

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21647

山西褐土区设施蔬菜地不同棚龄土壤氮、磷残留特征

李丽君^{1, 2}, 刘平^{1, 2*}, 马琳杰³, 惠薇³, 马琦琦³, 霍晓兰^{1, 2}

[1. 山西农业大学资源环境学院(龙城校区), 山西太原 030031; 2. 山西省土壤环境与养分资源重点实验室, 山西太原 030031; 3. 山西大学生命科学学院, 山西太原 030006]

摘要: 设施蔬菜地因其高度集约化的栽培条件和管理方式对土壤养分状况影响极大, 但随着种植年限的增加, 土壤中氮、磷残留趋势并不清楚。基于此, 采取野外调查采样与实验室分析相结合的方法, 对山西省晋中市太谷县范村镇象谷村不同种植年限(10、20、30年)温室大棚土壤主要肥力指标进行综合分析, 了解褐土区设施蔬菜地土壤主要养分氮、磷残留和迁移特征。结果表明: 不同种植年限大棚土壤氮、磷均出现表层(0~20 cm)累积的现象。随着土层深度的增加, 不同年限大棚土壤 NO_3^- -N残留量均有降低的趋势, 各棚龄土壤0~100 cm土层的硝态氮(NO_3^- -N)残留量均显著高于100~200、200~300、300~400 cm土层土体的残留量, 10、20、30年棚龄土壤0~100 cm土层的 NO_3^- -N残留量分别为100~200、200~300、300~400 cm土层土体内 NO_3^- -N残留量的34.9%、43.4%、40.9%, 且20年的残留量占比最高; 不同棚龄相应各层土体 NO_3^- -N残留量均高于大田。随着棚龄增加, 土壤0~20 cm土层的有效磷(Olsen-P)含量表现为先升高后降低的趋势, 不同棚龄Olsen-P含量(0~40 cm土层)是大田3.8~5.6倍, 均以20年棚龄的含量最高。10年棚龄20~40 cm土层和20年棚龄40~60 cm土层的Olsen-P含量均已接近大田表层值(24.66 mg/kg), 不同棚龄土壤Olsen-P含量从40 cm土层开始均急剧下降。0~400 cm土层土体内全氮与 NO_3^- -N含量呈显著线性相关, 0~100 cm土层土体全磷和Olsen-P含量之间呈幂乘相关关系, 由各自的决定系数可知, 土壤中50%左右的 NO_3^- -N和Olsen-P含量受全氮量和全磷量的影响。此外, 褐土区磷淋溶阈值为45.1 mg/kg, 超过此值该区域土壤存在磷淋溶风险。总之, 大棚内短期投入大量肥料的生产方式导致土壤中特别是0~20 cm表层土壤氮和磷的大量残留, 而长期水肥的高投入又引起有效态氮和磷的淋溶, 进而在土壤深层次残留。

关键词: 山西褐土区; 设施蔬菜; 种植年限; 土壤养分残留; 磷淋失临界值

近年来, 我国设施蔬菜生产发展迅速。与大田作物相比, 设施蔬菜生长期短、养分需求量大、产量高、经济效益好。设施蔬菜栽培过程中, 过量施肥、盲目灌溉、不均衡施肥现象普遍存在, 加之保护地的特殊环境导致其光、温、水、肥等条件与露天菜地相比有很大差别^[1]。菜农过量施用氮磷肥及大水灌溉带来一系列环境问题, 如硝酸盐、有效磷在土壤中高度累积^[2], 地下水氮素、磷素含量超标, 造成水源污染、富营养化等问题^[3], 这些环境问题日益引起人们的关注。

设施蔬菜是农业生产措施和种植环境相对稳定

的一种栽培方式, 在人为精耕细作管理措施下, 土壤养分含量丰富, 均高于相应的农田^[4]。随着种植年限的延长, 土壤养分状况会发生变化。8~10年以内的温室土壤有机质、硝态氮、速效磷等含量均随年限增加而不断增加^[5]。设施蔬菜种植一定年限后, 会出现土壤理化性质恶化的现象, 对蔬菜产量、品质产生较大影响, 降低农民的经济收益^[4]。近年来, 设施蔬菜土壤养分残留状况引起科学工作者的重视。相关研究多集中于10年左右棚龄、0~20 cm土层深度的设施蔬菜土壤养分, 少部分深度为0~60 cm, 而30年棚龄、0~400 cm土层土壤养分状况调查报道欠缺^[6]。

山西省晋中市太谷县土壤、气候条件良好, 设施蔬菜种植发展迅速, 成为其周边城市蔬果供应的重要基地。2015年设施蔬菜产量达到85万t, 产值为10亿元。2016年山西省政府通过了《山西农谷建设初设方案》, 太谷县设施农业有很大的发展机遇, 而设施土壤是设施农业可持续发展的重要保

