

温室土壤磷素迁移变化特征研究

张树金, 余海英, 李廷轩, 张锡洲

(四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014)

摘要:采用野外调查采样和室内分析相结合的方法,研究了典型温室栽培地区山东寿光土壤磷素状况及其迁移变化特征。结果表明:(1)除 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 外,温室土壤耕层(0~20 cm)全磷及无机磷组分含量均显著高于露地土壤,其平均含量分别为露地土壤的 2.9、3.7、5.6、4.1、3.4 倍和 6.1 倍,且以耕层累积为主,表现出明显的表聚特征,并有向下迁移的趋势;(2)在温室栽培的前期,磷素累积较快,连续种植了 4~8 a 时,全磷含量达到一个较高范围,为露地土壤的 2~4 倍,随着种植年限的继续增加,其再累积磷素的能力较差,甚至略有下降;(3) $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 O-P 是温室土壤磷素累积的主要形态,与露地土壤相比,其在 0~20 cm 耕层的平均增加量分别为 296.5、288.5、306.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;(4)温室土壤耕层水溶性磷和速效磷的平均含量为 10.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 248.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别为露地土壤的 8.7 倍和 5.4 倍,磷淋失并造成环境污染的可能性很大。

关键词:温室土壤;无机磷分级;全磷;速效磷;水溶性磷

中图分类号:X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1534-08

The Migration Characteristics of Phosphorus in Greenhouse Soils

ZHANG Shu-jin, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou

(College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: By investigating the management of greenhouses in Shouguang, Shandong Province and analyzing soil samples of both greenhouse and open field, the contents and fractions of phosphorus in soils were studied. The results indicated that: (1) In the topsoils (0~20 cm) of the greenhouses, the contents of total phosphorus and the fractions of inorganic phosphorus(except $\text{Ca}_{10}\text{-P}$) were 2.9 times, 3.7 times, 5.6 times, 4.1 times, 3.4 times and 6.1 times higher than that of the corresponding open field soils. And the maximum values were observed in the topsoil (0~20 cm), which displayed apparent accumulation in topsoils and tended to move downward further to the subsoil. (2) Phosphorus accumulated faster in the early stage of cultivation in the greenhouse soils. The content of the total phosphorus were 2~4-fold higher than that of the open field in greenhouses cultivated for 4 to 8 years. And the accumulation rate of phosphorus decreased as cultivating years pass by. (3) $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P , O-P were the major fractions of available phosphorus in greenhouse, with an increase of 296.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 288.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 306.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ over that of the open field soil. (4) The average contents of water soluble phosphorus and available phosphorus in greenhouse topsoils amounted to 10.93 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 248.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively, 8.7 times and 5.4 times higher than that of the open field soils. There was a great possibility of phosphorus leaching and environmental pollution.

Keywords: greenhouse soil; inorganic phosphorus fractionation; total phosphorus; available phosphorus; water soluble phosphorus

温室栽培条件下,种植户为了追求温室利用率及作物高产,常在棚室内进行连续种植,作物复种指数高且肥料投入量大,化肥和有机肥的年投入量远远高

于露地栽培,并超过作物的实际需要量,从而使得一些未被作物吸收利用的养分及肥料的副成分大量残留于土壤中,造成严重的资源浪费^[1]。其中,磷肥的投入过剩较普遍^[2]。由于施入土壤的化学磷肥极易被土壤吸附、固定,磷肥的当季利用率仅为 10%~25%,大量未利用的磷素长期或暂时滞留在温室土壤中,不仅造成了磷素资源的浪费,加剧了土壤次生盐渍化,同时也加大了淋洗损失所造成的污染风险^[3-4]。磷肥施入

收稿日期:2010-03-17

基金项目:四川省教育厅重点项目(2006A008);土壤与农业可持续发展国家重点实验室基金课题(055124)

作者简介:张树金(1986—),男,四川宜宾人,硕士研究生,主要从事土壤生态等方面的研究。E-mail:isabele@foxmail.com

通讯作者:李廷轩 E-mail:litinx@263.net

土壤后,大部分被吸附固定,转化成磷酸铁、铝和钙等矿物态磷^[5]。研究磷素在土壤中的形态和转化过程,及其对速效磷和水溶性磷的贡献可较好地反映土壤磷素状况,且有助于合理施用磷肥,提高磷肥肥效,减小环境危害等理论的建立^[6]。因此,本文以中国温室蔬菜生产基地——山东省寿光具有代表性的温室为研究对象,研究磷素迁移变化的规律,以期为温室农业生产中合理施用磷肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验选取山东省寿光市具有代表性的洛城镇、文家镇和孙集镇的日光温室土壤及相邻的露地土壤进

