

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.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.22.031

# 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

弥明言<sup>1</sup>, 杜超<sup>1</sup>, 温小珊<sup>1</sup>, 姚锋先<sup>2</sup>, 纪玲玲<sup>1</sup>, 李松涛<sup>1</sup>, 王宵君<sup>1</sup>, 程林秀<sup>1</sup>

(1. 赣南师范大学地理与环境工程学院/江西省城市固废低碳循环技术重点实验室,江西赣州 341000;

2. 国家脐橙工程技术研究中心,江西赣州 341000)

**摘要:**探索了短期内动物源和植物源液态有机肥单施或与化肥配施对我国南方柑橘种植系统红壤磷素累积特征及流失风险的影响及作用机制,为该地区创新施肥及减轻农业面源污染提供依据。试验于 2019—2020 年在国家脐橙工程技术研究中心基地开展,设置 6 种处理:清水(CK)、单施液态化肥(T1)、单施动物源有机液肥(T2)、单施植物源有机液肥(T3)、50% 动物源有机液肥 + 50% 化肥配施(T4)和 50% 植物源有机液肥 + 50% 化肥配施(T5)。通过分析不同施肥处理下土壤理化性质、磷素累积情况(全磷和速效磷)及易解吸磷(RDP)含量、土壤最大缓冲量(MBC)、磷平衡零点浓度(EPC<sub>0</sub>)、磷吸附指数(PSI)和磷吸持饱和度(DPS)等指标的变化,并利用相关分析和冗余分析探讨了土壤磷素环境学指标与土壤理化性质之间的关系。结果表明:不同液态有机肥灌溉施用有利于提高土壤磷素含量,土壤全磷和速效磷含量显著增加,植物源液肥比动物源液肥更有利于提高土壤磷素含量,其中 T5 效果最好,有效提高了土壤中遗留磷的活化率。不同液态有机肥灌溉施用下,土壤 RDP、EPC<sub>0</sub> 和 DPS 等磷素环境学指标显著增加,MBC 和 PSI 显著降低,但均未超过环境阈值,短期内环境风险较小。相关分析和冗余分析结果显示,土壤 pH 值、黏粒含量、土壤有机质(SOM)、无定形铁铝氧化物和磷素累积量是土壤磷素环境学指标变化的主要影响因子。综合来看,施用液态有机肥是提高红壤磷素有效性的较好方法,且对于解决红壤丘陵区“用工荒”的难题具有较好的应用前景。

**关键词:**液态有机肥;磷素累积;流失风险;红壤;脐橙园

**中图分类号:**S147;S666.206;X592

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2022)22-0223-10

磷素是提高作物产量和品质的必要元素之一,对植物生长发育有着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。但是,过量施入的磷素在红壤中以吸附、沉淀、同晶置换等方式被土壤中铁、铝氧化物固定并遗留<sup>[2]</sup>,导致磷肥在红壤中的当季利用率为 10% ~ 25%,75% ~ 90% 的磷肥被土壤吸附固持<sup>[3]</sup>。遗留磷在降水侵蚀等外营力驱动下的溶出,已经成为了环境污染尤其是农业面源污染的重要来源<sup>[4]</sup>。近年来,我国柑橘产业发展迅速,2018 年的产量及栽培面积分别为 4 138.14 万 t、248.7 万 hm<sup>2</sup>,已多年位居全球首位<sup>[5]</sup>。在农业部门的规划指导下,赣南-湘南-桂

北柑橘带是我国特色柑橘生产重要基地之一,发展逐渐壮大,柑橘种植已成为我国南方农民增收的主要手段<sup>[6-7]</sup>。但是,过量施肥及施肥方式单一的问题在柑橘种植体系中广泛存在,严重限制了我国柑橘产业的持续健康发展<sup>[8-9]</sup>。赣南作为我国柑橘的主产区,脐橙园大多建在丘陵山地上,坡度在 10° ~ 30° 的占比达 83.5%<sup>[10]</sup>,机械化普及率不够,人工成本过高,常规传统施肥方式效率低下,极大地限制了脐橙产业发展。因此,探究水肥一体化施用模式下红壤磷素有效性及环境风险,对农业面源污染的调控具有迫切的理论和现实意义。

大量研究表明,有机肥的施用不仅提高了土壤保水保肥的能力,也可以提高土壤遗留磷的活化率,其中有机肥和无机肥配施可显著提高土壤全磷和有效磷含量,保障植物生长阶段磷的稳定供给<sup>[11-12]</sup>。有机肥施入土壤后,主要通过以下 2 种方式影响土壤磷有效性:其一,通过腐解产生的有机酸来提高土壤磷素的活化率;其二,有机肥分解出的高分子有机酸包被土壤黏粒,占据其吸附位点,

收稿日期:2022-05-15

基金项目:国家自然科学基金(编号:41907331、32160763);江西省教育厅科技项目(编号:GJJ180780);江西省水利科学院开放研究基金(编号:2021SKTR04)。

作者简介:弥明言(1997—),女,陕西渭南人,硕士研究生,从事农业面源污染防治研究。E-mail:mingyanmi@126.com。

通信作者:杜超,博士,校聘副教授,硕士生导师,从事农业面源污染防治研究。E-mail:cdu@gnnu.edu.cn。

来减少土壤矿物对遗留磷的吸附固持<sup>[13-14]</sup>。目前常见的有机肥施用方式多以撒施、沟施加浇灌等传统方式为主,导致水肥利用率较低<sup>[15]</sup>。与固态有机肥相比,液态有机肥具有流动性和生物活性等特点,它不仅可以调整微生物结构(氨基酸)、丰富群落结构、改善土壤理化性质,还可以有效改善土壤中氮磷等营养元素的分配和迁移。目前,相关学者围绕各种农业种植系统中液态有机肥灌溉施肥的影响开展了一些研究,主要在有机液肥来源、发酵方式、功能性成分特征以及有机肥施用后提升作物产量及品质,减轻农作物病虫害,降低劳动成本等方面<sup>[16-17]</sup>。但是,关于液态有机肥施用后影响磷有效性及可能导致的环境问题没有引起足够的重视。此外,关于液态有机肥在柑橘种植体系的研究也不多见,奚辉等研究了施用有机液肥对柑橘园土壤环境、柑橘经济效益的影响<sup>[18]</sup>,但同样缺乏相关环境效应的研究。

液态有机肥灌溉施用作为一种省工省力的施肥新模式,有望破解南方丘陵山地柑橘园传统有机肥施用面临的“用工荒”难题<sup>[19]</sup>。此外,液态有机肥灌溉施用会显著改变以土壤含水率为代表的土壤理化性质,可能影响土壤有机质及铁铝矿物与磷的相互作用,进而导致磷的有效性 & 环境流失风险 的改变。目前,关于有机肥液态施用后的作用机制不清,须要深入研究。本研究通过施用不同液肥,探讨土壤磷素累积量及磷素环境指标变化,可为提高南方丘陵区柑橘种植产业红壤磷素有效性及防治面源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究于 2019 年 3 月至 2020 年 11 月在国家脐橙工程技术研究中心基地(地理位置 25°79'N,114°88'E)进行。土壤类型为丘陵红壤土,基础理化性质:pH 值为 4.50,黏粒含量为 2.63%,粉粒含量为 58.35%,砂粒含量为 38.98%,比表面积(SSA)为 23.19 m<sup>2</sup>/g,土壤有机质(SOM)含量为 6.94 g/kg,无定形氧化铁(Fe<sub>0</sub>)1.65 g/kg,无定形氧化铝(Al<sub>0</sub>)含量为 1.37 g/kg,碱解氮含量为 46.43 mg/kg,有效磷(Olsen-P)含量为 5.63 mg/kg,速效钾含量为 159.67 mg/kg。

