DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2025.05.003 CSTR: 32214.14.tr202501200030
赵甜甜, 田 康, 刘本乐, 等. 设施菜地土壤磷酸盐吸附特征与磷流失风险阈值确定. 土壤, 2025, 57(5): 971–978.

设施菜地土壤磷酸盐吸附特征与磷流失风险阈值确定①

赵甜甜[1,2], 田 康[1*], 刘本乐[3], 樊亚男[1], 胡文友[1,2], 黄 标[1], 赵永存[1,2]

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 蚌埠学院土木与水利工程学院, 安徽蚌埠 233030)

摘 要: 为明确设施菜地土壤对磷酸盐的吸附特征及其流失风险阈值, 选择山东省寿光市种植 1 年、10 年和 20 年的日光温室土壤以及种植 5 年和 15 年的塑料大棚土壤, 探究了表层(0 ~ 30 cm)和亚表层(30 ~ 60 cm)土壤磷酸盐的吸附特征并确定了磷流失风险阈值。结果表明: 土壤对磷酸盐的最大吸附量(Q_{max})随种植年限的增加呈先增加后降低的趋势, 这一变化主要受土壤粉粒和碳酸钙含量波动的影响。同时, 磷吸附亲和力常数(K)和最大缓冲容量(PBC)均随种植年限的增加而降低, 且亚表层土壤高于表层, 土壤磷饱和度(DPS)则表现出相反的趋势, 有机质含量和 pH 是影响土壤与磷酸盐结合能力的关键因素。基于有效磷含量与 PBC 和 DPS 的关系, 本研究确定了设施土壤磷流失风险值为 68.7 mg/kg, 磷流失风险管控值为 335.6 mg/kg。结果显示, 设施土壤面临较高的磷流失风险, 且该风险随种植年限的增加而加剧。尽管亚表层土壤有较强的磷吸附能力, 但其磷流失风险同样不容忽视。

关键词: 设施土壤; 磷吸附等温线; 种植年限; 流失风险

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Determination of Phosphate Adsorption Characteristics and Loss Risk Threshold in Greenhouse Vegetable Soil

ZHAO Tiantian[1,2], TIAN Kang[1*], LIU Benle[3], FAN Ya'nan[1], HU Wenyou[1,2], HUANG Biao[1], ZHAO Yongcun[1,2]

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 211135, *China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3 *School of Civil and Hydraulic Engineering, Bengbu University, Bengbu, Anhui* 233030, *China*)

Abstract: To clarify the adsorption characteristics of phosphate in facility vegetable field soil and its threshold for loss risk, this study investigated topsoils (0–30 cm) and subsoils (30–60 cm) from solar greenhouses with cultivation durations of 1, 10, and 20 years, as well as plastic greenhouses with 5 and 15-year cultivation histories in Shouguang City, Shandong Province, to analyze of phosphorus adsorption characteristics and quantify the environmental risk thresholds for phosphorus leaching. The results showed that the maximum phosphorus adsorption capacity (Q_{max}) initially increased then decreased with cultivation duration. This trend correlated significantly with the variations in silt content and calcium carbonate concentration. Both adsorption affinity constant (K) and phosphorus buffering capacity (PBC) demonstrated consistent declines with extended cultivation, showing higher values in subsoil than topsoil. Conversely, phosphorus saturation degree (DPS) displayed an inverse relationship with these parameters. Organic matter content and pH emerged as primary influencing factors of soil-phosphate binding capacity through correlation analysis. Environmental risk analysis established critical thresholds for phosphorus loss at 68.7 mg/kg (risk threshold) and 335.6 mg/kg (control threshold), based on quantitative relationships between available phosphorus, PBC, and DPS. Notably, phosphorus leaching risk escalated with cultivation duration, with subsoil showing unignorable phosphorus loss risk despite their higher adsorption capacity.

Key words: Greenhouse soil; Phosphorus adsorption isotherm; Planting years; Loss risk

设施种植是我国一项重要的农业土地利用方式。2021 年, 我国设施种植面积达 4 000 万亩左右(15 亩=1 hm^2), 其中设施蔬菜面积占 80% 以上, 设施蔬菜产量达到 2.3 亿吨, 占蔬菜总产量的 30%(数据来源于《全国现代设施农业建设规划(2023—2030 年)》[1])。设施蔬菜生产土地利用强度大, 为了保持

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41907091, 42307497)资助。
* 通信作者(tiank@issas.ac.cn)
作者简介: 赵甜甜(1997—), 女, 河南周口人, 博士研究生, 主要从事土壤磷循环研究。E-mail: zhaotiantian@issas.ac.cn