行调查研究,供试日光温室及相邻露地土壤的成土母质和地下水位等自然成土条件相同。寿光洛城镇、文家镇、孙集镇的温室蔬菜种植分别以黄瓜-丝瓜或辣椒-茄子、西红柿-茄子、黄瓜-苦瓜的连年轮作为主。每个温室的化肥和有机肥的年施用量分别可高达 11.5~28.1 t·hm⁻² 和 153.9~240.0 t·hm⁻²,以施用复合肥、磷酸氢二铵、过磷酸钙、硫酸钾为主,有机肥来源为当地饲养场的新鲜畜禽粪便。相邻露地为蔬菜的常规种植,化肥和有机肥的年施用量分别为 0.75~1.50 t·hm⁻² 和 0~0.15 t·hm⁻²,化肥主要以施用复合肥、尿素为主(详见表 1)。

1.2 采样方法

在各研究区按以下两种方式进行采样处理:(1)

表 1 山东寿光温室栽培施肥情况调查表
Table 1 Fertilization level of greenhouse system in Shouguang, Shangdong Province

温室栽培地点	编号(种植年限/a)	面积/m ²	作物及产量/kg·hm ⁻²	有机肥		化肥	
				种类	用量/t·a ⁻¹	种类	用量/kg·a ⁻¹
洛城镇	S1(2)	650	黄瓜 5 000、丝瓜 7 500	猪粪、鸡粪、鸭粪	15	复合肥	950
	S2(2)	650	黄瓜 5 000、丝瓜 7 500	猪粪、鸡粪、鸭粪	15	复合肥	950
	S3(4)	630	辣椒 3 000、丝瓜 7 500、茄子 7 500	猪粪、鸡粪、鸭粪	14	复合肥	950
	S4(4)	650	甜瓜 2 500、茄子 7 500、辣椒 2 500	猪粪、鸡粪	13	复合肥	950
	S5(8)	530	辣椒 10 000	猪粪、鸡粪	10	复合肥	850
文家镇	S6(8)	480	番茄 7 000、西葫芦 7 000	鸡粪	9	磷酸二铵	50
	S7(2)	325	番茄 7 500	猪粪、麦秆	3	复合肥	1 000
						磷酸二铵	35
						硫酸钾	75
						过磷酸钙	150
						氨基酸	700
	S8(2)	680	番茄 12 500、茄子 7 000	猪粪、麦秆	4	磷酸二铵	50
						硫酸钾	100
						过磷酸钙	200
						氨基酸	1 000
						复合肥	850
孙集镇	S9(4)	500	番茄 12 500、茄子 13 000	猪粪、鸡粪	7	复合肥	850
	S10(4)	500	番茄 12 500、茄子 15 000	猪粪、鸡粪	7	复合肥	850
	S11(7)	560	番茄 5 000、油豆 2 000	猪粪、鸡粪	12	复合肥	1 150
	S12(13)	600	番茄 7 500	猪粪	2	复合肥	300
	S13(2)	500	黄瓜 5 000、苦瓜 5 000	鸡粪	12	磷酸二铵	100
						复合肥	900
						磷酸二铵	300
	S14(3)	320	黄瓜 2 000、苦瓜 2 500	鸡粪	7	复合肥	600
	S15(4)	640	黄瓜 7 500、苦瓜 7 500	鸡粪	10	复合肥	1 150
	S16(4)	500	黄瓜 6 000、苦瓜 6 000、番茄 2 500	鸡粪	12	复合肥	750
	S17(8)	390	黄瓜 5 000、苦瓜 2 500	鸡粪、鸭粪	9	复合肥	400
	S18(9)	390	西葫芦 2 000	鸡粪	6	磷酸二铵	50
						碳铵	150
			豆角 1 750、辣椒 1 750			复合肥	300

不同种植年限(2、4、8 a 和 13 a 等)的温室土壤及相邻的露地土壤,取耕层(0~20 cm)土样;(2)当地最长种植年限的温室土壤及其相邻的露地土壤,按 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 分层采样。温室土样的采集均按“之”字形布点,单个温室内取一个混合耕层土样,剖面土样为单个温室内取多个剖面(5~7 个)按土层分别混合所得。采样的同时走访农户调查各采样点的施肥及栽培管理情况。

1.3 测定项目及方法

将所采土样置于阴凉处自然风干,磨细过筛。无机磷分级采用蒋柏藩-顾益初法^[7];全磷、速效磷和 pH 均用常规分析方法;土壤无机磷总量为各无机磷形态含量之总和;有机磷为全磷与无机磷总和之差;水溶性磷采用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$ 浸提(土水比 1:10),钼锑抗比色法^[8]。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 和 DPS 11.0 对数据进行统计分析,LSD 进行显著性分析。