收稿日期: 2021-11-30; 录用日期: 2022-02-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800105-5); 第2次全国污染源普查项目(091821103994212010)。

作者简介: 李丽君(1963-), 研究员, 博士后, 研究方向为农业面源污染。E-mail: lilijun2005@163.com。

通讯作者: 刘平, E-mail: lp709@163.com。

障^[7]。课题组在太谷褐土区设施蔬菜大棚4年定点试验发现,该区温室大棚和其他地区温室大棚区一样存在土壤盐分过度积累、硝态氮和有效磷残留较多等问题。但种植多年以后,该区域土壤氮和磷残留趋势并不清楚。本研究以典型褐土区-山西省晋中市太谷县范村镇有“三晋大棚第一村”之称的象谷村设施大棚为研究对象,调查不同种植年限大棚(10、20、30年)及大田(玉米、露地蔬菜轮作栽培土壤)土壤主要养分状况,明确该区域种植制度下土壤主要养分氮、磷素残留和迁移特征,对于防止设施蔬菜土壤质量退化,科学施用氮、磷肥,提高生产力,确保设施蔬菜生产、绿色健康发展具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究地点与概况

设施蔬菜大棚和大田土样均取自山西省晋中市太谷县范村镇象谷村,该点位于112°29'~112°30'E,37°45'~37°46'N范围内。年均降水量415 mm左右,年均气温12℃左右,海拔802 m。该村有耕地153 hm²,其中设施蔬菜大棚67 hm²,是全县有名的设施蔬菜专业村。该区域土壤类型按照地理发生分类划分属褐土。

1.2 设施蔬菜管理措施

设施蔬菜大棚均一直种植蔬菜,主要有西葫芦、黄瓜、茄子和西红柿等。一般基肥为鸡粪和羊粪复合肥8万~12万 kg/hm²、复合肥(一般为氮:磷:钾=18:18:18)300~525 kg/hm²,机械翻入土中,深度为20 cm;追肥(冬季10~20 d/次,夏季7~10 d/次,种植7个月左右)随灌水施入复合肥256~410 kg/hm²,复合肥的氮:磷:钾一般是1:1:1,盛果期使用钾含量为40%~43%的复合肥。多采用沟灌方式,每次灌溉量约为16.2万 L/hm²。

1.3 土壤采集和室内分析方法

1.3.1 不同棚龄土样采集

根据当地大棚蔬菜栽培历史,随机选10、20、30年3个种植年限蔬菜大棚各5个,在夏季休闲期进行取样。土样采集方法:按“5点法”布点,每个大棚0~100 cm土层分3个小区,按照梅花形每20 cm采1个混合样,共3个重复样;100~400 cm土层按照蛇形每20 cm采1个混合样。每个土样采集1 kg,每个棚30个土样。同时采集

邻近玉米和蔬菜轮作栽培的4个地块作对照(文中均称作大田)。

采样时间为2020年7月26日到8月15日。

土样风干后,研磨过筛后测定全氮、硝态氮(NO₃⁻-N)、全磷、有效磷(Olsen-P)。

1.3.2 样品分析及NO₃⁻-N、Olsen-P累积量和磷淋失临界值计算

土壤样品各指标采用常规分析方法:全氮-凯氏定氮法,全磷-钼锑抗比色法。NO₃⁻-N-连续流动注射法(AMS Futura 2, 法国)。

土壤Olsen-P的测定:取土样2.5 g,用pH 8.5 50 mL 0.5 mol/L的NaHCO₃溶液振荡30 min浸提,采用紫外分光光度-钼锑抗比色法测定。

土壤溶性磷(CaCl₂-P)的测定:取土样2 g,用20 mL 0.01 mol/L的CaCl₂溶液振荡1 h浸提(1:5土水比),采用紫外分光光度-钼锑抗比色法测定。

NO₃⁻-N/Olsen-P累积量(kg/hm²)=土层厚度(cm)×NO₃⁻-N/Olsen-P含量(mg/kg)×土层平均容重(g/cm³)/10

以Olsen-P含量为横坐标,CaCl₂-P含量为纵坐标绘制相关曲线,得出土壤Olsen-P与CaCl₂-P的关系方程,使得高Olsen-P含量与CaCl₂-P之间的关系方程相关系数最高、斜率最大,而低Olsen-P含量与CaCl₂-P之间的关系方程斜率最小,相关曲线转折点的土壤Olsen-P含量就是此种土壤的磷素淋失临界值^[8]。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用Excel 2007与Origin 2019进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同棚龄土壤NO₃⁻-N残留特征及其与全氮的关系

