

李嘉欣,李 智,郭明月,等. 不同种植年限设施蔬菜土壤的理化性质及对供磷能力的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(1):210-218.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.01.030

不同种植年限设施蔬菜土壤的理化性质 及对供磷能力的影响

李嘉欣¹, 李 智¹, 郭明月¹, 朱文昊¹, 张朝春^{1,2}, 刘 龙³, 叶新新¹, 郅红建¹

(1. 安徽农业大学资源与环境学院,安徽合肥 230036; 2. 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193;
3. 安徽省和县土壤肥料工作站,安徽合肥 238200)

摘要:研究不同种植年限设施蔬菜土壤养分和磷库的变化及磷吸附-解吸的能力,旨在为设施蔬菜合理施用磷肥提供理论依据。通过采集蔬菜典型生产区种植 5、28 年土壤以及临近的水稻土和自然条件下原状背景土的 0~20、20~40 cm 土层的土壤样品,测定土壤主要理化性质;利用 Hedley 磷分级法分析土壤磷库变化。选取安徽省和县的 2 种典型土壤,探究土壤磷的吸附-解吸特性以及与土壤理化性质之间的关系。结果显示,设施蔬菜土壤的养分含量显著高于水稻土与背景土,但 pH 值显著低于后者。种植 28 年设施蔬菜表层(0~20 cm)土壤的全磷、有效磷含量分别为 4.16 g/kg、380.22 mg/kg,与种植 5 年的土壤相比分别提高 232%、138%,且 NaHCO₃-P、NaOH-P、HCl-P 逐渐成为主要的磷库,而 NaOH-P_o 组分含量显著下降。随种植年限的延长,土壤磷的吸附能力下降而解吸能力增加,亚表层(20~40 cm)土壤有效磷含量增加。相关分析结果表明,土壤 C/P、N/P、pH 值、有机质含量、有效磷含量是决定土壤最大缓冲容量(MBC)的主要因子;土壤磷吸附能力与 C/P、N/P、NaOH-P_o 含量呈显著正相关,与 C/N、pH 值、有机质含量、微生物量磷含量、全氮含量、全磷含量、有效态磷(Olsen-P)含量及其他磷组分含量呈显著负相关,而解吸能力与之相反。因此设施蔬菜土壤随种植年限的延长,土壤磷吸附能力下降,解吸能力增加,导致土壤供磷能力提高;但同时促进磷向深层土壤移动,增加磷面源污染风险。

关键词:蔬菜;长期施肥;土壤理化性质;土壤磷组分;土壤磷吸附-解吸特性

中图分类号:S630.6;S143.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)01-0210-09

中国种植结构正经历着从“以粮为纲”向“粮经协调发展”的转变;设施农业能充分利用自然资源,产量高、品质优,种植面积不断加大^[1]。然而,设施

农业具有养分投入大、施肥不合理等特点,容易造成土壤板结和盐渍化等问题,不仅危害作物生长,而且导致土壤氮磷流失,加剧环境污染风险^[2-3]。

磷作为作物正常生长发育所必需的大量营养元素之一,其合理施用可提高作物产量^[4];但不当施用不仅会降低磷肥的当季利用率,而且容易增加水体富营养化等风险^[5]。蔬菜带来的高经济价值导致菜农容易过量施用肥料,因此,蔬菜等经济作

收稿日期:2023-02-08

基金项目:安徽省科技重大专项(编号:202103a06020012)。

作者简介:李嘉欣(1996—),女,四川峨眉山人,硕士研究生,主要从事植物磷素高效利用与调控研究。E-mail:1531546403@qq.com。

通信作者:张朝春,博士,教授,主要从事作物间套作研究。E-mail:zhangcc@cau.edu.cn。

广东园林,2015,37(2):77-79。

[J]. 中国园林,2015,31(10):104-108。

[17]周 翔. 有机覆盖物在园林绿地中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2011。

[22]吕子文,方海兰,黄彩娣. 美国园林废弃物的处置及对我国的启示[J]. 中国园林,2007,23(8):90-94。

[18]南京江北新区:“废料”变“肥料”绿化废弃物化身“城市吸尘器”[EB/OL]. (2022-12-16)[2023-02-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/HANM3pa5zUqNoDT7WxDDuQ>.

[23]南京市绿化园林局. 市政协十四届四次会议第 0520 号提案的答复(关于进一步加强园林绿化废弃物处置和综合利用工作的建议)[EB/OL]. (2021-07-13)[2023-02-15]. https://www.nanjing.gov.cn/xxgkn/2021njytabl/shizxta/202112/t20211207_3223972.html.

[19]马隆龙,唐志华,汪丛伟,等. 生物质能研究现状及未来发展策略[J]. 中国科学院院刊,2019,34(4):434-442。

[24]园林废弃物循环利用·昆山模式[J]. 园林,2020(6):81。

[20]侯家萍,王 闻,张蕾欣,等. 现代生物质能源技术体系及其产业化应用态势[J]. 现代化工,2022,42(5):7-13。

[25]春建伟,刘鸿雁,梁顺文,等. 深圳市园林绿化垃圾的产生和收集现状及处置对策[J]. 环境卫生工程,2009,17(1):47-49。

[21]刘宏钊,陈德敏. 论城市园林绿化废弃物循环利用的法律规制

物的合理施磷尤为重要^[6]。黄绍文等在研究我国蔬菜化肥减施潜力中发现,我国的主要设施蔬菜地中,氮、磷、钾施用量分别超过推荐量的 1.9、5.4、1.6 倍^[7]。王蓉等在连云港开展 500 个设施蔬菜大棚施肥和土壤养分情况调研,结果表明农户习惯于采用高氮、高磷、高钾的施肥模式,导致设施蔬菜种植中出现养分投入极其不平衡的问题^[8]。有调研发现,在冬春茬黄瓜、秋冬茬西红柿的设施蔬菜种植模式下,磷素年盈余量高达 480 kg/hm²,种植 3 年以上的设施菜地表层土壤有效磷的平均含量达 70 mg/kg^[9]。与相邻露地土壤比较,种植年限的延长导致设施土壤有效磷与其他养分大量累积^[10]。磷素过量盈余将增加环境污染风险。