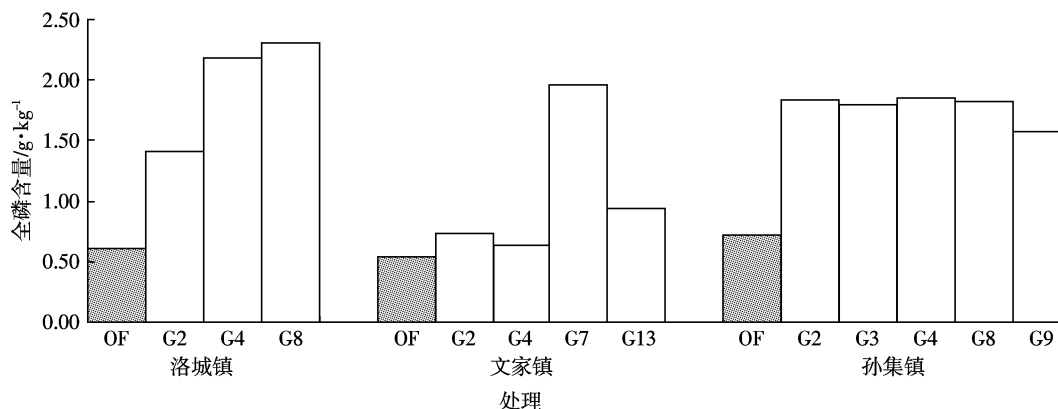
2 结果与分析

2.1 温室土壤全磷含量的变化特点

温室土壤耕层(0~20 cm)磷素以无机磷为主,占全磷含量的 84.1%~94.5%,平均为 90.6%,较露地土壤提高了 6.3%。从图 1 可以看出,研究区 3 个镇露地土壤耕层全磷含量水平基本一致,处于相对较低的水平,其原因主要是当地的土壤类型、栽培管理基本一致。温室栽培后,土壤全磷含量较露地土壤有明显增高,但其累积量却因温室种植年限的不同而有较大的差异,表现出含量高且变化幅度大的特点。在温室栽培的前期,磷素累积较快,连续使用了 4~8 a 时,

全磷含量达到一个较高范围,为露地土壤的 2~4 倍。随着种植年限的继续增加,其再累积磷素的能力较差,甚至略有下降。随着温室栽培年限的增加,洛城镇全磷含量呈逐年增加且增幅减小的趋势,并在种植的第 8 a 达到最高。虽然洛城镇温室土壤化肥施入量基本保持一致(见表 1),有机肥施入量略有降低,但施入土壤中的磷肥当季利用率低,易在土壤中累积,且其累积能力有降低的趋势。文家镇全磷含量总体上也呈现出逐年增加的趋势,只是种植的第 4 a 增加不明显,在种植的第 7 a 达到最高,而在种植的第 13 a 又有显著的降低。文家镇种植了 7 a 的温室土壤全磷含量很高,主要是化肥及有机肥施入量高所致;而在种植的第 13 a 全磷含量相对较低,主要是因为其施肥量明显低于其他种植年限,但仍高于种植了 2 a 和 4 a 的温室土壤,主要是因为其种植年限较长,磷素在土壤中已有一定的累积。孙集镇从种植的第 2 a 就增加到一个较高的全磷范围,其后几乎没有多大的变化,直到连续种植的第 9 a 全磷含量才有所降低。这可能是由于每年施入的磷素含量与作物吸收带走的磷素之间保持相对平衡,使得全磷含量变化不大。而在种植的第 9 a,其施肥量明显低于其他种植年限,故全磷含量略有下降。

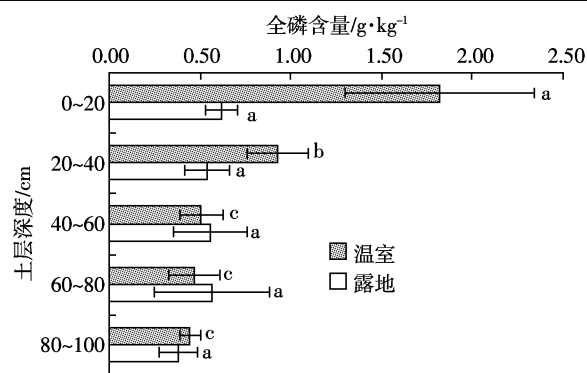
从图 2 可知,研究区温室土壤耕层全磷平均含量为 $1.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($CV=29\%$),露地土壤平均仅为 $0.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($CV=9\%$),前者是后者的 2.9 倍。20~40 cm 土层全磷含量也明显高于露地土壤,40 cm 以下各土层无明显差异。温室土壤磷素以耕层累积为主,表现出明显的表聚特征。尽管温室土壤中磷素的移动性很小,但由于长期大量施用磷肥和土壤翻耕等,土壤磷素仍会不同程度地向下移动。



OF:露地;G2、G3、G4、G7、G8、G9、G13:分别表示使用年限为 2、3、4、7、8、9、13 a 的日光温室。

图 1 温室土壤耕层(0~20 cm)全磷含量年限变化特征

Figure 1 Contents of total phosphorus in the topsoil(0~20 cm) of greenhouse in different cultivated years



