

生草覆盖下有机无机肥配施对苹果园土壤磷形态分布的影响

孔 旭¹, 陈玉萌¹, 赵志远¹, 蒋 皓¹, 冯天宇¹,

王 楷¹, 张 媛¹, 郑 伟¹, 翟丙年^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2.农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 依托 13 年长期定位试验采取裂区设计, 主处理为行间生草覆盖和清耕, 副处理为 4 个施肥处理, 具体为不施肥(CK)、单施有机肥(M)、氮磷钾配施(NPK)、有机无机肥配施(MNPK), 采用修正的 Hedley 磷分级方法浸提和测定各磷形态。结果表明: 石灰性土壤 0—20、20—40 cm 土层各形态磷含量以盐酸态磷(D.HCl—P)和残留态磷(Residual—P)为主, 水溶性磷(H_2O —P)与碳酸氢钠无机磷($NaHCO_3$ —Pi)比例较低。经过 13 年生草覆盖和不同施肥处理, 生草覆盖条件下有机无机肥配施提高土壤中无机磷的含量和占比, 降低残留态磷的含量。比例在 0—20、20—40 cm 土层无机磷比例分别由 68.5% 和 66.1% 上升到 75.8% 和 69.7%, 残留态磷的比例由 26.8% 和 27.0% 下降到 18.3% 和 23.5%。生草覆盖下有机无机肥配施可显著提高土壤有效磷和无机磷的含量以及 H_2O —P、 $NaHCO_3$ —Pi 活性磷在土壤中的比例, 生草覆盖结合有机无机肥配施能够增加土壤活性磷含量, 保持高比例有效磷库, 是提高当前苹果园磷肥利用率的重要措施, 对保证该地区苹果高产、磷肥资源高效利用具有重要意义。

关键词: 生草; 有机无机肥配施; 磷分级; 磷有效性

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)02-0336-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.02.039

Effects of Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers on Soil Phosphorus Distribution in Apple Orchard Under Grass

KONG Xu¹, CHEN Yumeng¹, ZHAO Zhiyuan¹, JIANG Hao¹,

FENG Tianyu¹, WANG Kai¹, ZHANG Ai¹, ZHENG Wei¹, ZHAI Bingnian^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Based on 13 years of long-term positioning experiment, and the split plot design was adopted. The main treatment was the roots of grass coverage and clearing, The secondary treatment was four fertilizer treatments, including no fertilizer (CK), single application of organic fertilizer (M), combined application of nitrogen, phosphorus and potassium (NPK) and combined application of organic and inorganic fertilizer (MNPK). The modified Hedley phosphorus classification method was used for extraction and determination of various phosphorus forms. The results showed that the contents of various phosphorus forms in 0—20 cm and 20—40 cm layers of calcareous soil were mainly D.HCl—P and residue—P, and the ratio of water-soluble phosphorus (H_2O —P) to inorganic phosphorus sources of sodium bicarbonate ($NaHCO_3$ —Pi) was low. After 13 years of grass mulching and different fertilization treatments, the combined application of organic and inorganic fertilizers under grass mulching conditions increased the content and proportion of inorganic phosphorus in soil, and the content and proportion of residual phosphorus in 0—20 cm and 20—40 cm soil layers reduced from 68.5% and 66.1% to 75.8% and 69.7%, respectively, the proportion of residual phosphorus decreased from 26.8% and 27.0% to 18.3% and 23.5%, respectively. The combined application of organic and inorganic fertilizers under grass mulch could significantly increase the contents of available P and inorganic P in soil and the proportion of H_2O —P and $NaHCO_3$ —Pi active P in soil. The combined application of

收稿日期: 2022-06-07

资助项目: 陕西省科技重大专项(2020zdzx03-02-01); 国家现代农业产业技术体系(CARS-27); 陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2015-17)

第一作者: 孔旭(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事植物营养与调控研究。E-mail: kx1996@nwfufu.edu.cn

通信作者: 翟丙年(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养与调控。E-mail: bingnianzhaitg@126.com

organic and inorganic fertilizers under grass mulch could increase the content of active P in soil and maintain a high proportion of available P pool, which was an important measure to improve the utilization rate of P fertilizer in apple orchard. It is very important to ensure the high yield of apple and the efficient utilization of phosphorus fertilizer resources in this area.

