

不同温室蔬菜种植模式下土壤磷素形态分布与转化^①

李娟娟, 滕艳敏, 李季*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:采用蒋柏藩-顾益初无机磷分级浸提法,研究了15 a长期有机、综合和常规种植3种温室蔬菜生产体系下石灰性土壤磷形态分布及转化特征。结果表明:种植模式及施肥年限对土壤有机磷含量和各形态无机磷含量均有显著影响,且交互作用显著。随着施肥时间延长,3种种植模式土壤有机磷含量与无机磷形态 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 含量不断升高, Al-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量呈现不规则变动,差异较小;有机模式土壤有机磷含量与无机磷形态 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 含量均高于常规和综合模式, O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量略小于常规和综合模式。在各磷素占比中,中等活性磷源($\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 Al-P)>潜在磷源(O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)>有效磷源($\text{Ca}_2\text{-P}$)。表层土中有机磷占全磷的8%~23%,亚表层土中有机磷占全磷的6%~13%。有机模式促进了无机磷各形态之间、有机磷和无机磷形态之间的转化过程,0~20 cm土层的磷素转化比20~40 cm更活跃。

关键词:有机生产体系;有机肥;无机磷形态;有机磷

中图分类号: S157.4 文献标志码: A

Soil Phosphorus Fraction and Transformation Under Different Production Modes of Greenhouse Vegetables

LI Wanwan, TENG Yanmin, LI Ji*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The study focuses on phosphorus(P) fractions and transformation in calcareous soil in a 15-year experiment under organic, integrated and conventional production modes of greenhouse vegetables. The hierarchical extraction method of inorganic P was used to analyze the distribution of inorganic P fractions. The results showed that production mode, fertilization year and their interaction all had significant effects on the contents of organic P and inorganic P fractions. With the increase of fertilization year, the contents of organic P, $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$ and Fe-P under three production modes were continuously increased, but the contents of Al-P , O-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ changed irregularly with small variances. The contents of organic P, $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$ and Fe-P under organic production mode were higher than those under integrated and conventional production modes, while the contents of O-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ under organic production mode were lower than those under integrated and conventional production modes. The proportion of P fractions was in an order of moderate-activity P sources ($\text{Ca}_8\text{-P}$, Fe-P , Al-P) > potential P sources (O-P , $\text{Ca}_{10}\text{-P}$) > available P source ($\text{Ca}_2\text{-P}$). Organic P content accounted for 8%–23% and 6%–13% of total P content in 0–20 and 20–40 cm soils, respectively. The organic production mode could promote the transformation between inorganic P fractions and between organic P and inorganic P fractions, and it was more active in 0–20 cm soil than in 20–40 cm soil.

Key words: Organic production mode; Organic fertilizer; Inorganic phosphorus fraction; Organic phosphorus

1980年以来,我国设施蔬菜种植面积逐年递增,2016年已达到391.5万hm²^[1]。截至2015年底,我国有机蔬菜种植面积为14.8万hm²^[2]。设施蔬菜生产能够高效使用非耕地土地,提高蔬菜产量和质量^[1]。但也存在着化肥和有机肥施入过量、养分不平衡和温

室气体排放等问题^[3]。研究表明,长期大量施入磷肥或有机肥会污染地下水,引起水体富营养化^[4]。

1989年,蒋柏藩和顾益初^[5]在张守敬和Jackson法的基础上提出了一套适用于石灰性土壤无机磷分级的新体系,把石灰性土壤中的无机磷分为二钙磷

①基金项目:国家重点研究发展计划项目(2016YFD0800601)资助。

* 通讯作者(liji@cau.edu.cn)

