

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.01.005

贾萌萌, 刘国明, 黄标. 设施菜地利用强度对土壤磷形态分布及其有效性的影响——以江苏省水耕人为土和潮湿锥形土为例. 土壤, 2021, 53(1): 30–36.

设施菜地利用强度对土壤磷形态分布及其有效性的影响——以江苏省水耕人为土和潮湿锥形土为例^①

贾萌萌^{1,2}, 刘国明^{1,2}, 黄标^{1*}

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 以江苏省水耕人为土和潮湿锥形土两种土壤类型为对象, 研究了设施菜地利用强度对土壤磷形态分布及其有效性的影响。结果表明: 随利用强度增加, 两种土壤类型的各磷形态含量均有所增加, 以水溶态磷和铝结合态磷(Al-P)增加最为显著($P<0.05$)。而水耕人为土闭蓄态磷(O-P)占总磷百分比和潮湿锥形土残渣态磷占总磷百分比随利用强度增加则表现出显著降低的趋势($P<0.05$)。回归分析结果表明, 水耕人为土有效磷主要来自于铁结合态磷(Fe-P)和 Al-P; 潮湿锥形土有效磷主要来自于水溶态磷和钙结合态磷(Ca-P), 且以前者更为重要。另外, 设施蔬菜生产增加了土壤磷淋失的风险, 尤其是潮湿锥形土。水—旱轮作并结合减少施肥量可能是降低设施土壤磷淋失风险的一个有效措施。

关键词: 设施蔬菜; 水耕人为土; 潮湿锥形土; 磷有效性; 磷形态

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Effects of Greenhouse Vegetable Cultivation on Fractionations and Bioavailability of Soil Phosphorus—A Case Study on Paddy Soil and Fluvo-aquic Soil in Jiangsu Province

JIA Mengmeng^{1,2}, LIU Guoming^{1,2}, HUANG Biao^{1*}

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to understand the influence of management strategies of greenhouse vegetable production (GVP) on the fractions and bioavailability of soil phosphorus(P), soil samples encompassing a wide range of P status were collected in two typical GVP bases in Jiangsu Province: one with paddy soil in Guli Village of Nanjing City and one with fluvo-aquic soil in Xiahu Village of Xuzhou City, and the basic physiochemical properties and P fractions of the soil samples were analyzed. It was shown that Fe-P, O-P and organic P predominated in the paddy soil, while Ca-P contributed the most in the fluvo-aquic soil. With the increase of utilization intensity, the concentrations of soil available P, soluble P, Al-P, Fe-P, organic P and residual P in the paddy soil, the concentrations of soil available P, soluble P, Al-P, O-P, Ca-P and organic P in the fluvo-aquic soil, the percentages of W-P and Al-P to total P for both soil types were increased significantly ($P<0.05$), but O-P in paddy soil and residual P in fluvo-aquic soil were decreased significantly ($P<0.05$). Stepwise regression analyses revealed that Olsen-P was mainly contributed by Fe-P and Al-P in paddy soil, while by W-P and Ca-P in fluvo-aquic soil. It was worth noting that intensive agricultural inputs in GVP might increase the risk of P loss, especially for fluvo-aquic soil. Therefore, appropriate management strategies, such as paddy-upland rotation and lower fertilizer rate, are necessary to improve the bioavailability of soil P and achieve a sustainable progress of GVP.

Key words: Greenhouse vegetable production; Paddy soil; Fluvo-aquic soil; P bioavailability; P fractions

磷(P)是植物生长发育所必需的大量营养元素之一。植物吸收利用的磷主要来源于土壤^[1]。土壤中的

磷主要分为有机态磷和无机态磷两大类,后者又包括矿物态磷、吸附态磷和土壤溶液中的磷^[2]。植物吸收

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41473073)和环保公益性行业科研专项项目(201409044)资助。

* 通讯作者(bhuang@issas.ac.cn)

作者简介: 贾萌萌(1987—), 女, 河北曲周人, 博士研究生, 主要从事土壤元素地球化学过程研究。E-mail: mmjia@issas.ac.cn

利用的磷主要为土壤溶液中的磷与有机态磷矿化分解产生的小分子有机态磷或无机态磷^[3]。不同磷形态的植物有效性明显相同。土壤中磷的形态分布和转化方向对其生物有效性起着决定性作用^[4]。因此,研究磷形态分布对于评价土壤供磷状况,了解土壤-植物磷迁移过程具有重要意义。