产量，养分投入显著高于露天农田[2]，目前设施土壤养分累积已经被广泛报道[3-5]。由于不均衡施肥，以及磷的易固定特性，设施土壤中磷累积尤为显著[6-8]。例如，云南设施土壤耕层全磷的含量范围为 0.53 ~ 5.64 g/kg[9]；安徽马鞍山市种植 28 年的设施表层(0 ~ 20 cm)土壤全磷含量为 4.16 g/kg，较种植 5 年的大棚提高了 232%[10]。土壤磷含量过高不仅会降低肥料利用率，还可能威胁周边水体安全。

土壤对磷酸盐的吸附特性受多种因素的影响，包括铁铝氧化物、碳酸钙、土壤质地、有机质、pH 等[11-15]。磷肥进入土壤后，主要以被吸附的形态存在，随着种植年限的增加，土壤性质不断变化，磷不断累积，一旦超出土壤的承载能力，便会产生较高的流失风险[16-17]。在碱性潮土中，设施土壤中磷主要以钙结合态形式存在，其中易被植物利用的弱吸附态含量和比例显著高于露天农田[18-19]。由于长期被塑料膜覆盖，设施土壤中磷的主要迁移途径是剖面淋溶[20-21]。高晶波等[7]研究发现，日光温室 40 cm 以下土层有效磷累积量占 0 ~ 400 cm 土壤剖面总累积量的 45.3%。磷酸盐氧同位素分析结果表明，亚表层土壤累积的磷主要来自表层土壤磷的淋溶[18]。表层土壤对磷的缓冲和容纳能力决定了磷向深层土壤迁移的可能性，而亚表层土壤不仅能为作物提供养分[22]，还可作为磷在剖面上淋溶的缓冲带。评估不同种植年限和磷含量水平的设施表层与亚表层土壤对磷的吸附能力，不仅有助于评估磷的流失风险，还对未来磷的管理具有重要意义。

土壤磷的流失风险阈值是评估磷流失风险的重要指标。关于土壤磷流失风险的阈值研究较多，但不同土壤类型的差异显著[15, 23]，而针对设施土壤的研究相对较少[24]。目前常用的土壤磷流失风险阈值确定方法是 Hesketh 和 Brookes[25]提出的，该方法通过建立土壤 0.01 mol/L $CaCl_2$ 浸提液与土壤有效磷(0.5 mol/L $NaHCO_3$ 提取)之间的非线性关系确定拐点。然而，该方法受多种因素的影响，包括提取时土壤与提取液的比例、土壤吸附能力和强度、土壤理化性质，以及土壤有效磷的范围等[26-27]。土壤吸附参数能够提供更多关于土壤磷环境容量的信息，因此可能更适合用于确定土壤磷流失风险阈值，尤其是磷含量较宽范围的设施土壤。

土壤磷素水平和种植年限是影响设施土壤磷流失风险的重要因素。考虑到设施菜地土壤耕层一般为 30 cm，本研究选择了种植年限不同且土壤全磷含量差异显著的日光温室和塑料大棚，对其表层(0 ~ 30 cm)和亚表层(30 ~ 60 cm)土壤进行磷吸附等温线测定，并通过吸附参数与有效磷之间的关系确定磷流失风险阈值，从而评估设施菜地土壤磷流失风险。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山东寿光是我国典型的设施蔬菜生产基地，有 30 余年的种植历史，当地大棚种植面积约 60 万亩，蔬菜大棚 15.7 万个，是著名的“中国蔬菜之乡”。寿光市位于山东半岛中部，地理位置为 36°41′N ~ 37°19′N，118°32′E ~ 119°10′E，属暖温带季风区大陆性气候，年平均气温 12.7 ℃，年平均降水量 593.8 mm。土壤类型主要为潮土和褐土，采集的样品主要为褐土。日光温室和塑料大棚是当地最主要的设施大棚类型，蔬菜品种多样，主要类型为番茄、辣椒、茄子、黄瓜和甜瓜。

1.2 土壤样品采集与理化性质测定

2021 年 6 月在山东省寿光市纪台镇采集了种植 1 年(SG1)、10 年(SG10)和 20 年(SG20)的日光温室及种植 5 年(PG5)和 15 年(PG15)的塑料大棚 0 ~ 60 cm 深度土壤样品。土壤样品理化性质测定参考《土壤调查实验室分析方法》[28]。pH 采用电极法测定，土水质量比为 1∶2.5；土壤质地采用激光粒度法测定；有机质采用重铬酸钾−硫酸消化法测定；全氮采用硒粉、硫酸铜、硫酸钾消化−蒸馏法测定；全铁采用 X 射线荧光光谱仪测定；碳酸钙采用气量法测定，通过盐酸与碳酸钙反应产生的 CO_2 体积进行计算。全磷采用高氯酸−氢氟酸−盐酸消解，有效磷采用 0.5 mol/L(pH=8.5)碳酸氢钠浸提，钼锑抗比色法测定。土壤样品的基本理化性质见表 1。