表1、2分别为不同棚龄设施蔬菜大棚土壤NO₃⁻-N含量在不同土壤层次中的残留浓度和残留量。不同大棚施肥量不同,土壤养分差异较大,由表1中不同年限大棚土壤NO₃⁻-N浓度最大值、最小值和均值可以体现此差异。表2中10、20和30年棚龄0~400 cm土层土体内NO₃⁻-N残留量分别为大田的1.45、1.86和1.25倍。随着土层的加深,不同棚龄设施蔬菜大棚土壤NO₃⁻-N残留量呈降低趋势,各棚龄土壤0~100 cm土层的NO₃⁻-N

表 1 土壤 0 ~ 400 cm 土层累积 NO₃⁻-N 描述性统计 (mg/kg)

棚龄 年限	0 ~ 100 cm			100 ~ 200 cm			200 ~ 300 cm			300 ~ 400 cm		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
大田	73.3	165.2	139.6	56.3	145.9	105.6	75.5	171.0	104.4	74.5	151.9	98.5
10	81.5	295.5	227.0	108.5	159.1	136.3	88.0	210.0	150.6	109.6	160.0	135.7
20	199.6	463.2	362.2	85.4	265.8	186.6	173.3	282.7	170.7	57.8	191.5	128.0
30	187.9	399.5	229.2	29.3	160.3	96.6	96.4	152.1	124.7	67.4	167.2	109.8

表 2 土壤 0 ~ 400 cm 土层累积 NO₃⁻-N

棚龄 年限	0 ~ 400 cm	0 ~ 100 cm	百分比	100 ~ 200 cm	百分比	200 ~ 300 cm	百分比	300 ~ 400 cm	百分比
	累积量	累积量	(%)	累积量	(%)	累积量	(%)	累积量	(%)
	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)							
	A	B	B/A	C	C/A	D	D/A	E	E/A
大田	5602.4	1745.1bc	31.1	1320.1ab	23.6	1305.5a	23.3	1231.6a	22.0
10	8120.1	2837.8a	34.9	1703.2a	21.0	1882.6a	23.2	1696.5a	20.9
20	10428.7	4527.4ab	43.4	2166.7b	20.8	2134.2a	20.5	1600.5a	15.3
30	7003.2	2864.4c	40.9	1207.8b	17.2	1559.1a	22.3	1371.9a	19.6

注：同列数据后不同小写字母表示处理在 5% 水平上差异显著。A、B、C、D、E 分别表示 0 ~ 400、0 ~ 100、100 ~ 200、200 ~ 300、300 ~ 400 cm 的 NO₃⁻-N 累积量。

残留量均显著高于相应其他 3 层 (100 ~ 200、200 ~ 300 和 300 ~ 400 cm) 土体, 分别占 0 ~ 400 cm 土层土体内 NO₃⁻-N 残留量的 34.9%、43.4% 和 40.9%, 以 20 年的残留量占比最高; 其中, 20 年棚龄 0 ~ 100 cm 土层 NO₃⁻-N 累积量最高, 是大田的 2.6 倍。各棚龄土壤中 200 ~ 300 cm 土层的 NO₃⁻-N 残留量高于或接近 100 ~ 200 cm 土层。可知, 大量氮肥和灌溉水投入不仅使土壤表层 NO₃⁻-N 残留量增加, 而且过量的 NO₃⁻-N 可能已迁移至 300 ~ 400 cm 土层或更深处, 这些下移的 NO₃⁻-N 大大增加了地下水污染的风险。

从图 1 可以看出, 被调查大棚 0 ~ 400 cm 土层土体内全氮和 NO₃⁻-N 含量呈显著的线性相关, 决定系数达 0.5213 (P<0.01), 也就是说土壤中 52% 左右 NO₃⁻-N 含量受全氮含量的影响。

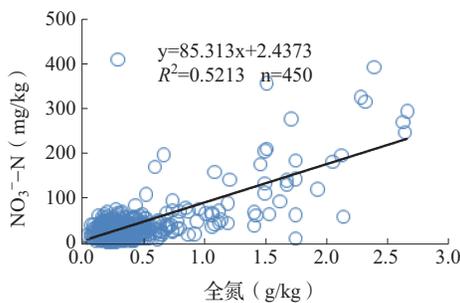


图 1 土壤 0 ~ 400 cm 土层中全氮与 NO₃⁻-N 含量的关系

2.2 不同棚龄土壤 Olsen-P 残留特征及其与全磷的相互关系

土壤磷素表层积累是保护地土壤的共同特征, 图 2 显示, 所调查褐土区 Olsen-P 在土壤中的含量随种植年限的增加整体表现为先升高后降低的趋势, 20 年土壤 Olsen-P 浓度最高, 而后开始降低。与大田相比, 所有棚龄设施蔬菜地 0 ~ 40 cm 土层 Olsen-P 含量显著提高, 是大田的 3.8 ~ 5.6 倍。在 0 ~ 100 cm 土层范围内, 随棚龄的增加, 0 ~ 60 cm 内各土层 (0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm) 的 Olsen-P 含量均在增加, 为大田的 1.2 ~ 6.2 倍, 其中 20 年棚龄 0 ~ 20 cm 土层的土壤 Olsen-P 含量最大, 为大田的 6.2 倍。随着土壤深度的增加, 从 40 cm 土