同一土壤类型后小写字母相同表示未达5%的差异显著水平。下同。

图2 温室土壤全磷的剖面分布情况

Figure 2 Spatial variation of total phosphorus in greenhouse soils

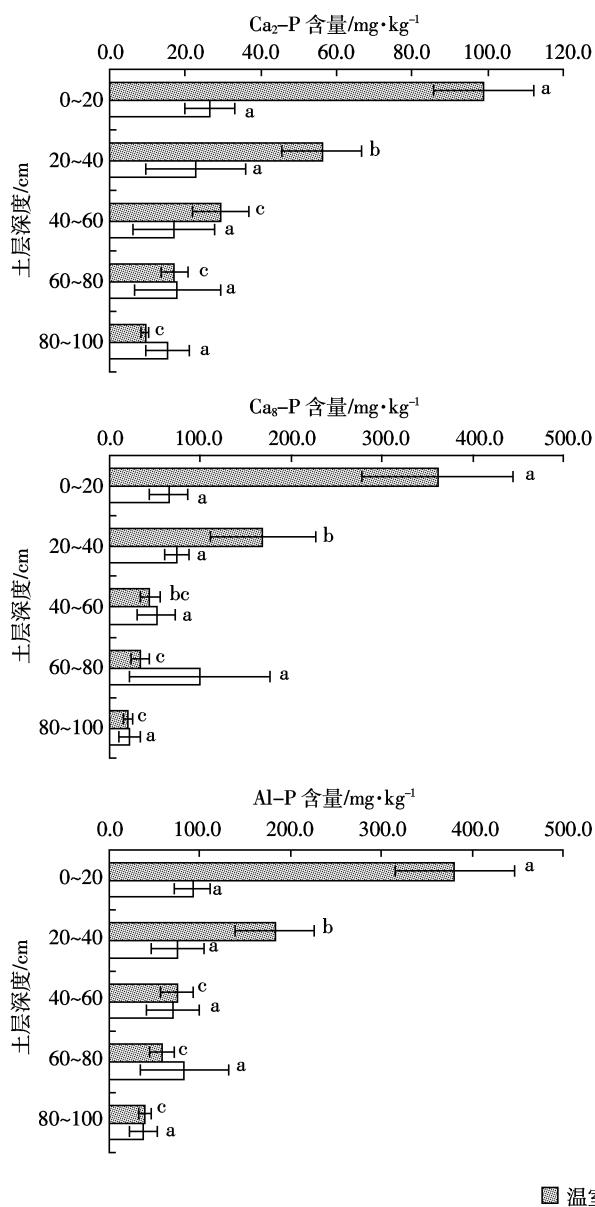


图3 温室土壤无机磷组分的剖面分布情况

Figure 3 Spatial variation of inorganic phosphorus fractions in greenhouse soils

2.2 温室土壤无机磷组分的剖面变化特点

分析表明(图3),露地土壤各无机磷组分的含量较低,在0~100 cm内各土层间均无显著性差异。除Ca₁₀-P外,温室土壤各无机磷组分含量与全磷含量的变化趋势相似,在0~20 cm耕层均较露地土壤显著增加,20~40 cm土层也明显增加,40 cm以下各土层又无明显变化。

温室栽培后,土壤耕层Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P和O-P的含量均有显著的增加(图3),平均含量分别是98.9 (CV=33%)、361.5 (CV=56%)、380.8 (CV=42%)、119.31 mg·kg⁻¹ (CV=28%)和366.6 mg·kg⁻¹ (CV=41%),为露地土壤的3.7、5.6、4.1、3.4倍和6.1

倍。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 仅占温室土壤耕层无机磷总量的 7.7%, 是含量最低的无机磷组分; Al-P 为含量最高的无机磷组分, 占到无机磷总量的 25.1%, 比 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 分别高出 17.4%、5.1%、15.6%、7.1% 和 5.4%。露地土壤耕层 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量在 203.2~295.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 242.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($CV=11\%$)。温室栽培后, 土壤耕层 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量平均增加了 83.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 达到 326.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($CV=24\%$), 但与露地差异不显著, 未表现出明显的累积现象。温室土壤耕层 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量占无机磷总量的比例仅为 19.7%, 由于温室土壤无机磷累积量大, 而以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的形式累积较少, 因而露地土壤 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 所占无机磷总量的比例较温室土壤高, 达到 46.7%。