Keywords: grass; combined application of organic and inorganic fertilizers; phosphorus classification; phosphorus availability

苹果产业已经成为陕西渭北旱源的支柱产业,但近年来果农大量使用化学肥料,忽略有机肥使用,肥料施用不合理现象突出,不仅造成土壤板结、养分不平衡等现象,还出现磷肥利用率低和磷肥损失等现象^[1]。磷素是植物体内有机化合物的重要组成部分,又是植物生长代谢和能量循环过程必不可少的,有利于植物的生长和发育。施肥是土壤磷的重要来源,然而磷肥施入石灰性土壤后极易被土壤中的矿物吸附固定,转变为无效态磷^[2]。长期施用磷肥使土壤中的磷大量积累,磷素可通过地表径流和土壤淋溶作用进入水体,不仅造成磷矿资源的浪费,而且造成水体富营养化等生态环境问题^[3]。

果园生草覆盖是在果园行间种植豆科作物或牧草,定期刈割,覆盖于地面或将其翻耕到土壤中^[4]。果园生草覆盖是一种先进、实用、高效的果园管理措施,不仅能增加土壤有机质、速效磷等养分,还能起到保墒蓄水,减少地表径流,从而降低肥料环境风险,促进果树对土壤磷充分吸收的作用^[5]。果园生草覆盖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^[6]。施用有机肥是提高果园土壤养分,增加果实产量,改善果实品质的有效手段,有机肥在腐解过程中释放有机酸,有机酸可以活化土壤残留态磷^[7-9]。但有机肥结构较为复杂,有机物质较多,肥效释放较为缓慢,单独施用无法及时供给植物所需养分,因此有机无机肥配施能够较好地提高磷肥利用率^[10]。果园生草覆盖结合有机无机肥配施对土壤磷形态分布及有效性影响的研究较少,故本试验依托 13 年长期定位试验开展研究,旨在减少磷肥损失,提高土壤磷肥利用率,实现果树提质增产,为果树产业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西省渭南市白水县西北农林科技大学苹果试验站(35°04′—35°27′N, 109°16′—109°45′E),于 2008 年布置试验。研究地属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 10.5℃,年极端最低气温-15.9℃,年极端最高气温 38.6℃,昼夜温差大,无霜期 207 天;2020 年平均降水量 577.8 mm,日照充足,光热资源丰富。试验地土壤类型为黄绵土,质地

中壤,其基础肥力水平为:有机质含量 13.58 g/kg,全氮含量 0.76 g/kg,硝态氮含量 24.60 mg/kg,铵态氮含量 2.10 mg/kg,有效磷含量 16.94 mg/kg,速效钾含量 151.28 mg/kg,pH 8.36。

1.2 供试材料

该试验供试品种为矮化中间砧“长富二号”富士系列,基砧为“M26”,果树于 2010 年开始结果,至今为 13 年树龄,果树株行距为 2 m×4 m,为自由纺锤形树形,行间种植小油菜品种为“陕油 0973”,于 2008 年 5 月开始进行行间生草播种,现已持续种植生草 13 年,播种量为 0.75 g/m²,每年 11 月刈割,刈割后小油菜翻入土中,翻入深度为 0—40 cm。果树生长期清耕处理定期除草,各处理区的生态条件与田间管理措施保持一致。

1.3 试验方案

试验采用裂区设计,2 个主处理分别为行间生草覆盖和清耕,副处理为 4 个施肥处理,具体为不施肥 CK,单施有机肥 M,氮磷钾配施 NPK,有机无机肥配施 MN-PK。每个处理设置 3 次重复,每个重复包含 4 株果树。在果树一侧树冠投影区开沟施肥,深度约为 40 cm,供试肥料:氮肥为尿素,磷肥为磷酸二铵,钾肥为硫酸钾,有机肥为羊粪(SOM 350.2 g/kg, TN 2.33 g/kg),有机肥按照“斤果斤肥”的原则确定用量。本试验采用羊粪堆制而成的传统有机肥,根据确定的目标产量来确定有机肥用量。施肥量见表 1,其中有机肥以基肥于秋季果实收获后(10 月上旬)一次性施入土壤中;氮、磷、钾化肥分 3 次施入。其中,50%与秋季果实收获后以基肥形式与有机肥一起施入,余下的 30%和 20%分别于坐果期、膨大期以追肥形式施入。

1.4 样品采集与测定

土壤样品于果树成熟期(2020 年 10 月)采集 0—20, 20—40 cm 土层土样,树冠树行分别采集 9 钻,每 3 钻混合作为 1 个土样,土样自然风干用于土壤有效磷、全磷及磷形态的测定。

1.5 土壤磷形态测定方法

按照 Hedley 等^[11]和 Sui 等^[12]修正的 Hedley 法进行土壤磷形态分级,把土壤磷分成 5 种形态,每种磷形态分为有机态和无机态 2 个部分。分别用不同的浸提液蒸馏水、0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液、0.1

mol/L 氢氧化钠溶液、1.0 mol/L 盐酸溶液连续浸提,每一步加入浸提液后振荡 16 h (25 ℃,200 min),离心(10 000 r/min,10 min),分别提取 H₂O—P(水溶性磷)、NaHCO₃—P(活性磷)、NaOH—P(潜在活性磷)、D.HCl—P(稳定性磷)和 Residual—P(残留态磷)。用钼蓝比色法测定溶液中无机磷(Pi)含量,用过硫酸铵、硫酸消化后用比色法测定溶液中的总磷(Pt),二者的差值为有机磷(Po)含量,残余态磷用高氯酸—浓硫酸消煮法测定。

