

种植年限对设施菜田土壤剖面磷素累积特征的影响

张经纬¹, 曹文超¹, 严正娟², 陈清², 李俊良^{1*}

(1.青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:以山东寿光集约化设施菜田为研究对象,分析了不同种植年限设施菜田土壤磷素投入和土壤磷素累积的差异,比较不同种植年限土壤剖面中无机磷、有机磷、Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的变化特征。结果表明:磷素过量积累是设施菜田的显著特征,主要由于有机肥以粪肥投入为主,复合肥中 P 素比例偏高,收获作物带走量仅占磷素投入的 7.2%;随着种植年限增加,P 素累积现象明显,过量的磷素盈余导致了土壤剖面中不同形态磷含量的上升,其中以无机磷尤其明显;用来表征土壤有效磷指标的 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 有显著的相关性,研究区域中当土壤(Olsen-P)达到 $80.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 开始显著升高,增大了设施菜田磷素淋溶风险。

关键词:设施菜田;全磷;Olsen-P; $\text{CaCl}_2\text{-P}$;种植年限;磷淋溶拐点

中图分类号:S158 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)05-0977-07

Effects of Cropping Years on the Characteristics of Phosphorus Accumulation in Soil Profiles Under Green-house Vegetable Production

ZHANG Jing-wei¹, CAO Wen-chao¹, YAN Zheng-juan², CHEN Qing², LI Jun-liang^{1*}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Based on the collective data from field surveys in intensive vegetable greenhouses in Shouguang, Shandong, the study was aimed to investigate the differences of phosphorus(P) input and soil P accumulation in greenhouse production with different cropping years, and compare the variation in the contents of total P(TP), organic P, inorganic P, Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ in soil profile. The results showed excessive P accumulation was the typical characteristics in greenhouse field due to the use of animal manure and compound fertilizers with high P content and the removal of very P amount by vegetables, only accounted for 7.2% of total P input. Planting age increased the extent of P accumulation in greenhouse, and P surplus increased the concentrations of soil P in different forms, especially inorganic P, in soil profile. A positive correlation was significantly evident between the contents of Olsen-P, which indicated soil available P supply, and $\text{CaCl}_2\text{-P}$, which was regarded as the index of P runoff; In the surveyed region soil $\text{CaCl}_2\text{-P}$ level significantly increased while soil Olsen-P content increased up to $80.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in soil, which rapidly accelerated the high risk of P loss to environment.

Keywords: greenhouse vegetable; total P; Olsen-P; $\text{CaCl}_2\text{-P}$; planting years; P leaching point

目前设施蔬菜生产中,肥料过量投入和盲目灌溉等问题普遍存在^[1-3],磷素投入过剩问题尤为突出。在山东寿光调查发现,集约化设施菜田磷投入量达到 $2\,022 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$,其中化学磷肥投入量为 $1\,376 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot$

hm^{-2} ,来自有机肥的磷为 $647 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[4],远远超过作物对磷的吸收,P肥当季利用率普遍较低,仅为 10%~25%^[5]。与大田作物相比,大多数蔬菜根系分布浅、根长密度低,需要维持较高的土壤磷供应浓度^[6],但是蔬菜对氮、钾的需求高于磷,长期高量施入有机肥和高磷含量复合肥必然导致磷素的大量盈余。已有研究表明,北京郊区设施菜田磷素每季盈余在 $201\sim 795 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间^[7],山东一些设施菜田每年磷盈余达到 $1\,801 \text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[4]。过量的磷素盈余导致了磷

收稿日期:2011-11-25

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201103003);现代农业产业技术体系北京市果类蔬菜创新团队项目

作者简介:张经纬,在读研究生,主要从事蔬菜养分管理研究。

E-mail:baozhaigo@163.com

* 通信作者:李俊良 E-mail:jlli1962@163.com

素在土壤中大量累积,不仅会影响磷素的形态,也带来很大的环境风险。在种植年限为8 a以上的设施菜地表层土壤中 Olsen-P 达到 $253 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与大田土壤相比,设施土壤磷素主要以作物的速效磷源 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 及缓效磷源 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 积累,而 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 等相对稳定的磷源积累缓慢^[9]。磷素通常被认为在土壤中不容易移动,但在最近10 a已有报道指出,当磷素超过饱和吸附点时易产生磷素淋洗,且过量磷肥投入和不合理的灌溉方式,极大地增加了磷素的淋失风险^[10-11]。磷素淋洗主要以 CaCl_2 浸提的磷为测定指标,许多研究表明,当土壤 Olsen-P 超过某一临界值(磷淋溶拐点),土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 开始迅速增加^[12-15], $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 相关突变点可作为土壤磷的淋失风险预测^[5,16-18]。