作者简介:李娟娟(1994—),女,山东济宁人,硕士,主要从事有机农业与养分管理等方面的研究。E-mail: caulww127@163.com

($\text{Ca}_2\text{-P}$)、八钙磷($\text{Ca}_8\text{-P}$)、十钙磷型($\text{Ca}_{10}\text{-P}$)、铝磷(Al-P)、铁磷(Fe-P)和闭蓄态磷(O-P)。土壤中的各种磷形态处于不断转化的过程中,影响无机磷固定和活化的因素有施肥,土壤 pH, 土壤中 Al、Fe、Ca、Mg 的含量,磷灰石等矿物的表面积等;影响土壤有机磷矿化和固定的主要因素是土壤微生物,特别是土壤磷酸酶的活性及细菌和原生动物的活动^[6-7],而微生物活动和磷酸酶活性又受施肥、农药及土壤 pH 等因素的影响。研究结果表明,施用有机肥能够提高土壤中的磷素含量并促进磷素循环。张建军等^[12]对玉米地的研究发现,随有机肥施用量的增加,黑垆土中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量增加,而 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 和 O-P 含量降低,其中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 所占比例最大,可达到 80% 左右。很多研究结果认为,有机肥施用促进土壤中的无机磷向有效态磷转化^[13-14]。施肥年限对土壤中各无机磷形态的含量与分布有显著影响。王劲松等^[15]研究了温室大棚种植年限对石灰性土壤各无机磷形态的影响,结果表明,随施肥年限增加, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量均增加,经过 15 a 的种植, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占总无机磷的比例达到 50%, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占无机磷的比例提高到 8% 左右,之后趋于稳定。施用有机肥会提高土壤中有机磷的含量。杨艳菊等^[16]研究结果表明,大量施用有机肥相比不施肥处理提高土壤中有机磷含量 201.5%,其中活性有机磷含量增加最多,对速效磷的贡献最大。

目前,国内外的研究主要集中于短期单施肥或长期混合施肥对土壤磷形态的影响,对长期温室蔬菜大棚施用有机肥如何影响石灰性土壤中磷素形态转化的研究很少。本研究以中国农业大学曲周试验站有机、综合与常规种植 3 种蔬菜日光温室长期定位试验为基础,研究不同施肥年限 3 种生产体系下土壤剖面磷素形态及其含量分布,探究土壤中磷素的转化过程,评价土壤的供磷能力及其对环境的影响,探寻合理的调控措施,在提高作物生产力的同时,最大限度

地降低环境污染,为设施蔬菜生产和有机蔬菜种植的肥料管理提供依据,为发展规模化、专业化、标准化的有机农业设施蔬菜种植模式提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河北省邯郸市曲周县北部中国农业大学曲周试验站(36°52'N, 115°01'E),试验于 2002 年 3 月开始,是针对有机蔬菜生产进行的长期定位研究。试验采用的日光温室为拱圆式,长 52 m、宽 7 m,占地面积约 0.04 hm²。供试土壤为治理后的盐化潮褐土,试验前为多年菜田。

1.2 试验设计

试验设有机、综合和常规种植 3 个处理,分别为:
①有机种植模式(ORG):采用有机蔬菜生产方式,只施用有机肥,病虫害防治以生物和物理防治为主,并辅以生物药剂防治;
②综合种植模式(INT):结合有机和常规蔬菜生产方式,施用减半有机肥及减半化肥,病虫害防治以生物和物理防治为主,比较严重时少量使用一些低毒低残留农药;
③常规种植模式(CON):采用常规蔬菜种植方法,施用化肥和少量有机肥,追施尿素,病虫害防治以化学防治为主,使用国家规定的高效低毒农药控制病虫害。化肥中氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾,有机肥由当地养殖场生产的牛粪、鸡粪(牛粪约 6 000 kg, 鸡粪约 3 000 kg)添加北京沃土天地生物有限公司生产的 VT 菌剂后堆置而成。3 种蔬菜种植模式分别在 3 个温室进行,每个温室内平分为 3 个小区,每个小区约 120 m²,作为 3 个重复。种植作物为芹菜、番茄、茄子、茴香等。每年的养分投入量见表 1。

1.3 样品采集与指标测定

于 2017 年 4 月取样,每个处理分为 3 个取样小区,于植株行正中间用土钻采集土样,取样深度为 0~40 cm,每 20 cm 为一层,每个小区按“X”字形取 5

表 1 不同生产模式投入养分量(kg/hm²)
Table 1 Nutrients input under different production modes

时间	种植模式	化肥			有机肥			总计		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
春季蔬菜	CON	696.97	242.42	727.27	273.18	365.81	377.60	970.15	608.23	1 104.88
	INT	487.88	121.21	363.64	464.40	621.87	641.93	952.28	743.08	1 005.56
	ORG	0.00	0.00	0.00	1 064.01	1 381.91	1 426.02	1 064.02	1 385.91	1 430.67
秋季蔬菜	CON	418.18	242.42	727.27	273.18	365.81	377.60	691.36	608.23	1 104.88
	INT	209.09	121.21	363.64	464.40	621.87	641.93	673.49	743.08	1 005.56
	ORG	0.00	0.00	0.00	928.80	1 243.74	1 283.85	928.80	1 243.74	1 283.85

钻, 混匀。土样取回后剔除石砾和植物残根等杂物后风干保存, 另外, 收集2013—2016年4月份土壤样品, 用于磷形态测定。有机磷测定采用灼烧法, 无机磷形态测定采用蒋柏藩和顾益初^[5]无机磷分级浸提法。

