

果园绿肥对土壤磷组分及磷素有效性的影响

张建伟¹, 石孝均^{1,2}, 徐文静¹, 张学良¹, 刘瑞¹, 魏勇¹, 赵秋³, 张宇亭^{1,2}

(1.西南大学资源环境学院,重庆 400716;

2.西南大学长江经济带农业绿色发展研究中心,重庆 400716;3.天津市农业科学院,天津 300192)

摘要:以天津市桃园土壤为研究对象,采用 Tiessen 磷分级方法研究绿肥栽培并利用条件下土壤磷组分含量变化和磷素活化周转特征。试验共设 3 个处理:绿肥覆盖(SC)、翻压(BU)和清耕对照(CT)处理。分别于绿肥处理 1,4,7 年后采集 0—20,20—40 cm 的土壤样品,测定全磷、活性磷库(Resin—P_i和 NaHCO₃—P)、中稳性磷库(NaOH—P)和稳定态磷库(Dil.HCl—P_i、Conc.HCl—P 和 Residual—P)含量。结果表明,与 CT 处理相比,SC 和 BU 处理在各采样年份均提高了土壤全磷、Resin—P_i、NaHCO₃—P、NaOH—P 和 Residual—P 含量,降低 Dil.HCl—P_i和 Conc.HCl—P 含量,处理间差异性随绿肥利用年限的增加而增加;其中,各指标 BU 处理均优于 SC 处理,且 0—20 cm 土层变化最为明显。绿肥利用 7 年后,BU 处理 0—20 cm 土壤 Resin—P_i、NaHCO₃—P、NaOH—P 和 Residual—P 含量较 CT 处理分别显著增加 48.82%~128.41%,145.93%~231.16%,206.26%~590.06%和 34.67%~37.66%,Dil.HCl—P_i和 Conc.HCl—P 含量分别显著降低 12.37%~15.79%和 43.72%~91.39%。综上,相对于清耕对照处理,果园绿肥栽培并利用可显著增加土壤活性磷库和中稳性磷库的比例,并显著降低稳定态磷库的比例;同时,随着绿肥利用年限的增加,土壤活性磷库和中稳性磷库的比例随之增加,稳定态磷库的比例随之降低。研究结果表明,果园绿肥栽培并利用可以有效促进土壤难溶性磷的活化周转,提高土壤磷素生物有效性。

关键词:绿肥栽培;覆盖或翻压;磷库;磷活化周转

中图分类号:S142⁺.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)06-0336-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.045

Effects of Green Manure on Soil Phosphorus Fractions and Availability in Orchard

ZHANG Jianwei¹, SHI Xiaojun^{1,2}, XU Wenjing¹, ZHANG Xueliang¹,

LIU Rui¹, WEI Yong¹, ZHAO Qiu³, ZHANG Yuting^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716;

2.Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Basin,

Southwest University, Chongqing 400716; 3.Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300192)

Abstract: Taking peach orchard as the research object, the effect of green manure on soil phosphorus fractions and phosphorus turnover characteristics were investigated by Tiessen's phosphorus fractionation method. There were three treatments, including green manure utilization as surface cover (SC), buried underground (BU) and clean tillage control (CT). Soil samples from 0—20 and 20—40 cm were collected after green manure utilization for 1, 4, and 7 years, to measure the content of total phosphorus, labile phosphorus pool (Resin-P_i and NaHCO₃—P), moderately stable phosphorus pool (NaOH—P) and stable phosphorus pool (Dil.HCl—P_i, Conc.HCl—P and Residual—P). The results showed that, compared with CT, SC and BU increased soil total phosphorus, Resin-P_i, NaHCO₃—P, NaOH—P and Residual—P contents, and decreased Dil.HCl—P_i and Conc.HCl—P contents in each sampling year. These differences were more pronounced with the increase of green manure utilization time. And, the BU showed the higher phosphorus availability than SC and the green manure mainly affected 0—20 cm soil layer. After seven years of cultivation and utilization of green manure, compared with CT, the contents of Resin—P_i, NaHCO₃—P, NaOH—P and Residual—P of BU were significantly increased by 48.82%~128.41%, 145.93%~231.16%, 206.26%~590.06% and 34.67%~37.66%, respectively, and the contents of Dil.HCl—P_i and Conc.HCl—

收稿日期:2021-05-25

资助项目:国家自然科学基金青年基金项目(31902116);国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22-G-13)

第一作者:张建伟(1997—),男,在读硕士研究生,主要从事果园绿肥磷素循环研究。E-mail:2833632280@qq.com

通信作者:张宇亭(1985—),男,副教授,硕士生导师,主要从事果园绿肥养分循环研究。E-mail:zyt2018@swu.edu.cn

赵秋(1977—),女,副研究员,博士,主要从事绿肥应用等方面的研究。E-mail:qiu Zhao_2008@163.com

P were significantly reduced by 12.37% ~ 15.79% and 43.72% ~ 91.39%, respectively. In summary, compared with CT, green manure utilization could significantly increase the proportion of soil labile and moderately stable phosphorus pool, and significantly decrease the proportion of stable phosphorus pool. Moreover, with the increasing green manure utilization years, the proportion of soil labile and moderately stable phosphorus pool also increased, while the proportion of stable phosphorus pool decreased. This study shows that the cultivation and utilization of green manure in orchards could effectively promote the mobilization and turnover of insoluble phosphorus and improve the bioavailability of soil phosphorus.