1.2 试验设计

本研究使用的液肥类型包括无机液肥、动物源

有机液肥和植物源有机液肥。其中,动物源有机液肥由纯鸡粪沤制,植物源有机液肥由菜籽饼粕发酵而成,液态有机肥原液理化参数见表 1。试验共有 6 个处理(表 2),CK 为清水浇灌处理,T1 处理为 1.58 倍 Hoagland 营养液,T2 处理为单施动物源液态有机肥,T3 处理为单施植物源液态有机肥,T4 处理为动物源有机液肥与无机营养液等比例混合配施,T5 处理为植物源有机液肥与无机营养液等比例混合配施。采用随机区组设计,每个处理重复 6 次,相邻小区间用水泥砖隔开,小区面积 1.0 m×1.0 m,每个小区定植长势基本一致的 1 年生枳壳砧纽荷尔脐橙幼苗 1 株,嫁接时间为 2018 年 8 月,2019 年 3 月定植,随机区组排列。为了符合当地脐橙产业以氮定肥的实际现状,试验采用等氮设计,2019 年和 2020 年累积施氮量分别为 50、100 g/株,试验结束时每株树总施氮量为 150 g。具体施肥情况见表 2。氮肥为尿素(N 含量为 46%)和磷酸二氢铵(N 含量为 12%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 61%),磷肥为磷酸二氢铵(N 含量为 12%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 61%),钾肥为硫酸钾(K<sub>2</sub>O 含量为 52%)。

2020 年 11 月停止施肥后,每个处理随机选取 3 个小区进行土样采集,在脐橙树滴水线外随机选取 3 个点采集表层土壤(0~15 cm)并混匀,剔除根系后自然风干土样过 2 mm 筛备用。

表 1 液态有机肥原液理化参数

原料	pH 值	电导率 (mS/cm)	总氮含量 (g/L)	总磷含量 (g/L)	总钾含量 (g/L)
动物源液肥	8.59	5.83	1.25	0.21	2.86
植物源液肥	5.46	5.47	0.66	0.91	1.03

1.3 分析项目与测定方法

1.3.1 常规理化指标 土壤 pH 值按电位法(土水质量比 1:2.5)<sup>[20]</sup>进行测定;土壤质地采用氢氧化钠分散-激光粒度仪<sup>[21]</sup>测定;土壤有机质含量采用油浴重铬酸钾法<sup>[22]</sup>测定;碱解氮含量采用碱解扩散法<sup>[23]</sup>测定;土壤比表面积采用氮气物理吸附法<sup>[24]</sup>测定;无定形氧化铁、无定形氧化铝含量采用酸性草酸铵缓冲液浸提-电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)<sup>[25]</sup>测定。

1.3.2 土壤磷素指标测定 土壤全磷含量采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 消化-钼锑抗比色法<sup>[26]</sup>测定;土壤有效磷(速效磷)和土壤易解吸磷(RDP)含量分别采用 NaHCO<sub>3</sub> 和 0.01 mg/L CaCl<sub>2</sub> 浸提(土液质量

表 2 不同液肥处理下氮磷钾的来源与构成

年份	处理	N 含量(g/株)			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 含量(g/株)			K <sub>2</sub> O 含量(g/株)		
		有机肥	无机肥	总量	有机肥	无机肥	总量	有机肥	无机肥	总量
2019	CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	T1	0	50	50	0	69	69	0	78	78
	T2	50	0	50	69	0	69	78	0	78
	T3	50	0	50	69	0	69	78	0	78
	T4	25	25	50	34.5	34.5	69	39	39	78
	T5	25	25	50	34.5	34.5	69	39	39	78
2020	CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	T1	0	100	100	0	19	19	0	47	47
	T2	100	0	100	19	0	19	47	0	47
	T3	100	0	100	19	0	19	47	0	47
	T4	50	50	100	9.5	9.5	19	23.5	23.5	47
	T5	50	50	100	9.5	9.5	19	23.5	23.5	47

比 1 : 20), 钼锑抗比色法<sup>[27]</sup>测定。

磷吸附指数 (PSI)<sup>[28]</sup>, 称取过 60 目风干土样 2.00 g 于 50 mL 离心管内, 加入含磷浓度 75 mg/L 的 0.01 mg/L CaCl<sub>2</sub> 溶液 25 mL (1 g 土加磷量为 1.50 mg), 加入 2 滴甲苯, 25 ℃ 恒温摇床振荡 24 h, 5 000 r/min 离心 8 min, 收集上清液。采用钼锑抗比色法测定溶液磷含量 (C, μmol/L), 并计算磷吸附量 (X, mg/100 g)。

磷等温吸附<sup>[29]</sup>: 称取过 60 目筛的风干土样 2.00 g 于 50 mL 离心管中, 分别加入 0、5、10、20、30、50、100 mg/L 的 0.01 mg/L CaCl<sub>2</sub> (pH 值 = 7) 溶液 40 mL, 加入 3 滴甲苯, 在 25 ℃ 恒温摇床振荡 24 h, 5 000 r/min 离心 8 min 收集上清液, 采用钼锑抗比色法测定溶液磷含量。

磷等温解吸<sup>[30]</sup>: 将上述高速离心后残渣先用无水乙醇清洗 2 遍, 再加入 40 mL 0.01 mg/L CaCl<sub>2</sub> 溶液, 同上 25 ℃ 恒温摇床振荡 24 h, 5 000 r/min 离心 8 min, 测定上清液磷含量。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 数据处理

(1) Langmuir 方程拟合磷的等温吸附:

$$C_e/Q_e = (K \times Q_{\max}) + C_e/Q_{\max} \quad (1)$$

式中: C<sub>e</sub> 为平衡液中的磷浓度, mg/L; Q<sub>e</sub> 为土壤磷的吸附量, mg/kg; Q<sub>max</sub> 为磷最大吸附量, mg/g; K 为吸附亲和力常数。

(2) 土壤最大缓冲量 (MBC):

$$MBC = K \times Q_{\max} \quad (2)$$

(3) 磷吸持饱和度 (DPS):

$$DPS = \text{速效磷}/Q_{\max} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Q<sub>max</sub> 通过 Langmuir 方程拟合获得, mg/g; 速效磷为有效磷含量 (mg/kg)。

(4) 磷吸附指数 (PSI):

$$PSI = X/\lg C \quad (4)$$

式中: C 为平衡液中磷浓度, μmol/L; X 为磷的吸附量, mg/100 g。

(5) 磷素零点吸附平衡浓度 (EPC<sub>0</sub>):