1.4 数据处理与分析

数据由Microsoft Excel 2010程序进行整理, 变异性及方差分析使用SPSS 20.0程序。

2 结果与分析

2.1 土壤无机磷动态变化及影响因素

由图1可知, 在表层土壤(0~20 cm)中, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量最高, 常规、综合和有机种植模式最高分别达1 457.91、1 097.25、1 599.68 mg/kg。随着施肥时间延长, 3种植模式的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P含量不断升高, 2013—2017年常规种植模式的增幅分别为102%、31%、97%, 综合种植模式的增幅分别为42%、23%、67%, 有机种植模式的增幅则分别为25%、50%、73%; 且有机种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P平均含量

均显著大于常规和综合种植模式, 其中, 2017年 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 较常规和综合种植模式增幅为84%、80%, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 增幅为10%、46%, Fe-P增幅为13%、38%。随施肥时间延长, Al-P、O-P、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量波动变化, 2013—2017年, 常规种植模式Al-P含量在228.22~369.60 mg/kg, O-P含量在119.59~240.34 mg/kg, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量在365.64~528.67 mg/kg; 综合种植模式Al-P含量在197.34~311.60 mg/kg, O-P含量在130.77~388.24 mg/kg, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量在316.03~426.42 mg/kg; 有机种植模式Al-P含量在189.04~357.12 mg/kg, O-P含量在44.92~176.00 mg/kg, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量在296.69~441.31 mg/kg, O-P及 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量略低于常规和综合种植模式。

在亚表层土壤(20~40 cm)中, 同样 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量最高, 常规、综合和有机种植模式最高分别可达503.23、417.00、567.25 mg/kg(图1)。随着施肥时间延长, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P含量呈上升趋势, 2013—2017年常规种植模式的增幅分别为297%、54%、64%, 综合种植模式的增幅分别为156%、35%、67%, 有机种植模

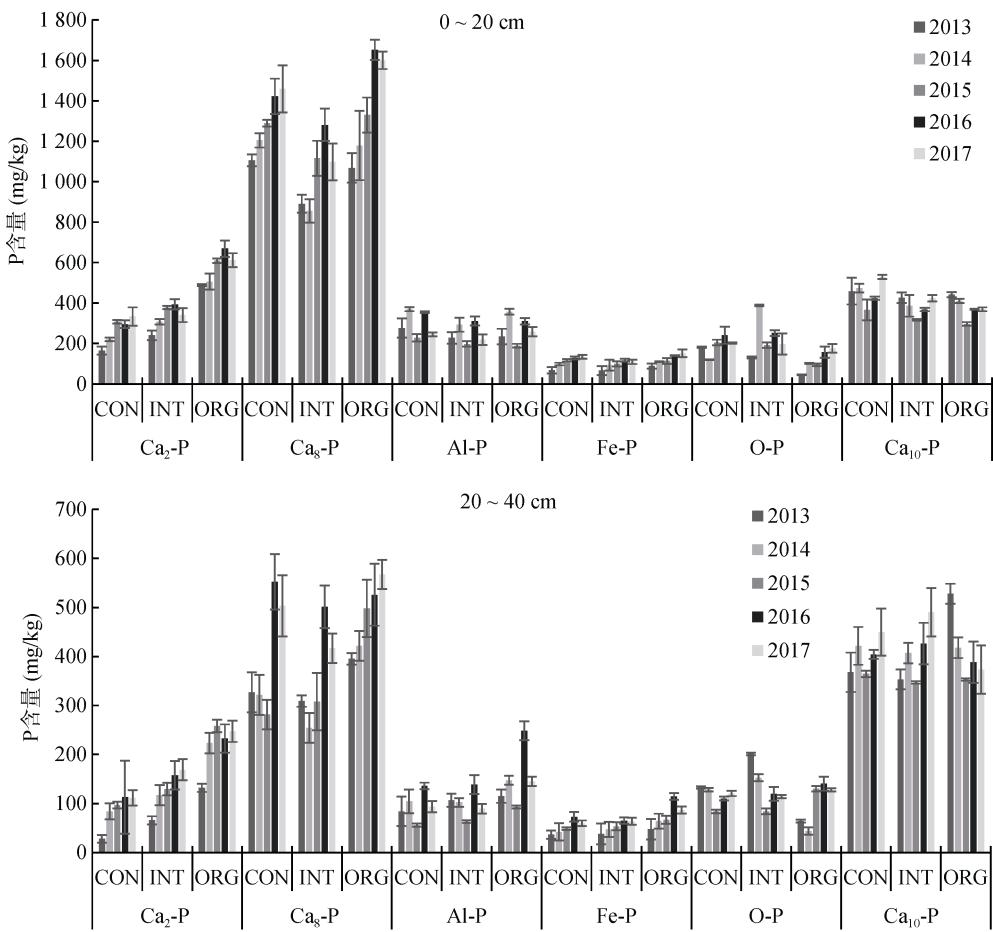


图1 不同温室蔬菜种植模式土壤无机磷形态含量变化

Fig. 1 Inorganic P fractions in soils under different production modes of greenhouse vegetables