Keywords: green manure cultivation; surface cover or buried underground; phosphorous pool; phosphorus mobilization

磷是植物生长的主要限制元素,也是植物组织基本成分、核酸和能量物质形成的必需营养元素^[1]。不同于碳氮等元素,磷素在土壤中的移动性较差,极易被土壤中钙、铁、铝等离子化学固定为生物有效性低的磷形态。因此,我国磷肥的当季利用率很低,仅有 10%~20%^[2],特别是在果园生态系统中,磷素当季利用率不足 10%,造成大量的磷素盈余在土壤中^[3]。例如,在京郊平谷地区果园中,磷素年平均投入量为 693 kg/hm²,而年际盈余就达到 468 kg/hm²,远高于粮田的磷素盈余(38 kg/hm²)^[4]。李玲等^[5]也发现,河北省果园中磷素盈余率为 615.7%,明显高于粮田(66.6%)。土壤中盈余的磷素生物有效性低,难以被果树再次吸收利用^[6-7]。因此,有效利用土壤中盈余的磷素并促进难溶性磷的周转循环在水果的可持续生产中具有重要意义。

果园中进行绿肥栽培利用作为一种广泛采用的田间管理手段,已被证实可有效活化土壤难溶性磷,促进土壤盈余磷素的周转循环^[8-9]。绿肥可以直接分泌质子、有机酸等根系分泌物活化土壤难溶性磷^[10]。如兰忠明等^[11]研究发现,绿肥根系分泌物能够活化土壤难溶性铁磷和铝磷,从而吸收利用土壤盈余的磷素,再将其还田以促进土壤磷素的周转循环^[12]。在稻田生态系统发现,翻压绿肥显著降低土壤难溶性磷含量,活性和中稳性磷库含量较对照处理也有所增加^[13]。Yadav 等^[14]在麦田土壤中也发现,绿肥还田显著增加土壤水溶性磷含量。另外,绿肥能够提供大量碳源,大幅度提升土壤碳磷比,进而促进微生物的生长和活动。微生物可以释放有机酸并分泌磷酸酶等物质活化土壤难溶性磷,并将其同化固定为微生物生物量磷,从而提高土壤磷素有效性^[8,15]。目前,针对绿肥活化周转土壤难溶性磷的研究主要集中于粮食作物系统,针对果园生态系统的研究较为缺乏,并且长时间尺度上绿肥对土壤磷组分及磷素有效性的研究更为少见。

综上,本研究以天津市桃园—绿肥生态系统为研究对象,对绿肥连续利用 1,4,7 年的土壤进行磷组分和磷素有效性分析,以此揭示果园绿肥对土壤难溶性

磷的活化利用潜力,以期提高土壤中盈余磷素的生物有效性,为实现我国果园“减磷增效”的绿肥栽培途径提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究试验地为长期定位试验,初始于 2010 年,位于天津市西青区大柳滩村万亩果园内(116°58'N, 39°80'E),属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 11.6℃,年平均降水量 586.1 mm,无霜期 203 天。供试土壤为潮土,基础理化性质为:pH 9.0,有机质含量 12.6 g/kg,碱解氮含量 80.1 mg/kg,速效磷含量 14.5 mg/kg,速效钾含量 235 mg/kg^[16]。桃树品种为自选育“津柳早红”,株行距为 4 m×3 m,小区面积 180 m²。供试绿肥为华北地区果园常种绿肥二月兰(*Oryehophragmus violaeus*)。

1.2 试验设计

试验共设 3 个处理:(1)绿肥覆盖(SC):每年 9 月于桃树行间撒播二月兰,播种量为 25 kg/hm²,使其自然生长直至死亡覆盖于地表。(2)绿肥翻压(BU):播种二月兰同覆盖处理。翌年 4 月末将二月兰翻压入土,翻压深度为 20 cm。(3)清耕对照(CT):代表果农习惯;杂草旺盛时刈割或喷洒除草剂。每个处理 3 次重复。果树田间管理同当地农民习惯,各处理保持一致。2010—2017 年施入复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15),作为基肥和追肥施用,各占 50%,施用量为 600 kg/hm²。2014 年后各小区每年增施牛粪堆制有机肥(N:P₂O₅:K₂O 为 1.78:1.07:2.35),施用量为 30 t/hm²。

1.3 样品采集与试验方法

分别于 2011 年、2014 年和 2017 年采集 0—20, 20—40 cm 土壤样品。采用五点取样法采集土壤样品后混匀,挑出土样中的大块石砾和植物残体等杂物后风干并过筛保存。

在 2020 年 8—11 月完成样品测定分析工作,土壤各项指标参照土壤农化分析常规方法^[17]。全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定,土壤磷分级测