EPC<sub>0</sub> (mg/L) 值是通过 Q<sub>e</sub> 对 C<sub>e</sub> 作图, 其直线与 C<sub>e</sub> 轴的交点即为 EPC<sub>0</sub> 值。其计算公式为

$$Q_e = K_d \times C_e - S_0 \quad (5)$$
$$EPC_0 = S_0/K_d \quad (6)$$

式中: S<sub>0</sub> 为初始状态下的吸磷量, mg/kg; K<sub>d</sub> 为线性吸附常数, L/kg。

1.4.2 数据分析 试验数据采用 Excel 2016 进行处理后用 SPSS 21.0 对数据进行差异显著性检验 (LSD), 采用 Origin 2021b 进行拟合分析绘图, 采用 Canono 5.0 进行冗余分析 (RDA)。

2 结果与分析

2.1 液态有机肥灌溉施用对红壤理化性质及磷素累积的影响

2.1.1 液态有机肥灌溉施用对红壤理化性质的影响 在不同有机液肥的施用下, 土壤理化性质具有显著性差异 (表 3)。土壤 pH 值为 4.26 ~ 4.47, T2 和 T3 处理与 CK 相比分别增加了 0.09、0.05, 但 3 个处理间均无显著差异, T1、T4 和 T5 处理与 CK 相比分别显著减小了 0.12、0.34、0.17, T1、T5 处理之

间无显著性差异,但显著高于 T4 处理。土壤黏粒占比在 1.55% ~ 2.58%,与 CK 相比均有所降低,CK、T5 处理之间无显著差异,但均显著高于 T1 处理,其他处理间无显著差异;比表面积值在 21.55 ~ 22.90 m<sup>2</sup>/g,5 种施肥处理后比表面积与 CK 相比均降低;土壤碱解氮含量为 69.50 ~ 143.50 mg/kg,T1、T2、T3、T4 和 T5 处理与对照相比分别升高了 36.63、4.33、78.63、18.83、52.66 mg/kg,各处理间均具有显著差异;土壤有机质含量为 17.07 ~ 26.63 g/kg,T1 和 T5 有机质与 CK 相比显著增加了

4.17、7.89 g/kg,T2、T3 和 T4 处理比 CK 显著降低了 1.14、0.76、1.67 g/kg,T1、T3、T4、T5 处理间均具有显著性差异,T2 和 T3 处理间无显著差异;无定形氧化铁含量为 1.18 ~ 2.17 g/kg,T2 和 T3 处理与 CK 相比增加了 0.52、0.08 g/kg,T1、T4 和 T5 处理与 CK 相比降低 0.23、0.45、0.09 g/kg,T2 处理含量最高,但与 CK 和 T5 处理差异不显著,与其余处理差异显著。5 种处理的无定形氧化铝含量与 CK 相比均降低,T5 处理与 CK 无显著差异,其余处理与 CK 相比均差异显著。

表 3 不同液态有机肥施用下红壤的理化性质

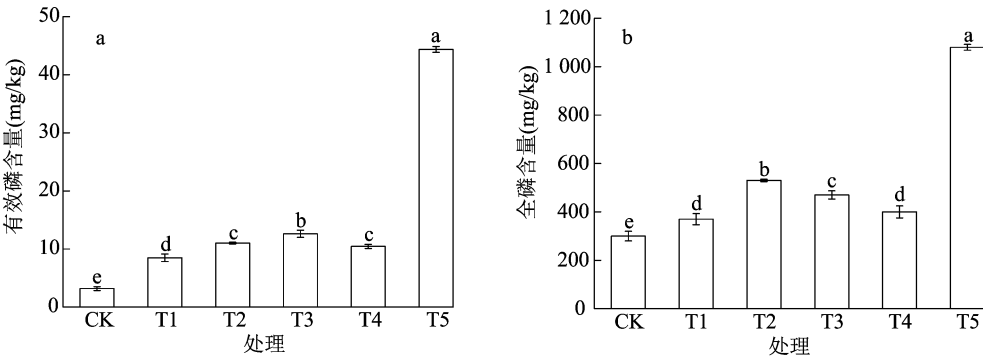
处理	pH 值	黏粒含量 (%)	SSA (m <sup>2</sup> /g)	碱解氮含量 (mg/kg)	SOM (g/kg)	Fe <sub>0</sub> 含量 (g/kg)	Al <sub>0</sub> 含量 (g/kg)
CK	4.38 ± 0.11a	2.63 ± 0.25a	23.19	65.17 ± 1.89f	18.74 ± 0.35c	1.65 ± 0.34ab	1.37 ± 0.31a
T1	4.26 ± 0.01b	1.55 ± 0.09b	21.55	101.80 ± 0.00e	22.91 ± 0.96b	1.42 ± 0.26bc	1.13 ± 0.27cd
T2	4.47 ± 0.12a	1.83 ± 0.09ab	22.75	69.50 ± 0.00e	17.60 ± 0.38de	2.17 ± 0.24a	1.15 ± 0.16c
T3	4.43 ± 0.00a	1.83 ± 0.41ab	21.91	143.50 ± 0.00a	17.98 ± 0.23d	1.73 ± 0.30b	0.95 ± 0.07d
T4	4.04 ± 0.01c	2.41 ± 0.76ab	22.90	84.00 ± 3.50d	17.07 ± 0.23e	1.18 ± 0.05c	1.08 ± 0.06cd
T5	4.21 ± 0.02b	2.58 ± 0.42a	22.38	117.83 ± 2.02b	26.63 ± 0.23a	1.56 ± 0.09ab	1.27 ± 0.16ab

注:同一列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。表 5 同。

2.1.2 液态有机肥灌溉施用对红壤磷素累积的影响 土壤有效磷和全磷的变化可以反映出土壤磷素的积累情况。由图 1 可知,不同有机液肥的灌溉施用均可以提高土壤有效磷和全磷的含量,但施肥对土壤有效磷的影响程度显著大于对土壤全磷的影响程度,且因有机液肥的配施比例不同增加幅度也有所不同。通过不同液态有机肥的灌溉施用,不同处理之间具有显著性差异,其中 T5 处理的速效磷显著高于其他处理,与 CK 相比提高了 12.90 倍,T1、T2、T3、T4 处理分别增加了 1.66、2.45、2.96、2.28 倍。T5 处理的全磷含量显著高于其他处理,与 CK 相比提高了 2.60 倍,T1、T2、T3、T4 处理分别

增加了 0.23、0.77、0.57、0.33 倍。植物源液肥与无机液肥配施可以显著提高土壤中有效磷的含量,同时磷素在土壤中累积富集。

土壤有效磷累积含量的高低,不仅可以反映土壤磷素的肥力水平,而且在一定程度上可以反映通过降水径流产生的磷素环境效应。从 6 种施肥处理可以看出,在同等施氮的条件下,随着施磷量的增加,土壤中有效磷和全磷含量呈现增加的趋势,同时有效磷在全磷中的占比也发生了相应变化,5 种处理均增大了有效磷的占比,范围为 2.08% ~ 4.11%,与 CK 相比,分别增加了 1.23、1.02、1.62、1.55、3.05 百分点,其中 T5 处理速效磷占比最大,