因反季节种植、复种指数和经济效益较高等特点,设施蔬菜在我国发展迅速。至2016年,全国设施蔬菜种植面积达391.5万hm²,产量为2.5亿t,约占蔬菜总产量的30.5%^[5]。高产出、高收益的同时,也必然伴随着各种肥料的过量投入,尤其是有机肥。以山东寿光市为例,设施蔬菜单位种植面积的施肥量是小麦-玉米轮作模式的6倍~14倍^[6]。设施蔬菜种植过程中,往往以蔬菜氮需求作为肥料施用量的条件,加之肥料中磷普遍偏高,而作物对磷的利用率很低(5%~15%)^[7],所以,大量的磷素残留下来,磷积累成为设施蔬菜土壤的一个典型特征^[8]。对于露天菜地,施用有机肥可以增加土壤中活性、中等活性磷的含量,降低稳定态磷的含量^[9]。王伯仁等^[10]发现,长期施用有机肥有利于红壤旱地钙结合态磷(Ca-P)和铝结合态磷(Al-P)的积累,而闭蓄态磷(O-P)则保持相对稳定。设施蔬菜生产条件下,土壤其他理化性质变化程度也异常剧烈,例如酸化现象明显^[11]、有机质(OM)含量显著增加^[12]等,这些对磷形态分布及其转化过程起着重要的作用。与普通农田土壤相比,设施蔬菜土壤磷形态转化过程可能有所不同。另外,设施蔬菜土壤磷过度积累,可能通过径流或淋溶的方式离开土体,进而导致周围水体环境污染^[13]。

江苏省是我国设施蔬菜的一个重要生产区域。受成土母质、地球化学过程、人为活动等因素的影响^[14],不同类型土壤的磷形态分布可能会存在明显差异,但迄今为止关于这方面的报道仍较为少见。因此,本文以江苏省水耕人为土和潮湿锥形土上的设施菜地为对象,研究了不同利用强度下土壤磷形态分布特征及其有效性,以期了解设施蔬菜种植过程中土壤磷形态分布及其有效性的变化规律,查明土壤磷有效性的主要影响因素,为选择适宜的设施蔬菜肥料管理方式及避免地下水污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样区概况

土壤样品采自江苏省两个典型设施蔬菜种植区域:南京市江宁区谷里村(31.89°N, 118.67°E)和徐州市铜山区下湖村(34.15°N, 117.25°E)。其中,谷

里村土壤是由下蜀黄土母质发育形成的水耕人为土;下湖村土壤则是由河流冲积物发育形成的潮湿锥形土^[15]。谷里村设施类型为塑料大棚,种植年限在12a左右,全年种植蔬菜,施肥以有机肥为主,年均用量为14.9 t/hm²;下湖村设施类型包括日光温室和塑料大棚两种,种植年限长达30a之久,种植方式包括全年种植蔬菜或蔬菜-水稻轮作,年均有机肥用量介于121~447 t/hm²。两个地区复合肥年均用量类似,均在3 t/hm²左右。

1.2 土壤样品采集

采样区域内,将谷里村种植年限>10、5~10、1~5a的设施大棚和下湖村种植年限>20、10~20、1~10a的设施大棚分别确定为强度、中度和轻度3种利用强度。每个利用强度选择4个蔬菜大棚为重复,即每个种植区域内确定12个设施大棚为采样点。每个大棚内,在3m×4m范围内采用梅花型5点法采集表层(0~20cm)土壤,混合均匀后,按照四分法留取1kg左右土样带回实验室,土样经自然风干,剔除根系、石砾、砖瓦等杂物后,利用木槌研磨过2.0mm尼龙筛备用。然后取其中约50g土壤,用玛瑙研钵研磨过0.149mm尼龙筛,分别用于不同土壤属性的测定分析。

1.3 土壤性质测定

pH采用电位法测定(1:2.5土水比);OM采用外加热重铬酸钾-硫酸消化法测定;全氮(TN)采用半微量凯氏法测定;土壤粒径分布采用吸管法测定;全磷(TP)采用HClO₄-HF-HCl消煮,钼锑抗比色法测定;有效磷(Olsen-P)采用0.5 mol/L NaHCO₃溶液提取,钼锑抗比色法测定,具体步骤见《土壤调查实验室分析方法》^[16]。

土壤磷形态测定参考《土壤农化分析》^[17],主要步骤见表1。其中,有机态磷(Or-P)灼烧提取的同时,另外称取相同质量的土壤样品,未经灼烧。灼烧与未经灼烧的土壤含磷量的差值,即为Or-P含量。土壤TP含量与上述磷形态相减之后得到的值即为残渣态磷(Re-P)。每个土壤样品的提取设置3个重复,提取液中的磷浓度采用钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理

采用IBM Statistics SPSS20.0软件进行数据统计分析, Sigmaplot 12.5软件进行作图。通过单因素方差分析(One-Way ANOVA)和LSD(最小显著性差异法)对数据进行差异显著性检验和多重比较($P<0.05$)。