定采用 Tiessen 磷分级方法^[18]。该方法根据植物有效性的不同,将磷形态分为:(1)活性磷库,Resin-P_i(树脂提取态无机磷)、NaHCO₃-P(包括碳酸氢钠提取态无机磷 NaHCO₃-P_i和碳酸氢钠提取态有机磷 NaHCO₃-P_o);(2)中稳性磷库,NaOH-P(包括氢氧化钠提取态无机磷 NaOH-P_i和氢氧化钠提取态有机磷 NaOH-P_o);(3)稳定态磷库,Dil.HCl-P_i(稀盐酸提取态无机磷)、Conc.HCl-P(包括浓盐酸提取态无机磷 Conc.HCl-P_i和浓盐酸提取态有机磷 Conc.HCl-P_o)以及 Residual-P(残留态磷)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 2018 软件进行数据整理和图表制作,利用 SPSS 22.0 软件进行方差分析(ANOVA),用最小差数法(LSD)进行差异显著性检验。

2 结果与分析

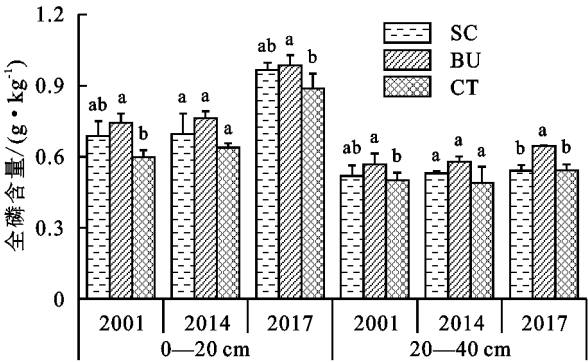
2.1 绿肥对土壤全磷的影响

从图 1 可以看出,在 0—20 cm 土层中,2011 年和 2017 年 SC 处理土壤全磷含量较 CT 处理分别提高 14.78% 和 8.75%,但并无显著差异($P>0.05$);BU 处理全磷含量分别显著提高 24.11% 和 10.93% ($P<0.05$)。20—40 cm 土层土壤全磷含量呈现出类似的变化特征,而其变化幅度低于 0—20 cm 土层。在不同土层中,2014 年 SC 和 BU 处理土壤全磷含量较 CT 处理均有所增加,但无显著差异($P>0.05$)。

2.2 绿肥对土壤磷组分的影响

2.2.1 绿肥对土壤活性磷库的影响 果园栽培并利用绿肥提高土壤活性磷库含量(图 2)。栽培并利用绿肥对 3 种活性磷形态均存在不同程度的提高,其中

对 Resin-P_i 含量提升幅度最大,NaHCO₃-P_i 含量次之,NaHCO₃-P_o 含量最小。随着绿肥利用年限的增加,土壤 Resin-P_i、NaHCO₃-P_i 和 NaHCO₃-P_o 含量呈现上升趋势(20—40 cm NaHCO₃-P_o 除外)。其中以 0—20 cm 土层变化最为明显,2014 年和 2017 年 SC 处理土壤 Resin-P_i、NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o 含量较 2011 年分别提高 3.82%,6.92%,12.64% 和 245.06%,260.95%,308.03%;BU 处理土壤 Resin-P_i、NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o 含量分别提高 6.67%,4.67%,8.66% 和 230.73%,217.41%,256.16%。绿肥连续覆盖或翻压利用 7 年后,在 0—20 cm 土层中,SC 和 BU 处理土壤 Resin-P_i、NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o 含量较 CT 处理分别显著提高 64.03%,21.37%,69.00% 和 82.95%,37.67%,112.10%;在 20—40 cm 土层中,土壤 Resin-P_i、NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o 含量分别提高 140.40%,121.04%,71.44% 和 598.79%,884.17%,321.45%,其中 SC 处理 NaHCO₃-P_i 无显著差异($P>0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同处理土壤全磷含量

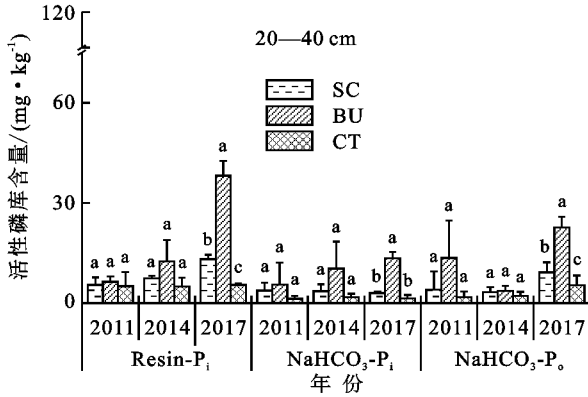
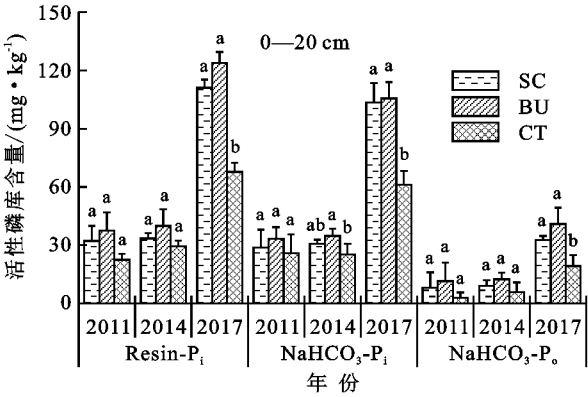


