究表明, 无定形氧化铝对磷的吸附量大于无定形氧化铁^[34], 这可能是本研究中全磷含量较高时, Al-P 成为最主要的无机磷形态的原因。

本研究中, Al-P、Fe-P、Org-P 与有效磷均显著正相关, Al-P 与有效磷相关性最好, 是有效磷的主要来源; Fe-P、Org-P 与有效磷相关性次之。在土壤 pH 介于 4.15~4.56 的条件下, Al-P 含量决定土壤有效磷的供应水平, 这与前人的研究结果一致^[13]。已有研究表明 Fe-P、Al-P 是红壤的有效磷源, 而 O-P 的有效性较低^[17]; 通过相关分析结合通径分析的研究也表明 Fe-P、Al-P 是有效磷源, 可以直接影响土壤有效磷含量, Al-P、O-P、Ca-P 间接影响土壤有效磷含量^[35]。这说明高磷累积的土壤磷有效性并不低。这之前认为的酸性土壤上磷的有效性低, 大部分磷素转为 O-P 不同, 高磷累积的土壤上磷素大部分转化为 Al-P, 有效性还是比较高。结合前人研究结果我们认为当土壤磷素大量累积, O-P 占全磷比例下降, 而主要以有效性较好的 Al-P、Fe-P 为主。根据平和果园土壤有效磷及各磷形态含量分析可知, 果园土壤磷累积已经形成一个巨大的磷库, 而其中大部分又能被果树直接或间接利用, 因此, 可以对高磷果园采取针对性的施肥方案, 减少磷肥投入, 降低土壤磷含量, 在减少肥料投入成本的同时, 也有助于改善平和琯溪蜜柚果园生态环境。

4 结论

在高磷素累积的果园土壤中, 随树龄增加, 表层土壤有效磷显著上升。随着土壤磷素的累积, 土壤磷素形态发生明显变化, 当全磷含量 $\leq 0.5 \text{ g/kg}$ 时, 各磷形态主要以 Org-P、Fe-P 为主; 随着全磷含量的上升, Al-P 占比明显上升, 成为主要的磷素形态; 多元线性回归和逐步回归分析结果表明 Al-P 与有效磷相关性最好, 是土壤有效磷的主要来源。磷素累积果园土壤中已经形成一个巨大的磷库, 且高磷条件下主要以 Al-P 累积为主, 因此认为土壤磷库有效性较高, 可适当减少磷肥投入或者不施磷肥, 降低土壤磷含量, 减少经济成本, 提高生态效益。

致谢: 感谢林伟杰、林瑞坤对土壤取样的帮助。

参考文献:

- [1] Menšík L, Hlisenikovsky L, Pospíšilová L, et al. The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(8): 2813–2822.
- [2] Li H G, Liu J, Li G H, et al. Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses[J]. *AMBIO*, 2015, 44(2): 274–285.
- [3] 颜廷梅, 杨林章, 单艳红. 稻田土壤养分的迁移规律及其环境风险[J]. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1189–1193.
- [4] 张乃明, 李成学, 李阳红. 滇池流域土壤磷累积特征与释放风险研究[J]. *土壤*, 2007, 39(4): 665–667.
- [5] Jordan C, McGuckin S O, Smith R V. Increased predicted losses of phosphorus to surface waters from soils with high Olsen-P concentrations[J]. *Soil Use and Management*, 2000, 16(1): 27–35.
- [6] Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1/2): 157–167.
- [7] 彭智平, 王群, 黄继川, 等. 湛江市辣椒种植区土壤养分状况分析[J]. *广东农业科学*, 2016, 43(12): 36–40.
- [8] 全智, 吴金水, 魏文学, 等. 长期种植蔬菜后土壤中氮、磷有效养分和重金属含量变化[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2919–2929.
- [9] 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.
- [10] 林国林, 云鹏, 陈磊, 等. 小麦季磷肥施用对后作玉米的效果及土壤中无机磷形态转化的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 676–680.
- [11] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 II. 土壤 Olsen-P 及各形态无机磷的动态变化[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 365–368.
- [12] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1136–1146.
- [13] 杨丽娟, 李天来, 周崇峻. 塑料大棚内长期施肥对菜田土壤磷素组成及其含量影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 205–208.
- [14] 敖俊华, 黄莹, 方界群, 等. 广东蕉区土壤磷状况及不同磷形态分布特征研究[J]. *甘蔗糖业*, 2017(6): 1–5.
- [15] 孙燕, 杨建峰, 董云萍, 等. 不同咖啡园土壤磷素形态特征及其有效性研究[J]. *热带作物学报*, 2012, 33(4): 605–608.
- [16] 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J]. *土壤学报*, 1992, 29(1): 80–86.
- [17] 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.
- [18] 向春阳, 马艳梅, 田秀平. 长期耕作施肥对白浆土磷组分及其有效性的影响[J]. *作物学报*, 2005, 31(1): 48–52.
- [19] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, 1957, 84: 133–144.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [21] 鲁剑巍, 陈防, 王富华, 等. 湖北省柑橘园土壤养分分级研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(4): 390–394.
- [22] 林瑞坤, 许修柱, 郑朝元, 等. 福建省平和县蜜柚园磷肥使用现状及土壤磷素平衡研究[J]. *福建热作科技*, 2018, 43(3): 5–12.
- [23] Obreza T A, Rouse R E, Morgan K T. Managing phosphorus for citrus yield and fruit quality in developing orchards[J]. *Hortscience*, 2008, 43(7): 2162–2166.
- [24] 李发林, 曾瑞琴, 危天进, 等. 福建省平和县琯溪蜜柚果园土壤磷环境风险评价研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(8): 1001–1009.
- [25] Blake L, Johnston A E, Poulton P R, et al. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods[J]. *Plant and Soil*, 2003, 254(2): 245–261.
- [26] Cao N, Chen X P, Cui Z L, et al. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(2/3): 161–170.
- [27] 王艳玲, 王杰, 赵兰坡, 等. 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.
- [28] 林德喜, 范晓晖, 胡锋, 等. 长期施肥后苜蓿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.
- [29] 宋淑琼. 云南红壤无机磷化学特性研究[J]. *西南农业学报*, 1989, 2(1): 38–41.
- [30] 张鼎华, 涂传进, 沈兵松, 等. 福建山地几种主要土类土壤磷的研究[J]. *林业科学*, 2008, 44(8): 29–36.
- [31] 冯跃华, 张杨珠, 黄运湘. 不同稻作制、有机肥用量及地下水深度对红壤性水稻土无机磷形态的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(10): 3551–3558.
- [32] 徐仁扣. pH 对酸性土壤中铝的溶出和铝离子形态分布的影响[J]. *土壤学报*, 1998, 35(2): 162–171.
- [33] 邱亚群. 湖南典型土壤磷的吸附解吸机制及磷流失控制研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [34] 徐明岗. 土壤离子吸附 1. 离子吸附的类型及研究方法[J]. *土壤肥料*, 1997(5): 3–7.
- [35] 乔思宇, 周丽丽, 范昊明, 等. 冻融条件下黑土无机磷分级及有效性研究[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 259–264.