不同小写字母分别代表处理间显著性差异(P<0.05)  
图1 不同液态有机肥施用对红壤磷素累积的影响

T2 处理最小。

## 2.2 液态有机肥灌溉施用对红壤磷素吸附解吸特征及环境学指标的影响

### 2.2.1 液态有机肥灌溉施用对红壤磷素吸附解吸特征的影响

不同有机液肥土壤磷等温吸附曲线见图 2-a, 各处理间存在较大差异。在低磷浓度时, 外源磷在土壤表面的吸附急剧增加; 高磷浓度时, 吸附趋于稳定, 外源磷在土壤表面的吸附量随外源磷浓度的升高而降低。其中, T5 处理吸附曲线的位置与其他处理相比最低, 表明在相同的溶液磷浓度下, T5 处理下土壤对磷的吸附量最小。T2 处理在平衡液磷浓度 0 ~ 30 mg/L 时, 曲线位置较高, 反映了 T2 处理下土壤对磷素吸附较强。CK 处理下土壤磷吸附量最大, 可能是因为在清水浇灌的处理下土壤磷素含量亏缺, 造成土壤对磷的吸附能力增强, 吸附量显著增加。土壤磷吸附量与平衡液磷浓度的关系用 Langmuir 等温吸附方程有较好的拟合效果, Langmuir 回归方程拟合出的决定系数在 0.91 ~ 0.96 之间, 均达到极显著水平, 由回归方程

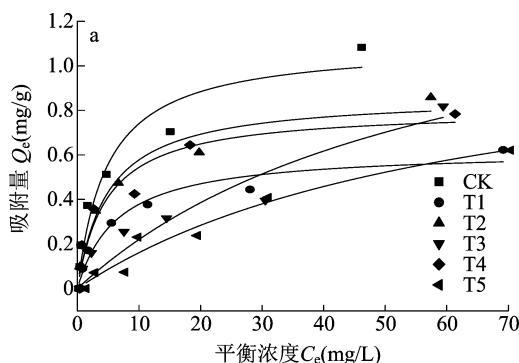


图2 不同液态有机肥施用对红壤磷素吸附解吸特征的影响

表 4 不同液态有机肥施用下红壤吸附特征参数

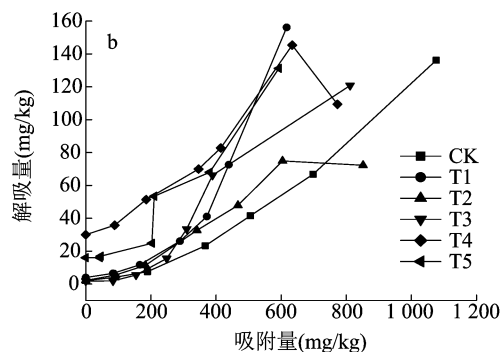
处理	$Q_{\max}$ (mg/g)	$K$	$R^2$
CK	1.10	0.21	0.94
T1	0.62	0.16	0.96
T2	0.87	0.20	0.96
T3	1.55	0.02	0.91
T4	0.81	0.21	0.92
T5	1.19	0.02	0.95

### 2.2.2 液态有机肥灌溉施用对红壤磷素环境学指标的影响

在不同有机液肥处理下, 土壤中的磷素风险值发生了显著变化(表 5)。RDP、EPC<sub>0</sub> 和 DPS 参数表征环境风险意义一致, 均与土壤磷累积量呈显著正相关。与 CK 相比, T5 处理 RDP 含量增加了

估算得出相关参数可表征土壤磷吸附的基本特征。由表 4 可知, 不同有机液肥处理的亲和力常数 ( $K$ ) 为 0.02 ~ 0.21, 除 T4 处理外, 其他施肥处理的  $K$  值均小于 CK; 不同有机液肥处理  $Q_{\max}$  为 0.62 ~ 1.55 mg/g, 其中 T1、T2 和 T4 处理均比 CK 值小, T3 和 T5 处理均比 CK 值大, 而 T5 的  $Q_{\max}$  值小于 T3, 表明在不同液肥处理下, 植物源有机液肥与无机液肥配施土壤的吸附能力小于单施植物源液肥处理。

由图 2-b 可知, T4 处理解吸曲线位置在 T1 之上, T2、T3 和 T5 处理曲线趋于中间位置, 而 CK 处理曲线在最下面。说明有机液肥与无机液肥配施处理的土壤对磷的吸附能力较弱, 外源加入的磷更易被解吸出来进入液相; 单施动物源液肥的土壤对磷的吸附较强, 新加入的磷更难解吸出来。从吸附曲线的趋势可以看出, 在外源磷浓度较低时, 解吸曲线增长趋势较为平缓, 而当外源磷浓度较高时, 解吸曲线明显变陡。表明在不同外源磷浓度下, 土壤对磷的吸附能力也有所不同, 高磷浓度下吸附固持的磷素更易解吸出来, 土壤对磷的吸附能力降低。



3.23 mg/kg, 其他处理 (T1、T2、T3、T4) 分别降低了 12.05%、4.01%、5.61%、20.14%, T5 处理与其他处理之间具有显著性差异, T1、T2、T3、T4 之间无显著性差异, 说明不同有机液肥处理下, T5 处理更易发生磷的流失, 流失风险较大; EPC<sub>0</sub> 是在平衡溶液中土壤磷素达到吸附与解吸的动态平衡时的浓度, 表明在此浓度下土壤既不发生吸附, 也不发生解吸。不同处理的 EPC<sub>0</sub> 为 0.11 ~ 1.68 mg/L, 与 CK 相比, T4、T5 处理的 EPC<sub>0</sub> 分别增大 0.21、1.38 mg/L, T1、T2、T3 处理分别降低了 0.06、0.04、0.19 mg/L, T3、T5 处理间相差 1.57 mg/L。DPS 反映土壤吸附磷位点的饱和状态, 不同施肥处理下 DPS 为 0.29% ~ 3.72%; 与 CK 相比, 5 种施肥处理的 DPS 值均增大, 其中 T5 的 DPS 值显著增大, 是 CK 的 11.83 倍,

T1、T2、T4 处理间无显著性差异。MBC 和 PSI 参数表征环境风险意义一致,均与土壤磷累积量呈负相关关系。 $Q_{\max}$ 和  $K$ 的乘积代表 MBC,是判断土壤供磷能力的综合参数。不同有机液肥处理 MBC 为 0.03 ~0.23,其中,CK 处理最高,T5 处理最低,表明 CK 处理下土壤对磷素的缓冲能力最大,而 T5 处理

最小,T1、T2、T3 和 T4 处理的土壤对外源磷的缓冲能力大小介于二者之间。PSI 用于表征土壤中磷的吸持或释放的可能性。不同处理的 PSI 值为 32.29 ~44.88 mg/kg。与 CK 相比,不同液态有机肥灌溉处理后土壤 PSI 值均显著降低,其中 T5 处理的 PSI 值最小。

表 5 不同液态有机肥施用下红壤磷素环境学指标

处理	RDP (mg/kg)	EPC <sub>0</sub> (mg/L)	MBC	PSI (mg/kg)	DPS (%)
CK	2.07 ±0.06b	0.30	0.23	44.88 ±0.06a	0.29 ±0.01d
T1	1.81 ±0.07bc	0.24	0.10	33.01 ±0.62d	1.37 ±0.06b
T2	1.98 ±0.12bc	0.26	0.17	39.72 ±0.35b	1.27 ±0.01b
T3	1.95 ±0.10bc	0.11	0.03	38.37 ±0.49c	0.81 ±0.02c
T4	1.65 ±0.05c	0.51	0.17	32.51 ±0.06d	1.28 ±0.06b
T5	5.30 ±0.15a	1.68	0.02	32.29 ±0.22d	3.72 ±0.06a