图 2 不同处理土壤活性磷库含量

2.2.2 绿肥对土壤中稳性磷库的影响 果园栽培并利用绿肥提高土壤中稳性磷库含量(图 3)。栽培并利用绿肥均提高 2 种中稳性磷形态含量,其中对 NaOH-P_i 含量提升幅度最大,NaOH-P_i 含量次之。随着绿肥利用年限的增加,土壤 NaOH-P_i 和 NaOH-P_o 含量呈现上升趋势。其中以 NaOH-P_o 含量变化最为明显,在 0—20 cm 土层中,2014 年和

2017 年 SC 处理土壤 NaOH-P_o 含量较 2011 年分别提高 334.84% 和 579.60%,BU 处理土壤 NaOH-P_o 含量分别提高 105.07% 和 333.28%;在 20—40 cm 土层中,2014 年和 2017 年 SC 处理土壤 NaOH-P_o 含量分别提高 504.72% 和 700.96%,BU 处理土壤 NaOH-P_o 含量分别提高 176.28% 和 203.27%。在 2014 年和 2017 年,0—20 cm 土层中,SC 处理

NaOH—P_i含量较 CT 处理分别显著提高 132.39%和 145.89%;BU 处理 NaOH—P_i含量较 CT 处理分别显著提高 168.97%和 185.52%。不同处理 20—40 cm 土层土壤 NaOH—P_i含量变化呈现类似趋势,但其变化幅度低于 0—20 cm。在 0—20 cm 土层中,BU 处理土壤

NaOH—P_i含量在 2011 年、2014 年和 2017 年较 CT 处理分别显著提高 255.62%,99.59%和 128.42%;在 20—40 cm 土层分别显著提高 245.77%,103.46%和 27.11%。此外,在 20—40 cm 中,各年份 BU 处理 NaOH—P_i含量较 SC 处理高,且达到显著水平($P<0.05$)。

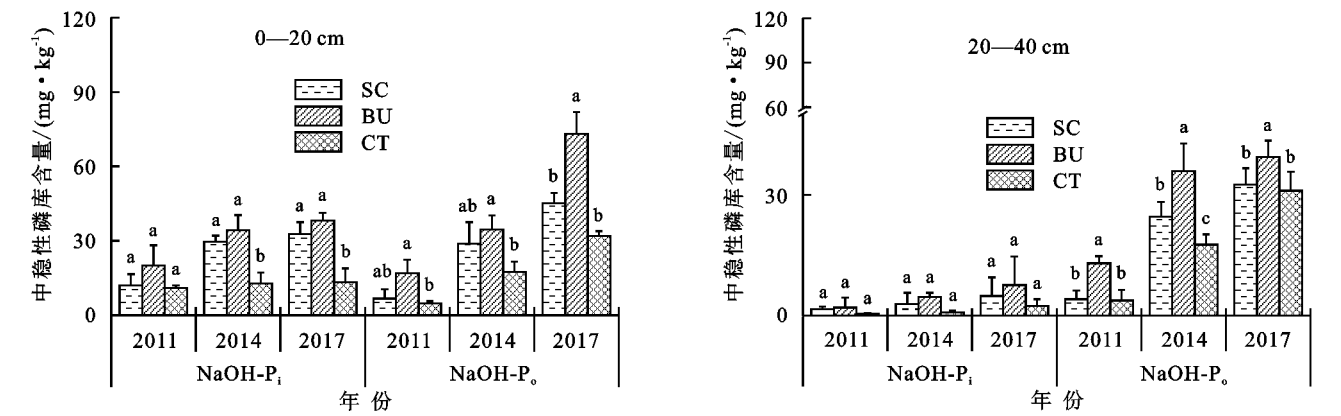


图 3 不同处理土壤中稳性磷库含量

2.2.3 绿肥对土壤稳定态磷库的影响 果园栽培并利用绿肥降低土壤 Dil.HCl—P_i和 Conc.HCl—P 含量(图 4)。绿肥连续覆盖或翻压利用 7 年后,土壤 Dil.HCl—P_i和 Conc.HCl—P 含量变化最明显:在 0—20 cm 土层中,SC 和 BU 处理土壤 Dil.HCl—P_i、Conc.HCl—P 含量较 CT 处理分别显著降低 0.23%,41.91%和 13.64%,71.43%($P<0.05$);在 20—40 cm 土层中,土壤 Dil.HCl—P_i、Conc.HCl—P 分别降低 5.63%,22.86%和 7.04%,41.05%,但无显著差异