目前设施蔬菜养分管理中氮素投入和累计已有深入研究,但对磷的环境问题也不容忽视。本文通过对山东省寿光市不同年限设施菜地进行调查取样、磷投入分析并对土壤中不同磷素形态进行比较研究,阐明磷素投入对土壤不同形态磷素积累作用,并估算出土壤磷的淋洗拐点,为设施蔬菜磷肥合理的施用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 施肥调查和土壤采集方法

调查区域:山东省寿光市集约化设施蔬菜种植区域,主要包括寿光市中南部13个乡镇,土壤类型主要为褐土和潮褐土,寿光市土地面积为 $2\,180 \text{ km}^2$,2008年寿光市耕地面积为 $94\,000 \text{ hm}^2$,蔬菜种植面积为 $60\,000 \text{ hm}^2$ 。

调查方法:调查采用问卷形式,调查的主要内容包农户信息、地块基本农事管理信息、种植制度、养分投入概况、灌溉量、农作物产量及效益等。调查地点的选择是根据不同乡镇优势蔬菜(辣椒、番茄、茄子、黄瓜、芹菜、生菜、苦瓜)种植区域,根据不同种植年限,选取了不同棚龄(1~3 a,4~6 a,7~9 a,9 a以上)的13个设施温室,并以菜田附近的3个小麦田为对照,耕作方式为连作。

土样采集方法:随机抽取有代表性的温室大棚,每个样品按照S点取样方法5点取样,每个点分别在0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm各土层分别取样,混匀并妥善保存。每个样品鲜重为0.5~1.0 kg。

1.2 土壤样品处理及测定方法

土壤养分含量测定采用常规分析方法:pH值采用电位法(水土比5:1);有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;速效钾含量采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵浸提-火焰光度计测定;速效磷含量采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠浸提-钼蓝比色法(Olsen法);全磷含量采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消化-钼锑抗比色法测定; $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化钙溶液浸提(水土比为10:1,振荡1 h)-钼锑抗比色法测定;有机磷含量采用马弗炉灼烧,用 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 溶液浸提-钼锑抗比色法测定;全磷减去有机磷即为无机磷的含量。

土壤无机氮测定:将采集的新鲜土样迅速带回室内,过4 mm筛,称取12 g鲜土加入100 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl溶液浸提,振荡1 h,过滤后用流动分析仪(型号TRAACS2000)测定滤液中无机氮含量。同时采用烘干法测定土壤含水量。

1.3 磷养分平衡计算

分别整理调查农户养分管理数据,并用Excel整理汇总。作物带走养分参数参照高祥照的《肥料实用手册》及马文奇的《山东省作物施肥现状、问题与对策》。

磷素盈余=有机肥中磷+化肥中磷-作物带走磷

1.4 数据处理

数据处理采用Excel、SAS统计软件,磷淋溶拐点采用SigmaPlot的双线性模型进行分析模拟。

2 结果与分析

2.1 设施菜田磷素投入及盈余

大多数矿质土壤中农田磷素的收支平衡是决定土壤磷水平发展趋势的基本因素^[9]。调查结果显示(表1),寿光设施蔬菜生产中磷平均投入量为 $2\,174 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$,其中有机肥投入的磷量平均为 $874 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$,占到磷投入总量的40%,已经超过了磷素带走量,因此在土壤养分资源管理时,有机肥带入的养分含量不容忽视。磷投入量远远超出了作物需求量,为作物带走量的6~23倍,导致磷素大量盈余,年平均盈余高达 $1\,959 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$,为露天麦田盈余量的8倍。对于不同蔬菜而言,磷素盈余量为瓜菜类>果菜类>叶菜类。如此高的磷素投入导致磷素严重盈余,必然带来高风险的磷素淋失,大量养分投入使得表层土壤养分状况发生了重大变化(表2)。与粮田相比,设施菜田土壤有机质、无机氮、速效磷以及速效钾含量都显著提高,并随着种植年限的增加而增加。种植年限为9 a以上的设施菜田,0~20 cm土壤有机质、无