注:同列数据后内不同小写字母分别代表处理间差异显著( $P<0.05$ ;LSD 检验)。

2.3 液态有机肥灌溉施用下红壤理化性质与磷环境学指标的关系

2.3.1 液态有机肥灌溉施用下磷素环境学指标与理化性质的相关性 由表 6 可知,RDP 与 SOM 存在显著正相关关系( $r=0.83^*$ ),与全磷和速效磷存在极显著正相关关系( $r=0.95^{**}$ 、 $r=0.96^{**}$ )。EPC<sub>0</sub>与黏粒、SOM 存在正相关关系( $r=0.58$ 、 $r=0.78$ ),与全磷和速效磷存在极显著正相关关系( $r=$

$0.91^{**}$ 、 $r=0.94^{**}$ )。DPS 与 SOM 存在显著正相关关系( $r=0.82^*$ ),与全磷和速效磷存在极显著正相关关系( $r=0.95^{**}$ 、 $r=0.96^{**}$ )。 $Q_{\max}$ 与碱解氮存在正相关关系( $r=0.62$ ), $K$ 值与 SSA 存在正相关关系( $r=0.55$ ),与 SOM、全磷、速效磷存在负相关关系( $r=-0.54$ 、 $r=-0.67$ 、 $r=-0.70$ ),与碱解氮存在极显著负相关关系( $r=-0.92^{**}$ )。MBC 与 SSA 存在正相关关系( $r=0.74$ ),与 SOM、全磷、速效磷存

表 6 不同液态有机肥施用对红壤理化性质与磷流失风险参数的相关性分析

指标	相关系数															
	pH 值	黏粒	SSA	碱解氮	Fe <sub>0</sub>	Al <sub>0</sub>	SOM	总磷	有效磷	$Q_{\max}$	$K$	RDP	EPC <sub>0</sub>	MBC	PSI	DPS
pH 值	1.00															
黏粒	-0.38	1.00														
SSA	-0.07	0.74	1.00													
碱解氮	0.01	-0.27	-0.73	1.00												
Fe <sub>0</sub>	0.76	-0.11	0.09	-0.02	1.00											
Al <sub>0</sub>	-0.004	0.65	0.55	-0.58	0.18	1.00										
SOM	-0.24	0.13	-0.42	0.35	0.10	0.38	1.00									
总磷	-0.15	0.32	-0.10	0.40	0.44	0.19	0.73	1.00								
有效磷	-0.26	0.35	-0.15	0.46	0.30	0.18	0.78	0.99**	1.00							
$Q_{\max}$	0.40	0.23	-0.03	0.62	0.34	-0.18	-0.03	0.30	0.29	1.00						
$K$	-0.10	0.04	0.55	-0.92**	-0.25	0.29	-0.54	-0.67	-0.70	-0.72	1.00					
RDP	-0.18	0.48	-0.03	0.33	0.35	0.42	0.83*	0.95**	0.96**	0.30	-0.63	1.00				
EPC <sub>0</sub>	-0.44	0.58	0.09	0.20	0.15	0.43	0.78	0.91*	0.94**	0.12	-0.47	0.96**	1.00			
MBC	0.05	0.25	0.74	-0.94**	-0.12	0.44	-0.59	-0.64	-0.68	-0.48	0.94**	-0.55	-0.44	1.00		
PSI	0.74	0.14	0.49	-0.42	0.41	0.35	-0.50	-0.45	-0.53	0.32	0.31	-0.35	-0.49	0.56	1.00	
DPS	-0.38	0.25	-0.20	0.34	0.22	0.19	0.82*	0.95**	0.96**	0.03	-0.55	0.91*	0.93**	-0.62	-0.67	1.00

注:基于 Pearson's 相关系数的相关性矩阵,\*\*、\* 分别表示在 0.01、0.05 水平上显著相关。

在负相关关系( $r = -0.59, r = -0.64, r = -0.68$ ),与碱解氮存在极显著负相关关系( $r = -0.94^{**}$ )。PSI 与 pH 值存在正相关关系( $r = 0.74$ ),与 SOM 和速效磷存在负相关关系( $r = -0.50, r = -0.53$ )。

**2.3.2 液态有机肥灌溉施用下磷素环境学指标与理化性质的冗余分析** 土壤理化性质(环境因子)显著影响磷素的环境学指标,本研究通过 RDA 分析环境学指标与土壤理化性质之间的关系。由图 3 可见,RDA 分析图中磷素指标的箭头与环境因子箭头的夹角及连线长度可以看出理化性质对磷环境风险参数的影响。结果表明,RDA 第 1 轴和第 2 轴累计解释了土壤理化性质对红壤旱地磷素含量变化影响程度的 92.20% ( $P < 0.01$ ),且第一轴包含了大部分磷环境风险影响因子信息,能解释 78.20% ( $P < 0.01$ )。第一象限内的  $Q_{\max}$ 、RDP 和  $EPC_0$  与 pH 值、黏粒、 $Al_0$ 、碱解氮、全磷和速效磷呈正相关关系;第二象限内的 PSI 与 SSA 和  $Fe_0$  呈正相关关系;DPS 与 SOM、全磷、速效磷和呈正相关关系。另外第二象限的 PSI 与 SOM、全磷和速效磷呈负相关关系;第三象限的 MBC 和 K 值与黏粒、 $Al_0$ 、碱解氮、全磷、速效磷呈负相关关系。

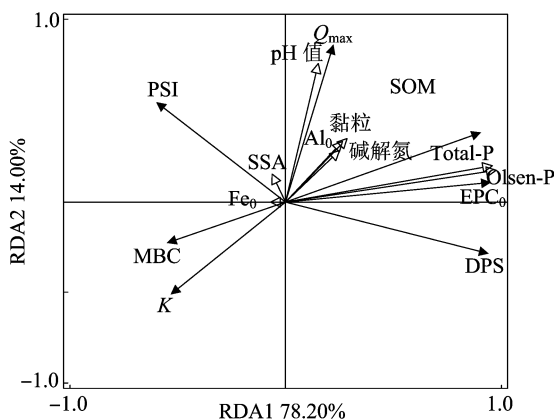


图3 不同液态有机肥施用对红壤理化性质与磷流失风险参数的相关性分析

### 3 讨论与结论

#### 3.1 液态有机肥灌溉施用对红壤磷素累积的影响

本研究通过施用无机液肥和有机液肥或者两者配施,来探究液态有机肥对红壤磷素累积的影响。结果表明,施用液态有机肥可以显著增加土壤磷素累积量,降低土壤对外源磷的固持能力。戚瑞生等<sup>[31]</sup>对黄土旱塬地区长期定位施肥处理下土壤磷素累积的研究结果表明,当土壤速效磷含量超过 62.00 mg/kg 时,磷素就容易发生地表径流,造成环境污染。本试验结果表明,速效磷含量在 8.49 ~ 44.37 mg/kg 之