($P>0.05$)。此外,栽培并利用绿肥提高土壤 Residual—P 含量(图 4)。其中,BU 处理土壤 Residual—P 含量较 CT 处理变化最明显,达到显著水平($P<0.05$)。在 0—20 cm 土层中,BU 处理的土壤 Residual—P 含量在 2011 年、2014 年和 2017 年较 CT 处理分别显著提高 33.45%,15.70%和 36.36%;在 20—40 cm 中,BU 处理的土壤 Residual—P 含量在 2011 年、2014 年和 2017 年较 CT 处理分别显著提高 35.13%,80.31%和 55.05%。

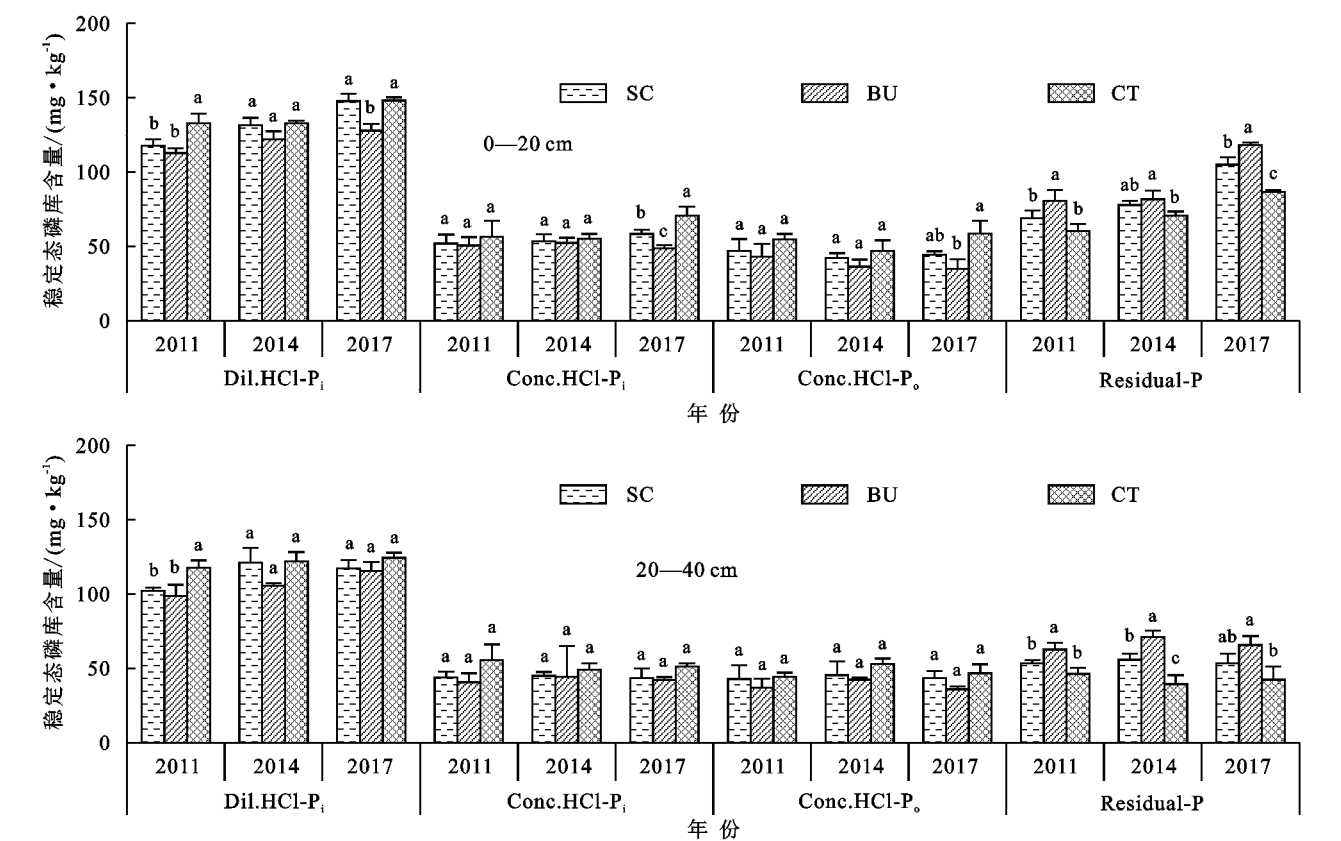


图 4 不同处理土壤稳定态磷库含量

2.4 绿肥对土壤不同磷库相对含量的影响

随着绿肥利用年限的增加,土壤活性和中稳性磷库相对含量随之提高,稳定态磷库相对含量随之降低(图 5)。连续覆盖或翻压利用绿肥 7 年后,在 0—20 cm 土层中,SC 和 BU 处理土壤活性磷库、中稳性磷库相对含量较 CT 处理分别显著提高 36.68%,40.81%和 43.01%,91.80%,土壤稳定态磷库相对含量分别显著降低 20.04%和 28.97%;在 20—40 cm 土层中,土壤活性磷库相对含量分别显著提高 103.09%和 394.59%,土壤稳定态磷库相对含量分别显著降低 5.94%和 19.94%($P<$