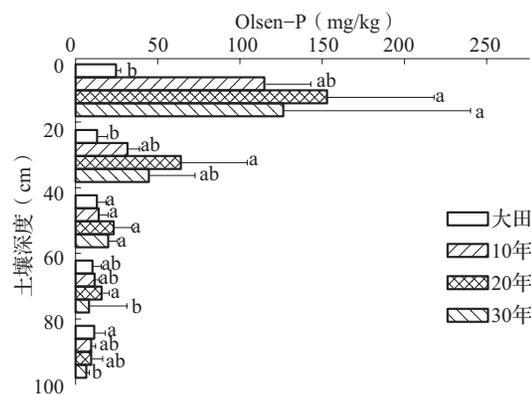


图 2 不同棚龄土壤 0 ~ 100 cm 土层中 Olsen-P 残留状况

注：不同小写字母表示不同棚龄间差异显著 (P<0.05)。

层开始,各棚龄土壤 Olsen-P 含量均急剧下降。

虽然土壤中存在多种固磷机制导致其弱迁移,但 10 年棚龄 20 ~ 40 cm 土层的 Olsen-P 含量已超过大田表层值 24.66 mg/kg, 20 年棚龄 40 ~ 60 cm 土层的 Olsen-P 含量接近大田表层值; 30 年棚龄 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 土层的 Olsen-P 含量高于大田相应各层值。由此可知,随大棚年限的增加土壤中 Olsen-P 含量已经开始向下淋溶。

所调查大棚土壤 0 ~ 100 cm 土层全磷和 Olsen-P 含量为显著的乘幂相关关系(图 3), 决定系数达 0.509 ($P < 0.01$), 表明土壤 Olsen-P 含量约 50% 取决于土壤全磷含量。因此,磷肥的过量投入会导致更多的 Olsen-P 残留,特别是 0 ~ 40 cm 土层容易积累较多的 Olsen-P。

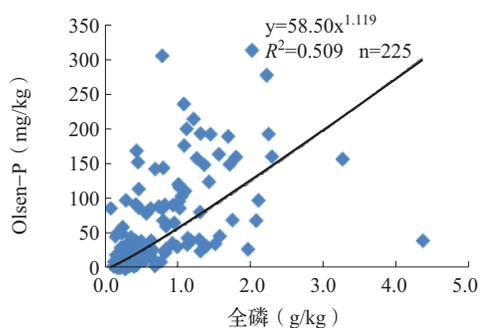


图 3 不同棚龄土壤 0 ~ 100 cm 土层中全磷与 Olsen-P 含量的关系

2.3 褐土区土壤磷淋失临界值

图 4 为课题组 4 年设施蔬菜定点试验结合不同棚龄设施蔬菜土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 含量的关系图。从图 4 可知,当土壤 Olsen-P 含量低于 45.1 mg/kg 时,随 Olsen-P 含量的增加, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量增加缓慢,拟合方程为 $\text{CaCl}_2\text{-P} = 0.071\text{Olsen-P} + 0.141$ ($R^2 = 0.507$); 当 Olsen-P 含量超过 45.1 mg/kg 时,随 Olsen-P 含量的增加, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量急剧增

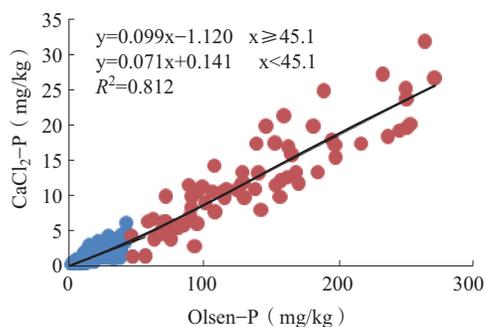


图 4 土壤 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的关系

加,二者拟合方程为 $\text{CaCl}_2\text{-P} = 0.099\text{Olsen-P} - 1.120$ ($R^2 = 0.812$)。因此,土壤中被称作磷素淋溶“突变点”的 Olsen-P 值或土壤磷酸盐淋失临界值为 45.1 mg/kg,此时土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量约为 3.4 mg/kg。试验点和大部分大棚调查土壤 0 ~ 40 cm 土层中的 Olsen-P 含量均超过此值,因此都存在淋溶风险。