表 1 土壤磷形态连续提取主要步骤
Table 1 Sequential extraction procedures for soil P fraction analysis

提取液	主要处理步骤	磷形态
1 mol/L NH ₄ Cl	振荡 30 min, 离心(3 500 r/min, 8 min), 过滤, 定容	水溶态磷(W-P)
0.5 mol/L NH ₄ F(pH 8.2)	振荡 1 h, 离心(3 500 r/min, 8 min), 过滤, 定容	铝结合态磷(Al-P)
0.1 mol/L NaOH	振荡 2 h, 静置 16 h, 再振荡 2 h, 离心(4 500 r/min, 10min); 倒出上清液于三角瓶中, 加入 1.5 ml 浓 H ₂ SO ₄ , 摇匀后放置过夜, 吸取一定量提取液于容量瓶中, 定容	铁结合态磷(Fe-P)
0.3 mol/L 柠檬酸钠-连二亚硫酸钠	80 ~ 90 °C 水浴加热 15 min, 加入 0.5 mol/L NaOH 溶液, 搅拌 10 min, 冷却后离心(4 500 r/min, 10 min), 定容; 吸取一定量上述溶液, 与 H ₂ SO ₄ +HNO ₃ +HClO ₄ 混合液高温消化, 直至 H ₂ SO ₄ 回流, 定容	闭蓄态磷(O-P)
0.25 mol/L H ₂ SO ₄	振荡 1 h, 离心(3 500 r/min, 8min), 过滤, 定容	钙结合态磷(Ca-P)
0.1 mol/L H ₂ SO ₄	550 °C 灼烧 1 h 后, 用稀硫酸溶液将残渣洗入容量瓶中, 40 °C 条件下保温 1 h, 定容	有机态磷(Or-P)

2 结果与分析

2.1 设施菜地土壤基本理化性质

供试水耕人为土 pH 呈酸性, 黏粒含量在 258.90 ~ 333.41 g/kg, 属粉砂质黏壤土; OM 和 TN 含量分别在 20.01 ~ 28.37 g/kg 和 1.22 ~ 1.55 g/kg。潮湿锥形土 pH 呈

中性至碱性, 黏粒含量在 138.71 ~ 185.53 g/kg, 属粉砂质壤土。OM 和 TN 含量分别在 22.03 ~ 28.95 g/kg 和 1.40 ~ 1.92 g/kg。随设施菜地利用强度增加, 两种土壤类型的 OM 和 TN 含量呈明显上升趋势, 且达到显著水平($P<0.05$), 而潮湿锥形土 pH 表现为显著下降($P<0.05$)(表 2)。

表 2 不同设施菜地利用强度土壤基本理化性质
Table 2 Basic physiochemical properties of greenhouse soils with various utilization intensities

土壤类型	利用强度	pH	OM(g/kg)	TN(g/kg)	黏粒(g/kg)	TP(g/kg)	Olsen-P(mg/kg)
水耕人为土	强度	5.27 ± 1.00 a	28.37 ± 3.14 a	1.55 ± 0.08 a	310.42 ± 14.1 a	1.45 ± 0.27 a	120.02 ± 19.00 a
	中度	5.26 ± 0.52 a	28.10 ± 2.93 a	1.45 ± 0.18 a	303.14 ± 27.48 a	1.14 ± 0.18 a	84.69 ± 8.63 b
	轻度	5.34 ± 0.39 a	20.01 ± 4.98 b	1.22 ± 0.10 b	286.02 ± 25.19 a	0.78 ± 0.07 b	47.85 ± 4.43 c
潮湿锥形土	强度	7.36 ± 0.03 c	28.95 ± 3.25 a	1.92 ± 0.06 a	152.53 ± 13.02 a	3.23 ± 0.15 a	682.02 ± 109.18 a
	中度	7.56 ± 0.18 b	27.18 ± 3.80 a	1.63 ± 0.16 b	158.03 ± 11.14 a	2.54 ± 0.31 b	368.12 ± 69.78 b
	轻度	7.66 ± 0.05 a	22.03 ± 0.86 b	1.40 ± 0.07 c	175.54 ± 16.20 a	1.12 ± 0.29 c	126.70 ± 16.35 c