机氮、Olsen-P 和速效钾分别是粮田土壤的 2.3、2.1、17.9 倍和 3.9 倍;但是随着种植年限的增加,土壤呈现酸化趋势。

2.2 设施菜地土壤磷素积累特征

同露地麦田土壤相比,设施土壤有机磷、无机磷均显著增加(表 3),并且随着设施年限的增加这种累积的趋势更加明显,尤其是土壤无机磷的累积,种植年限超过 9 a 的设施菜田各土层的无机磷含量要显著高于露天麦田和 1~3 a 种植年限的设施菜田;在不同种植年限,同一土层土壤无机磷随着种植年限的增长而增大,土壤磷素有向下淋洗趋势,在 40~60 cm 土层,7~9 a 和 9 a 以上土壤无机磷含量要显著高于种植年限为 1~3 a、4~6 a 的土壤无机磷含量,这说明土壤磷素在长时间设施栽培下已经被淋失到 40 cm 以下。由于无机磷的大量累积导致土壤中无机磷与有机磷的比值发生变化,随着种植年限的增加,无机磷与有机磷的比值增加,种植 9 a 以上的设施菜田 0~20 cm 土层无机磷/有机磷是粮田的无机磷/有机磷比例的 3.2 倍。设施种植年限大于 3 a 的菜田 0~20 cm 土壤中,无机磷的比重超过了 90%,20~100 cm 土层无

机磷的比重在 80%~89%之间;而粮田 0~20 cm 土层无机磷的比重为 76%,20~100 cm 土层无机磷的比重在 80%左右。

2.3 设施菜田土壤有效磷变化特征

2.3.1 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的土壤剖面变化

由图 1 可以看出,由于大量磷肥投入,设施菜田不同土壤层次的有效磷含量明显高于露地小麦土壤有效磷含量,尤其是在 0~20 cm 表层土壤中,设施土壤有效磷含量最高值达到露地小麦有效磷含量的 85.2 倍。在同一土层,有效磷含量随种植年限地增加而逐渐累积,尤其是表层土壤 Olsen-P 与水溶性磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$)显著提高,但当棚龄大于 7 a 时,0~20 cm、20~40 cm 土层有效磷稳定,随着种植年限的加长甚至有下降的趋势,但是在 40 cm 以下的土壤,Olsen-P 却随着种植年限增加明显升高;在 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层,1~3 a、4~6 a 种植年限设施菜地土壤 Olsen-P 呈倒三角分布,而 7~9 a、9 a 以上呈倒梯形分布;1~3 a、4~6 a 种植年限设施大棚土壤 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 随着土层深度的加深而降低,并且下降趋势要大于 7~9 a、9 a 以上设施大棚土壤,这说明土壤

表 1 不同种植作物磷素投入及盈余

Table 1 Phosphorous input and surplus with different vegetable species

棚龄/a	经度	纬度	土壤类型	当季作物	年产量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	P 素投入/ $\text{kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$		植株磷素带走量/ $\text{kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$	P 素盈余/ $\text{kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$
						来自有机肥	来自化肥		
1	118°41'43.3"	36°55'16.7"	褐土	茄子	288	1 024	1 540	259	2 305
2	118°59'03.8"	36°50'40.3"	褐土	黄瓜	208	941	1 566	416	2 091
3	118°46'20.7"	36°51'26.2"	褐土	番茄	220	802	1 166	220	1 748
4	118°41'25.9"	36°55'15.7"	潮褐土	辣椒	109	962	1 023	120	1 865
5	118°50'6.4"	36°47'10.7"	潮褐土	番茄	202	953	1 511	202	2 262
6	118°55'15.5"	36°51'36.6"	潮褐土	辣椒	80	716	1 300	88	1 928
7	118°41'51.2"	36°54'33.1"	褐土	生菜	340	716	1 516	306	1 926
8	118°44'40.3"	36°55'22.5"	潮褐土	番茄	368	663	1 223	368	1 518
9	118°41'19.8"	36°56'46.1"	褐土	辣椒	100	454	972	110	1 316
10	118°40'21.7"	36°57'43.9"	褐土	苦瓜	264	791	1 346	119	2 018
11	118°44'41.7"	36°55'21.2"	潮褐土	番茄	236	1 292	1 042	236	2 098
12	118°41'57.4v	36°54'00.7"	潮褐土	芹菜	284	743	1 636	256	2 123
20	118°41'38.4v	36°55'14.6"	褐土	辣椒	97	1 315	1 056	107	2 264
平均						874	1 300		1 959
大田	118°41'44.5"	36°54'37.6"	褐土	小麦	6.2	0	350	66	284
大田	118°48'37.6"	36°47'18.1"	褐土	小麦	5.9	0	295	78	217
大田	118°41'44.5"	36°55'14.2"	褐土	小麦	6.4	0	322	79	243
平均									248