2.3 温室土壤耕层无机磷组分的年限变化特点

由表 2 分析可知, 不同种植年限温室土壤耕层无机磷组分与露地相比均有明显变化, 但在不同种植年限间有一定的差异。山东寿光 3 个镇调查结果得出, 磷素主要以 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 O-P 的形式累积在土壤中, 平均增加量分别为 296.5、288.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 306.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。洛城镇连续种植了 2 a 的温室土壤中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量最高, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 含量在种植的第 4 a 达到最大值, 而 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 O-P 则是在种植第 8 a 时达到最大值, 分别是露地土壤的 12.7 倍和 7.1 倍。文家镇温室土壤各无机磷组分含量均在种植的第 7 a 达

到最大值。孙集镇连续种植了 2 a 的温室土壤其 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Fe-P 含量达最大值, Al-P 、 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 则分别在种植的第 3 a、8 a、9 a 时达到最大值。

研究区 3 个镇无机磷组分在栽培年限间的变化幅度大且无明显迁移变化规律, 体现了人为因素(栽培管理方式、肥料种类及其施用量)对温室土壤磷素累积的强烈作用(见表 1)。部分研究区以过磷酸钙的形式施入土壤, 不可避免地增加了土壤中的 Ca-P 含量, 所以从人为因素的角度解释各无机磷组分的变化符合温室栽培的实际情况。因此, 应进一步深入研究温室土壤的磷素迁移变化规律, 指导种植户合理施用磷肥, 以避免资源浪费及环境污染。随着温室栽培年限的增加, 3 个镇 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的含量均较露地明显增加, 但其相对百分比却随种植年限的增加而呈下降的趋势, 表明 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 不易在土壤累积。 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 O-P 的相对百分比稳定, 但在不同地区表现出一定的差异。 Al-P 和 Fe-P 也有相似的变化趋势。温室土壤 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的增加明显滞后于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 。这可能与 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的溶解性及对作物的有效性较低, 在土壤中形成与转化的进程较慢有关。

3 讨论

据实地调查, 温室磷素的年投入量为 3 656 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中 2 184 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 由化肥带入。每年磷素在土

表 2 温室土壤耕层(0~20 cm)无机磷组分的年限变化特征

Table 2 The change characteristic of inorganic phosphorus fractions in the topsoil (0~20 cm) of greenhouse

地点	年限	无机磷组分/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
		$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$
洛城镇	OF	17.2(2.8)	47.7(7.9)	70.3(11.6)	25.3(4.2)	71.5(11.8)	295.6(49.0)
	G2	91.4(6.5)	319.9(22.8)	283.7(20.2)	47.4(3.4)	120.1(8.5)	425.5(30.3)
	G4	102.4(4.7)	583.3(26.7)	496.6(22.7)	98.1(4.5)	450.3(20.6)	320.1(14.7)
	G8	96.3(4.2)	605.9(26.2)	367.7(15.9)	88.5(3.8)	506.4(21.9)	403.4(17.5)
文家镇	OF	23.1(4.3)	40.5(7.5)	75.0(14.0)	42.1(7.8)	64.4(12.0)	203.1(37.8)
	G2	77.8(10.7)	106.0(14.6)	158.3(21.8)	83.0(11.4)	76.2(10.5)	125.7(17.3)
	G4	56.2(8.8)	57.8(9.0)	161.6(25.2)	89.2(13.9)	67.9(10.6)	113.6(17.7)
	G7	138.1(7.1)	297.6(15.2)	631.0(32.2)	162.6(8.3)	258.3(13.2)	306.1(15.6)
	G13	73.5(7.9)	134.8(14.4)	149.0(15.9)	109.5(11.7)	164.4(17.6)	217.0(23.2)
孙集镇	OF	39.5(5.5)	107.0(14.9)	131.5(18.3)	36.9(5.2)	45.7(6.4)	228.0(31.8)
	G2	178.6(9.7)	339.7(18.4)	417.0(22.6)	233.7(12.7)	330.8(17.9)	167.8(9.1)
	G3	128.3(7.1)	263.9(14.7)	559.7(31.1)	146.8(8.2)	340.7(18.9)	259.6(14.4)
	G4	119.0(6.4)	331.2(17.9)	474.6(25.6)	204.2(11.0)	353.7(19.1)	225.6(12.2)
	G8	113.6(6.2)	296.7(16.3)	417.7(23.0)	139.5(7.7)	437.6(24.1)	266.0(14.6)
	G9	75.8(4.8)	228.0(14.5)	351.9(22.4)	127.2(8.1)	326.5(20.8)	360.9(23.0)