表 1 试验处理与施肥量

		单位:kg/hm ²			
主处理	副处理	有机肥	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
生草	CK	0	0	0	0
	M	44978	0	0	0
	NPK	0	456	276	276
	MNPK	22549	360	180	180
清耕	CK	0	0	0	0
	M	44978	0	0	0
	NPK	0	456	276	276
	MNPK	22549	360	180	180

1.6 数据处理与方法

1.6.1 磷含量计算方法^[13]

磷含量(g/kg)= $\rho \times V/m \times V_2/V_1 \times 10^{-3}$
式中: ρ 为待测液中磷的质量浓度($\mu\text{g/mL}$); V 为样品制备溶液体积(mL); m 为风干土质量(g); V_1 为吸取滤液体积(mL); V_2 为显色溶液体积(mL); 10^{-3} 为换算乘数。

1.6.2 数据统计与分析 试验数据采用 Excel 2013 整理,采用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析,采用双因素(two-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),利用 Origin 2008 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤无机磷含量的影响

土壤无机磷含量占土壤磷含量的 60%~80%,是作物所需磷的主要来源^[14-15],长期生草覆盖和施肥处理下土壤磷形态分布具有较大差异。图 1 为 0—20,20—40 cm 土层不同形态土壤无机磷含量。在 0—20,20—40 cm 土层,土壤无机磷形态中水溶性磷 H₂O—P 含量均为最低,含量变化范围分别为 3.06~9.84,0.69~4.03 mg/kg,稀盐酸态磷(D.HCl—P)含量最高,含量变化范围分别为 461.92~731.54,395.71~501.86 mg/kg。在 0—20,20—40 cm 土层,除 NaOH—Pi 外,生草覆盖和施肥处理对其他无机磷形态都有交互效应,生草覆盖下的 MNPK 处理与清耕模式下的 MNPK 处理相比均可以增加 H₂O—P、D.HCl—P 含量,分别提高 9.3%,2.4%和 30.2%,13.0%,生草

覆盖和清耕模式下 NPK 和 MNPK 施肥处理与 CK 相比均可以提高各磷形态含量。

2.2 不同处理对土壤有机磷含量的影响

有机磷在土壤中的含量不高,但在磷素含量较低的情况下,有机磷也是重要的磷源。由图 2 可知,在 0—20,20—40 cm 土层,各处理间 Residual—P 含量最高,变化范围分别为 158.13~217.22,164.00~229.21 mg/kg,生草覆盖与清耕模式相比,Residual—P 含量分别降低 4.8%,12.7%。土壤有机磷形态中 NaHCO₃—Po 含量最低,各处理间变化范围分别为 4.21~24.90,8.93~22.84 mg/kg。生草覆盖和清耕模式下 MNPK 处理比 CK 处理 NaOH—Po 含量在 0—20,20—40 cm 土层分别显著提高 67.0%,24.4%和 27.2%,12.5%。

2.3 不同处理磷组分在土壤中的比例

磷肥施入土壤后转化为各种形态在土壤中累积,而磷素的形态影响磷素的有效性及利用效率^[16]。由图 3 可以看出,D.HCl—P 在土壤中占比最高,呈现 D.HCl—P>Residual—P>NaOH—Po>NaOH—Pi>NaHCO₃—Po>NaHCO₃—Pi>H₂O—P 趋势。0—20,20—40 cm 土层生草覆盖下的 MNPK 处理与 CK 处理相比 H₂O—P 的比例分别增加 0.4%,0.01%。Residual—P 比例分别下降 8.5%,3.5%,NaHCO₃—Pi 比例分别增加 4.5%,3.3%;无机磷含量分别增加 358.73,52.96 mg/kg,其比例分别增加 7.3%,6.1%。0—20,20—40 cm 土层清耕处理下 MNPK 处理 H₂O—P 的比例分别增加 0.3%,0.4%,无机磷含量分别增加 201.13,17.92 mg/kg,无机磷比例在 0—20 cm 增加 3.6%,20—40 cm 下降 6.6%,Residual—P 比例在 0—20,20—40 cm 分别下降 4.4%,5.0%。