注:根据调查,2011 年寿光设施蔬菜氮钾的平均投入量为 $2\,490\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $2\,260\text{ kgK}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中有机肥投入的氮钾分别为 $940\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $860\text{ kgK}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$,化肥投入的氮钾分别为 $1\,550\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1\,400\text{ kgK}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$;灌溉方式均为漫灌。

表 2 不同种植年限日光温室土壤化学性质						
Table 2 Soil chemical properties in the surveyed greenhouses with different cropping years						
种植年限/a	土壤层次/cm	pH	有机质/g·kg ⁻¹	无机氮/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	有效钾/mg·kg ⁻¹
1~3	0~20	8.28	17.3	133	152	537
	20~40	8.10	8.72	53.0	16.9	151
	40~60	8.62	8.20	39.0	26.4	142
	60~80	8.93	6.24	38.0	6.60	90.2
	80~100	8.81	6.10	32.0	6.40	88.2
4~6	0~20	7.87	13.5	138	183	702
	20~40	8.84	7.55	73.0	47.9	221
	40~60	8.69	6.39	62.0	56.6	121
	60~80	9.00	5.19	49.0	6.80	82.0
	80~100	8.67	5.20	52.0	6.50	83.4
7~9	0~20	7.83	20.1	156	319	434
	20~40	8.01	8.23	53.0	145	299
	40~60	8.44	5.50	59.0	51.8	150
	60~80	8.56	4.53	50.0	16.8	150
	80~100	8.78	4.35	43.0	16.6	123
>9	0~20	7.80	29.7	133	298	822
	20~40	8.39	13.1	74.0	176	566
	40~60	8.48	7.36	45.0	65.7	222
	60~80	8.76	5.39	49.0	46.3	147
	80~100	8.62	5.26	34.0	36.5	134
露地小麦	0~20	8.47	12.8	54.0	16.7	209
	20~40	8.68	6.65	50.0	11.2	94.4
	40~60	9.00	12.3	66.0	12.1	89.4
	60~80	8.50	7.82	31.0	7.90	81.1
	80~100	8.65	6.58	28.0	3.60	82.4

表 3 不同棚龄 0~100 cm 土壤剖面无机磷、有机磷、无机磷/有机磷变化						
Table 3 Variation of inorganic P, organic P and ratio of inorganic/organic P in different soil layers of different cropping years						
土壤磷	土层厚度/cm	粮田	设施蔬菜			
			1~3 a	4~6 a	7~9 a	大于 9 a
有机磷/mg·kg ⁻¹	0~20	292ab	326ab	351b	524ab	541a
	20~40	187ab	132b	260ab	399a	370ab
	40~60	200a	181a	179a	146a	266a
	60~80	154a	254a	156a	173a	150a
	80~100	140ab	157ab	177ab	113b	233a
无机磷/mg·kg ⁻¹	0~20	946c	2 209bc	3 384ab	4 727a	5 553a
	20~40	671b	930b	1 123b	2 062ab	2 799a
	40~60	683b	851b	989b	1 133ab	1 703a
	60~80	636bc	591c	723abc	921ab	965a
	80~100	615a	701a	681a	990a	1 288a
无机磷/有机磷	0~20	3.2	6.8	9.6	9.0	10.3
	20~100	3.8	4.2	4.6	6.1	6.6

注：同一土壤层次同一行中带有相同字母表示含量在 0.05 水平下差异不显著。The same letter in the same column and same soil layers means no significant differences for tomato yield among different treatments by LSD($P<0.05$).