1.3 磷吸附试验

取 2.0 g 10 目风干土于 100 mL 离心管中，分别加入 40 mL 含磷量 0、5、10、20、30、50、75、100 mg/L 的磷酸二氢钾溶液(0.01 mol/L KCl 配制)[14, 27]，并加入 3 滴甲苯抑制生物活动，于 25 ℃、200 r/min 振荡 24 h，5 500 r/min 离心 5 min，用钼锑抗比色法测定上清液磷酸盐含量。每个处理重复 3 次。

1.4 磷吸附等温线拟合

Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型是研究磷吸附特征最常用的方法，可以获得土壤磷吸附参数以评价土壤的吸附能力。

Langmuir 吸附等温线方程：

$$Q_t = \frac{Q_{max} K C_{eq}}{1 + K C_{eq}} \tag{1}$$

表 1　土壤样品基本理化性质

Table 1　Physiochemical properties of tested soils

土壤样品	土层深度 (cm)	pH	有效磷 (mg/kg)	全磷 (g/kg)	全氮 (g/kg)	有机质 (g/kg)	黏粒 (%)	粉粒 (%)	砂粒 (%)	全铁 (g/kg)	碳酸钙 (g/kg)
SG1	0 ~ 30	7.74	68.2	0.88	0.95	12.97	9.00	60.1	30.9	27.3	15.06
	30 ~ 60	8.06	30.7	0.66	0.56	7.49	8.66	67.2	24.2	29.2	19.41
SG10	0 ~ 30	7.88	239.5	2.77	2.06	25.94	13.0	57.9	29.1	35.5	38.87
	30 ~ 60	8.21	92.8	0.95	0.62	7.26	12.1	65.8	22.1	35.6	85.13
SG20	0 ~ 30	6.42	522.2	4.37	2.35	28.15	9.98	58.4	31.7	32.8	3.96
	30 ~ 60	6.99	345.6	2.14	1.00	11.83	11.5	52.0	36.5	29.2	12.93
PG5	0 ~ 30	7.46	81.6	0.83	1.07	10.91	6.05	64.2	29.8	28.0	3.74
	30 ~ 60	7.78	11.9	0.33	0.45	5.39	11.0	57.5	31.5	30.3	5.12
PG15	0 ~ 30	7.00	191.0	2.16	1.70	20.12	7.84	47.2	44.9	28.5	8.44
	30 ~ 60	7.83	94.1	0.88	0.57	6.37	8.42	52.3	39.2	29.9	22.44

式中：Q_t 为单位质量土壤吸附的总磷(mg/kg)；C_{eq} 为平衡时溶液中磷的浓度(mg/L)；Q_{max} 为试供土壤潜在的磷最大吸附量(mg/kg)；K 为磷吸附亲和力常数(L/mg)。

Freundlich 吸附等温线方程：

$$Q_t = K_f C_{eq}^{1/n} \tag{2}$$

式中：K_f 为 Freundlich 吸附常数(L/kg)；$1/n$ 为吸附指数。

1.5　磷饱和度、缓冲容量和土壤磷吸附率计算

$$\mathrm{DPS}(\%) = \frac{\mathrm{STP}}{Q\max + \mathrm{STP}} \times 100 \tag{3}$$