间,均不会发生地表径流等环境风险问题。与动物源液肥处理相比,植物源液肥处理磷素累积量显著增加,这可能是因为植物源液肥中含有大量的速效无机磷和有机磷,土壤在一定程度上固定了液肥中的磷素<sup>[32]</sup>。与单施植物源液肥相比,植物源液肥与无机液肥配施能更好地提高土壤有效磷含量,一方面可能是因为单施植物源有机肥中磷素起效慢,而与无机液肥配施迅速加快了肥料中磷素的利用率。另一方面,植物源液肥与无机液肥配施增加了土壤中有机质的含量,有机质进而转化为腐殖酸,在酸性土壤中腐殖酸中的柠檬酸对磷的活化效果最好,因为酸性土壤中无机磷主要以磷酸铁、铝盐的形式存在,柠檬酸与酸性土壤中铁铝离子络合能力最好,抑制土壤对无机磷的固定,加大了土壤遗留磷的活性,影响磷素的转化<sup>[33]</sup>。Kim 等研究结果也表明在施用化肥的基础上施加有机液肥,有利于土壤形成稳定团聚体,增加胶体物质,改善土壤理化特性,提高土壤含水率和透气性能,提高土壤养分的利用率,为植物创造良好的生长环境<sup>[34]</sup>。

#### 3.2 液态有机肥灌溉施用对红壤磷素吸附解吸特征及环境学指标的影响

本研究表明,红壤对磷的等温吸附特征符合 Langmuir 方程,不同液肥灌溉施用会明显影响红壤对磷的吸附特性。当外源磷溶液浓度在 0 ~ 30 mg/L 时,吸附曲线具有较大的斜率,此阶段为磷的快速吸附阶段,原因可能有 2 个方面:其一可能是因为土壤中无定形铁铝氧化物对磷的化学吸附,其二可能是因为土壤中的黏粒上的盐基离子对磷的共价吸附。当外源磷浓度大于 30 mg/L 时曲线特征趋于平缓,吸附量增加较慢,土壤磷素吸附量逐渐达到饱和,这一阶段为慢速吸附阶段,可能与土壤对磷的物理化学吸附有关<sup>[35]</sup>。本研究还表明,在整个等温吸附过程中,植物源液肥处理的吸附曲线位置低于动物源液肥处理,其中植物源液肥与无机液肥配施的吸附曲线的位置最低,原因可能是随着土壤磷素的积累,磷素表面的吸附位点被土壤遗留磷占位,从而降低了磷的吸附能力<sup>[36]</sup>。土壤磷解吸特征是土壤吸附的固态磷被一部分解吸进入溶液中,本研究表明,动物源液肥与无机液肥配施处理的土壤对磷的吸附较弱,可能是因为有机液肥的施用降低了土壤黏粒占比,导致土壤对磷的吸附结合能减少,进而土壤更容易解吸出已经被吸附固持的磷素<sup>[37]</sup>。因此,土壤磷解吸特征也是评价土壤磷环境风险大小

的重要指标,同时也涉及到环境方面的问题。

土壤易解吸磷(RDP)是指土壤遗留磷容易进入液相的磷素,表征土壤磷素通过地表径流入水体的难易程度<sup>[38]</sup>。本试验结果表明,除植物源与无机液肥处理外,其他处理的 RDP 含量均降低。一方面可能是因为液态肥料挥发性较强,另一方面液态肥料具有肥效快、流动性强等特点,更有利于在短期内供给植物更多的可溶性磷,残留在土壤中的易解吸磷含量减少<sup>[39]</sup>。王敏峰等研究菜地中土壤磷素累积的结果表明,施用沼液后 RDP 含量达到了 20.20 mg/kg,显著提高土壤可溶性磷的累积,加大了环境风险<sup>[40]</sup>,与其相比本试验风险较小。磷零点吸持平衡浓度( $EPC_0$ )用来表征土水界面磷交换的方向和含量,土壤磷素处于动态平衡时,其  $EPC_0$  值越小土壤固相中的磷素较难进入液相,而  $EPC_0$  值越大,则土壤固相中的也就更容易进入液相<sup>[41]</sup>。本研究表明,单施植物源液肥的植物源  $EPC_0$  值最低,与无机配施处理的  $EPC_0$  值最高,与有效磷含量呈显著正相关。王艳玲等的研究结果也表明,与 CK 相比,施用无机肥和有机肥处理的  $EPC_0$  呈增大趋势,说明施用有机肥和无机肥均导致土壤磷素流失风险增大<sup>[42]</sup>。不仅如此,本试验结果表明不同有机液肥的施用土壤磷吸持饱和度(DPS)也有不同程度的升高,因此将 DPS 能力来表征随径流或被淋溶的流失风险。Sekhon 等认为当 DPS 大于 25%,土壤磷素就容易流失<sup>[43]</sup>。本研究结果表明,与对照相比,在不同的液肥灌溉处理后,DPS 值均增大,其中有机与无机液肥配施的 DPS 值大于单施有机液肥,但 5 种处理均未超出环境阈值。

土壤磷素的最大缓冲量(MBC)主要受土壤质地、有机物质和施肥模式等因素的影响<sup>[44]</sup>。本研究结果显示,植物源液肥处理的最大缓冲量小于动物源液肥处理,且植物源液肥与无机液肥配施小于各处理,原因可能是一方面植物源液肥能有明显提高有机质含量,有机质具有显著的凝胶性质,显著降低了土壤铁铝矿物对磷的吸附能力。另一方面可能是,液肥中含有大量的有机酸,而有机酸可以通过促进高稳性磷向活性磷转化,显著提高土壤速效磷含量,提高的幅度可达 10~1 000 倍,增大磷素的活化率,降低土壤磷素最大缓冲量<sup>[45]</sup>。土壤磷吸附指数(PSI)用于评判土壤磷素的吸持或释放能力,评估磷素从固相磷向液相释放的概率。本研究结果表明,与 CK 相比,5 种施肥处理的土壤 PSI 值均

显著降低,有机与无机液肥配施的 PSI 值小于单施有机液肥,说明有机无机配施会显著增大磷的流失风险,其中植物源与无机液肥配施风险较大。魏红安等探究了红壤磷素的环境临界值,研究结果表明 PSI 的临界值为 23.46 mg/kg<sup>[46]</sup>,但本研究结果中 5 种施肥处理均未超出环境阈值。本试验为探究短期内液态有机肥的灌溉施用对土壤磷素流失风险的影响,但由于液态肥料肥效时间较短,土壤中磷素含量累积不高,试验中 5 种施肥处理均未超出环境阈值。如果在长期施肥模式下,随着土壤吸磷量的增多,土壤固磷能力受限,磷素进入水体的可能性也将增大,因此液态有机肥灌溉施用对土壤磷素环境风险的影响值得关注。