P 素在长期的积累下开始向深层转移。 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 是土壤磷素淋溶的重要指标之一, 在种植年限为 20 a 的设施菜地, 土壤 80~100 cm 的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 达到 $2.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 因此在长期高投入的设施栽培下, 土壤磷素存在很大的淋失风险。

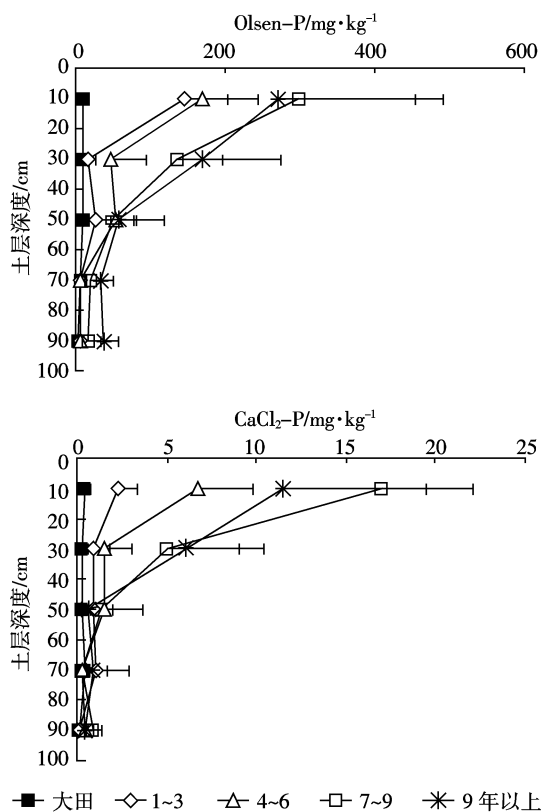


图 1 不同种植年限田块不同土层 Olsen-P、水溶性磷 (CaCl_2 浸提) 的变化

Figure 1 Variation of Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ in 0~100 cm soil layers with the increase of cropping years

2.3.2 Olsen-P 与土壤有机磷、无机磷的关系

相关分析结果表明(图 2), 与土壤有机磷相比, 土壤无机磷与土壤速效磷含量有更高的相关性 ($R^2=0.6818$), 说明土壤无机磷素是影响土壤速效磷含量的主要因素, 这也与无机磷占全磷比重较大有关; 在较高种植年限的设施菜地, 土壤无机磷与有机磷都处于较高水平, 而土壤有机磷变化幅度较大。

2.3.3 菜田土壤 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 变化关系

根据 Heckrath 等研究发现耕层土壤水溶性磷与 Olsen-P 有很好的相关性, 并且当 Olsen-P 增至某一值时 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 提高的幅度明显增加, 该点称之为转折点 (Change point)^[20], 即土壤磷淋失临界值。当土壤磷含量超过临界值, 淋洗风险急剧增加。本研究发现, 通过对表层土壤 (0~20 cm) 的研究, 该地区的菜田土壤