式的增幅分别为 27%、43%、83%; 且有机种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Fe}\text{-P}$ 平均含量均大于常规和综合种植模式, 2017 年 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 较之增幅为 122%、46%, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 增幅为 13%、36%, $\text{Fe}\text{-P}$ 增幅为 45%、37%。随施肥时间延长, $\text{Al}\text{-P}$ 、 $\text{O}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量波动变化, 2013—2017 年, 常规种植模式 $\text{Al}\text{-P}$ 含量在 55.91~135.91 mg/kg, $\text{O}\text{-P}$ 含量在 83.95~132.78 mg/kg, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量在 364.32~449.83 mg/kg; 综合种植模式 $\text{Al}\text{-P}$ 含量在 63.10~138.73 mg/kg, $\text{O}\text{-P}$ 含量在 84.02~201.38 mg/kg, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量在 347.13~490.07 mg/kg; 有机种植模式 $\text{Al}\text{-P}$ 含量在 92.92~248.52 mg/kg, $\text{O}\text{-P}$ 含量在 43.77~140.60 mg/kg, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量在 373.4~527.92 mg/kg。

由图 2 可知, 随着施肥时间的延长, 在 0~20 cm 土层中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 所占比例先上升后稳定, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 所占比例稳定在 50% 左右, $\text{Fe}\text{-P}$ 的比例稳定在 4.5% 左右,

$\text{Al}\text{-P}$ 和 $\text{O}\text{-P}$ 的比例略有下降, 常规和有机种植模式 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 比例下降, 而综合种植模式略有上升; 在 20~40 cm 土层中, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 所占比例逐渐上升, $\text{Al}\text{-P}$ 和 $\text{Fe}\text{-P}$ 的比例分别稳定在 9% 和 4.5% 左右, $\text{O}\text{-P}$ 的比例略有下降, 常规和综合种植模式 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 所占比例上升, 而有机种植模式略有下降。有机种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 所占比例高于常规和综合模式, $\text{O}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 所占比例几乎均低于常规和综合种植模式, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Fe}\text{-P}$ 和 $\text{Al}\text{-P}$ 比例无明显差异。整体看来, 表层土各磷素占比: 中等活性磷源($\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Fe}\text{-P}$ 、 $\text{Al}\text{-P}$)>潜在磷源($\text{O}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)>有效磷源($\text{Ca}_2\text{-P}$)。亚表层土各磷素占比: 2013—2014 年潜在磷源($\text{O}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)>中等活性磷源($\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Fe}\text{-P}$ 、 $\text{Al}\text{-P}$)>有效磷源($\text{Ca}_2\text{-P}$), 2015—2017 年中等活性磷源($\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Fe}\text{-P}$ 、 $\text{Al}\text{-P}$)>潜在磷源($\text{O}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)>有效磷源($\text{Ca}_2\text{-P}$)。