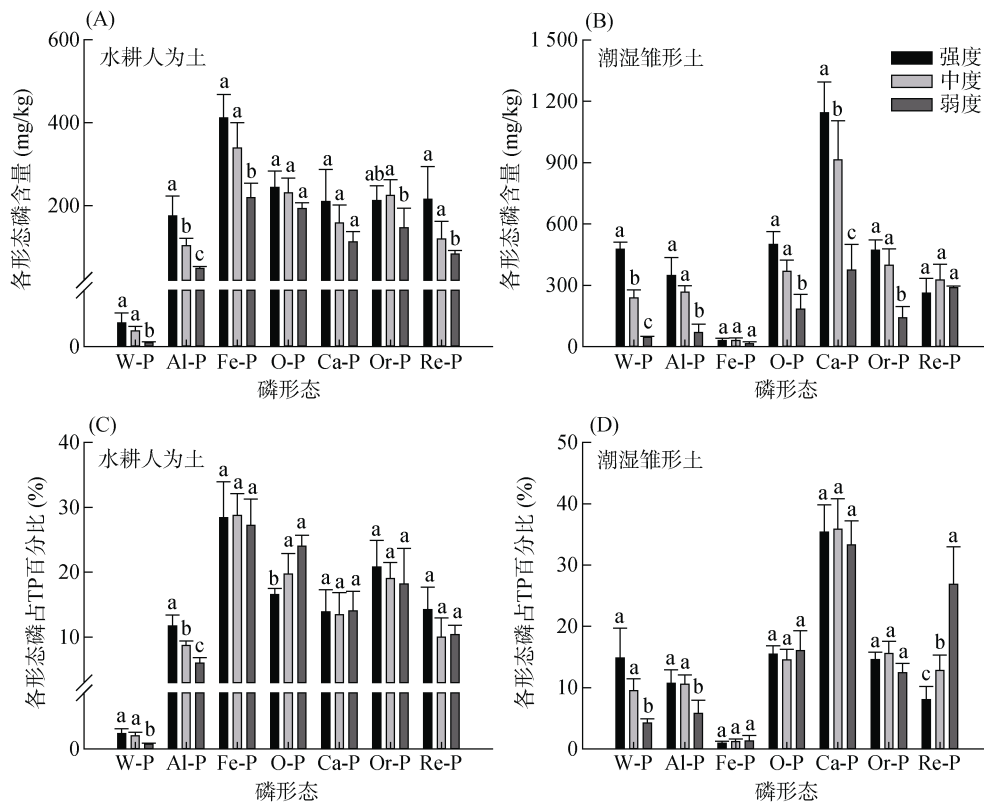
注: 表中不同小写字母表示同一类型土壤上不同利用强度设施菜地在 $P<0.05$ 水平上存在显著差异。

供试水耕人为土 TP 和 Olsen-P 含量分别为 0.78 ~ 1.45 g/kg 和 47.85 ~ 120.02 mg/kg, 潮湿锥形土 TP 和 Olsen-P 含量分别为 1.12 ~ 3.23 g/kg 和 126.70 ~ 682.02 mg/kg。强度利用条件下, 水耕人为土和潮湿锥形土 TP 平均含量分别是轻度利用条件下的 1.86 倍和 2.88 倍; Olsen-P 平均含量分别是轻度利用条件下的 2.51 倍和 5.38 倍(表 2)。方差分析结果表明, 随设施菜地利用强度增加, 两种土壤类型的 TP 和 Olsen-P 含量均表现为显著增加($P<0.05$)。

2.2 设施菜地不同利用强度土壤磷形态分布

供试水耕人为土和潮湿锥形土各磷形态含量及其占 TP 的百分比如图 1 所示。水耕人为土各磷形态

含量呈以下分布规律: Fe-P>O-P>Or-P>Ca-P>Re-P>Al-P>W-P。其中, Fe-P、O-P 和 Or-P 含量分别为 219.32 ~ 412.17、192.91 ~ 244.17 和 146.88 ~ 212.58 mg/kg, 分别占 TP 的 22.06% ~ 34.41%、15.15% ~ 25.18% 和 10.93% ~ 23.65%; W-P 和 Al-P 含量分别为 0.69 ~ 4.20 和 48.37 ~ 175.04 mg/kg, 仅占到 TP 的 0.09% ~ 0.28% 和 6.03% ~ 11.72%。潮湿锥形土各磷形态以 Ca-P 优势最为明显, 其含量为 302.25 ~ 1 300.66 mg/kg, 占 TP 的 28.52% ~ 41.77%; W-P、Al-P 和 Or-P 含量分别在 45.91 ~ 475.51、68.81 ~ 349.04 和 141.94 ~ 472.34 mg/kg, 分别占 TP 的 4.22% ~ 14.84%、5.80% ~ 10.73% 和 11.01% ~ 18.32%。



(图中不同小写字母表示同一形态磷在不同利用强度下差异在 $P<0.05$ 水平显著)

图 1 不同设施菜地利用强度土壤各磷形态含量及占比

Fig. 1 Concentrations and proportions of phosphorous fractions in greenhouse soils with various utilization intensities