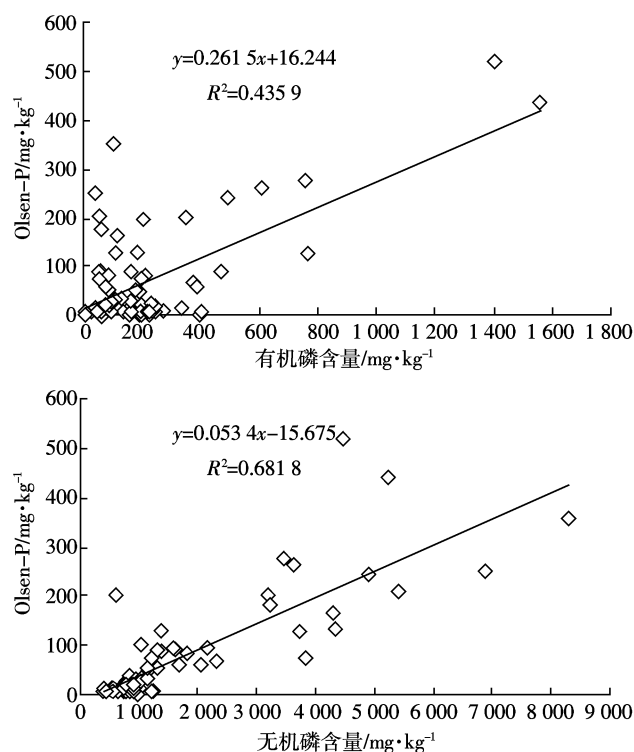


图 2 土壤 Olsen-P 与土壤有机磷、无机磷关系
Figure 2 Correlation between soil Olsen-P and organic and inorganic P

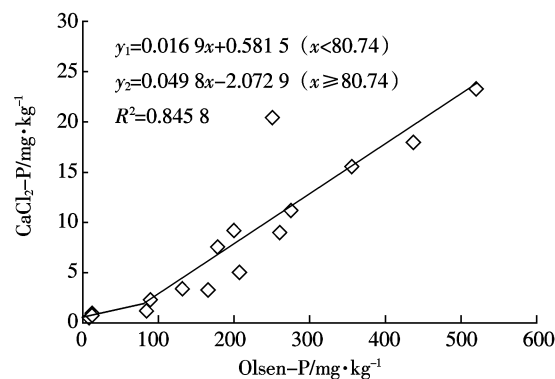


图 3 0~20 cm 土层 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 相关性
Figure 3 The correlation between soil Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ (0~20 cm)

磷淋失临界值为 Olsen-P $80.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3), 即当土壤中 Olsen-P 大于 $80.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 磷素淋失的风险将迅速增大。就目前而言, 所调查地区设施菜田 0~20 cm 土层的 Olsen-P 含量已经远远超出该临界值, 具有很高的淋失风险。

3 讨论

3.1 设施菜地磷素积累状况及磷素形态变化规律

设施蔬菜具有复种指数高、养分和水分投入量

大、产量高等特点,是建立在人为控制环境下具有封闭或半封闭生产环境的栽培系统。由于有机肥和化学磷肥的大量投入,作物带走量较少,设施土壤磷素大量累积,本次调查显示,设施菜地表层土壤(0~20 cm) Olsen-P 和全磷分别是露天麦田的 14.5 倍和 6.9 倍,种植年限越久的设施菜地,土壤磷素累积程度越高,并有向下迁移趋势,与前人研究相似^[21-23];当种植年限达到 7 a 以上,土壤全磷含量增加程度呈降低的趋势,这可能是由于土壤胶体吸附磷素的能力有一定限度,当累积超过其吸收能力时,过量磷素会被灌溉水冲淋至深层土壤^[24];设施土壤有机磷与无机磷随着种植年限的增加都有积累的趋势,大量施用磷肥同时增加土壤无机磷和有机磷的含量;长期施用有机肥导致土壤表层(0~20 cm)中有机磷比重有增加的趋势,这与土壤有机质有着显著的关系,20~100 cm 土层有机磷占全磷的比重低于表层土壤(0~20 cm),这可能是由于表层土壤有机磷不断矿化为无机磷,移动至土壤下层而致使无机磷比重偏大;虽然有机肥中的磷投入占到磷素总投入的 40%以上,但由于有机肥(粪肥)中磷素大多是以无机磷形态存在^[25],土壤磷素的积累主要是无机磷的积累,占土壤全磷的 81%~95%。