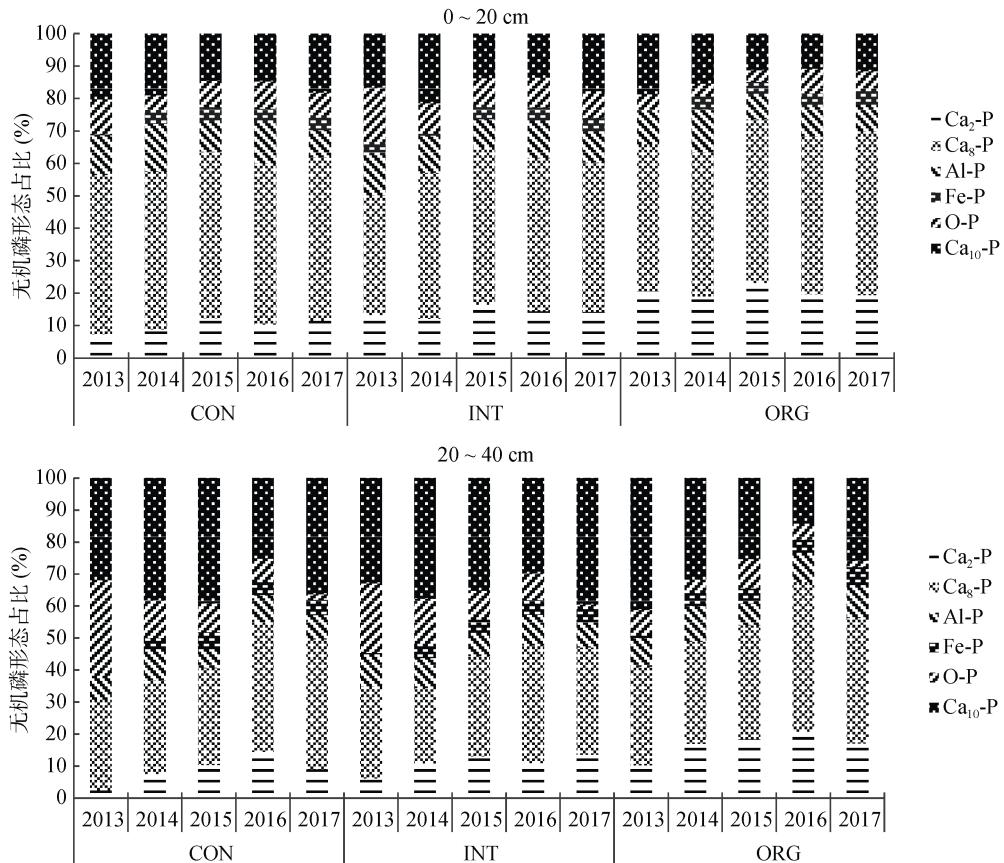


图 2 不同温室蔬菜种植模式土壤不同形态磷占无机磷的比例

Fig. 2 Proportion of different P fractions in total inorganic P under different production modes of greenhouse vegetables

由表 2 可知, 除亚表层 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 外, 种植模式及施肥年限对其余形态磷素含量均有显著影响; 除表层土的 $\text{Fe}\text{-P}$ 和亚表层土的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 外, 种植模式与施肥年限的交互作用均显著影响其余磷组分。说明种植模式及施肥年限共同影响土壤中无机磷形态的含量分布。

2.2 土壤有机磷动态变化及影响因素

由图 3、表 3 可知, 种植模式及施肥年限对有机磷含量均有显著的影响, 且种植模式与施肥年限的交互作用亦显著。随着施肥时间的增加, 土壤中有机磷含量显著提高, 表层土常规、综合和有机种植模式有机

表2 土壤无机磷变异来源方差分析
Table 2 ANVOA results of variation sources of soil inorganic P

土层(cm)	变异来源	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$
0~20	种植模式	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	施肥年限	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	种植模式×施肥年限	0.020	0.012	0.005	0.124	0.002	0.001
20~40	种植模式	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.623
	施肥年限	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	种植模式×施肥年限	0.008	0.163	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

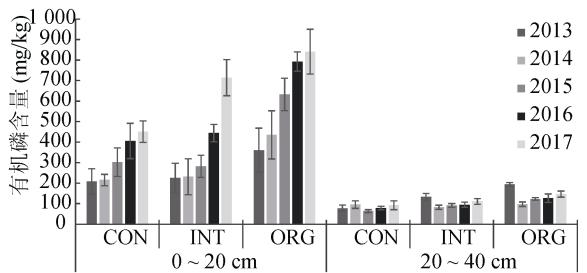


图3 不同温室蔬菜种植模式有机磷含量变化
Fig. 3 Organic P in soils under different production modes of greenhouse vegetables

磷含量最高分别可达 450.52、714.19、840.74 mg/kg, 2017 年比 2013 年增幅为 117.10%、215.28%、133.55%; 亚表层土中常规、综合和有机种植模式有机磷含量最高分别可达 92.08、110.64、146.51 mg/kg, 2017 年比 2013 年增幅为 18.13%、42.72%、54.93%。有机种植模式下土壤有机磷含量几乎全都高于常规和综合种植模式, 2017 年表层土分别比常规及综合种植模式高出 87.61%、17.71%, 亚表层土则分别高出 59.11%、32.42%。

由图 4 可知, 在表层土中有机磷占全磷的 8% ~ 23%, 在亚表层土中有机磷占全磷的 6% ~ 13%; 表层土中有机磷所占比例逐年升高, 且有机种植模式均高于常规和综合种植模式; 亚表层土中有机磷所占比例稳定在 8% 左右, 3 种种植模式间没有显著性差异。