式中：DPS 为磷饱和度(%)；STP 为已被吸附的可解析的磷量(mg/kg)，用 Olsen P 表示。

$$\mathrm{PBC} = Q_{max} \times K \tag{4}$$

式中：PBC 为土壤磷最大缓冲容量(L/kg)。

$$\mathrm{AE}(\%) = Q_t / Q_0 \times 100 \tag{5}$$

式中：AE 为土壤磷吸附率(%)；Q_0 为初始溶液磷浓度(mg/kg)。

1.6　数据统计与分析

使用 Excel 2021 进行数据计算与处理，采用 Origin 2025 进行相关分析和绘图，相关分析采用 Spearman 相关。

2　结果

2.1　不同种植年限设施土壤对磷酸盐的吸附特征

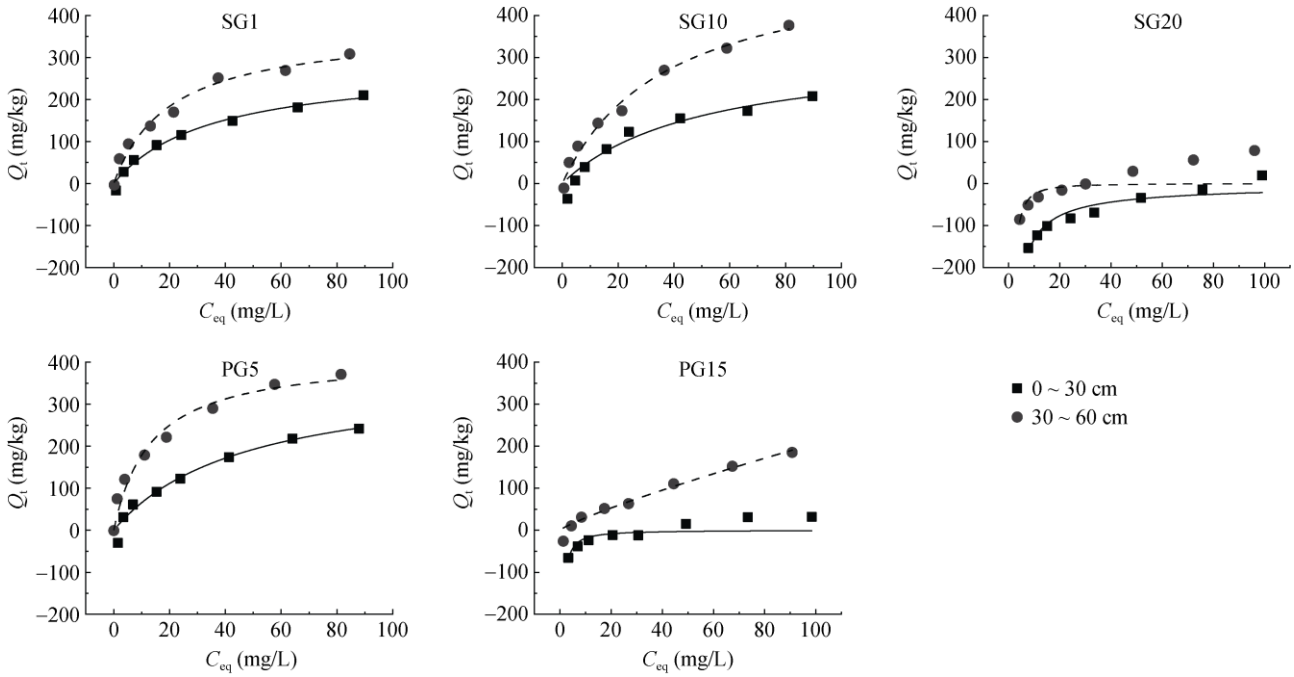
Langmuir 和 Freundlich 两种吸附等温线模型对大多数样品的拟合效果较好(表 2 和图 1)。除 SG20 亚表层和 PG15 表层土壤外，其余样品 R^2 值均高于 0.95，且 $P<0.05$。由于 SG20 和 PG15 样品在低磷浓度溶液中释放了大量的磷，导致其吸附量为负值，因

表 2　吸附等温线拟合参数

Table 2　Adsorption isotherm fitting parameters

土壤样品	土层深度 (cm)	Langmuir			Freundlich			DPS (%)	PBC (L/kg)
		Q_{max}(mg/kg)	K(L/mg)	R^2	K_f(L/kg)	$1/n$	R^2		
SG1	0 ~ 30	283.5	0.028 6	0.98***	17.79	0.557	0.97***	19.4	8.11
	30 ~ 60	370.1	0.049 1	0.98***	44.08	0.445	0.98***	7.66	18.17
SG10	0 ~ 30	322.7	0.019 9	0.94***	17.02	0.566	0.99***	42.7	6.42
	30 ~ 60	538.0	0.026 7	0.99***	32.37	0.564	0.98***	14.7	14.36
SG20	0 ~ 30	–45.22	–0.180	0.62**	–817.1	–0.790	0.89***	109.5	8.14
	30 ~ 60	–0.999	–0.236	0.34	–833.5	–1.510	0.49	100.3	0.24
PG5	0 ~ 30	373.9	0.021 2	0.97***	16.20	0.618	0.95***	17.9	7.93
	30 ~ 60	416.9	0.074 7	0.97***	70.70	0.386	0.99***	2.78	31.14
PG15	0 ~ 30	–4.043	–0.323	0.47	–284.8	–1.173	0.67*	100.2	1.31
	30 ~ 60	611.0	0.004 8	0.97***	4.22	0.846	0.97***	13.3	2.93

注：表中*、**、***分别表示拟合效果达 $P<0.05$、$P<0.01$、$P<0.001$ 显著水平。



(SG20 和 PG15 为 Freundlich 拟合曲线，其余为 Langmuir 拟合曲线)

图 1 土壤磷吸附拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves of soil phosphorus adsorption

此未能得到拟合度较好的 Langmuir 曲线，图 1 中 SG20 和 PG15 结果为 Freundlich 模型拟合曲线。所有样品拟合曲线变化趋势相似，即吸附量随平衡溶液浓度的增加先快速增加，后逐渐趋于平缓。Langmuir 方程拟合结果表明，土壤 Q_{max} 随种植年限的增加呈现先增加后降低的趋势。其中，SG10 和 PG15 亚表层土壤 Q_{max} 最大，分别为 538.0 mg/kg 和 611.0 mg/kg。然而，表征磷吸附亲和力的 K 值在 SG1 和 PG5 样品中最大，且表层和亚表层土壤 K 值随种植年限的增加而降低。此外，无论是 Q_{max}、K，还是 K_f，亚表层土壤的值均高于表层土壤。值得注意的是，SG20 表层与亚表层土壤以及 PG15 表层土壤 Q_{max} 均为负值，表明其土壤磷饱和度已超过 100%。PBC 最大值出现在 PG5 亚表层土壤中，其次为 SG1 亚表层土壤。