3.2 菜田土壤磷素环境风险评价

受磷素自身化学性质影响,磷素在土壤中移动性较差,但是长期使用磷肥和大量灌水仍然会导致表层磷素向下层淋失^[26],在传统的设施蔬菜栽培中一季的灌溉量高达 1 000 mm^[1],在如此高的灌溉下,土壤磷素向下层淋洗在所难免。本次调查显示,随着棚龄的增加,各土层土壤 Olsen-P 和 CaCl₂-P 有着显著的增加趋势。0.01 mol·L⁻¹ 氯化钙可提取磷为公认的环境指标^[27],Heckrath 等研究发现潮褐土可溶性磷与土壤耕层 Olsen-P 有很好的相关性,并确定了土壤磷淋失的 Olsen-P 转折点为 57 mg·kg⁻¹^[20]。本次调查发现,在典型北方石灰性潮褐土和褐土的设施菜田中,土壤磷素淋溶拐点为 80.7 mg·kg⁻¹,在 0~20 cm 土层,除了露天麦田外,不同年限设施的菜地土壤都超过 80.7 mg·kg⁻¹,即使是新建的设施大棚,表层土壤 Olsen-P 也达到 84 mg·kg⁻¹,磷素向下层土壤淋失风险较大。与大田相比,设施土壤磷素淋溶拐点值较高,同样是北方石灰性土壤,柏兆海对北京平谷地区调查显示砂壤、轻壤和重壤中平均 Olsen-P 含量分别为 23.1、40.1、51.5 mg·kg⁻¹ 时^[15],存在土壤磷淋溶拐点,这与本文得出的结论差距较大,导致这种现象的原因可能有两个:一是菜园土壤与露天土壤相比,经过长期的设施

栽培,土壤性质已经发生变化,致使 Olsen-P 的拐点增大;二是即使新建温室,Olsen-P 也已经超过淋溶拐点值,已经发生磷素淋溶。由于调查样本数较少,缺乏中等磷素土壤样品,这需要进行进一步的验证。

4 结论

设施蔬菜地与露天小麦地相比,土壤有机质、氮、磷、钾的总量均大于露地麦田,土壤无机磷、Olsen-P、CaCl₂-P、全磷含量在土壤不同土层均大于露地小麦地所含对应磷量,且随种植年限增加差值越来越大,设施土壤出现磷素的累积和淋失现象。0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 浸提的土壤磷即 CaCl₂-P 可作为土壤磷的淋失指标,分析显示,当土壤 Olsen-P 达到 80.7 mg·kg⁻¹ 时,CaCl₂-P 含量显著上升,因此在长期的设施栽培下,磷素淋洗即可能对地下水造成危害。磷素的管理主要以恒量监控为原则,磷素的管理既要保证蔬菜作物高产,又要保证在环境风险值以内;应注重减少磷肥投入,注重高碳有机肥的投入,并大力推广水肥一体化技术,挖掘作物生物学潜力,提高磷肥利用效率。

参考文献:

- [1] 李俊良,朱建华,张晓晟,等. 保护地番茄养分利用及土壤氮素淋失[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(2): 126-129.
LI Jun-liang, ZHU Jian-hua, ZHANG Xiao-sheng, et al. Nitrate leaching loss from soil and nutrient utilization by tomato in protected field[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2001, 7(2): 126-129.
- [2] 朱建华. 蔬菜保护地氮素去向及其利用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
ZHU Jiang-hua. Study on fate and utilization of nitrogen in protected vegetable fields[D]. Beijing: China Agricultural University, 2002.
- [3] 何飞飞. 设施番茄周年生产体系中的氮素优化及环境效应分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
HE Fei-fei. Studies on optimizing nitrogen management and environmental implication in greenhouse tomato cropping system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006.
- [4] 刘兆辉,姜丽华,张文君,等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296-303.
LIU Zhao-hui, JIANG Li-hua, ZHANG Wen-jun, et al. Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 296-303.
- [5] 章明奎,周翠,方利平,等. 蔬菜地土壤磷饱和度及其对磷释放和水质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 544-548.
ZHANG Ming-kui, ZHOU Cui, FANG Li-ping, et al. Phosphorus saturation degree of soils on vegetable farms and its effects on soil phosphorus release potential and water quality[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 544-548.