3 讨论

3.1 不同棚龄土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 残留特征及其与全氮的关系

氮素是一切生物生长所必需的大量元素之一,在土壤中可转化为作物可吸收的多种形态。氮素可被作物利用的主要形态是硝态氮,它也是蔬菜喜好的形态。但土壤胶体不易吸附硝态氮,一旦硝态氮在土壤中大量累积,易产生淋失对地下水水质产生影响^[9-10]。

氮肥的增产效果在设施蔬菜生产中表现最为明显,增施氮肥成为菜农提高设施蔬菜生产率的主要方法之一^[10]。设施蔬菜生产过程中施肥量大、灌溉强度大、频率高以及不同于大田的管理措施,使得生产周期内温室大棚温度、湿度较高,氮素随水分蒸发向上移动,导致其与大田土壤环境有较大差异,不同棚龄设施蔬菜地出现表聚现象,表层土壤中全氮含量均显著高于大田^[3, 9]; 随着设施大棚棚龄增加,土壤中过量养分累积越来越严重,出现养分失调、土壤板结、次生盐渍化等问题,伴有土壤保肥力逐渐降低的现象^[11],还有可能是蔬菜多年连作对土壤养分的消耗加快^[12],综合因素使土壤中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量呈现出随棚龄增加呈先增加后降低的趋势^[13]。

本研究采样时间在夏季休闲期,正值雨季和高温气候,土壤水分大量蒸发,使底层土壤中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 向上移动。随着土层加深,所调查各棚龄土壤中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量呈下降趋势,这可能是由于设施蔬菜大棚长期被塑料薄膜覆盖,得不到雨水冲刷,加之棚内气温、土温较高,氮素随水分蒸发向上移动,表聚现象严重,没有氮源补充的下层氮素随种植年限的增加而降低^[9]。同时,不同棚龄 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在 200 ~ 300 cm 土层中富集较多,可随灌溉水进入 300 ~ 400 cm 土层中,大大增加了地下水污染的风险。调查结果显示,表层土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 虽有高度积累并有向下迁移的特征,但 0 ~ 400 cm 土层土体内并未出现明显的累积峰。解文艳等^[14]研究结果

表明, 种植旱地作物 6 年后的土壤 NO_3^- -N 已淋洗至 220 cm 土层, 由此推断本调查区设施蔬菜土壤中残留的 NO_3^- -N 可能已淋溶至 400 cm 土层以下, 因而在 0 ~ 400 cm 土层土体内未出现累积峰。调查结果显示, 0 ~ 400 cm 土层土体内全氮和 NO_3^- -N 含量呈显著的线性相关, 其决定系数达 0.5213, 表明土壤 NO_3^- -N 含量有一半取决于土壤中的全氮含量; 氮肥投入量越大, 土壤中残留的 NO_3^- -N 越多, 向下淋溶的风险越大^[15]。

调查结果显示, 种植年限对设施蔬菜土壤中 NO_3^- -N 含量的变化也有一定影响。不同棚龄 0 ~ 400 cm 土层土体内 NO_3^- -N 含量高于大田以及随着棚龄增加 NO_3^- -N 含量变化趋势表明: 随着大棚使用年限及肥料投入总量的增加, 设施大棚中 NO_3^- -N 累积现象越来越严重, 20 年棚龄土壤 NO_3^- -N 含量最高, 之后土壤 NO_3^- -N 含量开始降低。这一现象在相关研究中也可看到^[11, 16]。造成这一现象的主要原因: 设施蔬菜大棚为高温高湿环境, 化肥施用量远远超过蔬菜生长所需量, 过量的含氮化肥及有机物料经分解、硝化后转化为硝酸盐累积在土壤中, 导致设施蔬菜土壤以硝酸盐为主的盐分含量急剧升高, 加重了温室大棚土壤的次生盐渍化^[5]。因此, 随着大棚使用年限的延长, 长期大量施用有机肥和无机复合肥使土壤中氮素大量积累, 影响设施蔬菜土壤养分的平衡^[17-18], 使土壤肥力难以提高^[12]、土壤板结和次生盐渍化问题越来越严重, 土壤中 NO_3^- -N 含量降低^[11, 16]。土壤 NO_3^- -N 含量取决于土壤中的全氮含量, 减少氮肥用量可降低土壤中 NO_3^- -N 含量^[19]。因此, 在生产中可通过减少施肥量来降低土壤 NO_3^- -N 含量。

土壤中的氮素一方面可以随灌溉水淋溶至下层土体中, 另一方面在上层土壤富集, 这说明土壤中氮素的累积、淋溶取决于蔬菜生长过程中的施肥量、灌溉量、蔬菜生长周期以及生长环境等因素, 无论是累积还是淋溶都是这些因素共同作用的结果^[20]。