SG20 表层与亚表层土壤以及 PG15 表层土壤整体处于磷释放的状态(图 1，图 2)。特别是在低浓度的磷溶液中，这些样品释放了大量的磷，其中 SG20 表层土壤释放的无机磷含量甚至超过了 100 mg/kg。在吸附过程中，这 3 个样品的磷吸附率随着添加磷溶液浓度的增加而升高，而磷含量较低且种植时间较短的大棚土壤，其磷的吸附率则随着磷溶液浓度的增加而降低。当添加磷溶液浓度大于 50 mg/L 时，所有样品的磷吸附率趋于稳定。

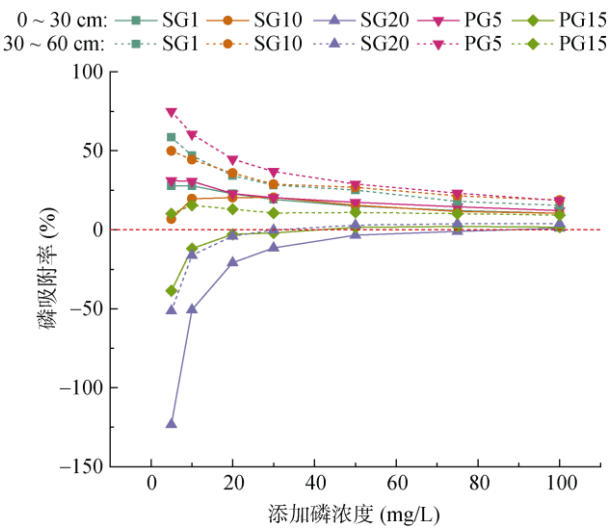
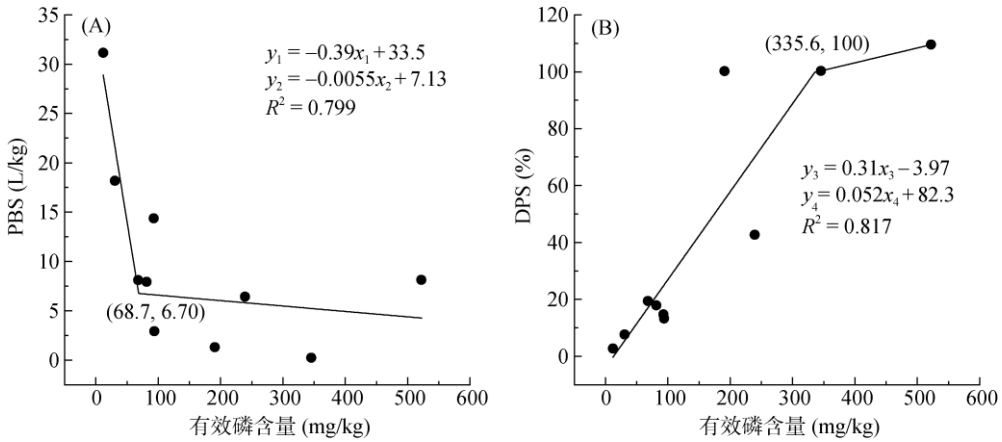


图 2 土壤磷吸附率曲线

Fig.2 Soil phosphorus adsorption rate curve

2.2 设施土壤磷流失风险阈值

随着有效磷含量的增加，PBC 和 DPS 的变化呈现非线性趋势，并在有效磷达到一定的浓度后逐渐趋于稳定。两段式线性拟合结果表明，PBC 随有效磷含量的增加呈现先快速下降后缓慢下降的趋势，拐点出现在有效磷含量为 68.7 mg/kg 时(图 3A)。有效磷含量超过拐点后 PBC 降至 10 L/kg 以下并趋于稳定，表明土壤已无法完全吸附外源磷，此时开始出现磷流失风险。因此，将 68.7 mg/kg 定义为磷流失风险值的阈值。



(标注的数值为拐点有效磷含量及对应 PBC 和 DPS 值)

图 3　设施土壤有效磷与磷最大缓冲容量(A)和磷饱和度(B)之间的关系

Fig.3　Relationship between available P in greenhouse soil and maximum buffering capacity of P (A) and P saturation (B)