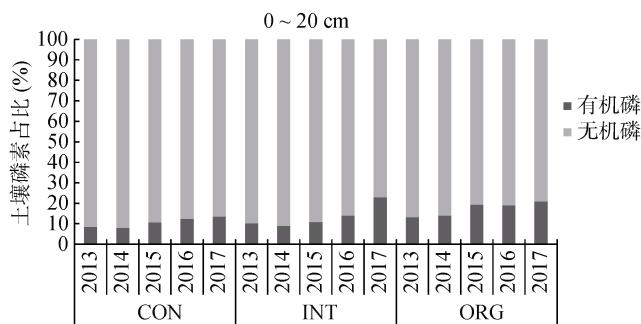


图4 不同温室蔬菜种植模式土壤有机磷与无机磷占全磷的比例
Fig. 4 Proportion of inorganic and organic P in soils under different production modes of greenhouse vegetables

壤中无机磷形态之间、有机磷与无机磷之间的转化更活跃, 有机种植模式促进了土壤磷素之间的转化过程。

在 20~40 cm 土层, 常规种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 含量两两呈现明显的线性相关关系; 综合种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 O-P 含量两两呈现明显的线性相关关系, 有机磷与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 含量均存在明显的线性相关关系, 但 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量呈显著负相关关系。有机种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 O-P 、有机磷含量两两呈现明显的线性相关关系($\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 除外), 说明有机种植模式土

2.3 土壤各形态磷组分的相关性

由表 4 统计分析可知, 在 0~20 cm 土层, 常规种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、有机磷含量两两呈现明显的线性相关关系, 表明两种磷形态之间存在一定的转化关系。综合种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 O-P 含量两两呈现明显的线性相关关系, 有机磷与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 含量均存在明显的线性相关关系, 但 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量呈显著负相关关系。有机种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 O-P 、有机磷含量两两呈现明显的线性相关关系($\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 除外), 说明有机种植模式土

表 4 土壤各形态磷组分的相关性
Table 4 Correlation between P fractions under different production modes of greenhouse vegetables

土层(cm)	处理	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	有机磷
0 ~ 20	CON	Ca ₂ -P	1					
		Ca ₈ -P	0.864**	1				
		Al-P	-0.305	-0.082	1			
		Fe-P	0.933**	0.884**	-0.071	1		
		O-P	0.387	0.482	-0.273	0.364	1	
		Ca ₁₀ -P	-0.026	0.189	0.128	0.054	-0.235	1
		有机磷	0.779**	0.811**	-0.174	0.763**	0.282	0.186
	INT	Ca ₂ -P	1					
		Ca ₈ -P	0.831**	1				
		Al-P	0.209	0.12	1			
		Fe-P	0.851**	0.764**	0.361	1		
		O-P	0.806**	0.863**	0.325	0.679**	1	
		Ca ₁₀ -P	-0.569*	-0.395	0.118	-0.295	-0.31	1
		有机磷	0.419	0.539*	-0.054	0.663**	0.287	0.243
20 ~ 40	CON	Ca ₂ -P	1					
		Ca ₈ -P	0.903**	1				
		Al-P	-0.073	0.115	1			
		Fe-P	0.748**	0.882**	0.217	1		
		O-P	0.824**	0.879**	0.368	0.794**	1	
		Ca ₁₀ -P	0.426	0.636*	0.408	0.790**	0.598*	1
		有机磷	0.757**	0.777**	-0.118	0.790**	0.784**	0.536*
	INT	Ca ₂ -P	1					
		Ca ₈ -P	0.836**	1				
		Al-P	0.630*	0.771**	1			
		Fe-P	0.933**	0.899**	0.616*	1		
		O-P	-0.459	-0.449	0.088	-0.650**	1	
		Ca ₁₀ -P	0.188	0.287	0.295	0.253	-0.212	1
		有机磷	0.029	0.246	0.544*	0.117	0.227	0.187
0 ~ 20	ORG	Ca ₂ -P	1					
		Ca ₈ -P	0.703**	1				
		Al-P	0.15	0.597*	1			
		Fe-P	0.926**	0.796**	0.289	1		
		O-P	-0.756**	-0.346	0.343	-0.651**	1	
		Ca ₁₀ -P	0.681**	0.560*	0.294	0.612*	-0.589*	1
		有机磷	-0.237	0.253	0.307	-0.155	0.194	-0.029
	ORG	Ca ₂ -P	1					
		Ca ₈ -P	0.651**	1				
		Al-P	0.173	0.668**	1			
		Fe-P	0.532*	0.870**	0.854**	1		
		O-P	0.226	0.409	0.341	0.415	1	
		Ca ₁₀ -P	-0.831**	-0.451	-0.111	-0.506	-0.253	1
		有机磷	-0.568*	-0.202	-0.164	-0.285	-0.146	0.412