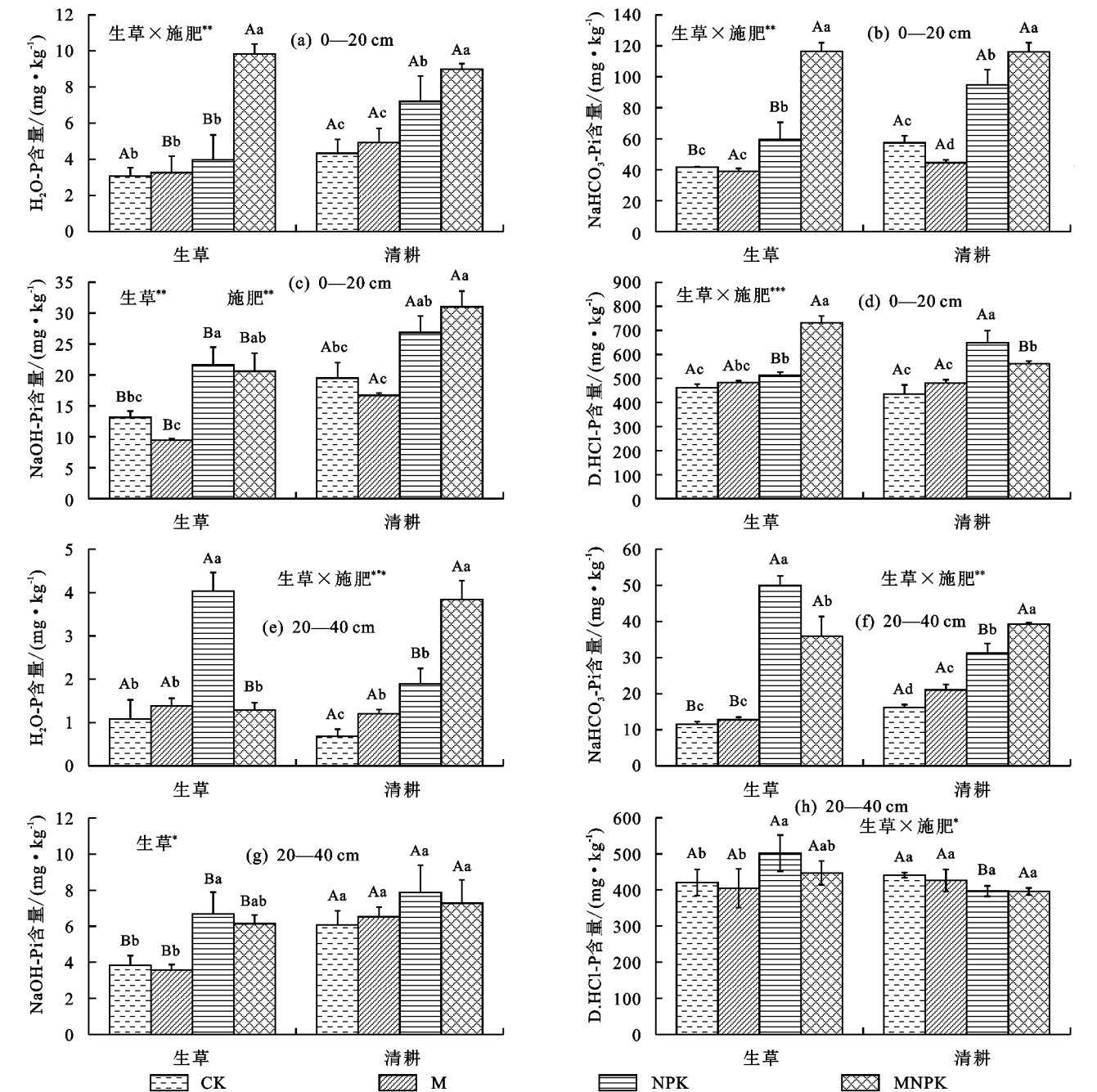
2.4 土壤各磷素形态之间及与有效磷、磷活化系数的相关关系

土壤中的磷受到土壤质地、酸碱性和其他组分的影响,改变其原来的形态,实现有机磷和无机磷之间、各形态无机磷之间、各形态有机磷之间相互转化,从而改变磷形态的含量及其有效性^[17]。磷活化系数是有效磷与全磷之比,活化系数越高,土壤的磷有效性越高^[18]。一般认为,土壤有效磷与某磷组分的相关性越显著,说明该磷组分的有效性越高,其相对有效性也越高^[19]。因此,通过对不同磷组分之间进行相关性分析,掌握有机肥及生草覆盖对土壤磷素活化效果,增加磷素有效性和提高磷肥利用率。

由表 2 可知,0—20 cm 土层 H₂O—P 与 NaHCO₃—P、NaOH—P、D.HCl—P 相关性均达到显著正相关,相关系数分别为 0.97,0.78,0.72,0.67,0.85,NaHCO₃—Pi 与 D.HCl—P、NaOH—Pi 相关系数达