土壤各磷形态含量随设施蔬菜利用强度增加基本呈增加趋势。由图 1A、1B 可知，强度利用条件下，水耕人为土 W-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca-P、Or-P 和 Re-P 平均含量分别是轻度利用条件下的 6.09 倍、3.62 倍、1.88 倍、1.27 倍、1.86 倍、1.45 倍和 2.58 倍；潮湿锥形土 W-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca-P、Or-P 和 Re-P 平均含量分别是轻度利用条件下的 10.36 倍、5.07 倍、2.18 倍、2.72 倍、3.05 倍、3.33 倍和 0.91 倍。方差分析结果表明，与轻度利用相比，强度利用条件下水耕人为土 W-P、Al-P、Fe-P 和 Re-P 含量显著增加($P<0.05$)，潮湿锥形土 W-P、Al-P、O-P、Ca-P 和 Or-P 含量增加也达到显著水平($P<0.05$)。

然而，各磷形态占 TP 百分比的变化规律则有所不同(图 1C、1D)。与轻度利用相比，强度利用条件下水耕人为土 O-P 和潮湿锥形土 Re-P 分别下降了 7.41% 和 18.79%，且其下降量达到显著水平($P<0.05$)；而水耕人为土 W-P 和 Al-P 分别增长了 0.19% 和 5.69%，潮湿锥形土 W-P 和 Al-P 分别增长了 10.62% 和 4.92%，两种土壤类型 W-P 和 Al-P 的增长量也都达到显著水平($P<0.05$)。

2.3 设施菜地土壤磷形态与 Olsen-P 相关性

水耕人为土和潮湿锥形土的 Olsen-P 含量与各形

态磷含量相关分析结果分别如表 3 和表 4 所示。水耕人为土 Olsen-P 含量与 W-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca-P、Or-P 和 Re-P 含量呈极显著正相关($P<0.01$)；潮湿锥形土 Olsen-P 含量与 W-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca-P 和 Or-P 含量呈极显著正相关关系($P<0.01$)。除 Or-P 之外，水耕人为土其他各磷形态相关性均达到显著($P<0.05$)或极显著水平($P<0.01$)。同样地，潮湿锥形土除 Re-P 外，其他各磷形态之间相关性也都达到了显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)水平。这可能与过量肥料投入导致各磷形态含量均有所增加有关。

表 3 水耕人为土土壤磷形态与 Olsen-P 的相关分析

Table 3 Pearson's correlation coefficients between Olsen-P and P fractions of paddy soil

	Olsen-P	W-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	Or-P
W-P	0.91**	1					
Al-P	0.96**	0.94**	1				
Fe-P	0.78**	0.69*	0.76**	1			
O-P	0.74**	0.84**	0.76**	0.61*	1		
Ca-P	0.76**	0.84**	0.83**	0.43	0.53*	1	
Or-P	0.42	0.34	0.38	0.53	0.31	0.18	1
Re-P	0.84**	0.85**	0.92**	0.59*	0.61*	0.92**	0.21

注：**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关(双侧)，*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关(双侧)；下同。

表 4 潮湿锥形土土壤磷形态与 Olsen-P 的相关分析
Table 4 Pearson's correlation coefficients between Olsen-P and P fractions of fluvo-aquic soil

	Olsen-P	W-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	Or-P
W-P	0.94**	1					
Al-P	0.77**	0.73**	1				
Fe-P	0.49**	0.36 *	0.67**	1			
O-P	0.86**	0.76**	0.95**	0.71**	1		
Ca-P	0.82**	0.71**	0.89**	0.59*	0.90**	1	
Or-P	0.80**	0.78**	0.90**	0.55*	0.87**	0.86**	1
Re-P	-0.16	-0.07	-0.02	-0.02	-0.10	-0.10	0.28

表 5 土壤 Olsen-P 与各磷形态逐步回归分析结果
Table 5 Stepwise regression of soil Olsen-P and P fractions

土壤类型	回归方程	R ²	显著性
水耕人为土	Olsen-P = 0.27 Al-P + 0.14 Fe-P + 9.09	0.92	P<0.001
潮湿锥形土	Olsen-P = 0.91 W-P + 0.20 Ca-P - 8.28	0.93	P<0.001

3 讨论

3.1 设施菜地利用强度对土壤性质的影响

设施菜地土壤 OM、TN、TP 和 Olsen-P 含量均表现为随利用强度增加而显著增加($P<0.05$)。已有研究表明,设施菜地种植一段时间之后,土壤 OM 含量明显增加($P<0.001$)^[18],TP 和 Olsen-P 含量分别可达普通农田土壤的 2 倍^[19]和 5 倍^[20]左右。这主要是由于设施蔬菜种植过程中,过量肥料(尤其是有机肥)的投入,远远超过了蔬菜本身所需量,导致土壤出现养分积累现象^[12,21]。除营养元素之外,化学肥料也向土壤中带入了大量的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等强酸性离子,使得 pH 呈下降趋势^[22]。另外,铵盐的硝化作用也会促进土壤酸化过程^[23],这与本文中潮湿锥形土 pH 随利用强度增加而显著降低($P<0.05$)的结果相一致。同样地,Kong 等^[24]也指出,与邻近露天土壤相比,设施菜地土壤 pH 下降了 0.86 个单位。