本研究表明,不同的施肥模式直接影响土壤理化性质及土壤磷素的吸附、转化和解吸的特征,间接影响着磷素环境学指标。因此,列举不同施肥模式影响下速效磷、RDP、PSI 和 DPS 相关环境风险值(表 7)。研究结果表明,施肥可以迅速增加土壤中速效磷和 RDP 的含量,各处理 PSI 值远远超出环境阈值,部分处理的 DPS 也严重超出环境阈值,其中有机肥混合施用 PSI 超出阈值 20.75 mg/kg, DPS 超出环境阈值 131.95%。液体猪粪处理 PSI 值超出阈值 21.50 mg/kg, DPS 也超过了 9.00%,严重威胁到环境安全。本研究数据表明,植物源与无机液肥配施不仅提高了土壤中速效磷的含量,PSI 与临界值相比大 7.29 mg/kg, DPS 也比临界值小 21.58%,磷素环境风险较小。

### 3.3 液态有机肥灌溉施用下红壤磷素环境学指标对理化性质变化的响应

不同液态有机肥灌溉施用下影响着土壤的理化性质(如 pH 值、土壤质地、铁铝氧化物、有机质等)进而间接影响土壤磷素的累积与释放。本试验中,易解吸磷(RDP)、磷零点吸持平衡浓度( $EPC_0$ )和磷吸附饱和度(DPS)与土壤磷素累积量呈正相关,表明当土壤磷素累积量增加时,风险参数值增大,加大土壤磷素的环境风险。一方面土壤磷素含量的累积是影响 RDP、 $EPC_0$  和 DPS 的主要因素,另一方面黏粒与其呈显著正相关,可能是因为土壤黏粒含量越大,对磷的吸附能力增大,土壤黏粒含量的增大可增加土壤对磷的结合能,造成被土壤吸附的磷更容易被固持,再者土壤铁铝氧化物也与其具有较大的正相关性。陈波浪等在耕型红壤上进行的 12 年长期肥力定位试验结果表明,土壤中结晶态



表 7 不同有机肥处理下磷素环境学指标对比

处理	速效磷含量 (mg/kg)	RDP 含量 (mg/kg)	PSI (mg/kg)	DPS (%)	参考文献
化肥 + 15% 有机肥	56.30	0.35	—	39.80	[47]
单施有机肥	99.90	1.35	11.82	8.38	[48]
有机肥混合	703.13	—	4.25	156.95	[49]
化肥 + 有机肥	95.61	30.14	11.89	10.66	[50]
液体猪粪	150.00	3.21	3.50	34.00	[51]
有机肥 + 磷肥	317.10	118.90	—	140.45	[52]
有机肥 + 化肥	191.67	—	—	17.25	[53]
猪粪 + 过磷酸钙	14.54	—	20.41	280.60	[54]
有机肥 + 磷肥	32.22	1.12	—	5.80	[55]
氮磷有机肥	73.13	—	7.43	28.50	[56]
化肥 + 有机肥	10.77	0.43	15.48	8.40	[57]
本研究(植物源 + 无机液肥)	46.33	5.30	32.29	3.42	本研究

铁铝化合物被有机质通过溶解、络合和还原的方式,提高铁铝化合物的活性使非晶质铁铝化合物增多,加大对磷的吸附能力<sup>[58]</sup>。土壤最大缓冲量(MBC)和磷吸附指数(PSI)与土壤累积量呈负相关,表明当土壤磷素累积量增加时,风险参数值减小,环境风险加大。SSA 和有机质是影响 MBC 和 PSI 的主要因素,SSA 与 MBC 和 PSI 具有较大的显著正相关性,可能是因为土壤比表面积较小,土壤固持磷的能力减小<sup>[59]</sup>。研究结果也表明,pH 值与 PSI 具有显著负相关,可能是因为 pH 值与有机质呈显著负相关关系,有机质含量增加可能会致使土壤 pH 值降低,而酸化的土壤更容易引发磷的流失,此外土壤中交换性铝的含量也极易受到土壤 pH 值的影响,影响磷吸附指数<sup>[60]</sup>。

3.4 结论

不同液态有机肥灌溉施用均可以显著增加红壤中磷素的累积和提高磷素有效性,其中植物源有机液肥与无机液肥配施在磷素累积和提升磷素有效性方面更有优势。但是,植物源有机液肥与无机液肥配施下,土壤易解吸磷(RDP)、土壤磷素零点吸附平衡浓度(EPC<sub>0</sub>)和吸附饱和度(DPS)等环境磷指标也显著增加,虽然目前还没有超过环境阈值,但也表明这种施肥模式下红壤磷的潜在流失风险最大。综合看来,在南方红壤橘园种植系统,植物源有机液肥与无机液肥配施具有节省劳动力和短期内迅速提高磷素有效性的显著优势,但是相应的面源磷流失风险也显著高于其他施肥模式。短期看来,该种施肥模式下环境风险虽在阈值范围

内,但随着施肥的继续进行,长期环境效应仍值得持续关注。

参考文献:

[1]Daly K,Styles D,Lalor S,et al. Phosphorus sorption,supply potential and availability in soils with contrasting parent material and soil chemical properties[J]. European Journal of Soil Science,2015,66 (4):792-801.

[2]Sarah D,Luciano G,Khara G,et al. Accessing legacy phosphorus in soils[J]. Soil Systems,2020,4(4):74.

[3]Liu J,Hu Y F,Yang J J,et al. Investigation of soil legacy phosphorus transformation in long-term agricultural fields using sequential fractionation,P K-edge XANES and solution P NMR spectroscopy [J]. Environmental Science & Technology,2015,49(1):168-176.

[4]刘小曼,刘晓东,刘伟栋,等. 我国不同种类柑橘养分状况及氮磷钾推荐用量研究[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(4):565-574.

[5]邓秀新. 国内外柑橘产业发展趋势与柑橘优势区域规划[J]. 广西园艺,2004,15(4):6-10.

[6]胡友,陈昕,祁春节. 中国柑橘生产布局变迁驱动机制研究:基于农户决策视角[J]. 中国农业资源与区划,2022,43(5):122-131.

[7]梁珊珊. 我国柑橘主产区氮磷钾肥施用现状及减施潜力研究[D]. 武汉:华中农业大学,2017.

[8]宋金田,祁春节. 农户柑橘种植意愿及影响因素实证分析:基于我国柑橘主产区152个农户的调查[J]. 华中农业大学学报(社会科学版),2012(4):17-21.

[9]刘桂东,姜存仓,王运华,等. 赣南脐橙园土壤基本养分含量分析与评价[J]. 中国南方果树,2010,39(1):1-3,8.

[10]王瑞东,姜存仓,刘桂东,等. 赣南脐橙园立地条件及种植现状调查与分析[J]. 中国南方果树,2011,40(1):1-3.