已有大量研究表明,设施蔬菜复种指数高,生长环境相对封闭,土壤长期得不到雨水淋洗,大量施用化肥更是加剧土壤环境的恶化;同时,种植年限的延长,极易造成土壤酸化、板结、连作障碍等问题,严重影响蔬菜的产量和品质^[11]。与粮田相比,蔬菜地的高水肥投入决定了其具有较高的氮磷淋溶量^[12]。因此,研究蔬菜保护地中土壤磷素的形态具有重要意义。张大庚等的研究表明,设施农业土壤中的磷素主要以 Ca₂-P、Fe-P 的形态淋失^[13]。菜地长期施磷导致土壤中无机磷积累^[14],磷的增加量和盈余量呈一定的线性正相关,且随种植年限的延长和土壤磷盈余量的增加,有效磷在全磷中的占比也逐渐增加^[15]。刘蕾等在种植 10 年的西红柿—甜瓜种植模式下,提出该地区使用土壤有效磷的淋溶阈值为 60 mg/kg,磷肥投入控制阈值为 260 mg/kg^[16]。然而,土壤磷库除了有效态磷(Olsen-P)之外,还有其他磷组分,活性、中等活性、稳定态无机磷和易矿化可溶的活性有机磷、中等活性的有机磷,这些组分也会影响土壤的供磷能力。植物对磷的吸收会耗竭可溶性磷,从而引发其他土壤磷库平衡的变化,主要是通过解吸和溶解导致土壤磷的动态变化。不稳定无机磷库的耗竭,会触发 HCl-P、NaOH-P 库中磷的释放,表明磷可以从磷酸钙矿物以及 Fe、Al 氧化物上的非闭塞位点解吸或溶解,以补充不稳定无机磷库^[17],而且这些组分与土壤供磷能力及磷损失有关。

认识磷的吸附-解吸特性,对于增加磷的可利用性、评估环境磷流失风险具有重要的意义。长期大量施用磷肥,当土壤吸附能力超出最大值时,会造成磷的固定、淋溶和迁移,从而造成磷的损失。

高秀美等研究指出,随种植年限的延长,蔬菜地土壤磷的最大吸附量、最大缓冲容量明显降低,土壤解吸率明显提高,无定形铁铝含量的变化是影响土壤磷吸附解吸特性的主要因素^[18]。有研究表明,蔬菜地长期施肥,导致土壤 CEC、有机质、黏粒及速效钾含量之间相关性显著^[19]。然而,种植年限对土壤磷吸附和解吸能力的影响尚不清楚,因此无法科学地评价不同种植年限设施土壤的供磷能力。

安徽省在长三角 4 省(市)蔬菜种植中占据重要地位,同时安徽省作为全国五大棚菜主产区之一^[20],其设施蔬菜种植养分投入量高,尤其是磷肥投入过量,容易发生磷素的淋溶和迁移,造成流域水体污染^[10]。本试验在安徽省和县设施农业集中区,选取设施蔬菜种植模式、施肥模式相近且种植年限不同的设施土壤为研究对象,通过分析不同种植年限设施土壤的磷组分、磷吸附解吸特征,研究土壤磷素迁移转化规律及其影响因素,以期为农户科学施用磷肥提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于 2021 年 12 月至 2022 年 10 月在安徽省马鞍山市和县开展。和县地处长江下游地区的沿岸北部,被誉为“中国蔬菜之乡”;作为长江中下游区域的“菜篮子”,和县常年蔬菜种植面积达 2.8 万 hm²,其中设施高效栽培面积约为 2.13 万 hm²,约占全年蔬菜种植面积的 76%;蔬菜种植已成为当地的主导产业^[21]。《根据和县 2011—2020 年统计年鉴》显示,蔬菜种植主要集中在历阳镇、功桥镇、乌江镇、善厚镇、西埠镇,其中历阳镇蔬菜占农作物总播种面积的 40% 以上,且近 10 年的播种面积稳步增长;乌江镇与西埠镇保持平稳。根据调研数据,蔬菜的基肥主要用干鸡粪、猪粪、三元复合肥,追肥用尿素(N≥46%)、水溶性钾肥(K₂O≥50%);在蔬菜种植的整个生育期,化肥养分投入分别为:N 201 ~ 270 kg/km²,P₂O₅ 178 ~ 240 kg/km²,K₂O 348 ~ 360 kg/km²^[22]。

1.2 土壤样品采集、测定方法和计算方法

1.2.1 土壤样品采集 选取和县历阳镇、西埠镇、功桥镇的土壤样品作为代表,其主要种植模式是 1 年 2 茬果菜(辣椒、番茄、茄子)轮作。选取连续种植 5、28 年的大棚土,与大棚临近的水稻土壤、无任何种植的自然背景土,分别采集其 0 ~ 20、20 ~

40 cm 土层样品。大棚土每个年份选 3 个大棚作为重复,每个大棚采用“S”形路线法,取 3 个点的土壤制备混合样。采集的土样自然风干处理后,混匀进行研磨,过筛后测定土壤的基本理化性质。其中,以 0~20 cm 土层的 5、28 年的大棚土,作为和县设施蔬菜地典型的长江冲积土设施土壤,用于测定土壤磷吸附-解吸量、磷分级、微生物量磷含量。

1.2.2 测定方法 实验室样品指标测定参照标准方法^[23]。

(1) 土壤基本理化性质。土壤 pH 值采用酸度计测定(土:水=1:2.5);土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法^[24]测定;土壤全氮含量采用联合消煮凯氏定氮法测定;土壤速效钾含量采用 NH_4OAC 浸提-火焰光度计法测定;土壤有效磷含量采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗色法测定;土壤全磷含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定。

(2) 土壤对磷吸附-解吸的能力。磷吸附能力测定步骤如下:称取 1.5 g 通过 60 目筛土壤置于 50 mL 离心管中,加入 30 mL 含磷量分别为 5、10、20、50、100、150、200、300 mg/L 的 KH_2PO_4 (该溶液以 0.01 mol/L CaCl_2 为平衡电解质),再加入 2~3