明土壤不同土层的无机磷形态含量与转化过程不尽相同。3 种种植模式有机磷含量与其他无机磷形态几

乎没有明显的相关性,说明有机磷几乎没有参与磷素的转化过程。

3 讨论

本研究表明,种植模式及施肥年限对各形态无机磷含量均有显著影响,且交互作用显著。随着施肥时间延长,3种种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 含量不断升高, Al-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量呈现不规则变动,差异较小;有机种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 含量均高于常规和综合种植模式, O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量略小于常规和综合种植模式。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 对植物具有高度有效性,是作物的有效磷源。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与有机质含量呈显著正相关关系,说明土壤有机质含量的提高会降低土壤中磷的吸附,原因可能是有机肥施入土壤后提高了土壤有机质含量,改变了土壤的物理性质^[15],同时有机肥中也含有大量的活性磷^[17],且通过矿化作用及分解作用释放出部分磷素、通过腐殖酸与 Ca 、 Fe 和 Al 等螯合降低土壤中磷的吸附,从而导致土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量的增加^[18]。大量施用有机肥及土壤中有效磷含量过多会促进 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 方向转化^[16],这是因为土壤对于有效磷的承载是有限的,当超过某一阈值后,磷素会加速移动、流失或转化,从而提高土壤中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量。陆欣春等^[20]研究发现,长期施用有机肥会显著提高 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 的含量,但 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量变化不显著。王劲松等^[15]研究了栽培年限为0~15 a的温室土壤,结果发现随种植年限增加,土壤无机磷形态的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量均明显增加,种植4~5 a后,无机磷中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占到50%。宋付朋^[21]研究了化肥与有机肥配施下石灰性菜田土壤无机磷形态,结果表明土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Fe-P 含量在表层强烈富集,下层含量骤减,趋势与本研究结果一致。本研究结果表明,3种种植模式土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量呈现先上升后稳定的趋势, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量所占比例稳定在50%左右, Fe-P 的比例稳定在4.5%左右, Al-P 、 O-P 及 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的比例略有下降,这是因为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 含量的上升导致总无机磷含量上升,而 Al-P 、 O-P 及 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量几乎不变。在表层及亚表层土壤中,无论施肥年限多长,有机种植模式的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 所占比例均高于常规和综合种植模式,这可能是因为大量的有机肥施入携带了大量的活性磷,每年的持续输入使 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 维持在较高水平,且活性磷含量过高,垂直移动性增强,增加了亚表层土中的含量。李中阳等^[22]研究了有机无机肥料配施对潮土的影响,结果表明长期施肥处理提高了土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的比例,降低了 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的比例,与本研究结果一致。

本研究结果表明,随着施肥时间的增加,土壤中有机磷含量显著提高,有机种植模式下土壤有机磷含量几乎全都高于常规和综合种植模式。杨艳菊等^[16]研究结果表明,大量施用有机肥相比不施肥处理提高土壤中有机磷含量201.5%,其中活性有机磷含量增加最多,对速效磷的贡献最大。有机肥含有大量磷素,施入土壤后会扩大土壤磷库,改变土壤的物理、化学、生物性质,从而影响土壤中磷素的转化过程。有机肥中腐殖酸不仅能和 Ca 、 Al 、 Fe 螯合,吸附于铁矿石表面,而且会形成腐殖酸-(Fe/Al)-P复合体,这些过程会释放磷素,并增强磷素移动^[18]。有机肥中含有许多 Ca 元素,有机肥长期使用会提高土壤中 Ca-P 的含量,并提高其比例。有机肥中含有许多微生物、酶及生物能源物质,可促进土壤中微生物增长,改变微生物群落结构,提高土壤团聚体含量和土壤孔隙度,有利于养分积累^[23]。