3.2 不同棚龄土壤 Olsen-P 残留特征及其与全磷的关系

磷素具有移动性差、易于积累的特点。设施蔬菜生长过程中不继续施用磷肥, 不能满足蔬菜生长需要, 产量受到影响。因此, 农户大量施用磷肥, 导致土壤中磷素高度积累, 但其中大部分为无效态^[9]。当设施蔬菜生产过程中, 磷肥施用量超过蔬

菜生长所需量和土壤最大吸附量之和时, 富集在土壤中迁移性差的磷素会产生淋溶, 对地下水安全产生不良影响^[15]。

与大田相比, 不同棚龄土壤 Olsen-P 在 0 ~ 60 cm 土层累积量有不同程度的增加, 在 40 cm 土层有向下骤减的垂直分布特征^[21], 表明设施蔬菜土壤磷的表聚现象以及磷的吸附固定高于大田^[3, 9, 22]; Olsen-P 在土壤中的含量随土壤深度的增加而逐渐降低, 说明虽然土壤中磷素的移动性很小, 但设施蔬菜生产长期大量施用磷肥, 表层土壤 Olsen-P 仍有不同程度地向下运移^[21], 周艺敏等^[23]在保护地养分调查中也发现类似现象。随着设施蔬菜大棚使用年限增加, Olsen-P 在土壤中的浓度逐渐提高, 20 年棚龄的最高, 而后开始下降^[24]。这可能是设施蔬菜长期大量施用磷肥, 过量的磷素累积在土壤中, 随着使用年限的延长, 出现土壤板结和次生盐渍化等问题, 导致土壤中磷的有效性降低^[11, 16]。从 0 ~ 100 cm 土层全磷和 Olsen-P 的相关关系可以看出, 约 50% 的土壤 Olsen-P 含量受到全磷量的影响。因此, 磷肥的过量投入会导致更多 Olsen-P 的残留, 特别是 0 ~ 40 cm 土层容易积累较多的 Olsen-P^[3]。

传统观点认为, 土壤对磷的固定能力较强, 磷在土壤中移动性小。当土壤速效磷含量较低时, 磷的淋失量极少^[25]。随着研究的深入, 大量试验表明, 当残留量超过土壤磷素淋失临界值时, 磷移动性增大, 可随水向下层土壤移动, 增加淋溶风险^[26]。2000 年 Hesketh 等^[27]发现, 以土壤 Olsen-P 含量为横坐标, 土壤 CaCl_2 -P 含量为纵坐标作图, 得出的曲线上有一转折点, 与这一点相对应的 Olsen-P 值, 被称为“磷淋失临界值”。当土壤中 Olsen-P 含量低于淋失临界值时, 发生淋溶的可能性较小, 磷素淋失风险低, 对环境影响很小; 当土壤中 Olsen-P 含量达到或高于此值时, 发生淋溶的可能性较大, 磷素淋失风险增加, 对环境产生不良影响^[27-30]。土壤是一个复杂的系统, 不同地区的土壤理化性质、地理条件、农田管理方式等不一样, 导致土壤对磷素吸附、固定能力有所差异, 因此, 不同地区土壤磷淋失临界值及磷素淋溶特性差别较大^[28-29]。文献报道, 我国 23 个不同土壤磷淋失临界值为 30 ~ 156 mg/kg^[31], 农田大多集中在 50 ~ 60 mg/kg 之间, 菜田在 50 ~ 80 mg/kg 之间^[32-33], 英国 8 个差异较大的地区在 13 ~ 119 mg/kg 之间^[34]。

在生产中, 确定施肥量既要考虑保证农作物的产量, 还要考虑过量磷素对环境产生的影响。因此, 磷淋失临界值的确定是生产中极为重要的环节。调查结果显示, 褐土区域土壤中磷淋失临界值为 45.1 mg/kg, 这一值在菜田淋失临界值内^[31]。如果以此为参照, 大部分被调查大棚土壤 0 ~ 40 cm 土层中 Olsen-P 含量超过此值, 都存在淋溶风险。因此, 在设施蔬菜种植中, 在保证设施蔬菜安全生产的前提下, 依据设施蔬菜养分需求规律, 制定出科学的施肥、灌溉等管理方案, 最大程度提高水肥利用率, 降低过量水肥带来的环境影响, 为实现设施蔬菜可持续化、效益化提供科学依据。

4 结论

土壤 NO_3^- -N、Olsen-P 出现表聚现象; 随着设施蔬菜大棚棚龄的增加, 土壤 NO_3^- -N、Olsen-P 含量呈先升高后降低的趋势, 20 年棚龄的最高; 各层土壤中 NO_3^- -N 含量高于相应大田各层; 过量的 NO_3^- -N 可能已迁移至土体下层 300 ~ 400 cm 或更深处; 除 30 年棚龄 60 ~ 100 cm 土层土壤 Olsen-P 含量低于大田外, 其余棚龄及土层含量均高于大田。