到0.83,0.81,说明土壤各磷组分之间的相互转化主要发生在 H_2O-P 、 $NaHCO_3-P$ 与其他磷组分之间。由表3可知,20—40 cm 土层 H_2O-P 与 $NaHCO_3-Pi$ 相关性达到极显著相关,其他磷组分之间无显著相关关系,说明20—40 cm 土层各磷组分之间的相互转化主要发生在 H_2O-P 与 $NaHCO_3-Pi$ 之间。除 $NaOH-Po$ 和 $Residual-P$,其他磷组分与有效磷均存在相关关系,磷组分与有效磷之间的相关性呈现 $H_2O-P(0.99)$ 、 $NaHCO_3-Pi(0.99) > D.HCl-P(0.87) > NaHCO_3-Po(0.77) > NaOH-Pi(0.75) > NaOH-Po(0.64) > Residual-P(0.39)$ 趋

势,其中 H_2O-P 和 $NaHCO_3-Pi$ 相关性系数最大。 H_2O-P 、 $NaHCO_3-Pi$ 、 $NaOH-Pi$ 磷组分与有效磷均存在显著性相关关系,其中 H_2O-P 与有效磷呈现极显著性相关关系,磷组分与有效磷之间的相关性呈现 $NaHCO_3-Pi(0.79) > H_2O-P(0.77) > NaOH-Pi(0.71) > NaHCO_3-Po(0.66)$ 、 $Residual-P(0.66) > NaOH-Po(0.32) > D.HCl-P(0.18)$ 趋势。 H_2O-P 、 $NaHCO_3-Pi$ 、 $D.HCl-P$ 与全磷均达到极显著相关关系。除 $NaOH-Po$ 、 $D.HCl-P$ 和 $Residual-P$ 外,其他磷组分均与磷活化系数呈现显著或极显著相关关系。



注: *表示生草覆盖和施肥处理之间存在交互效应;大写字母表示主处理间多重比较;小写字母表示副处理间多重比较;不同字母表示差异达显著水平($p < 0.05$)。下同。