3.2 设施菜地不同利用强度土壤磷形态分布

一般情况下,无机态磷是农田土壤磷的主要部分,约占 TP 的 60%~80%^[25]。本研究中,水耕人为土和潮湿锥形土无机磷总量分别占 TP 含量的 70.93%~71.39% 和 60.70%~77.33%。根据所结合的主要阳离子,通常将无机态磷分为 Fe-P、Al-P、O-P 和 Ca-P 四种形态^[26]。其中,Fe-P 和 Al-P 是酸性土壤无机态磷的主要成分,Ca-P 是石灰性土壤无机态磷的主要形态^[3]。由图 1 可知,Fe-P 和 O-P 是水耕人为土无机态磷的主要形态,而 Al-P 所占比例相对较小,这可能与酸性富铁环境下 Al-P 向 Fe-P 转化有关^[27];在潮湿锥形土中,Ca-P 是最为主要的无机态

为进一步筛选出对设施菜地土壤 Olsen-P 含量有显著影响的磷形态,建立“最优”回归方程以便对 Olsen-P 含量进行有效预测和控制,本文以 Olsen-P 含量为因变量,W-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca-P、Or-P 和 Re-P 含量为自变量,进行逐步回归分析(表 5)。结果表明,水耕人为土 Olsen-P 含量大小主要受 Al-P 和 Fe-P 含量的影响($P<0.001$),而潮湿锥形土 Olsen-P 水平主要受 W-P 和 Ca-P 含量的影响($P<0.001$),且 W-P 含量效果较为显著。

磷,这主要是由于江苏苏北土壤多来自黄泛冲积物,母质钙含量较高,加之旱作条件下,钙淋失程度较低所致。各磷形态中,W-P 是含量最低的一种,在水耕人为土中尤其偏低(0.09%~0.28%),这主要与该类型土壤铁、铝氧化物和黏粒含量较高,对磷的吸附固定能力较强有关^[28]。土壤 Or-P 含量的大小与多种因素有关,例如:成土母质、风化过程、土壤性质、土地利用方式等,一般认为,TP 含量越高的土壤,Or-P 含量也越高^[29]。本文中,水耕人为土和潮湿锥形土 Or-P 占 TP 的百分比比较接近,表明 TP 有可能是决定 Or-P 含量的主要因素。

设施蔬菜种植过程中,土壤各磷形态含量存在不同程度的增加(图 1A、B),以 W-P 和 Al-P 含量增加最为明显,其占 TP 的百分比随利用强度增加而显著增加($P<0.05$)(图 1C、D)。然而,水耕人为土 O-P 和潮湿锥形土 Re-P 占 TP 的百分比则表现为相反的变化规律,即随利用强度增加而显著下降($P<0.05$)。这与多方面因素有关,一方面,施肥在向土壤带入少量活性磷的同时^[30],也导致了 OM 的积累。OM 在分解过程中释放的有机酸、腐殖质酸等物质会通过竞争吸附或螯合等方式,抑制矿物对磷的吸附或沉淀反应^[31-32];另一方面,设施菜地土壤酸化可以增加土壤中磷酸盐的溶解度,促进难溶态磷向可利用态磷的转化,抑制难溶态磷的生成^[33]。与上述几种磷形态不同,Or-P 占 TP 的百分比保持在一个相对稳定的水平。这是由于长期施用有机肥会导致土壤氮磷比(N/P)下降,成为一个氮限制体系,不利于 Or-P 的积累^[34]。本研究中,水耕人为土和潮湿锥形土 N/P 比分别为 1.09 和 0.78,明显低于全国和江苏省土壤

N/P 比(1.23 和 1.58), 恰好也证实了这一猜测。此外, 设施蔬菜高温、高热生产条件下, 也有可能加速 Or-P 的矿化过程。以上分析表明设施蔬菜种植过程中, 施肥不仅增加了土壤中各磷形态的含量, 而且改变了磷形态的分布特征, 即 W-P 和 Al-P 的比重明显增加。