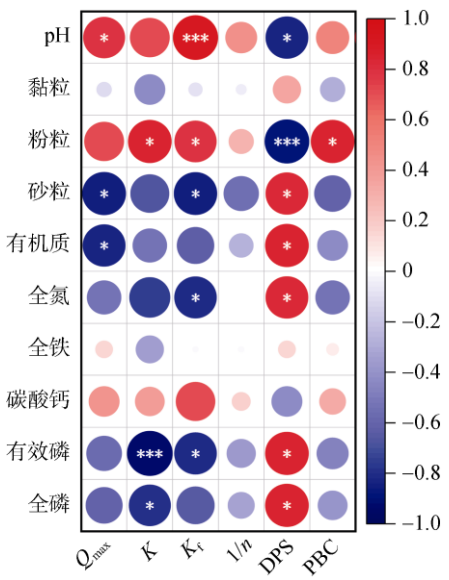
DPS 的变化趋势与 PBC 相反，其随有效磷含量的增加迅速上升，并在有效磷含量为 335.6 mg/kg 时达到拐点，此时 DPS 为 100%，表明土壤达到磷饱和状态(图 3B)。超过该拐点后，土壤很难进一步吸附磷，因此将 335.6 mg/kg 定义为磷流失风险的管控值。

3　讨论

3.1　土壤性质对土壤磷酸盐吸附能力的影响机制

土壤颗粒与磷酸盐的初始反应主要发生在可变电荷表面，其吸附过程受颗粒种类与粒径的影响。在酸性土壤中，铁铝氧化物具有较大的比表面积，是吸附磷的主要物质[29]，但在石灰性土壤中碳酸钙是主要的固磷载体[30-31]。本研究采集的土壤样品偏碱性，磷酸盐吸附参数与全铁相关性微弱，但 K_f 与碳酸钙含量呈正相关(图 4)，因此碳酸钙是该研究区磷酸盐吸附的主要物质。在钙质土壤中，Samadi[32]的研究结果表明土壤磷吸附指数随着土壤黏粒含量的增加而增加，而 Jalali 和 Jalali[33]基于 57 个土壤样本的分析提出，粉粒含量才是与土壤磷吸附性和可提取性密切相关的关键土壤性质，与 Q_{max}、K_f 和 PBC 正相关。本文研究区的土壤黏粒含量较低且变异系数小，难以评估其作用，而粉粒含量则与 K 和 K_f 呈显著正相关(图 4)，决定了磷吸附亲和力大小。

土壤 pH 与有机质通过调控反应表面可变电荷的种类影响磷酸盐吸附。在高 pH 条件下，土壤胶体表面带正电荷有利于促进磷酸盐阴离子的静电吸附[34]。相关分析结果显示，pH 与 Q_{max} 和 K_f 显著正相关，因此 pH 升高有利于增强土壤胶体对磷的吸附作用[14]。有机质对土壤磷的吸附影响存在两种相反的机制，一方面有机质分解产生的低分子量有机酸通过竞争



(*、**、***分别表示相关性达 $P<0.05$、$P<0.01$、$P<0.001$ 显著水平)

图 4　土壤性质与磷吸附参数相关性

Fig.4　Correlation analysis between soil properties and adsorption parameters of phosphorus

吸附位点降低了土壤对磷酸盐的吸附能力[35]；另一方面，有机质释放的 H^+ 诱导矿物表面基团质子化，增加与磷酸盐的结合[36]。本研究中前者占主导地位，表现为 Q_{max} 随有机质含量增加而降低，同时土壤 pH 的降低进一步削弱了吸附能力，这与 K 值随着种植年限增加持续降低及亚表层吸附量高于表层的现象一致。

设施菜地土壤对磷酸盐的吸附能力与设施土壤磷整体的累积规律相似，即在种植 10 ~ 15 年时全磷和有效磷的含量达到峰值，随后有降低趋势[37-38]。SG10 和 PG15 样点的 Q_{max} 明显偏高，但是 K 值却没有同步增加，表明 Q_{max} 的增加主要是土壤中与磷结

合的点位增加。在碱性土壤中，碳酸钙通过提供充足结合点位主导吸附增强，这两个样点碳酸钙的含量明显偏高，尽管没有与吸附参数达到显著相关水平，但可以提供更多的吸附点位，抵消了有机质和 pH 的作用，因此表现为 Q_{max} 增加。SG20 土壤 pH 偏中性，碳酸钙部分溶解，磷吸附点位减少，且趋于饱和，土壤对磷的吸附能力下降，因此 Q_{max} 降低，磷逐渐向下迁移。石宁等[39]的研究发现有效磷的累积主要在前期 5 ~ 10 年，且主要发生在 0 ~ 40 cm 土层，在 10 ~ 15 年时 40 ~ 100 cm 深度有明显累积，设施菜地 0 ~ 100 cm 土层养分累积和向下迁移速率转变的关键时期是 10 年左右，本研究结果与此相似。

3.2 设施土壤磷流失风险

随着种植年限的增加，土壤对磷酸盐吸附能力下降，解吸能力增强，在一定程度上提高了土壤对作物的供磷能力[10]。这是由于种植蔬菜施用大量有机肥引入的有机物质占据了土壤磷吸附位点，促进了磷的释放。SG20 表层和亚表层土壤及 PG15 表层土壤的潜在磷最大吸附量均为负值，表明磷吸附能力已趋于饱和。种植超过 10 年的设施土壤在无添加外源磷条件下可释放超过 100 mg/kg 的磷素。SG20 表层与 PG15 表层土壤仅在 100 mg/L 磷溶液条件下表现出有限的吸附能力，提示在高磷土壤中，如果继续施肥，也要添加足够高的含量才能使土壤吸附一部分磷，否则磷很难被土壤固定，这不仅造成资源浪费，还会有较强的环境风险。设施土壤磷流失风险已经被广泛报道[40]。