滴甲苯抑制微生物活性,25℃恒温振荡 24 h 后取出离心过滤,采用钼锑抗比色法测定平衡溶液磷浓度^[25],土壤残渣保留待解吸试验使用。磷解吸能力测定步骤如下:吸附试验完成后,弃去残留的上清液,用 30 mL 饱和 NaCl 溶液清洗离心管中的 KH_2PO_4 (4 000 r/min 离心 8 min),此过程重复 1 次,再向管中加入 0.01 mol/L CaCl_2 溶液 30 mL/支,并加入 2~3 滴甲苯抑制微生物活性,离心管置于 25℃恒温培养箱中 180 r/min 连续振荡 24 h,4 000 r/min 离心 10 min,取出离心管,采用钼锑抗比色法测定其上清液的磷浓度^[26-27],以此计算相关参数^[28]。

(3) 土壤磷库分析 如图 1 所示,土壤磷组分分级采用 Hedley 修正体系法^[29],该分级体系采用具有不同溶解特性和提取能力的提取剂,对土壤进行连续浸提,把土壤各形态的磷分为活性 NaHCO_3 -P (无机磷)、 NaHCO_3 -Po (活性有机磷)、 NaOH -P (中等活性无机磷)、 NaOH -Po (中等活性有机磷)、 HCl -P (磷灰石型磷)、Residual-P (残余态磷)。土壤微生物量磷则采用三氯甲烷熏蒸,0.5 mol/L NaHCO_3 溶液(土:水=1:20)浸提提取法测定。

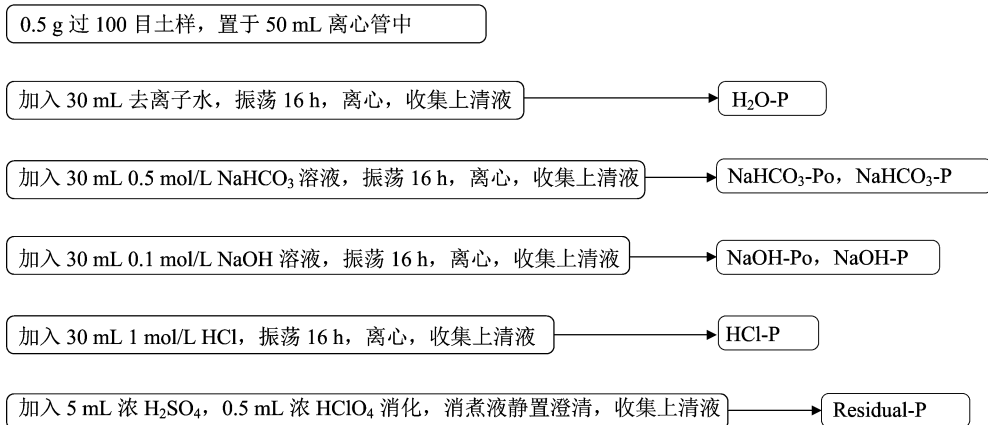


图1 Hedley 磷分级方法示意

1.2.3 计算方法 Langmuir 等温吸附方程:

$$C/Q = 1/(K_1 \times Q_m) + C/Q_m$$

式中: C 为平衡溶液中的磷浓度,mg/L; Q 为土壤磷的吸附含量,mg/kg; Q_m 为磷最大吸附量,mg/kg; K_1 为吸附亲和力常数。

根据 Langmuir 方程可计算以下参数:

(1) 土壤磷最大缓冲容量(MBC ,mg/kg) = $K_1 \times Q_m$,为土壤供磷特性的判断指标。

(2) 磷解吸率(DR) = 土壤磷的解吸量

(mg/kg)/土壤磷的吸附量(mg/kg) × 100%^[30]。

Freundlich 等温方程如下:

$$Q_e = K_2 \times C_e^n$$

式中: Q_e 为磷吸附量,mg/g; C_e 为吸附液中磷浓度,mg/L; K_2 为吸附系数(反映吸附能力的指标); n 为常数。

1.3 数据分析和处理

使用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理,SPASS 25.0 软件进行统计分析,Origin 2021、R

(4.2.0) 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同种植年限设施蔬菜土壤的基本理化性状

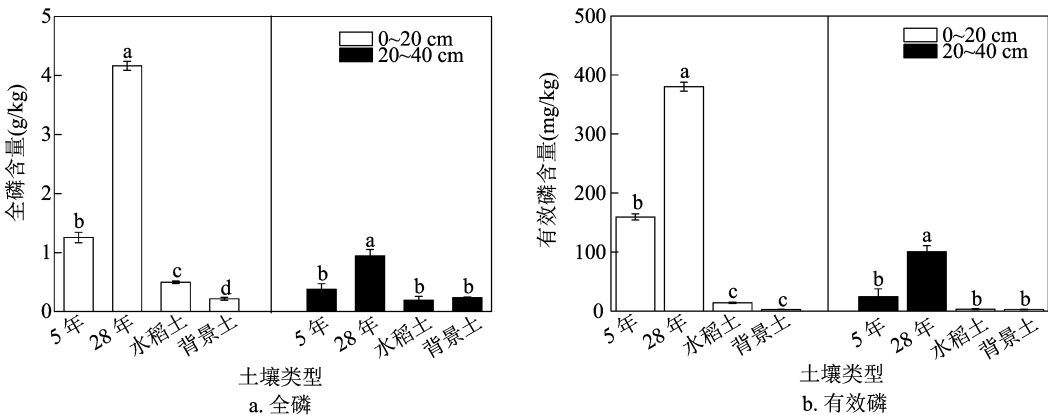
随着种植年限的延长,设施蔬菜表层(0~20 cm)土壤的 pH 值及有机质、全氮、速效钾含量逐渐增加,与水稻土、背景土差异显著(表 1)。其中种植 5 年设施土壤的 pH 值为 5.87,较水稻土(6.48)、背景土(6.69)分别显著降低 9%、12%。有机质含量在种植 28 年的设施土壤中高达 31.41 g/kg,是 5 年设施土壤的 2.6 倍。设施蔬菜亚表层土壤(20~

40 cm)有机质、全氮含量均显著高于水稻土与背景土,但随种植年限的延长,土壤有机质含量逐渐降低,土壤全氮含量无显著差异,速效钾含量逐渐增加。由图 2 可知,设施蔬菜表层土壤(0~20 cm)的全磷、有效磷含量均显著高于水稻土、背景土,种植 28 年的设施土壤的全磷、有效磷含量高达 4.16 g/kg、380.22 mg/kg,均显著高于种植 5 年的设施土壤。设施蔬菜种植 28 年的亚表层土壤(20~40 cm)的全磷、有效磷含量均显著高于水稻土、背景土;随种植年限的延长,设施蔬菜亚表层土壤的全磷、有效磷含量显著增加。