图1 不同处理0–40 cm 土层土壤无机磷含量

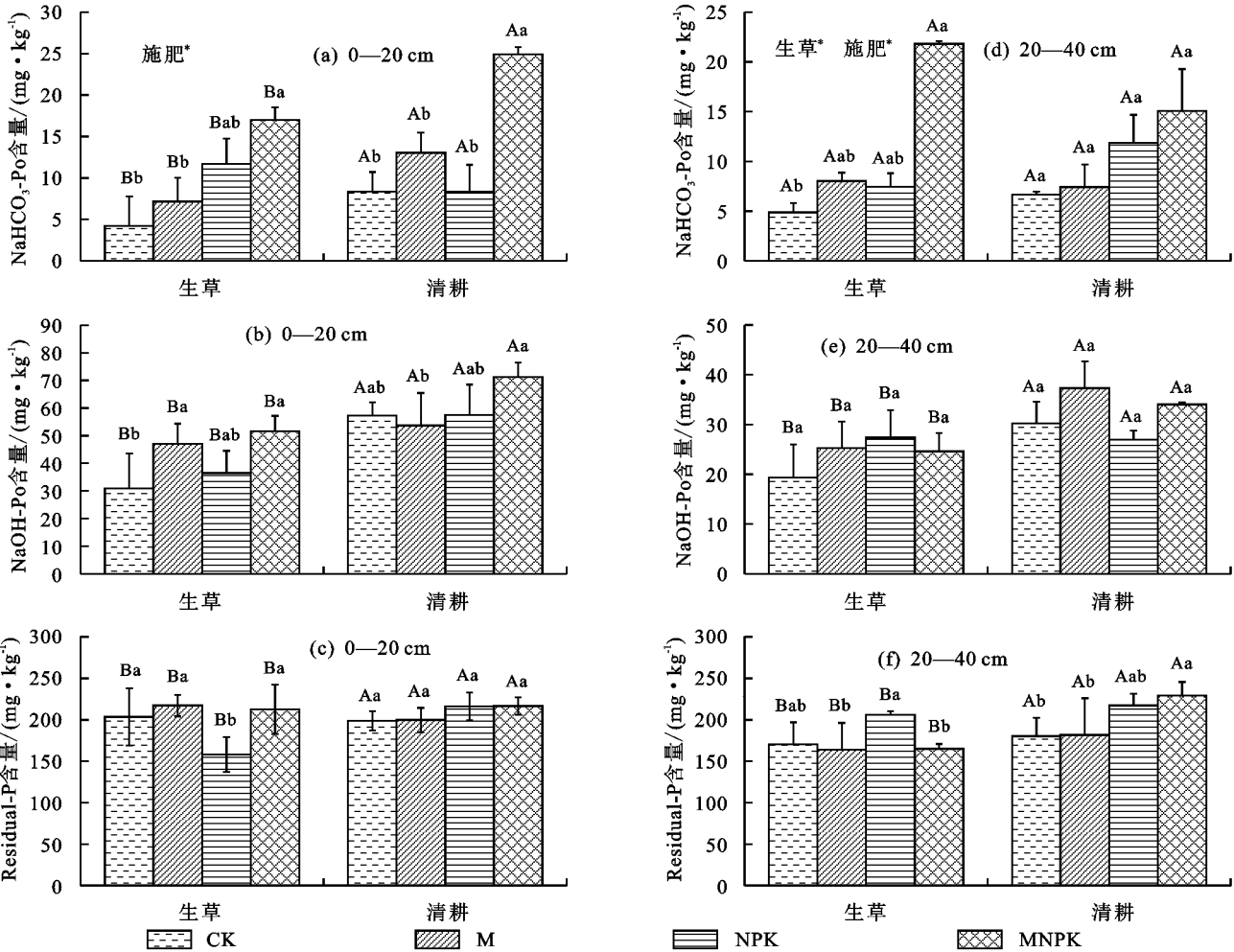


图 2 不同处理 0—40 cm 土层土壤有机磷含量

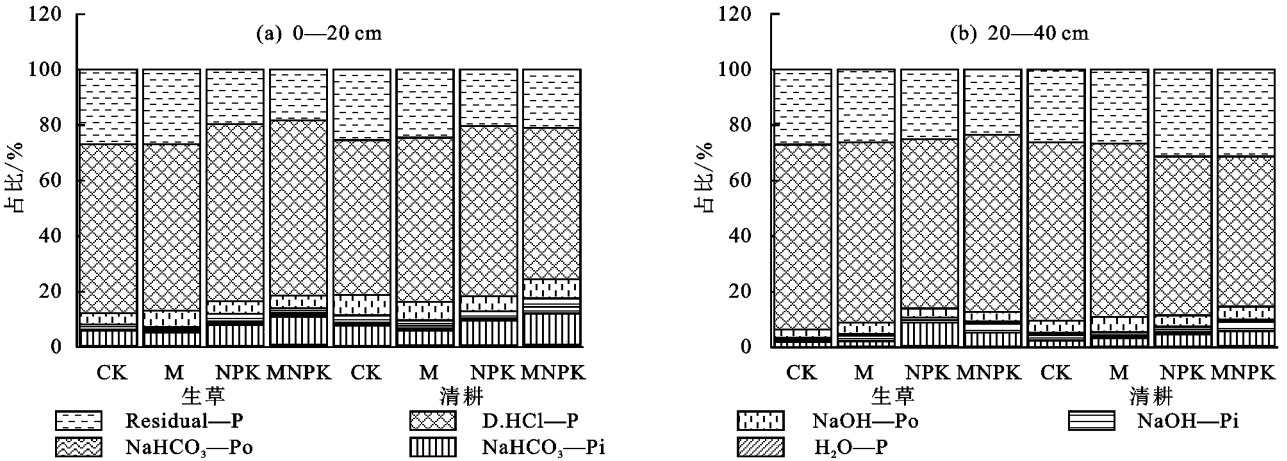


图 3 不同处理 0—40 cm 土层磷组分在土壤中的比例

3 讨论

3.1 长期生草覆盖下有机无机肥配施对土壤磷素形态分布及有效性的影响

果园中进行绿肥栽培可使土壤难溶性磷向植物容易吸收利用的可溶性磷转化,促进土壤磷循环利用^[20]。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^[21]。本研究中 0—20, 20—40 cm 生草处理下活性磷含量比清耕低,说明生草吸收消耗土壤中的一部分磷,这是因为生草生长前期吸收

土壤中的氮磷钾等养分,与果树形成养分竞争,但生草的根系分泌物、根瘤菌的结瘤固氮作用能够提升土壤有效磷等养分含量,后期生草刈割后覆盖于地表或翻耕入土壤后给土壤带来新的养分,从而弥补前期消耗的养分,降低对果树养分的竞争^[22]。

生草处理的磷素各形态除 D.HCl—P 外,其他磷形态含量都比清耕处理低,这主要由于绿肥活化土壤难溶性磷,使其向生物可利用性更高的磷形态转化^[23]。本研究表明,不同处理下土壤各磷形态以

D.HCl—P 和 Residual—P 为主,分别为土壤全磷的 53.1%~65.0%,18.2%~32.0%,与齐玲玉^[23]研究结果基本一致。经过 13 年(2008—2021 年)的生草覆盖和有机无机肥配施与 CK 相比,H₂O—P、NaHCO₃—P 含量显著提升,虽然生草吸收土壤磷,与果树具有竞争作用,但生草覆盖结合有机无机肥配施对活性磷(H₂O—P、NaHCO₃—P)含量的提升幅度更大。长期生草覆盖结合有机无机肥配施主要增加土壤中可利用态无机磷的比例,降低难利用态磷的比