所调查褐土区土壤中磷素淋失临界值为 45.1 mg/kg, 大部分被调查大棚土壤 0 ~ 40 cm 土层存在淋溶风险。

参考文献:

- [1] Li J G, Xin W, Liu X X, et al. Changes in soil physical and chemical characteristics in intensively cultivated greenhouse vegetable fields in North China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 195 (C): 104366.
- [2] Luan H A, Gao W, Tang J W, et al. Aggregate-associated changes in nutrient properties, microbial community and functions in a greenhouse vegetable field based on an eight-year fertilization experiment of China [J]. *Journal of Integrative Agriculture* 2020, 19 (10): 2530-2548.
- [3] Lu F, Zhao M Q, Chen X, et al. Effects of phosphorus accumulation in soil with the utilization ages of the vegetable greenhouses in the suburb of Shenyang [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 8: 16-20.
- [4] Bai X L, Gao J J, Wang S C, et al. Excessive nutrient balance surpluses in newly built solar greenhouses over five years leads to high nutrient accumulations in soil [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 288 (C): 106717.
- [5] 杜新民, 吴忠红, 张永清, 等. 不同种植年限日光温室土壤盐分和养分变化研究 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21 (2): 78-80.
- [6] Tian K, Xing Z, Kianpoor K Y, et al. Excessive phosphorus inputs dominate soil legacy phosphorus accumulation and its potential loss under intensive greenhouse vegetable production system [J]. *Journal of Environment Management*, 2022, 303: 114149.
- [7] 钞锦龙, 郝小梅, 胡磊, 等. 棚龄、灌溉方式对大棚土壤盐分及 pH 的影响 [J]. *山西农业科学*, 2021, 49 (1): 59-63.
- [8] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值 [J]. *生态学报*, 2004, 24 (10): 2275-2280.
- [9] 郑学东. 不同年限保护地土壤养分动态变化及盐分积累的研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [10] Zhang H Y, Hua K L, Zhang L J, et al. Exploring optimal catch crops for reducing nitrate leaching in vegetable greenhouse in North China [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 273-282.
- [11] 熊汉琴. 种植年限对蔬菜大棚土壤肥力的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- [12] 杨建军, 康恩祥, 陈年来. 不同种植年限日光温室土壤肥力与土壤酶活性的变化规律 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40 (9): 141-146.
- [13] 吴忠红. 山西中南部设施条件下土壤养分状况及生物特征研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [14] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 旱地春玉米地表覆盖对土壤硝态氮残留的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29 (4): 158-164.
- [15] Yan Z J, Chen S, Li J L, et al. Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 26-35.
- [16] 徐晓锋, 苗艳芳, 张菊萍, 等. 保护地土壤氮、磷积累及影响研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16 (2): 292-296.
- [17] 韩巍, 赵金月, 李豆豆, 等. 设施蔬菜大棚土壤氮磷钾养分富积降低土壤钙素的有效性 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (4): 1019-1026.
- [18] Hu W Y, Zhang Y X, Huang B, et al. Soil environmental quality in greenhouse vegetable production systems in eastern China: Current status and management strategies [J]. *Chemosphere*, 2017, 170: 183-195.
- [19] 郭文龙, 党菊香, 郭俊炜, 等. 不同利用年限蔬菜温室土壤性质垂直变化研究 [J]. *水土保持研究*, 2009, 16 (2): 262-264, 268.
- [20] 张迪, 赵牧秋, 牛明芬, 等. 有机肥对设施土壤硝态氮垂直分布的影响 [J]. *土壤通报*, 2011, 42 (5): 1148-1152.
- [21] Kianpoor K Y, Huang B, Sørensen H, et al. Phosphorus accumulation and leaching risk of greenhouse vegetable soils in Southeast China [J]. *Pedosphere*, 2021, 31 (5): 683-693.
- [22] Guan X L, Liu C Y, Li Y, et al. Reducing the environmental risks related to phosphorus surplus resulting from greenhouse