表 1 不同土壤基本理化性质

土层 (cm)	土壤类型	pH 值	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
0~20	5 年	5.87 ± 0.13c	11.98 ± 1.87b	1.69 ± 0.12b	267.42 ± 43.03b
	28 年	6.15 ± 0.02b	31.41 ± 1.19a	3.38 ± 0.12a	506.89 ± 32.57a
	水稻土	6.48 ± 0.01a	12.93 ± 0.53b	1.28 ± 0.01c	152.27 ± 17.42c
	背景土	6.69 ± 0.01a	4.52 ± 0.24c	0.59 ± 0.01d	200.03 ± 2.26bc
20~40	5 年	6.32 ± 0.09b	11.83 ± 2.59a	1.21 ± 0.21a	116.94 ± 6.64b
	28 年	6.54 ± 0.05a	8.06 ± 1.82ab	1.00 ± 0.11a	228.16 ± 21.68a
	水稻土	6.61 ± 0.05a	2.88 ± 0.31b	0.39 ± 0.01b	109.74 ± 0.01b
	背景土	6.72 ± 0.05a	4.02 ± 0.42b	0.59 ± 0.01b	211.15 ± 0.65a

注:同一深度同列数据后的不同小写字母表示不同类型土壤间差异达显著水平(P<0.05)。表 2 同。



5 年、28 年分别为连续种植的设施蔬菜地土壤,不同的小写英文字母表示差异达显著水平(P<0.05),误差棒表示标准误差。图 3 同

图2 不同土层土壤全磷含量与有效磷含量

2.2 不同年限设施土壤的磷组分

如图 3 所示,设施蔬菜土壤随种植年限的延长,其磷组分含量显著增加,其中种植 28 年的设施蔬菜土壤的 H₂O - P (283.87 mg/kg)、NaHCO₃ - P (531.22 mg/kg)、NaOH - P (724.67 mg/kg)、HCl - P (637.73 mg/kg)、Resdual - P (334.52 mg/kg) 含量,较种植 5 年的 H₂O - P (97.73 mg/kg)、NaHCO₃ -

P (175.74 mg/kg)、NaOH - P (190.70 mg/kg)、HCl - P (26.23 mg/kg)、Resdual - P (133.36 mg/kg) 含量,显著增加 190%、202%、280%、2331%、151%。种植 28 年的 NaOH - Po 含量(183.37 mg/kg)较种植 5 年的 NaOH - Po (329.52 mg/kg) 含量,显著减少 44%。随着种植时间的延长,种植 28 年的设施蔬菜土壤的 NaOH - P (26%)、HCl - P (23%) 占比,较种

植 5 年的 $\text{NaOH}-\text{P}$ (19%)、 $\text{HCl}-\text{P}$ (3%) 显著增加 37%、667%。种植 28 年的设施蔬菜土壤的 $\text{NaOH}-\text{Po}$ (7%)、 $\text{Resdual}-\text{P}$ (12%) 占比,较种植 5 年的 $\text{NaOH}-\text{Po}$ (34%)、 $\text{Resdual}-\text{P}$ (14%),显著减少 79%、14%。 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 、 NaHCO_3-Po 、 NaHCO_3-P

占比无显著变化。因此,随种植年限的延长,无机磷组分显著增加,有机磷组分显著减少。种植 28 年的蔬菜土壤以 NaHCO_3-P 、 $\text{NaOH}-\text{P}$ 、 $\text{HCl}-\text{P}$ 为主,三者合计占总磷的 67%。

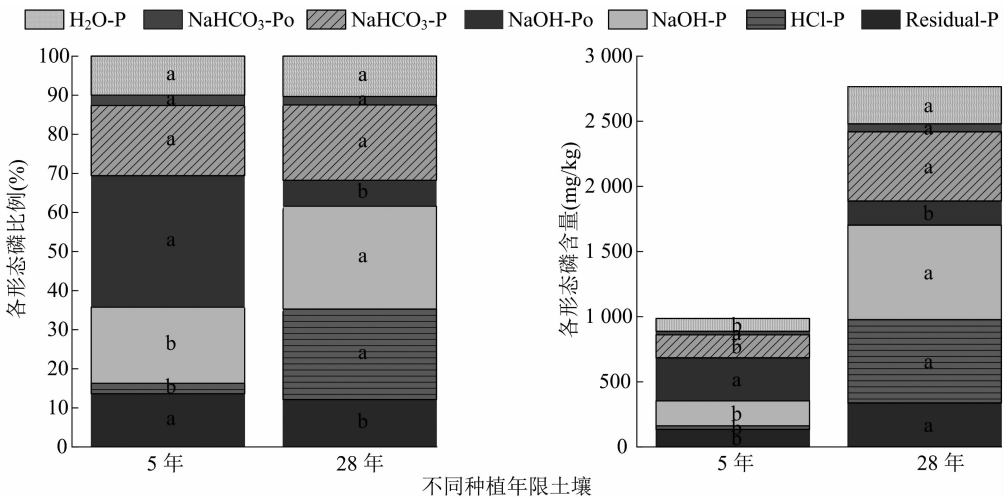


图3 不同种植年限设施土壤各磷组分在土壤全磷中的占比和含量

2.3 不同种植年限的典型设施土壤磷吸附/解吸特征

2.3.1 土壤磷吸附特征 图 4 为不同种植年限的典型长江冲积土设施蔬菜土壤磷的等温吸附曲线。不同种植年限长江冲积土的磷素吸附量变化趋势一致,随平衡液磷浓度的提高,其吸附量也在不断增加。但不同年限土壤之间存在差异,当平衡液磷浓度在 0~300 mg/L 之间,土壤磷素吸附量呈明显增长趋势。随着种植年限的延长,长江冲积土吸磷能力下降。