例,与 Lehmann 等^[24]的研究结果一致。施肥是提供土壤磷源的主要方式,有机肥与磷肥配合施用是提高磷素利用的有效途径之一^[25]。杨学云等^[26]经过 12 年长期定位肥料试验表明,有机肥配施无机肥,土壤全磷和速效磷含量大幅度提高,磷素主要以无机形态累积于土壤中。生草覆盖下的 MNPK 处理速效磷含量比 CK 提高 29.7 mg/kg,比清耕处理下的 MNPK 处理速效磷含量提高 2.53 mg/kg,说明生草结合有机无机配施能更好地提高土壤速效磷。

表 2 0—20 cm 土层各磷素之间的相关关系

磷形态	H ₂ O—P	NaHCO ₃ —Pi	NaHCO ₃ —Po	NaOH—Pi	NaOH—Po	D.HCl—P	Residual—P	有效磷	全磷	磷活化系数
H ₂ O—P	1	0.97 **	0.78 *	0.72 *	0.67 *	0.85 **	0.42	0.99 **	0.86 **	0.91 **
NaHCO ₃ —Pi		1	0.75 *	0.81 **	0.62	0.83 **	0.34	0.99 **	0.81 **	0.94 **
NaHCO ₃ —Po			1	0.69 *	0.68 *	0.43	0.14	0.77 *	0.42	0.91 **
NaOH—Pi				1	0.66	0.49	0.03	0.75 *	0.54	0.83 **
NaOH—Po					1	0.29	0.52	0.64	0.50	0.69 *
D.HCl—P						1	0.32	0.87 **	0.95 **	0.64
Residual—P							1	0.39	0.48	0.22
有效磷								1	0.86 **	0.92 **
全磷									1	0.61
磷活化系数										1

注:* 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著相关。下同。

表 3 20—40 cm 土层各磷素之间的相关关系

磷形态	H ₂ O—P	NaHCO ₃ —Pi	NaHCO ₃ —Po	NaOH—Pi	NaOH—Po	D.HCl—P	Residual—P	有效磷	全磷	磷活化系数
H ₂ O—P	1	0.82 **	0.16	0.51	0.38	0.27	0.76 *	0.77 *	0.80 **	0.69 *
NaHCO ₃ —Pi		1	0.15	0.57	0.13	0.65	0.56	0.79 *	0.96 **	0.70 *
NaHCO ₃ —Po			1	0.34	0.21	-0.27	0.24	0.66	0.13	0.74 *
NaOH—Pi				1	0.58	0.07	0.78 *	0.71 *	0.65	0.70 *
NaOH—Po					1	-0.10	0.43	0.32	0.29	0.33
D.HCl—P						1	-0.12	0.18	0.68 *	0.06
Residual—P							1	0.66	0.61	0.63
有效磷								1	0.75 *	0.99 **
全磷									1	0.64
磷活化系数										1

3.2 长期生草覆盖下有机无机肥配施对土壤磷形态转化的影响

土壤磷组分之间的形态分布和转化影响土壤有效磷的含量,从而影响磷的有效性。一般认为,土壤有效磷与某形态磷的相关性越显著,该形态的磷有效性越高,其相对有效性也越高^[26]。0—20 cm 土层除 NaOH—Po 和 Residual—P 外,H₂O—P、NaOH—Pi、NaHCO₃—P、D.HCl—P 均呈显著正相关(表 2),H₂O—P 和 NaHCO₃—Pi 相关性系数最大,说明 0—20 cm 土层 Resin—P 和 NaHCO₃—Pi 是最有效的磷源。20—40 cm 土层,H₂O—P、NaHCO₃—Pi、NaOH—Pi 与有效磷均存在显著性正相关(表 3),其

中 H₂O—P 与速效磷呈极显著相关关系,说明 20—40 cm 土层 H₂O—P 是最有效的磷源。0—20 cm 土层 H₂O—P 与 NaHCO₃—P、NaOH—P、D.HCl—P 均达到显著正相关,20—40 cm H₂O—P 与 NaHCO₃—Pi 达到极显著相关,表明不同形态磷素通过解吸、溶解、矿化等方式转化为有效性较高的磷形态。Residual—P 是土壤中最稳定性磷,植物难以吸收利用,Residual—P 与 0—20 cm 土层各形态的磷均无相关性关系,0—40 cm 土层与土壤有效磷、全磷、磷活化系数均无相关性关系,但生草处理结合有机无机肥配施可显著降低 Residual—P 比例,活化 Residual—P 向活性磷转化。