注: 括号内数字表示相对百分比(%)=(无机磷组分/全磷)×100。

壤中均有大量盈余,平均盈余量为 $3\,401\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,最高可达 $4\,702\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,大量未被利用的磷素残留于土壤中。因其在土壤的迁移速度比较慢^[9],最终导致温室土壤 0~20 cm 耕层全磷含量极显著高于露地土壤,20~40 cm 土层全磷含量均明显高于露地土壤,40 cm 以下各土层无明显差异,表现出明显的表聚特征,并有向下迁移的趋势,与前人的研究结论相似^[10-11]。王新民等^[12]在对日光温室褐土的研究中指出,日光温室土壤磷素含量随种植年限的延长而增加,李粉茹等^[13]在设施菜地也得出了相同的研究结论。路超等^[14]研究指出,在设施种植的第 1 a 土壤全磷含量增加最多,随后土壤全磷含量继续增加,但每年的增加量呈降低的趋势;4~6 a 后随着种植年限的延长,设施土壤全磷含量略有降低,但仍保持较高的含量水平。本试验研究结果表明,在温室栽培的前期,磷素累积较快,连续使用了 4~8 a 时,土壤全磷达到一个较高范围,为露地土壤的 2~4 倍,随着种植年限的继续增加,其再累积磷素的能力较差,全磷含量甚至略有下降。这可能与土壤磷负荷、栽培管理方式等有关。土壤胶体吸持磷素的能力具有一定的限度,当其累积量超过其能够吸持的能力时,土壤胶体将很难继续累积磷素,多余的磷素将被灌溉水淋洗进入地下水或流出土体进入地表水,进而增加水体磷浓度,加速水体富营养化,其具体机理有待于进一步研究。温室栽培持续一段时间后,生产上便会普遍出现作物生长不良、病虫害严重等生产问题,从而导致作物减产甚至绝收。而种植户便会在生产上减少投入并采取一些相应的措施来减少损失,如揭棚、翻耕等,待土壤条件稍有改善,种植户又会继续加大投入,使得温室土壤全磷及无机磷组分均表现出一定的波动性。

刘建玲等^[10]在长期施用磷肥的蔬菜保护地研究表明,施入土壤的磷素主要以 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 的形式积累,且主要在 0~20 cm 土层累积。路超等^[14]研究指出,设施土壤各无机磷组分的含量均明显增加,且 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的增加量为最高,其次是 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。本研究表明,在典型温室生产基地,土壤磷素主要以 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 O-P 的形式积累,而 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是含量最低的无机磷组分,与前人的研究有所不同。施入土壤的水溶性磷随着释放量的增加很快被 CaCO_3 吸附,转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$,利于其积累。但 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是作物的有效磷源,在温室栽培高复种高利用的生产状态下,易被作物吸收和利用,因而其累积量相对较小,并最终导致温室土壤磷肥利用率偏低,造成资源浪费和环

境污染。

试验结果表明, Al-P 是温室土壤耕层含量最高的无机磷组分,而 Fe-P 含量较露地土壤也有极显著的增加。这可能与温室土壤发生了一定程度的酸化有关。已有研究表明^[15],温室土壤的耕层酸化现象明显。本研究得出,孙集镇温室土壤耕层 pH 较露地土壤均明显降低,洛城镇也有一定程度的降低,而文家镇露地土壤耕层 pH 比温室土壤还低,其原因有待于进一步的研究。土壤酸化引起土壤 pH 下降,原有的碳酸盐及铁铝矿物发生强烈分解,形成活性铁、铝,固定并限制施入的肥料磷迁移^[16-17],使 Al-P 和 Fe-P 在温室土壤中增加显著。经相关分析得出(表 3),温室土壤耕层仅 Al-P 和 Fe-P 与 pH 呈现出显著的负相关关系,其相关系数分别为 $-0.535\,2^*$ 、 $-0.752\,5^{**}$ 。土壤 pH 下降使该研究区以中性土居多,而 Al-P 含量相对较高,与土壤的一般规律一致。温室栽培长期处于高集约化、高复种指数和高肥料施用量的生产状态下,加速了土壤的风化过程,而 O-P 的含量与土壤风化强度呈正相关。因此,施入土壤的水溶性磷肥易转化为有效性相对较低的 O-P (潜在磷源),使其在土壤中累积量较大。温室土壤 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量与露地土壤在整个剖面层次均无显著性差异,未表现出明显的耕层累积现象。表明 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 是土壤中不易形成与转化的相对稳定的无机磷组分,它的含量高低可能与土壤的母质类型、风化成土过程等有关,其具体机理有待于进一步研究^[18]。

土壤速效磷与某磷组分相关性愈大,该磷组分的速效性愈大,其相对有效性也愈高。并可据此推断土壤速效磷测定中浸出的主要磷组分^[19]。本试验分析得出,山东寿光温室土壤耕层速效磷含量为 $248.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($CV=31\%$),是露地土壤的 5.4 倍,大大超过了作物的需求量,磷素淋失的可能性大,应予以高度的重视。除 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 外,温室土壤各无机磷组分及有机磷与速效磷之间均存在极显著的相关关系。通径分析得出,温室土壤磷组分对速效磷的综合贡献的大小,即它们对速效磷的相对重要性依次为(括号内为通径系数): $\text{Ca}_2\text{-P}(0.608\,2) > \text{Al-P}(0.362\,8) > \text{Ca}_8\text{-P}(-0.200\,1) > \text{O-P}(0.173\,8) > \text{Fe-P}(0.017\,6) > \text{Ca}_{10}\text{-P}(0.016\,5) > \text{有机磷}(0.002\,2)$ 。因此,在温室土壤中,无机磷对速效磷的重要性比有机磷大,而在无机磷组分中则以 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Al-P 为速效磷的主要磷源,被作物吸收利用的程度较高。吕家珑等^[19]在 23 a 肥料定位试验研究中得出, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为速效磷的主要磷源,与本研究有