示,方程的决定系数 R^2 为 0.621~0.703。Langmuir 方程拟合的 K 值为平衡拟合参数,当反应物和载体之间有 $1/K$ 的反应活度时,对应的反应物吸附量达到最大值,能解释设施蔬菜土壤的胶体对磷酸根离子的亲和力^[31],也是影响土壤吸附强度的原因,反映土壤对磷的吸附结合能力。当 K 值为正时,则说明土壤常温下吸附是自发完成的, K 值越大则自发性越强,得到的产物越稳定,供应磷的强度就愈弱。各土壤的 K 值位于 0.02~0.13 之间,种植 5 年较种植 28 年的长江冲积土 K 值增加了 550%。磷最大吸附量 (Q_m) 是径流可溶性磷浓度相关的重要参数,对土壤磷吸附容量产生重要影响。种植 28 年较种植 5 年的长江冲积土,其 Q_m 显著降低 52.5%。

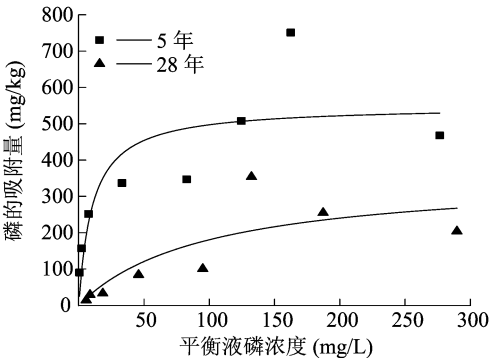


图4 Langmuir 方程拟合吸附等温曲线

Freundlich 方程拟合的常数 n 是一项非均相系数,其值的大小受吸附强度影响。常数 n 在 1~4 范围之内,表明是一种快且强吸附行为;本研究结果显示, $n < 1$,说明设施蔬菜土壤的吸附反应较容易发生。从表 2 可以看出 Langmuir 方程更好,一定程度上能反映土壤磷的吸附现状,以此计算土壤最大缓冲容量 ($\text{MBC} = Q_m \times K$) 这项综合参数来表明设施土壤磷吸附特性^[32],能反映磷吸附强度因素和容量因素。土壤最大缓冲容量 MBC 越大,则土壤储存磷的能力就越强,其供磷潜力也会随之提高。随种植年限的延长,长江冲积土的 MBC 显著降低,种植 28 年土壤的 MBC 比种植 5 年的低 92.2%。

针对土壤磷素吸附解吸特征方面的研究,常采用 Langmuir/Freundlich 方程拟合,可用来解释其吸附量与平衡溶液浓度之间的关系。如表 2 所示,不同种植年限长江冲积土设施土壤的吸附等温方程显

表 2 土壤 Langmuir/Freundlich 拟合方程与吸附特征参数

种植年限	Langmuir 等温吸附式[$C/Q = C/Q_m + 1/(K_1 Q_m)$]			Freundlich 等温吸附式[$\lg Q = n(\lg C) + \lg K_2$]			MBC (mg/kg)
	Q_m (mg/kg)	K_1	R^2	n	K_2	R^2	
5	526.32a	0.13a	0.649	0.26b	138.21a	0.703	68.97a
28	250.00b	0.02b	0.633	0.52a	14.86c	0.621	5.41c

注: Q_m 为磷的最大吸附量, K_1 为磷吸附亲和力常数^[33], n 为常数(常与吸附剂表面性有关), K_2 为吸附系数(反映吸附能力和吸附亲和力的大小,值越大表示吸附能力越强),MBC 为土壤磷最大缓冲容量。

2.3.2 土壤磷解吸特征 土壤磷解吸一般被看作是其吸附的逆过程,与被吸附磷的重新利用有关。由图 5 可以看出,随外源磷浓度的增加,设施蔬菜土壤磷素解吸量均呈增加趋势;不同种植年限设施蔬菜土壤的解吸曲线呈现一定的差异,表明加入外源磷的浓度和种植年限差异都有可能影响土壤磷的解吸量。随着种植年限的延长,长江冲积土土壤的解吸量越大。在加入磷浓度为 5~300 mg/L 范围内,土壤对磷的解吸率为 1.8%~87.1%(表 3),其中随着外源磷浓度的增加,5 年设施土壤解吸率先增后降再增的趋势,28 年设施土壤解吸率大致

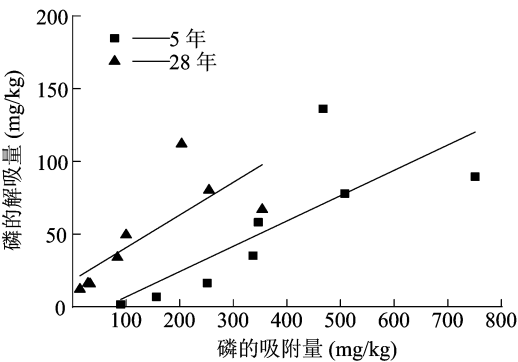


图5 不同种植年限的设施蔬菜土壤磷的等温解吸曲线

呈逐渐降低后逐渐增加的趋势。

表 3 土壤磷的解吸率

种植年限	磷的解析率(%)								
	5 mg/L	10 mg/L	20 mg/L	50 mg/L	100 mg/L	150 mg/L	200 mg/L	300 mg/L	平均
5	1.8	4.4	6.5	10.4	16.8	15.3	11.9	29.1	12.0
28	87.1	56.0	48.2	40.4	49.3	18.9	31.5	55.0	48.3