3.3 设施菜地土壤磷形态分布与磷生物有效性关系

土壤中磷的生物有效性取决于磷的形态分布及其转化方向。鲁如坤^[35]指出, 酸性水耕人为土 Olsen-P 水平主要是由 Fe-P 含量多少决定的。但是, 盆栽试验结果表明, 随磷肥施用时间的延长, 水耕人为土 Al-P 逐渐向 Fe-P 转化, 水稻吸收的磷主要来源于 Al-P 和 Fe-P^[36]。不仅如此, 有机肥矿化分解释放的小分子有机酸也有可能活化 Al-P 和 Fe-P, 使其被植物吸收利用^[37]。结合本文中 Olsen-P 与各磷形态逐步回归分析结果, 本研究认为, 水耕人为土 Olsen-P 的主要来源为 Fe-P 和 Al-P。对于潮湿雏形土, Olsen-P 含量大小主要受 W-P 和 Ca-P 的影响, 且 W-P 的作用最为显著, 这与已有的研究结果略有区别。顾益初和钦绳武^[38]将 Ca-P 进一步划分为 Ca₂-P、Ca₈-P 和 Ca₁₀-P 后, 发现 Ca₂-P 是石灰性土壤 Olsen-P 的最主要来源, Al-P、Fe-P 和 Ca₈-P 可以作为缓效磷源。在本研究中, 由于未将 Ca-P 进行进一步划分, 尚不能够解释 Ca₂-P、Ca₈-P 和 Ca₁₀-P 对潮湿雏形土 Olsen-P 的贡献情况, 这将是下一步的研究工作。水耕人为土中, W-P 对 Olsen-P 作用并不显著, 这可能是由于 W-P 含量极低所导致的。

3.4 设施菜地土壤磷淋失风险

设施蔬菜种植过程中, 过量施肥导致土壤磷含量不断增加, 活性较高的 W-P 含量增加尤为显著, 若是灌水措施不恰当, 就有可能增加磷淋失的风险。已有研究表明, 水耕人为土和潮湿雏形土 Olsen-P 的淋溶阈值分别为 82.7 mg/kg^[39]和 40.0 mg/kg^[40], 当 Olsen-P 含量超过该值时, 磷就会以淋溶的方式离开土体。本研究中, 潮湿雏形土 Olsen-P 含量在 126.70 ~ 682.07 mg/kg, 已明显超出其对应的淋溶临界值; 水耕人为土只有在强度利用条件下, 才有可能存在磷淋失风险。这与 Kalkhaje 等^[41]研究结果相一致: 随设施菜地利用强度增加, 潮湿雏形土磷淋失量呈指数增加。两种土壤类型磷淋失风险存在明显差异, 除了与其土壤性质有关之外, 可能与其种植年限也有关系。除此之外, N/P 比下降, 会影响作物对磷的吸收利用, 更多的磷积累在土壤中, 从而有可能出

现土壤磷吸附量趋向饱和状态^[42]。加之设施蔬菜生产体系本身具有高灌溉、强淋溶的特点, 土壤磷淋失的风险也随之增加^[43]。因此, 在设施蔬菜种植过程中, 应密切关注土壤磷淋失情况, 尤其是潮湿雏形土。针对上述情况, 于潮湿雏形土而言, 可以通过水-旱轮作并结合减少施肥量的方式, 提高土壤磷的生物有效性, 降低磷淋失风险, 实现设施蔬菜高效、可持续发展。

4 结论

1) 设施蔬菜种植过程中, 土壤 OM、TN、TP 和 Olsen-P 积累显著($P < 0.05$), 潮湿雏形土酸化现象明显($P < 0.05$)。

2) 水耕人为土中, Fe-P、O-P 和 Or-P 含量较高, 潮湿雏形土中以 Ca-P 优势最为明显。

3) 设施蔬菜种植过程中, 过量施肥导致土壤各磷形态含量明显增加, 尤其以 W-P 和 Al-P 增加程度最为剧烈, 而水耕人为土 O-P 和潮湿雏形土 Re-P 相对含量随利用强度增加却显著降低($P < 0.05$)。

4) 水耕人为土中, Fe-P 和 Al-P 是 Olsen-P 的主要来源; 潮湿雏形土中, Olsen-P 来自于 W-P 和 Ca-P, 且以 W-P 效果最为显著。

5) 设施蔬菜种植有可能增加了土壤磷淋失的风险, 尤其是潮湿雏形土。

参考文献:

- [1] 刘玉学, 唐旭, 杨生茂, 等. 生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1690-1695.
- [2] 张林, 吴宁, 吴彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1775-1782.
- [3] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 260-268.
- [4] Wang J, Liu W Z, Mu H F, et al. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application[J]. Pedosphere, 2010, 20(3): 304-310.
- [5] 农资与市场杂志. 5900 万亩, 看我国设施蔬菜主要分布在哪些区域[OL]. [2018-01-27]. http://www.sohu.com/a/219359539_658625
- [6] 刘苹, 江丽华, 高新昊, 等. 施肥对蔬菜产量的影响——以寿光市设施蔬菜为例[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1752-1758.
- [7] 包立, 刘惠见, 邓洪, 等. 玉米秸秆生物炭对滇池流域大棚土壤磷素利用和小白菜生长的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 815-824.
- [8] Huang B, Shi X Z, Yu D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in

- peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 112(4): 391–402.
- [9] 余炜敏, 梁嘉伟, 王荣萍, 等. 不同有机肥对菜地根际土壤磷素形态及蔬菜生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(32): 90–94.
- [10] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期施肥对红壤旱地磷的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(9): 255–259.
- [11] 符明明, 贾萌萌, 胡文友, 等. 设施栽培条件下蔬菜含硒状况及其健康风险评估[J]. *土壤*, 2016, 48(5): 887–892.
- [12] Yang L Q, Huang B, Hu W Y, et al. The impact of greenhouse vegetable farming duration and soil types on phytoavailability of heavy metals and their health risk in Eastern China[J]. *Chemosphere*, 2014, 103: 121–130.
- [13] 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.
- [14] 包先明, 崔宏. 退耕还湖后不同植被群落湿地土壤剖面磷素形态分布特征[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 25–31.
- [15] Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C. Development of soil classification in China[C]//Eswaran H, Rice T, Ahrens R, et al., *Soil Classification: A Global Desk Reference*. Boca Raton/London/New York/Washington, D.C.: CRC Press, 2003: 101–125.
- [16] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 8–72.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 90–97.
- [18] Ju X T, Kou C L, Christie P, et al. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(2): 497–506.
- [19] Yang L Q, Huang B, Mao M C, et al. Sustainability assessment of greenhouse vegetable farming practices from environmental, economic, and socio-institutional perspectives in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(17): 17287–17297.
- [20] 袁丽金, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 设施蔬菜土壤剖面氮磷钾积累及对地下水的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 14–19.
- [21] Fu M M, Huang B, Jia M M, et al. Effect of intensive greenhouse vegetable cultivation on selenium availability in soil[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(3): 343–350.
- [22] 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.
- [23] Han J P, Shi J C, Zeng L Z, et al. Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(4): 2976–2986.
- [24] Kong X L, Cao J, Tang R Y, et al. Pollution of intensively managed greenhouse soils by nutrients and heavy metals in the Yellow River Irrigation Region, Northwest China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(11): 7719–7731.
- [25] 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(2): 1–9.
- [26] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. *Soil Science*, 1957, 84(2): 133–144.
- [27] 沈兵松, 张鼎华. 酸性土壤无机磷研究进展[J]. *福建林业科技*, 2005, 32(1): 75–78.
- [28] Xiao Y, Tang J L, Wang M K, et al. Impacts of soil properties on phosphorus adsorption and fractions in purple soils[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(12): 2420–2431.
- [29] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤有机磷研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2189–2194.
- [30] Yan Z J, Liu P P, Li Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 982–989.
- [31] Arai Y, Livi K J T, Sparks D L. Phosphate reactivity in long-term poultry litter-amended southern Delaware sandy soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3): 616–629.
- [32] Barrow N J, Debnath A, Sen A. Mechanisms by which citric acid increases phosphate availability[J]. *Plant and Soil*, 2018, 423(1–2): 193–204.
- [33] 展晓莹, 任意, 张淑香, 等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4728–4737.
- [34] Keller M, Oberson A, Annaheim K E, et al. Phosphorus forms and enzymatic hydrolyzability of organic phosphorus in soils after 30 years of organic and conventional farming[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(3): 385–393.
- [35] 鲁如坤. 水稻土磷素化学和有效施用磷肥[J]. *磷肥与复肥*, 1993, 8(1): 84–86.
- [36] 向万胜. 华中亚热带红壤与水稻土磷素的形态与转化过程[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003.
- [37] 周垂帆, 林静雯, 李莹, 等. 草甘膦对土壤磷形态及有效性的影响[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(6): 71–77.
- [38] 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.
- [39] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 施磷对稻田土壤及田面水磷浓度影响的模拟[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1845–1848.
- [40] 黄绍敏, 郭斗斗, 张水清. 长期施用有机肥和过磷酸钙对潮土有效磷积累与淋溶的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 93–98.
- [41] Kalkhajeh Y K, Huang B, Hu W Y, et al. Phosphorus saturation and mobilization in two typical Chinese greenhouse vegetable soils[J]. *Chemosphere*, 2017, 172: 316–324.
- [42] 严正娟. 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.
- [43] 赵亚杰, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 施肥对设施菜地土壤磷累积及淋失潜能的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 466–472.