本研究通过 PBC 与有效磷的拟合曲线确定磷流失风险阈值为 68.7 mg/kg，与我国其他菜地的研究结果相似(主要集中在 60.0 ~ 80.0 mg/kg)[41]。采集的所有表层样品均超过此阈值，且随着种植年限的增加，有效磷含量增加，流失风险同步攀升。根据有效磷和 DPS 的拟合曲线显示，当有效磷含量达 335.6 mg/kg 时，设施土壤磷吸附趋于饱和，此时继续向土壤中施加磷，磷素可能直接向下淋溶。本课题组前期磷酸盐氧同位素研究证实，高磷表层土壤中的活性磷在当季就可直接淋溶进入亚表层[18]。刘蕾等[24]通过土壤原位磷淋溶试验得到的磷肥投入控制阈值为 260 mg/kg，超过此值时土壤磷素流失风险呈指数级增大，超过该值应禁止施用磷肥。本研究的阈值偏高可能是包含了日光温室和塑料大棚两种大棚类型，而 PG15 在有效磷含量为 191.1 mg/kg 时就已经达到磷饱和，所以可能需要进一步细分不同的大棚类型，以及扩大样本量以提高结果的精确性。尽管如此，本研究结果仍具有重要参考价值。

设施菜地亚表层土壤较表层土壤有更高的 Q_{max} 和 K，这主要归因于其较高的 pH 和较低的有机质，因此有较强的磷酸盐结合能力，且土壤碳酸钙含量也高于表层土壤，能够提供更多的吸附位点，具有较大的磷储存能力，使其成为剖面上磷向深层土壤淋溶的缓冲带。Yang 等[42]的研究结果也表明设施菜地表土 Q_{max} 最小，且随着土壤深度的增加而增加。

尽管亚表层土壤具备较强的磷酸盐吸附能力，其磷流失速率却可能不降反增。土体内磷素迁移包括基质流和优先流两种路径，前者面积大但流速缓慢，而后者可随水分通过土壤大孔隙实现快速迁移，进入深层土壤。研究表明，相对于露天农田土壤，设施土壤中磷在 0 ~ 20 cm 深度主要通过基质流路径在土壤剖面上进行垂直迁移，而在 20 cm 以下土层以优先流路径为主，且优先流路径中 $CaCl_2$-P 和 Olsen P 的增加速率是基质流的两倍，因此底层土壤磷向下迁移速度更快[20]。在优先流路径中，磷与周围土壤作用时间更短，即使底层土壤有较强的磷吸附能力，也很难截获和固持所有淋溶下来的磷。尤其是在砂粒含量高的碱性土壤中，优先流路径与淋溶液中溶解活性磷呈显著正相关[43]。此外，随种植年限的增加，底土磷饱和度上升，在种植时间久的设施大棚，底层土壤可能结合能力不足[40]。SG20 亚表层 PBC 仅为 0.24，基本没有缓冲能力，且有效磷含量高达 345.6 mg/kg，甚至超过 SG10 表层水平，可能成为深层土壤磷素释放的潜在源。

综上所述，磷流失风险随种植年限的增加而显著升高，尤其是种植超过 10 年的设施土壤，无论是日光温室还是塑料大棚，均面临较高的磷淋溶风险。

4 结论

随种植年限的增加，土壤潜在磷最大吸附量呈先增加后降低的趋势，这一变化主要受土壤粉粒和碳酸钙含量波动的影响。长期施肥导致土壤磷吸附亲和力常数和磷最大缓冲容量随种植年限的增加而降低，而磷饱和度则呈相反趋势，有机质含量和 pH 是影响土壤与磷酸盐结合能力的关键因素。本研究确定有效磷含量 68.7 mg/kg 为设施土壤磷流失风险阈值，335.6 mg/kg 为流失风险管控值。长期种植(>15 年)的设施土壤，其表层已接近磷吸附饱和，而亚表层由于淋溶机制的差异可能导致磷的流失速度加快，尤其是具有较高磷含量的亚表层土壤。综上，长期种植加剧了设施土壤的磷流失风险，建议基于土壤有效磷含量动态调控设

施菜地土壤磷肥投入，以实现资源高效利用并降低环境风险。

参考文献：

[1] 农业农村部, 国家发展改革委, 财政部, 自然资源部. 全国现代设施农业建设规划(2023—2030 年)[EB/OL]. 2023. https://jcs.moa.gov.cn/gzdt/202306/t20230615_6430323.htm.