2.4 土壤基本理化性状、磷组分与吸附解吸能力的相关性

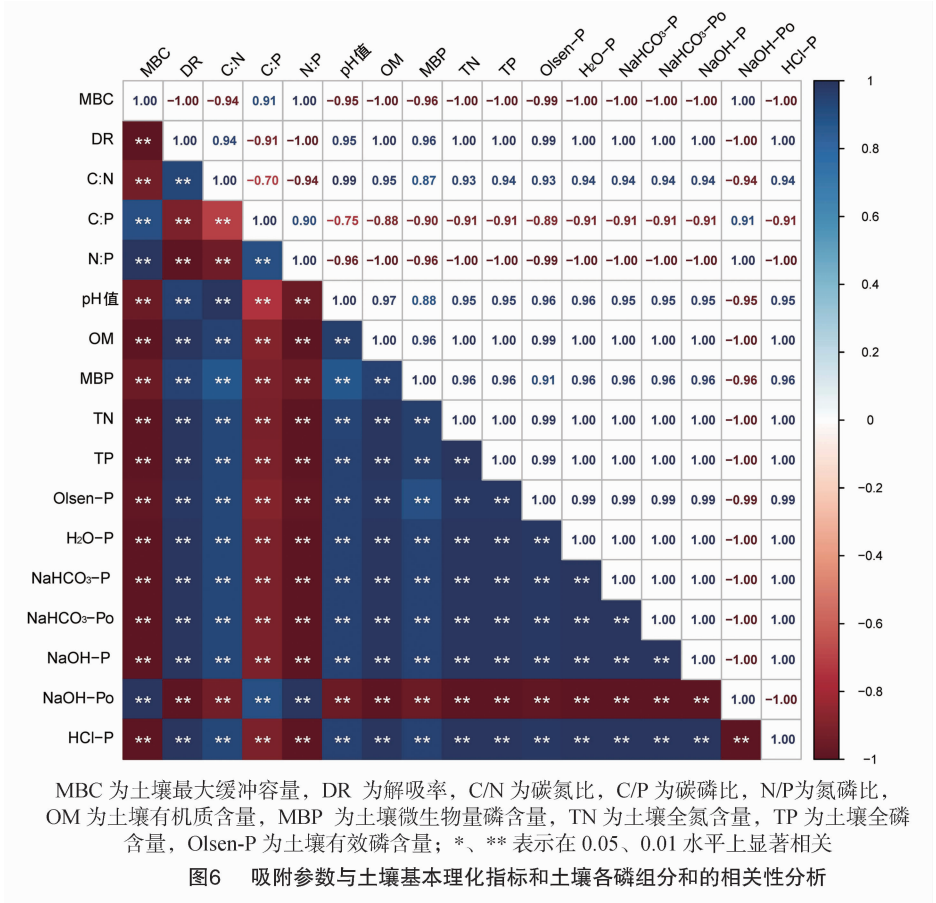
长江冲积土土壤吸附参数与土壤基本理化指标和土壤各磷组分的相关性分析(图 6)表明,随种植年限的延长,长江冲积土土壤最大缓冲容量(MBC)与 C/P、N/P、NaOH-Po 含量呈显著的正相关($P>0.01$),与 C/N、pH 值、OM 含量、MBP 含量、TN 含量、TP 含量、Olsen-P 含量及其他磷组分含量呈显著负相关。长江冲积土土壤磷解吸率(DR)与 C/P、N/P、NaOH-Po 含量呈显著负相关,与 C/N、pH 值、OM 含量、MBP 含量、TN 含量、TP 含量、Olsen-P 含量及其他磷组分含量呈显著正相关。

3 讨论

3.1 种植年限对土壤理化性质和磷组分的影响

前人研究结果表明,长期过量施肥会增加土壤养分的累积^[34],这与本研究结果一致。本研究中历阳镇作为和县蔬菜种植主要集中区,近 10 年播种面积稳步增长,施肥量达 922.5 kg/hm²,高于其余各镇。近年来,提出化肥减量、增加有机肥投入的政

策,和县设施蔬菜种植过程中磷肥施用量呈减少的趋势^[35];但历阳镇施磷量整体仍高于其余各镇。本研究表明,随种植年限的延长,设施蔬菜表层(0~20 cm)土壤的有机质、全氮、速效钾含量逐渐增加,亚表层(20~40 cm)有机质、全氮含量减少;其中表层土壤有机质含量在种植 28 年的设施土壤中高达 31.41 g/kg,是 5 年设施土壤的 2.6 倍,表明大量养分累积在土壤表层,深层土壤养分含量规律有一定的差异,可能是因为当地设施蔬菜种植的田间管理方式为大水大肥。设施蔬菜种植以辣椒、西红柿、花椰菜、茄子、黄瓜、菜用大豆等果菜类为主,施用的有机肥以猪粪、鸡粪为主,每季平均投入量高达 30 t/hm²;后期根据蔬菜长势,追施复合肥,化肥施用方式为撒施,灌水方式为喷灌或大水漫灌^[36]。磷在土壤中的扩散速度慢,主要积聚在土壤表层,这导致表层土壤中的全磷、有效磷含量显著高于次表层^[37],这与本研究结果一致。本研究表明,设施表层土壤(0~20 cm)的全磷、有效磷含量高达 4.16 g/kg、380.22 mg/kg,显著高于亚表层土壤(20~40 cm)(全磷、有效磷含量分别为 0.94 g/kg、



100.64 mg/kg)。随种植年限的延长,设施蔬菜亚表层土壤的全磷、有效磷含量均呈现增加的趋势,表明磷的淋失风险加剧(图 2),这些增加主要受磷平衡的影响,并因高磷施用量而加剧。本研究中,设施蔬菜地的 pH 值显著低于水稻土、背景土,设施蔬菜土壤酸化现象明显;造成土壤酸化的原因主要是长期大量施用化肥,其中蔬菜种植的施肥量远远超过粮食作物^[38]。由于土壤中的氮肥硝化作用会产生亚硝酸盐,形成大量的 H⁺,而土壤胶体中钙、镁等元素易被氢离子所取代,因此过量的 H⁺ 将会引起土壤 pH 值明显下降;其次,设施蔬菜土壤中 Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 等阴离子大量留存在土壤溶液中,也会使土壤 pH 值降低^[39]。设施蔬菜高温、高湿的环境不利于土壤中物质的代谢,且有大量有机酸释放在土壤中,导致设施蔬菜土壤 pH 值降低,其值显著小于相邻的农田土壤。

由 Sui 和 Michael 完善的 Hedley 磷分级方法,将土壤磷素分成有机磷和无机磷,H₂O-P、NaHCO₃-P 为活性无机磷,NaOH-P 为中等活性无机磷,HCl-P 为稳定态性无机磷^[34];NaHCO₃-Po 为易于矿化可溶的活性有机磷,NaOH-Po 由腐殖酸、褐菌素等

组成的中等活性有机磷^[40]。过量施用磷肥将不可避免地影响磷库条件,对环境造成长期威胁^[41]。本研究表明,随着种植年限的延长,无机磷组分显著增加,有机磷组分减少。可见,随种植时间的延长,磷肥施用量增加且累积,盈余磷素主要以NaHCO₃-P、NaOH-P、Residual-P 等形态为主,显著提高土壤供磷能力。残余态磷为最稳定的潜在磷源,种植 28 年设施土壤中残余态磷含量显著高于种植 5 年设施土壤,说明过量活性磷转化为难溶性磷而失效。因此,亟需科学施用磷肥,减少土壤活性磷组分,降低环境污染风险;减少磷素固定甚至失效,同时减少土壤酸化。