0.05)。此外,土壤稳定态磷库相对含量最高,在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中分别占总磷含量的 46.36%~82.10%和 68.34%~95.56%(图 5)。栽培并利用绿肥对土壤稳定态磷库影响最为明显,在 0—20 cm 土层中,2011 年 SC 和 BU 处理土壤稳定态磷库相对含量较 CT 处理降低 6.67%和 13.95%,BU 处理达到显著水平;2014 年 SC 和 BU 处理土壤稳定态磷库相对含量较 CT 处理显著降低 10.40%和 14.44%($P<0.05$)。不同处理 20—40 cm 土层土壤稳定态磷库相对含量变化呈现类似趋势,但其变化幅度均低于 0—20 cm 土层。

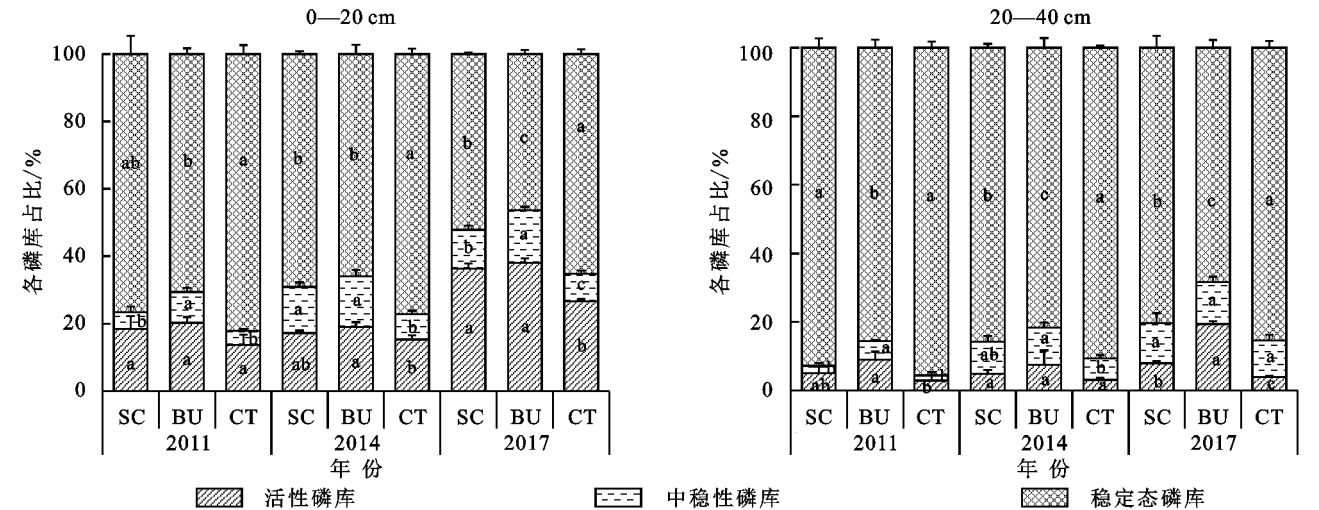


图 5 不同处理 0—20,20—40 cm 土层土壤各磷库占比

3 讨论

全磷是土壤中各形态磷素的总和,反映土壤磷素储存能力大小的一个重要指标。总体而言,果园栽培并利用绿肥对土壤全磷含量无显著影响(图 1),这与朱亚琼等^[19]的研究结果基本一致。在本研究中,2014 年后各小区增施大量有机肥是 2017 年土壤全磷含量增加的主要原因;另一方面,试验地点位于华北地区,冬春季多大风天气,农田土壤易受风蚀影响。研究^[20]表明,相对于清耕对照处理,栽培二月兰显著减少土壤风蚀总量。冯晓静等^[21]也指出,秸秆残茬覆盖较传统耕作可有效减少土壤全磷损失,故栽培绿肥使得土壤全磷含量相对较高。

本研究结果表明,果园栽培并利用绿肥提高土壤活性和中稳性磷库含量,降低土壤 Dil.HCl—P_i 和 Conc.HCl—P 含量(图 2~图 4),这主要由于绿肥活化了土壤难溶性磷,使其向生物可利用性更高的磷形态转化,另一方面绿肥吸收利用土壤盈余磷素,而后直接还田腐解释放出大量的活性磷^[12]。土壤活性磷库的生物有效性较高,是土壤中易被植物直接吸收利用的磷库。Gichangi^[22]研究发现,翻压绿肥可以增加土壤 NaHCO₃—P 含量。Li 等^[13]也指出,与单施化肥相比,绿

肥配施化肥使土壤 NaHCO₃—P_o 和 NaHCO₃—P_i 分别增加 33%和 52%,与本研究结果一致。

中稳性磷库主要由吸附在铁铝化合物上的无机磷和有机磷组成,是土壤潜在的活性磷库^[23]。关于绿肥对土壤中稳性磷库的影响,前人研究结果不一。Gao 等^[24]在水稻土中研究表明,连续 2 年翻压绿肥可显著增加土壤 NaOH—P_i 含量,而 NaOH—P_o 含量无显著变化;Teles 等^[25]在冬绿肥—玉米轮作体系中发现,连续 3 年翻压绿肥土壤 NaOH—P_i 含量较清耕处理有所降低。部分研究结果不一致可能是与作物体系、绿肥种类和土壤类型等有关,有待进一步研究。在本研究中,绿肥对土壤 NaOH—P_o 含量提升幅度更大(图 3)。NaOH—P_o 既来源于土壤腐殖酸对土壤活性磷的吸附固定,也可由土壤稳定态磷转化而来;绿肥还田后,土壤有机质含量增加,一方面土壤腐殖酸与土壤活性磷组分结合形成 NaOH—P_o;另一方面,腐殖酸对铁、铝离子具有较高的亲和力,能与铁铝复合物表面的磷竞争吸附位点,NaOH—P_o 得以从铁铝复合物中释放出来^[26]。