- cucumber production in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 130076.
- [23] 周艺敏, 小仓宽典. 半干旱地区菜园土壤特征及土壤持续利用 [J]. *植物营养与肥科学报*, 1997, 4 (3): 315-322.
- [24] 张菊, 董杰, 邓焕广, 等. 山东聊城不同种植年限蔬菜大棚土壤理化性质的演变 [J]. *土壤通报*, 2016, 47 (5): 1119-1125.
- [25] 何传龙, 马友华, 于红梅, 等. 减量施肥对保护地土壤养分淋失及番茄产量的影响 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2010, 16 (4): 846-851.
- [26] 刘京. 长期施肥下紫色土磷素累积特征及其环境风险 [D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [27] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of Phosphorus leaching [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 105-110.
- [28] 张世民, 热汗古丽·阿不拉, 朱友娟, 等. 阿克苏地区春玉米磷阈值研究 [J]. *新疆农业科学*, 2016, 53 (3): 455-460.
- [29] 周佳欢, 刘善江, 李克庆, 等. 农学阈值与环境阈值的土壤有效磷含量及其相互关系研究进展 [J]. *湖北农业科学*, 2019, 58 (S2): 215-218.
- [30] Jalali M, Jalali M. Assessment risk of phosphorus leaching from calcareous soils using soil test phosphorus [J]. *Chemosphere*, 2017, 171: 106-117.
- [31] 赵小蓉, 钟晓英, 李贵桐, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 II. 淋失临界值与土壤理化性质和磷吸附特性的关系 [J]. *生态学报*, 2006, 26 (9): 3011-3017.
- [32] 刘蕾, 王凌, 徐万强, 等. 设施土壤磷素淋失环境阈值及防控措施 [J]. *华北农学报*, 2019, 34 (增刊): 197-203.
- [33] 严娟. 施用粪肥对设施菜田土壤磷素形态与移动性的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [34] 刘晶晶. 苹果主产区土壤磷素状况、淋失阈值及阻遏技术研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.

The nitrogen and phosphorus residue in greenhouse vegetable soils with different planting years in cinnamon soil region of Shanxi

LI Li-jun^{1, 2}, LIU Ping^{1, 2*}, MA Lin-jie³, HUI Wei³, MA Qi-qi³, HUO Xiao-lan^{1, 2} (1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan Shanxi 030031; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources of Shanxi Province, Taiyuan Shanxi 030031; 3. College of Life Science, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030006)

Abstract: The soil nutrient status of facilities greenhouse vegetable was greatly affected by the high intensive cultivation and management, and the trend of soil nitrogen and phosphorus residues was not clear with the increase of planting years. To evaluate the impact of long-term application of large amounts of manure and inorganic compound fertilizer on protected soil, and to determine the phosphorus leaching threshold value, field research and lab analysis were used to clarify the relationship between the nutrient residues in greenhouse soil and planting years. Based on this, the soils of facility vegetable field, located in Taigu, Shanxi province, were used as samples, and the content of nitrogen and phosphorus residues and migration characteristics of greenhouse soil in cinnamon soil with planting age of 0, 10, 20 and 30 years were analyzed. The results exhibited that NO_3^- -N and Olsen-P mainly accumulated in the surface soil of different greenhouse age. With the depth of soil layer increased, the content of NO_3^- -N decreased, and the NO_3^- -N content in 0 ~ 100 cm layer was higher significantly than that of 100 ~ 200, 200 ~ 300 and 300 ~ 400 cm layer of different planting ages, respectively. The NO_3^- -N contents in 0 ~ 100 cm layer were 34.9%, 43.4%, 40.9% of that of 100 ~ 200, 200 ~ 300 and 300 ~ 400 cm layer, respectively, and the maximum amount of NO_3^- -N accumulation was achieved in 20 planting years. The NO_3^- -N content of different planting years was higher than that of the open field. The Olsen-P accumulation in 0 ~ 20 cm first increased, and then decreased with the increasing of greenhouse age. The Olsen-P (0 ~ 40 cm) content of different cultivated year was 3.8 ~ 5.6 times of the open field, and Olsen-P content of 20 planting years was the highest. The Olsen-P content decreased abruptly from 40 cm depth, and it was 24.66 mg/kg in top-soil of open field which was close to that of 20 ~ 40 cm of 10 planting years and 40 ~ 60 cm of 20 planting years. A significant correlation were found between the NO_3^- -N content and total nitrogen content in 0 ~ 400 cm, and a power relationship was found between Olsen-P and total P in 0 ~ 100 cm layer, both of which indicated that about 50% NO_3^- -N and about 50% Olsen-P contents were depended on total nitrogen and phosphorus content in soil, respectively. The phosphorus leaching threshold value was 45.1 mg/kg of Olsen-P content in cinnamon soil region of Shanxi. In practice, a large amount of NO_3^- -N and Olsen-P were accumulated in surface soils (0 ~ 20 cm) due to excessive and irrational fertilization in vegetable productions within short-term, which might be leading to NO_3^- -N and Olsen-P pollution in groundwater under flood irrigation conditions.

Key words: cinnamon soil region of Shanxi; greenhouse vegetable; planting years; soil nutrient residues; phosphorus leaching threshold value