- [6] Zhang X S, Liao H, Chen Q, et al. Response of tomato in calcareous soil to different application rates of seedbed phosphorus fertilizer[J]. *Pedosphere*, 2007, 17 (1):70–76.
- [7] Chen Qing, Zhang X S, Zhang H Y, et al. Evaluation of current fertilizer practice and soil fertility in vegetable production in the Beijing region [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69:51–58.
- [8] 李俊良, 崔德杰, 孟祥霞. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2):126–128.
LI Jun-liang, CUI De-jie, MENG Xiang-xia. The study of fertilization condition and question in protectorate vegetable in Shouguang, Shandong[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(2):126–128.
- [9] 吕福堂, 张秀省, 董洁, 等. 日光温室土壤磷素累积淋移和形态组成变化研究[J]. 西北农业学报, 2010, 19(2):203–206.
LÜ Fu-tang, ZHANG Xiu-sheng, DONG Jie, et al. Study on the phosphorus accumulation, leaching and forms varying in greenhouse soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinice*, 2010, 19(2):203–206.
- [10] 吴艳春, 庄舜尧, 杨浩, 等. 土壤磷在农业生态系统中的迁移[J]. 东北农业大学学报, 2003, 34(2):210–218.
WU Yan-chun, ZHUANG Shun-yao, YANG Hao, et al. Soil phosphorus transfer from agricultural ecosystem[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2003, 34(2):210–218.
- [11] Martina P, Wolf-Anno B, Andeas B. Mineral-nitrogen and phosphorus leaching from vegetable gardens in Niamey, Niger[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2011, 174, 47–55.
- [12] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *Environ Qual*, 1995, 24:904–910.
- [13] Maguire R O, Sims J T. Observations on leaching and subsurface transport of phosphorus on the Delmarva Peninsula, USA [C]//Connecting Phosphorus Transfer from Agriculture to Impacts in Surface Waters. International Phosphorus Transfer Workshop, 2001:20.
- [14] Sharpley A N, Daniel T, Sims T, et al. Agricultural Phosphorus and Eutrophication. United States department of Agriculture ARS-149, 2003.
- [15] 柏兆海, 万其宇, 陈清, 等. 县域农田土壤磷素积累及损失风险分析: 以平谷区为例 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (9):1853–1860.
BAI Zhao-hai, WAN Qi-yu, CHEN Qing, et al. Evaluation of soil phosphorus accumulation and loss risk on arable land at county level: The example of Pinggu District[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9):1853–1860.
- [16] 高秀美, 汪吉东, 刘兆普, 等. 集约化蔬菜地土壤磷素累积特征及流失风险[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1):82–86.
GAO Xiu-mei, WANG Ji-dong, LIU Zhao-pu, et al. Accumulation and leaching risk of phosphorus in vegetable soils under intensive cultivation[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(1):82–86.
- [17] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24:904–910.
- [18] Jordan C, McGuckn S O, Smith R V. Increased predicted losses of phosphorus to surface water from soils with high Olsen-P concentration[J]. *Soil Use and Management*, 2000, 16(1):27–35.
- [19] 陈清, 张福锁. 蔬菜养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007:120–121.
CHEN Qing, ZHANG Fu-suo. Vegetables integrated nutrient resource management theory and practice[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007:120–121.
- [20] Hesketh N, Brookes P C. Development of a indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29(1):105–110.
- [21] 刘建玲, 张福锁, 杨奋翻. 北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究[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.
- [22] 路超, 李絮花, 李润. 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. Fertility characteristic of soil phosphorus in sheltered cultivation[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2006(2):61–63, 67.
- [23] 王新民, 王卫华, 侯彦林. 豫北蔬菜保护地土壤磷素形态及其空间分布特征研究[J]. 土壤, 2004, 36(2):173–176.
WANG Xin-min, WANG Wei-hua, HOU Yan-lin. Phosphorus fractions and their vertical distribution in vegetable soil in suburbs of Anyang City[J]. *Soils*, 2004, 36(2):173–176.
- [24] 张树金, 余海英, 李廷轩, 等. 温室土壤磷素迁移变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8):1534–1541.
ZHANG Shu-jin, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, et al. The migration characteristics of phosphorus in greenhouse soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8):1534–1541.
- [25] 莫淑勋, 钱菊芳, 钱承梁. 猪粪等有机肥料中磷素养分循环再利用的研究[J]. 土壤通报, 1991, 28(3):309–315.
MO Shu-xun, QIAN Ju-fang, QIAN Cheng-liang. Studies on phosphorus of organic manures and its reutilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(3):309–315.
- [26] Borling K, Barberis E, Otabbong E. Impact of long-term inorganic phosphorous fertilization on accumulation, sorption and release of phosphorus in five Swedish soil profiles[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69:11–21.
- [27] Maguire R O, Sims J T. Measuring agronomic and environmental soil phosphorus saturation and predicting phosphorus leaching with Mehlich 3[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66:2033–2039.