Dil.HCl—P_i 和 Conc.HCl—P 主要为稳定性较高的钙结合态磷,生物有效性较低,不易被植物吸收

利用。在本研究中,连续翻压绿肥7年后,0—20 cm 土层土壤 Dil. HCl-P_i 和 Conc. HCl-P 含量显著降低(图4),表明土壤难溶性磷被活化,转化为活性和中稳性磷形态(图2、图3)。研究^[27]表明,在森林生态系统中,凋落物处理对土壤 Dil. HCl-P_i 和 Conc. HCl-P 含量无显著影响。而 Teles 等^[25]研究发现,翻压豆科绿肥后土壤难溶性有机磷含量显著降低,与本研究结果相似。不同试验结果的差异性可能与种植年限和土壤母质有关。

Residual-P 主要是浸提剂不能直接提取的难溶性钙磷和腐殖化有机磷部分,生物有效性最低,很难被植物吸收利用。本研究发现,栽培并利用绿肥提高土壤 Residual-P 含量(图4),表明绿肥在提高土壤磷素有效性的同时,还会引起土壤残留态磷的累积,这与杨敏琪^[28]和高小叶^[29]的研究结果一致。研究^[30]表明,土壤残留态磷不仅与氧化物表面的相互作用有关,还与土壤有机碳的络合密切相关。随着绿肥利用年限的增加,土壤有机碳含量不断升高,其与残留态磷的络合逐渐加强,残留态磷变得更难以利用;另一方面,残留态有机磷几乎都以肌醇六磷酸的形式存在,而肌醇磷酸盐是土壤有机磷最稳定的存在形式^[30],通常以植物残体的形式直接进入土壤,难以被植酸酶水解和土壤微生物利用。因此绿肥还田后残留态有机磷逐渐增加,导致土壤残留态磷不断累积。

从相对数量来看,随着绿肥利用年限的增加,土壤活性磷库的相对含量随之增加,稳定态磷库的相对含量随之降低(图5),该结果表明绿肥活化土壤难溶性磷,且土壤生物可利用性较高的磷组分随着利用年限的增加而增加,这与 Kolawole 等^[31]和吴双等^[32]的研究结果相似。主要由于绿肥生长期间向土壤中释放有机酸,其还田后在微生物作用下也会产生有机酸,有机酸与磷酸根存在着与土壤矿物的竞争吸附和铁、铝等金属离子的络合,在一定程度上减少土壤磷的吸附位点,提高土壤磷素有效性^[33];另一方面,绿肥还田后土壤肥力逐渐提升,促进土壤团粒结构形成,提高土壤水稳性团聚体含量,改善土壤通透性和保水保肥性^[34],更适宜土壤微生物的生长和活动,有利于土壤难溶性磷向活性及中稳性磷形态转化。

就绿肥不同利用方式而言,相对于覆盖处理,翻压处理土壤活性和中稳性磷库提升幅度更大,活化土壤难溶性磷的效果更为明显。研究^[35-36]发现,翻压处理下绿肥的累积腐解率和养分释放率均高于覆盖处理。本课题前期研究^[37]也表明,在培养和田间条件下翻压比覆盖处理更有利于绿肥腐解和养分的释放;

同时,覆盖还田使得绿肥暴露在空气中,缺乏与土壤和水分的接触,腐解较慢^[38]。而翻压还田增加绿肥与土壤的接触面积,更有利于绿肥的腐解和养分的释放,故翻压处理要优于覆盖处理。

4 结论

(1)果园栽培并利用绿肥增加土壤中易被植物直接吸收利用的活性磷库、中等可利用态的中稳性磷库和难以吸收利用的残留态磷含量,降低生物有效性低的稳定态磷库(残留态磷除外)含量。

(2)绿肥翻压处理优于覆盖处理。

(3)随着绿肥利用年限的增加,土壤活性磷库和中稳性磷库的比例随之增加,稳定态磷库的比例随之降低,并促进土壤稳定态磷组分向活性和中稳性磷组分转化,提高果园土壤磷素有效性。

参考文献:

- [1] Condon L M, Newman S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(5): 830-840.
- [2] 曾招兵,曾思坚,汤建东,等.广东省耕地土壤有效磷时空变化特征及影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 444-451.
- [3] 冯固.提高我国土壤—作物体系磷肥高效利用的途径[J]. *磷肥与复肥*, 2021, 36(2): 4.
- [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): 1853-1860.
- [5] 李玲,段英华,徐明岗,等.河北省不同利用方式农田土壤氮磷环境风险分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(7): 96-100, 149.
- [6] Rowe H, Withers P J A, Baas P, et al. Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 104(3): 393-412.
- [7] Menezes-Blackburn D, Giles C, Darch T, et al. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: A review[J]. *Plant and Soil*, 2018, 427(1/2): 5-16.
- [8] Hallama M, Pekrun C, Lambers H, et al. Hidden miners: The roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems[J]. *Plant and Soil*, 2019, 434(1/2): 7-45.
- [9] 洪继旺,线琳,黄冬芬,等.施用不同豆科绿肥对酸性土壤无机磷分级的动态影响[J]. *热带作物学报*, 2014, 35(8): 1475-1480.
- [10] Xue Y F, Xia H Y, Christie P, et al. Crop acquisition

- of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: A critical review[J]. *Annals of Botany*, 2016, 117(3):363-377.
- [11] 兰忠明, 林新坚, 张伟光, 等. 缺磷对紫云英根系分泌物产生及难溶性磷活化的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(8):1521-1531.
- [12] Damon P M, Bowden B, Rose T, et al. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 74: 127-137.
- [13] Li Y Y, Yang R, Gao R, et al. Effects of long-term phosphorus fertilization and straw incorporation on phosphorus fractions in subtropical paddy soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2):365-373.
- [14] Yadav R S, Jain N K, Meena H N, et al. Dynamics of soil phosphorus under different management practices for groundnut cultivation in calcareous Vertisols[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 16(2): 160-165.
- [15] Zhang L, Ding X D, Peng Y, et al. Closing the loop on phosphorus loss from intensive agricultural soil: A microbial immobilization solution? [J/OL]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9. DOI:10.3389/fmicb.2018.00104.
- [16] 赵秋, 高贤彪, 宁晓光, 等. 冬绿肥二月兰间作及翻压对北方桃园生长环境及果实品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(1):93-96.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [18] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction// Carter M R. Soil sampling and methods of analysis[M]. Chelsea: Lewis Publishers, 1993:75-86.
- [19] 朱亚琼, 简大为, 郑伟, 等. 不同种植模式下豆科绿肥对土壤改良效果的影响[J]. *草业科学*, 2020, 37(5):889-900.
- [20] 赵秋, 张新建, 宁晓光, 等. 华北农田冬绿肥覆盖的抗风蚀研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(8):120-124.
- [21] 冯晓静, 高焕文, 李洪文, 等. 河北坝上风蚀对农田土壤肥力水平影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(1):63-66.
- [22] Gichangi E. Effects of organic amendments on the transformations and bioavailability of phosphorus in soils: A review[J]. *Discovery Agriculture*, 2019, 5:41-50.
- [23] 雷玮倩, 胡玉福, 杨泽鹏, 等. 垦殖对川西北高寒草地土壤中不同磷组分含量的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(5):36-45.
- [24] Gao X Y, Shi D Y, Lv A, et al. Increase phosphorus availability from the use of alfalfa (*Medicago sativa* L.) agroecosystem [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):e36981.
- [25] Teles A P B, Rodrigues M, Bejarano Herrera W F, et al. Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? [J]. *Soil Use and Management*, 2017, 33(1): 34-44.
- [26] 陈立新. 落叶松人工林土壤质量变化规律与调控措施的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003.
- [27] 刘旭军, 程小琴, 田慧霞, 等. 间伐和凋落物处理对华北落叶松人工林土壤磷形态的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(20):7686-7696.
- [28] 杨敏琪. 有机物料的腐解特征及其对磷组分的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.
- [29] 高小叶. 紫花苜蓿绿肥对南方水稻生长和稻田生态系统碳、氮、磷积累和转运的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [30] Velásquez G, Ngo P, Rumpel C, et al. Chemical nature of residual phosphorus in Andisols[J]. *Geoderma*, 2016, 271:27-31.
- [31] Kolawole G O, Tian G, Tijani-Eniola H. Effects of fallow duration on soil phosphorus fractions and crop P uptake under natural regrowth and planted puerariaphaseoloides fallow systems in southwestern Nigeria [J]. *Experimental Agriculture*, 2005, 41(1):51-68.
- [32] 吴双, 袁联国, 李利君, 等. 农田杂草还田对土壤磷素形态的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(9):2984-2995.
- [33] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 长期定位施肥条件下紫色土无机磷形态演变研究[J]. *草业学报*, 2016, 25(4):63-72.
- [34] 陈尚洪, 朱钟麟, 吴婕, 等. 紫色土丘陵区秸秆还田的腐解特征及对土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6):141-144.
- [35] 李忠义, 韦彩会, 何铁光, 等. 不同还田方式下 2 种夏季绿肥的腐解特性[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(7):1554-1560.
- [36] 常天然. 两种绿肥种植模式对山地果园土壤水分和养分的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [37] 杨叶华. 绿肥在柑橘园的生长发育和养分累积及其释放特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [38] 田平, 姜英, 孙悦, 等. 不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(1):100-108.