[2] 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.

[3] Fan Y N, Zhang Y X, Hess F, et al. Nutrient balance and soil changes in plastic greenhouse vegetable production[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2020, 117(1): 77–92.

[4] 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.

[5] 郑杰, 高佳佳, 周建斌, 等. 不同栽培年限日光温室土壤磷素累积特性研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 171–175.

[6] 史春余, 张夫道, 张俊清, 等. 长期施肥条件下设施蔬菜地土壤养分变化研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 437–441.

[7] 高晶波, 王娟, 温家合. 黄土区土地利用方式转变对土壤磷素累积及淋溶损失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(7): 78–85.

[8] 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.

[9] 史静, 邓玉龙, 张乃明. 云南设施土壤养分累积特征研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 95–101.

[10] 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.

[11] Nobile C M, Bravin M N, Becquer T, et al. Phosphorus sorption and availability in an andosol after a decade of organic or mineral fertilizer applications: Importance of pH and organic carbon modifications in soil as compared to phosphorus accumulation[J].Chemosphere, 2020, 239: 124709.

[12] Gérard F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils—a myth revisited[J]. Geoderma, 2016, 262: 213–226.

[13] Jiang Y, Yan Q L, Liu T, et al. Phosphorus adsorption characteristics and release risk in saline soils: A case study of Songnen Plain, China[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1302763.

[14] 杨娇, 信秀丽, 钟新月, 等. 长期不同施肥对潮土磷素吸附特征的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1047–1057.

[15] Bai Z H, Li H G, Yang X Y, et al. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. Plant and Soil, 2013, 372(1): 27–37.

[16] 秦红灵, 全智, 刘新亮, 等. 长沙市郊不同种植年限菜地土壤磷状况及淋失风险分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1843–1851.

[17] Jalali M, Paripour M. Leaching and fractionation of phosphorus in intensive greenhouse vegetable production soils[J].Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(12): 1492.

[18] Zhao T T, Tian K, Liu B L, et al. Soil phosphorus cycling in greenhouse vegetable production system: New insights from phosphate oxygen isotope[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 378: 109286.

[19] 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雏形土为例[J]. 土壤, 2021, 53(1): 30–36.

[20] 刘蕾, 王鹤雄, 张国印, 等. 不同土地利用类型优先流对磷素垂直迁移及淋失风险的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(5): 204–211.

[21] 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.

[22] Gocke M I, Don A, Heidkamp A, et al. The phosphorus status of German cropland—An inventory of top- and subsoils[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2021, 184(1): 51–64.

[23] 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.

[24] 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(S1): 197–203.

[25] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1): 105–110.

[26] Koopmans G F, McDowell R W, Chardon W J, et al. Soil phosphorus quantity–intensity relationships to predict increased soil phosphorus loss to overland and subsurface flow[J]. Chemosphere, 2002, 48(7): 679–687.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 牛犇, 王艳玲. 不同年限稻田红壤发生层土壤磷的固持容量及其释放潜能研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1724–1736.

[30] 吕家珑, 李祖荫. 石灰性土壤中固磷基质的探讨[J]. 土壤通报, 1991, 22(5): 204–206.

[31] 晋艳, 尉庆丰. 土壤基质组成与磷吸附动力学的关系[J]. 土壤通报, 1994, 25(2): 74–77.

[32] Samadi A. Phosphorus sorption characteristics in relation to soil properties in some calcareous soils of Western Azarbaijan Province[J]. Journal of Agricultural Science & Technology 2006, 8(3): 251–264.

[33] Jalali M, Jalali M. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in

calcareous soils with different texture[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566/567: 1080–1093.

[34] Barrow N J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil[J]. Plant and Soil, 2017, 410(1): 401–410.

[35] Jiao Y, Whalen J K, Hendershot W H. Phosphate sorption and release in a sandy-loam soil as influenced by fertilizer sources[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(1): 118–124.

[36] 罗安程, 孙羲, 章永松. 有机肥及其施用方法对红壤磷吸附和解吸特征的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(2): 73–78.

[37] 方兵, 陈林, 王阳, 等. 设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 452–462.

[38] 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.

[39] 石宁, 李彦, 井永苹, 等. 长期施肥对设施菜田土壤氮、磷时空变化及流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2434–2442.

[40] Kalkhajeh Y K, Huang B, Sørensen H, et al. Phosphorus accumulation and leaching risk of greenhousevegetable soils in Southeast China[J]. Pedosphere, 2021, 31(5): 683–693.

[41] 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.

[42] Yang G R, Hao X Y, Li C L, et al. Effect of land use on soil phosphorus sorption-desorption under intensive agricultural practices in plastic-film greenhouses[J]. Pedosphere, 2014, 24(3): 367–377.

[43] Kianpoor Kalkhajeh Y, Huang B, Hu W Y. Impact of preferential flow pathways on phosphorus leaching from typical plastic shed vegetable production soils of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 307: 107218.