3.2 土壤磷吸附-解吸特性的影响因素

为了保持植物对磷的需要,土壤磷在吸附和解吸之间保持着一个动态平衡^[42]。本研究中,典型长江冲积土设施土壤随着种植年限的延长,MBC 总体呈下降的趋势,与较短种植年限相比,由于长期大量施用磷肥,土壤磷的吸附位点减少,吸附能力下降,从而使土壤的磷素解吸能力增强。有研究表明,在设施蔬菜栽培中,化肥的使用可以提高土壤对磷素的吸附位点,有机肥使用可以降低土壤对磷

素的吸附位点,而有机-无机肥料配施使用可以平衡土壤磷的保持和供应^[43]。这可能是因为有机肥中的可溶性成分会降低土壤磷的解吸力,有机肥覆着于土壤黏粒,从而吸附位点下降;土壤对磷的吸附量降低,对磷的解吸量增加^[44]。也有研究表明,施磷量对土壤磷素吸附和解吸特性的影响弱于磷肥的形态和施肥结构^[30]。可能是因为随着种植年限的延长,土壤出现土壤板结、酸化等一系列问题,导致土壤存储磷的能力和供磷能力下降。

土壤 C/N、C/P、pH 值、有机质等养分含量是影响土壤磷吸附和解吸行为的重要因素^[45],同时土壤吸附和解吸能力对土壤磷组分也有一定的影响。本研究相关分析表明,土壤的 C/N、C/P、pH 值、有机质含量、全氮含量、全磷含量、有效磷含量等对土壤磷素吸附和解吸特性有十分显著的影响。长江冲积土的吸附能力与 C/P、N/P、NaOH-Po 呈显著正相关,与 C/N、pH 值、OM 含量、MBP 含量、TN 含量、TP 含量、Olsen-P 含量及其他磷组分含量呈显著负相关;长江冲积土的土壤磷解吸能力与 C/P、N/P、NaOH-Po 呈显著负相关,与 C/N、pH 值、OM 含量、MBP 含量、TN 含量、TP 含量、Olsen-P 含量及其他磷组分含量呈显著正相关。王琼等在黑土上的研究表明,有机质与吸附能力呈负相关,与解吸能力呈正相关^[46],这与本研究结果一致。土壤有机质含量作为影响土壤磷的吸附和解吸能力的因素,其原理较为复杂。有大量研究认为,土壤有机质含量越高,对磷的吸附作用就越弱,解吸量与解吸率就越大^[47];也有研究结果相反。究其原因,一方面,土壤有机质含量增加,土壤矿物质胶体因土壤黏粒增加而减少对磷的吸附,有机质凝胶特性导致其吸附潜能降低,使土壤表面的磷易被解吸而释放于土壤溶液中^[48];另一方面,有机质胶体会与交换性铁氧化物、铝氧化物形成络合物,再通过络合作用使铁、铝氧化物活性增强,提高黏粒复合体的吸磷含量。大量研究也表明,随着土壤有效磷含量的累积增加,土壤对磷的吸附饱和度提高,固定率降低,解吸率提高^[49],这与本研究结果一致。马良等研究发现,土壤中磷的吸附量和解吸量均受 pH 值大小的影响,会随 pH 值的升高而降低^[50],这与本结果有所差异。和县地区典型土壤中等活性的 NaOH-Po 含量与土壤吸附能力呈显著正相关,与解吸能力呈负相关。而关于设施蔬菜土壤磷组分与土壤磷吸附解吸特性之间的响应机制,有待进

一步深入研究。

4 结论

本研究结果表明,长期施磷导致设施蔬菜土壤磷大量累积,累积量远高于同区域的水稻土和背景土。积累的磷主要分布在 0~20 cm 耕层土壤,以 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 、 NaOH-P 、 HCl-P 为主要磷组分,有机磷组分显著降低,土壤无机磷供应能力显著提高。然而,随着种植年限的延长,土壤的吸附能力下降,解吸能力提高,土壤供磷能力显著提高,增加当季磷肥的生物有效性,同时提高 20~40 cm 土层的磷含量,加剧土壤磷损失风险。土壤磷吸附能力与 C/P、N/P、NaOH-Po 含量呈显著正相关,与 C/N、pH 值、OM 含量、MBP 含量、TN 含量、TP 含量、Olsen-P 含量及其他磷组分含量呈显著负相关,而解吸能力与之相反。因此,在设施蔬菜生产中,需要根据土壤的理化性质和供磷能力优化磷肥施用,同时充分利用土壤有效性低的磷,在提高磷素有效性的同时,减少磷资源浪费和磷流失风险。

参考文献:

- [1] 韩旭东,王若男,崔梦怡,等. 中国规模农户设施农业经营状况及影响因素[J]. 资源科学,2020,42(4):749-762.
- [2] 王 瑞,仲月明,李慧敏,等. 高投入菜地土壤磷素环境与农学阈值研究进展[J]. 土壤,2022,54(1):1-8.
- [3] 俞映琼,杨林章,李红娜,等. 种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测[J]. 环境科学,2020,41(8):3870-3878.
- [4] 刘 凯,刘 佳,陈晓芬,等. 长期施用磷肥水稻土微生物量磷的季节变化特征与差异[J]. 中国农业科学,2020,53(7):1411-1418.
- [5] 司贤宗,张 翔,索炎炎,等. 磷肥-种子相对位置对花生生长发育及磷肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(3):84-89.
- [6] 龚松贵,王兴祥,张桃林,等. 低分子量有机酸对红壤无机磷活化的作用[J]. 土壤学报,2010,47(4):692-697.
- [7] 黄绍文,唐继伟,李春花,等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(6):1480-1493.
- [8] 王 蓉,王礼焦,孙潇潇. 连云港市设施蔬菜施肥与土壤养分状况分析[J]. 山西农业科学,2016,44(2):204-208,231.
- [9] 曹 云. SQR 9 微生物有机肥防治黄瓜土传枯萎病的效应与机制研究[D]. 南京:南京农业大学,2011.
- [10] 王敏峰,严正娟,陈 硕,等. 施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响[J]. 农业环境科学学报,2016,35(7):1351-1359.
- [11] 史艺杰,王美艳,徐胜祥,等. 太湖流域典型设施蔬菜地土壤结构特征研究[J]. 土壤,2020,52(5):1050-1056.
- [12] 王洪媛,李俊改,樊秉乾,等. 中国北方主要农区农田氮磷淋溶