在0~20 cm土层中,3种种植模式 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、有机磷含量之间两两呈现明显的线性相关关系,有机种植模式下磷形态之间的相关性更强,说明有机种植模式促进了土壤无机磷之间、有机磷与无机磷之间的转化过程。因有机肥中大部分磷都是有机磷,所以有机磷的水解程度直接关系到有机肥的利用效率,Criquet和Braud^[24]指出,有机肥中的有机磷需在水解酶的作用下才能水解为无机磷供作物吸收。其中,磷酸酶是土壤中广泛存在的一种水解酶,能够催化磷酸酯和磷酸酐的水解反应,促进土壤有机磷的矿化。孟娜等^[25]通过微区桶试验研究了施用磷肥和有机肥对土壤中有机磷、磷酸酶活性的影响,结果表明施用有机肥能够显著增加土壤中有机磷的含量、提高磷酸酶的活性,而有机磷含量与磷酸酶活性有显著的正相关关系,施用有机肥能够促进磷酸酶对有机磷的水解作用,使有机磷向无机磷转化。

4 结论

种植模式及施肥年限对温室蔬菜种植土壤各形态无机磷含量均有显著影响,且交互作用均显著。随着施肥时间延长,3种种植模式土壤有机磷含量及无机磷形态 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 含量显著升高, Al-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量呈现不规则变动,差异较小;有机种植模式有机磷含量及无机磷形态 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 含量显著高于常规和综合种植模式, O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 略小于常规和综合种植模式, Fe-P 含量没有显著性差异。整体来看,各磷素占比:中等活性磷源($\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 Al-P)>潜在磷源(O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)>有效磷源

(Ca₂-P)。表层土中有机磷占全磷的 8%~23%，亚表层土中有机磷占全磷的 6%~13%。有机种植模式促进了土壤无机磷之间、有机磷与无机磷之间的转化过程，且 0~20 cm 土层的磷素转化比 20~40 cm 更活跃。

参考文献：

- [1] 张真和. 中国设施蔬菜产业的贡献与发展趋势[J]. 农业工程技术, 2017(28):16~18.
- [2] 国家认证认可监督管理委员会, 中国农业大学. 中国有机产业与有机产品认证发展(2015) [M]. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2016: 132.
- [3] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [4] 王辉, 董元华, 李德成. 不同种植年限大棚蔬菜地土壤养分状况研究[J]. 土壤, 2005, 37(4): 460~462.
- [5] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(3): 58~66.
- [6] Kruse J. M, Abraham W, Amelung C, et al. Innovative methods in soil phosphorus research: A review[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 178(1): 43~88.
- [7] Pierzynski G M, McDowell R W, Sims J T. Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils[C]//Sims J T, Sharpley A N. Phosphorus: Agriculture and the Environment. Madison, WI: ASA, CSSA, and SSA, 2005: 53~86.
- [8] 张朴, 李仁英, 吴洪生, 等. 水稻秸秆生物质炭对土壤磷吸附影响的研究[J]. 土壤, 2018, 50(2): 264~269.
- [9] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1471~1485.
- [10] 王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1240~1250.
- [11] 严正娟. 施用粪肥对土壤磷素形态和移动性的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [12] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 不同用量有机肥对陇东旱塬黑垆土磷素形态转化及有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(2): 32~38.
- [13] 廖文华, 刘建玲, 黄欣欣, 等. 潮褐土上蔬菜产量和土壤各形态磷变化对长期过量施磷的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 894~903.
- [14] 薛巧云. 农艺措施和环境条件对土壤磷素转化和淋失的影响及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [15] 王劲松, 焦晓燕, 王丽革, 等. 温室种植年限对山西石灰性土壤磷含量及无机磷形态的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(3): 203~207.
- [16] 杨艳菊, 王改兰, 张海鹏, 等. 长期施用不同肥料对栗褐土有机磷组分的影响[J]. 土壤, 2013, 45(3): 426~429.
- [17] Kumaragamage D, Flaten D, Akinremi O, et al. Impact of manure phosphorus fractions on phosphorus loss from manured soils after incubation[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41: 845~854.
- [18] Koopmans G W, Chardon R, McDowell J T. Phosphorus movement and speciation in a sandy soil profile after long-term animal manure applications[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, 36(1): 305~315.
- [19] Pavinato P S, Merlin A, Rosolem C A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105: 149~155.
- [20] 陆欣春, 邹文秀, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土磷和锌形态转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1536~1542.
- [21] 宋付朋. 长期施磷石灰性土壤无机磷形态特征及其有效性研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2006.
- [22] 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): 1434~1439.
- [23] 赵红, 袁培民, 吕贻忠, 等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 306~311.
- [24] Criquet S, Braud A. Effects of organic and mineral amendments on available P and phosphatase activities in a degraded Mediterranean soil under short-term incubation experiment[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98: 164~174.
- [25] 孟娜, 廖文华, 贾可, 等. 磷肥、有机肥对土壤有机磷及磷酸酶活性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(4): 57~59.