4 结 论

(1)当地果园 0—40 cm 土层土壤磷形态以盐酸态磷和残留态磷为主,水溶性磷与碳酸氢钠无机磷的比例较低。经过 13 年生草覆盖和施肥处理,生草覆盖下的 MNPK 处理显著增加 H_2O-P 、 $NaHCO_3-Pi$ 和无机磷总含量和比例,降低 Residual-P 含量和比例,提高磷的有效性。

(2)有机无机肥配施可显著提高土壤有效磷、全磷、磷组分的含量以及 H_2O-P 、 $NaHCO_3-Pi$ 活性磷在土壤中的比例,生草条件下的磷组分含量低于清耕条件下的含量,但生草条件下有机无机配施对磷组分含量的提升幅度效果、提高土壤无机磷的比例比清耕条件下的有机无机肥配施好。生草覆盖下有机无机肥配施可显著提高水溶性磷的含量和比例,降低残留态磷的比例。

(3)0—20,20—40 cm 土层 H_2O-P 与 $NaHCO_3-Pi$ 相关性均达到显著性正相关,反映 0—40 cm 土层土壤磷组分之间存在相互转化。 H_2O-P 与有效磷、全磷、磷活化系数的相关系数最大,其生物有效性最高,是最有效的磷源。

综上所述,生草覆盖下有机无机肥配施可显著提高苹果园土壤活性磷含量,对提高土壤磷肥利用率、苹果增产提质具有重要意义,是一种值得广泛推荐的方式。

参考文献:

[1] 万炜,师纪博,刘忠,等.栖霞市苹果园氮磷养分平衡及环境风险评价[J].农业工程学报,2020,36(4):211-219.

[2] 陆景陵.植物营养学(上册)[M].2 版.北京:中国农业大学出版社,2003.

[3] 郭晓睿,宋涛,邓丽娟,等.果园生草对中国果园土壤肥力和生产力影响的整合分析[J].应用生态学报,2021,32(11):4021-4028.

[4] 谢丽丽,蔡建兴,黄素英.平和蜜柚果园生草栽培模式及技术应用[J].东南园艺,2020,8(6):50-53.

[5] 洪继旺,钱琳,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.

[6] 彭伟东,杨帆,李海英,等.果园生草技术在矮砧密植苹果园中应用现状及展望[J].草学,2020(1):83-86.

[7] 杨文娜,余烁,罗东海,等.化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响[J].环境科学,2022,43(1):540-549.

[8] 郭玉冰,刘建玲,郭巨秋,等.长期施用磷肥和有机肥对菜地土壤磷素有效性的影响[J].河北农业大学学报,2020,43(4):76-82.

[9] Schneider E, Haderlein S B. Potential effects of biochar on the availability of phosphorus mechanistic insights

[J].Geoderma,2016,277:83-90.

[10] 吴文丽,洪坚平,孟会生,等.连续施用解磷菌肥对复垦土壤磷酸酶和 Hedley 磷形态的影响[J].中国土壤与肥料,2016(4):59-64.

[11] Hedley M, Stewart J, Chauhan B. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J].Soil Science Society of America Journal,1982,46(5):970-976.

[12] Sui Y B, Thompson M L, Shang C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids[J].Soil Science Society of America Journal,1999,63(5):1174-1180.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2010.

[14] 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.

[15] 李想,刘艳霞,刘益仁,等.无机有机肥磷配施对作物产量及土壤磷形态的影响[J].土壤,2013,45(4):641-647.

[16] 刘树堂,韩晓日,迟睿,等.长期定位施肥对石灰性潮土磷素状况的影响[J].水土保持学报,2005,19(5):43-46.

[17] 焦亚鹏,齐鹏,王晓娇,等.氮磷配施对黄土高原旱作农业区典型农田土壤无机磷形态的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(8):1459-1472.

[18] 常佳.施用不同肥料对复垦土壤无机磷形态及玉米品质产量的影响[D].山西 太谷:山西农业大学,2016.

[19] 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.

[20] 李翠兰,李志洪,高强,等.有机无机复合肥及调节剂对玉米产量及磷素吸收的影响[J].玉米科学,2010,18(5):105-107,113.

[21] Teles A P B, Rodrigues M, Bejarano H 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.

[22] 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.

[23] 齐玲玉.有机肥配施磷肥对土壤磷素形态转化及水稻吸收利用的影响[D].杭州:浙江大学,2015.

[24] Lehmann J, Lan Z, Hyland C, et al. Long-term dynamics of phosphorus forms and retention in manure-amended soils[J].Environmental Science and Technology,2005,39(17):6672-6680.

[25] Xu M G, Li D C, Li J M, et al. Effects of organic manure application with chemical fertilizers on nutrient absorption and yield of rice in Hunan of Southern China[J].Agricultural Sciences in China,2008,7(10):1245-1252.

[26] 杨学云,孙本华,古巧珍,等.长期施肥对壤土磷素状况的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(4):837-842.