- 特征与时空规律[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(1):11–18.
- [13] 张大庚,栗杰,董越. 不同种植年限设施菜田土壤无机磷组分的累积和释放特征[J]. 水土保持通报,2021,41(4):93–99.
- [14] Bao L, Zhang N M, Liu L L, et al. Research on the evolution and accumulation characteristics of surface soil phosphorus in Tien Lake[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(4):840–844.
- [15] 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.
- [16] 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1):197–203.
- [17] Liao D, Zhang C C, Lambers H, et al. Adding intercropped maize and faba bean root residues increases phosphorus bioavailability in a calcareous soil due to organic phosphorus mineralization[J]. Plant and Soil, 2022, 476(1):201–218.
- [18] 高秀美,汪吉东,张永春,等. 蔬菜种植年限对土壤磷素吸附解吸特性的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(4):706–710.
- [19] 刘代欢,杜立宇,梁成华,等. 长期定位施肥蔬菜保护地土壤 K^+ 吸附解吸动力学研究[J]. 土壤学报,2010,47(1):177–181.
- [20] 纪龙,李崇光,章胜勇. 中国蔬菜生产的空间分布及其对价格波动的影响[J]. 经济地理,2016,36(1):148–155.
- [21] 许庆生,程在俊. 和县蔬菜产业发展的现状和思考[J]. 辣椒杂志,2018,16(1):42–45.
- [22] 韩上,武际,钱晓华,等. 安徽主栽蔬菜施肥现状调查及对策[J]. 中国蔬菜,2015(4):15–19.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [24] 孙浩然. 整合剂淋洗修复土壤中 As、Sb 污染物实验研究[D]. 贵阳:贵州大学,2016.
- [25] 唐雪霞,杨浩,盛建东,等. 不同施磷处理下棉田土壤磷素吸附特征研究[J]. 中国土壤与肥料,2021(2):8–16.
- [26] 邹慧芳. 褐土磷吸附特征及不同水肥条件下设施黄瓜的生长[D]. 太原:山西大学,2019.
- [27] 朱佳颖,韩晓日,杨劲峰,等. 30 年轮作施肥对棕壤磷库时间变异特征的影响[J]. 土壤通报,2011,42(4):891–895.
- [28] 杜婷婷. 玉米秸秆还田配施磷肥对土壤磷组分及产量的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2020.
- [29] Zhang T Q, MacKenzie A F, Liang B C, et al. Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(2):519–528.
- [30] 刘彦伶,李渝,张萌,等. 长期不同施肥对黄壤磷素吸附-解吸特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(3):450–459.
- [31] 赵庆雷. 施肥模式对土壤供磷能力及水稻磷营养的影响研究[D]. 青岛:青岛农业大学,2008.
- [32] 洪欠欠,颜晓,魏宗强,等. 长期施肥与土壤性质对水稻土磷吸附的影响[J]. 中国土壤与肥料,2018(3):61–66,84.
- [33] 周龙,苏丽珍,王思睿,等. 间作对红壤磷素吸附解吸平衡效应的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(11):1867–1878.
- [34] 吴玉梅,梁成华,杜立宇,等. 长期定位施肥对蔬菜保护地土壤磷素形态的影响[J]. 中国土壤与肥料,2009(3):39–43.
- [35] 梁涛,王帅,廖敦秀,等. 蔬菜化肥减量增效技术途径:以重庆为例[J]. 中国土壤与肥料,2021(1):303–309.
- [36] 程启鹏. 磷肥优化管理对设施黄瓜产量、品质及磷素利用效率的影响[D]. 合肥:安徽农业大学,2022:10.
- [37] Zhang Y C, Li R N, Wang L Y, et al. Threshold of soil Olsen-P in greenhouses for tomatoes and cucumbers[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41(20):2383–2402.
- [38] 曹舰艇,杨红,彭艳,等. 藏东南不同种植年限蔬菜大棚土壤 pH 及养分的变化特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(8):117–126.
- [39] 毕晓庆,山楠,杜连凤,等. 氮肥用量对设施滴灌栽培番茄产量品质及土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11):2246–2250.
- [40] 郭文杰. 热解制备牛骨生物炭并应用于提升蔬菜土壤磷素有效性的研究[D]. 南京:南京农业大学,2019:25.
- [41] von W R. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility[J]. Geochemical Transactions, 2006, 7:6.
- [42] 弥明言,杜超,温小珊,等. 液态有机肥灌溉施用对南方橘园红壤磷素累积及流失风险的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(22):223–233.
- [43] Thompson R B, Incrocci L, van Ruijven J, et al. Reducing contamination of water bodies from European vegetable production systems[J]. Agricultural Water Management, 2020, 240:106258.
- [44] 余婉霞. 设施菜地土壤磷与有机碳的转化及其相互关系[D]. 武汉:武汉理工大学,2014.
- [45] Sun T Y, Deng L Z, Fei K, et al. Characteristics of phosphorus adsorption and desorption in erosive weathered granite area and effects of soil properties[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(23):28780–28793.
- [46] 王琼,展晓莹,张淑香,等. 长期不同施肥处理黑土磷的吸附-解吸特征及对土壤性质的响应[J]. 中国农业科学,2019,52(21):3866–3877.
- [47] 迟杰,赵旭光,董林林. 有机质和低相对分子质量有机酸对沉积物中磷吸附/解吸行为的影响[J]. 天津大学学报,2011,44(11):968–972.
- [48] 赵庆雷,王凯荣,谢小立. 长期有机物循环对红壤稻田土壤磷吸附和解吸特性的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(1):355–362.
- [49] 龚振平,杜婷婷,闫超,等. 玉米秸秆还田及施磷量对黑土磷吸附与解吸特性的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(22):161–169.
- [50] 马良,徐仁扣. pH 和添加有机物料对 3 种酸性土壤中磷吸附-解吸的影响[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(6):596–599.