所不同。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是对作物最有效的磷源,因而它对速效磷的综合贡献最大,相关性也比较好。 Al-P 虽为潜在的缓效磷源,但在温室栽培条件下,其积累量大,占无机磷总量的 25.1%,因而也是温室土壤速效磷的主要磷源。 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 与速效磷存在极显著的正相关关系,但其通径系数却为负值(-0.200 1)。这可能是由于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Al-P 有一个较大的通径系数所致。

已有研究表明^[20], $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$ 提取的磷浓度与土壤渗出水中的磷浓度存在显著的正相关性,是易于随水淋失到底层的磷形态,故可用作表征土壤中溶于水里的磷浓度。张英鹏等^[21]研究指出,水溶性磷的淋失量随供磷水平的提高而增加,且与速效磷之间存在明显的正相关关系。本试验分析得出,速效磷与水溶性磷之间存在极显著的正相关 ($y=0.092 \ 6x-12.086, R^2=0.701^{**}, n=18$)。温室栽培后,土壤耕层水溶性磷含量表现出含量高,且变化幅度大的特点,平均含量达到 $10.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($CV=79\%$),是露地土壤的 8.7 倍(表 3)。因此,温室土壤磷淋溶损失的可能性大,具有潜在的环境风险,应作深入研究。研究水溶性磷与各无机磷组分的相关性,能进一步揭示土壤中磷

的有效性及其潜在的环境风险。相关性分析得出,温室土壤耕层仅 Al-P 和 Fe-P 与水溶性磷相关性达到显著或极显著水平,相关系数分别为 $0.600 \ 9^{**}$ 和 $0.566 \ 1^*$,且其通径系数也较其他磷组分高。因此,温室土壤水溶性磷的增加主要是 Al-P 和 Fe-P 的增加所致,其机理仍有待于进一步的研究。

4 结论

(1)除 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 外,温室土壤全磷及各无机磷组分在剖面层次上均以 0~20 cm 耕层累积为主,显著高于露地土壤,并表现出明显的表聚特征。在温室栽培的前期,磷素累积较快,连续种植了 4~8 a 时,全磷含量达到一个较高范围,为露地土壤的 2~4 倍,随着种植年限的增加,其继续累积磷素的能力较差,全磷含量甚至略有下降。

(2)在典型温室生产基地,施入土壤的磷肥主要以缓效态或迟效态的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 O-P 的形式积累,而速效态 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是含量最低的无机磷组分,仅占无机磷总量的 7.7%,这是造成温室土壤磷肥利用率偏低的主要原因之一。因此,在温室生产中要注意磷肥的后效,少施磷肥以避免资源浪费及环境污染。

(3) $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Al-P 是温室土壤速效磷的主要磷源,而水溶性磷的增加主要是 Al-P 和 Fe-P 的增加所致。温室土壤耕层水溶性磷和速效磷的含量为 $10.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $248.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别为露地土壤的 8.7 倍和 5.4 倍,磷淋失并造成环境污染的可能性很大,应予以高度的重视。

参考文献:

- [1] 余海英, 李廷轩, 周健民. 设施土壤盐分的累积、迁移及离子组成变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 642-650.
YU Hai-ying, LI Ting-xuan, ZHOU Jian-min. Salt accumulation, translocation and ion composition in greenhouse soil profiles [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 642-650.
- [2] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 514-522.
YU Hai-ying, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. *Science Agricultura Sinica*, 2010, 43(3): 514-522.
- [3] McDowell R, Sharpley A, Withers P. Indicator to the movement of phosphorus from soil to subsurface flow[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31: 217-227.
- [4] Yi Liu, Jining Chen, Arthur P J Mol, et al. Comparative analysis of phosphorus use within national and local economies in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51: 454-474.

表 3 温室土壤耕层(0~20 cm)水溶性磷、速效磷和 pH 值

Table 3 Contents of water soluble phosphorus, available phosphorus and pH in the topsoil(0~20 cm)of greenhouse

温室栽培地点	编号	水溶性磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH
洛城镇	OF	0.4	33.1	7.67
	S1	5.2	152.4	7.12
	S2	7.7	224.5	7.48
	S3	10.7	285.6	7.24
	S4	7.8	258.2	7.44
	S5	2.6	135.4	7.50
	S6	5.6	305.0	7.60
文家镇	OF	0.3	33.3	6.51
	S7	2.6	197.9	7.52
	S8	8.7	247.4	7.43
	S9	3.1	144.1	7.20
	S10	2.0	139.5	7.31
	S11	22.2	377.1	5.81
	S12	3.0	185.4	7.36
孙集镇	OF	3.1	71.6	7.37
	S13	14.6	308.3	6.24
	S14	8.1	217.1	6.44
	S15	25.8	331.5	6.23
	S16	16.6	283.2	5.92
	S17	22.0	363.4	6.52
	S18	28.4	314.9	5.71

- [5] Tara S Gahoonia, Farouq Asmar, Henriette Giese, et al. Root-released organic acids and phosphorus uptake of two barley cultivars in laboratory and field experiment[J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 12: 281-289.
- [6] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- LU Ru-kun. Principle and apply fertilizer of soil-plant nutrition[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998.
- [7] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2): 101-102, 110.
- GU Yi-chu, JIANG Bo-fan. Methods of determination of inorganic phosphorus fractionation in calcareous soil[J]. *Soils*, 1990, 22(2): 101-103, 110.
- [8] 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.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [9] 杜振宇, 周健民. 磷在红壤肥力微域中的迁移和转化[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 1-4, 41.
- DU Zhen-yu, ZHOU Jian-min. Movement and transformation of phosphorus in fertilizer microsites in red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 1-4, 41.
- [10] 刘建玲, 张福锁, 杨奋翮. 北方耕地和蔬菜保护地土壤磷状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 179-186.
- LIU Jian-ling, ZHANG Fu-suo, YANG Fen-he. Fractions of phosphorus in cultivated and vegetable soils in northern China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(2): 179-186.
- [11] 路超, 李絮花, 李润, 等. 设施栽培土壤磷素肥力特征 [J]. 山东农业科学, 2006(2): 61-63, 67.
- LU Chao, LI Xu-hua, LI Run, et al. Characteristics of phosphorus in greenhouse soils[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2006(2): 61-63, 67.
- [12] 王新民, 侯彦林. 日光温室土壤磷素形态及其空间分布特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 72-75.
- WANG Xin-min, HOU Yan-lin. Phosphorus fractions and its vertical distribution in a soil of vegetable field under solar greenhouse in suburb of anyang city[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(1): 72-75.
- [13] 李粉茹, 于群英, 邹长明. 设施菜地土壤 pH 值、酶活性和氮磷养分含量的变化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 217-222.
- LI Fen-ru, YU Qun-ying, ZOU Chang-ming. Variations of pH value, enzyme activity and nitrogen phosphorus content in protected vegetable soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(1): 217-222.
- [14] 路超. 设施土壤磷素形态、转化及其生物有效性的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- LU Chao. The Forms, transformation and availability of phosphorus in sheltered cultivation soil[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2006.
- [15] 余海英, 李廷轩, 周健民. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 571-576.
- YU Hai-ying, LI Ting-xuan, ZHOU Jian-min. Salt in typical greenhouse soil profiles and its potential environmental effects[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4): 571-576.
- [16] 金亮, 周健民, 王火焰, 等. 石灰性土壤肥力磷酸一铵的转化及其机制探讨[J]. 中国土壤与肥料, 2008(6): 6-10.
- JIN Liang, ZHOU Jian-min, WANG Huo-yan, et al. Transformation and translocation of fertilizer-P with monoammonium phosphate application in fertilosphere in calcareous soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(6): 6-10.
- [17] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 385-388.
- XU Ren-kou, Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5): 385-388.
- [18] 顾益初, 钦绳武. 长期施用磷肥条件下潮土中磷素的积累、形态转化和有效性[J]. 土壤, 1997, 29(1): 13-17.
- GU Yi-chu, QIN Sheng-wu. Accumulation, form translation and availability of moisture soil in long-term use of phosphate fertilizer[J]. *Soils*, 1997, 29(1): 13-17.
- [19] 吕家珑, 张一平, 陶国树, 等. 23 年肥料定位试验 0~100 cm 土壤剖面中各形态磷之间的关系研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 47-49.
- LV Jia-long, ZHANG Yi-ping, TAO Guo-shu, et al. Relationship among phosphorus forms in 0~100 cm soil profiles after 23 year application of fertilizer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 47-49.
- [20] McDowell R, Sharpley A, Brookes P, et al. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution[J]. *Soil Science*, 2001, 166(2): 137-149.
- [21] 张英鹏, 李彦, 聂培芸, 等. 山东省典型褐土的磷淋溶特征及风险评价[J]. 中国农学通报, 2007, 23(11): 219-223.
- ZHANG Ying-peng, LI Yan, NIE Pei-hui, et al. Phosphorus leaching character of cinnamon soil of Shandong Province and its risk evaluation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(11): 219-223.