[11]夏文建,冀建华,刘佳,等. 长期不同施肥红壤磷素特征和流

- 失风险研究[J]. 中国生态农业学报,2018,26(12):1876–1886.
- [12] 陈利军,蒋瑞霁,王浩田,等. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响[J]. 土壤,2020,52(3):451–457.
- [13] 王永壮,陈欣,史奕,等. 低分子量有机酸对土壤磷活化及其机制研究进展[J]. 生态学杂志,2018,37(7):2189–2198.
- [14] 李春越,党廷辉,王万忠,等. 腐殖酸对农田土壤磷素吸附行为的影响研究[J]. 水土保持学报,2011,25(3):77–82.
- [15] 赖金平,姚锋先,徐丽红,等. 有机液肥施用对纽荷尔脐橙幼树生长及其养分吸收的影响[J]. 南方农业学报,2021,52(10):2814–2823.
- [16] 徐海东,董合林,苏丽丽,等. 液态有机肥对滴灌棉花光合特性及产量形成规律的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(20):71–77.
- [17] 徐瑞强,徐海东,董合林,等. 液态有机肥与氮肥配施对棉花生理特性及产量的影响[J]. 中国农学通报,2019,35(13):42–47.
- [18] 奚辉,李国雷,陶安安,等. 滴灌施用有机液肥对红美人柑橘园土壤环境、柑橘产量、品质和经济效益的影响[J]. 浙江农业学报,2021,33(4):670–677.
- [19] 李思,弓瑶,詹保成,等. 中国有机液肥的应用现状及发展趋势[J]. 中国农学通报,2021,37(21):75–79.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2000:12–15.
- [21] 李慧茹,刘博,王汝幸,等. 土壤粒度组成分析方法对比[J]. 中国沙漠,2018,38(3):619–627.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000:30–33.
- [23] 李伟,张书慧,张倩,等. 近红外光谱法快速测定土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量[J]. 农业工程学报,2007,23(1):55–59.
- [24] 谢潇. 氮气吸附法在测定材料比表面积和孔径分布方面的应用原理[J]. 科技与创新,2019(9):7–8,12.
- [25] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 2版. 北京:农业出版社,1988.
- [26] 李朝英,郑路. 流动分析仪快速测定土壤全磷含量[J]. 中国土壤与肥料,2020(4):266–270.
- [27] 王肖君,王季丰,侯琼,等. 西苕溪流域主要经济林土壤磷素流失风险研究[J]. 土壤学报,2021,58(2):487–494.
- [28] 杨燕玲. 农田土壤对磷的吸附和解吸特性研究进展[J]. 安徽农业科学,2019,47(1):4–5,16.
- [29] 章明奎,周翠,方利平. 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.
- [30] 王蕾,王艳玲,李欢,等. 长期施肥下红壤旱地磷素有效性影响因子的冗余分析[J]. 中国土壤与肥料,2021(1):17–25.
- [31] 戚瑞生,党廷辉,杨绍琼,等. 长期定位施肥对土壤磷素吸持特性与淋失突变点影响的研究[J]. 土壤通报,2012,43(5):1187–1194.
- [32] 何金明,高峻岭,宋克光,等. 磷肥用量对番茄产量、磷素利用及土壤有效磷的影响[J]. 中国农学通报,2016,32(31):40–45.
- [33] 朱晓晖,杜晓玉,张维理. 有机肥料种类对土壤有效磷累积量的影响及其流失风险[J]. 中国土壤与肥料,2013(5):14–18.
- [34] Kim M S, Min H G, Kim J G. Integrating amendment and liquid fertilizer for aided – phytostabilization and its impacts on soil microbiological properties in arsenic – contaminated soil [J]. Applied Sciences,2020,10(11):3985.
- [35] 邵兴华,张建忠. 红壤磷吸附解吸特性及环境效应研究[J]. 广东农业科学,2007,34(11):85–87.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Börling K, Otabbong E, Barberis E. Soil variables for predicting potential phosphorus release in Swedish noncalcareous soils [J]. Journal of Environmental Quality,2004,33(1):99–106.
- [39] Jung J, Choi H. Eco – physiological properties of open – field cucumbers responded to organic liquid fertilizers [J]. Sustainability,2020,12(23):9830.
- [40] 王敏锋,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.
- [41] 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.
- [42] 王艳玲,何园球,吴洪生,等. 长期施肥下红壤磷素积累的环境风险分析[J]. 土壤学报,2010,47(5):880–887.
- [43] Sekhon B S, Bhumbla D K, Sencindiver J, et al. Using soil survey data for series – level environmental phosphorus risk assessment [J]. Environmental Earth Sciences,2014,72(7):2345–2356.
- [44] 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.
- [45] 魏丹,杨华薇,陈延华,等. 有机酸对土壤磷的活化利用研究进展[J]. 农业环境科学学报,2022,41(7):1391–1399.
- [46] 魏红安,李裕元,杨蕊,等. 红壤磷素有效性衰减过程及磷素农学与环境学指标比较研究[J]. 中国农业科学,2012,45(6):1116–1126.
- [47] 洪欠欠. 有机物料对红壤性稻田土壤磷吸附及其相关因素的影响[D]. 南昌:江西农业大学,2018.
- [48] 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.
- [49] 许俊香,邹国元,孙钦平,等. 施用有机肥对蔬菜生长和土壤磷素累积的影响[J]. 核农学报,2016,30(9):1824–1832.
- [50] Abboud F Y, Favaretto N, Motta A C V, et al. Phosphorus mobility and degree of saturation in oxisol under no – tillage after long – term dairy liquid manure application [J]. Soil and Tillage Research, 2018,177:45–53.
- [51] 张海涛,刘建玲,廖文华,等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附 – 解吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(2):284–290.

吴 玲. 水稻土中土著细菌群落对重金属 Cd 的响应[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(22): 233–238.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.22.032

# 水稻土中土著细菌群落对重金属 Cd 的响应

吴 玲<sup>1,2</sup>

(1. 常州工程职业技术学院检验检测认证学院, 江苏常州 213164;

2. 南京师范大学地理科学学院江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 江苏南京 210023)

**摘要:**为探究不同镉(Cd)浓度对水稻土中细菌群落分布的影响,设置不同 Cd<sup>2+</sup> 浓度梯度(0、20、40、80、160 mg/kg)的盆栽水稻土,采集水稻成熟期的根际土与非根际土,测定土壤样品的 pH 值、总氮(TN)、总有机碳(TOC)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N)与硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N),并利用基于 16S rRNA 基因的高通量测序技术研究水稻土样品中的细菌群落结构以及细菌群落结构与 Cd 含量等理化因子的潜在关系。结果显示,不同 Cd 含量的水稻土样品中原核微生物主要为细菌界(Bacteria),共有 35 个门 94 个纲,变形菌门(Proteobacteria)和  $\gamma$ -变形菌纲( $\gamma$ -Proteobacteria)细菌在不同 Cd 含量的水稻土样品中均表现出优势。研究表明,水稻土中 Cd 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量显著影响水稻土中纲水平细菌群落丰度。

**关键词:**水稻土;细菌群落;镉;高通量测序

**中图分类号:**S154.3;X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)22-0233-06

随着工农业的发展以及在人类活动的影响下,重金属引起的土壤污染问题越来越严重。重金属污染物易积累、难降解且毒性大,能够破坏土壤生态环境及土壤结构,使土壤变得贫瘠,并导致土壤肥力下降<sup>[1]</sup>。土壤中的重金属主要来源于风化作用、工业废水、农业化学物的排放以及空气中有毒气体在雨水冲刷下与土壤的混合作用<sup>[2]</sup>;同时,土

壤中的重金属还能通过渗透作用回到周围的大气与水体中<sup>[3]</sup>。我国是水稻种植大国,水稻土遭受不同程度及不同种类的重金属污染,其中,镉生物毒性极强,是土壤中较为常见的重金属污染元素,能够被稻米富集,因此受到广泛关注<sup>[4-5]</sup>。

土壤微生物能够参与 C、N 等多种营养元素的循环过程,在维持土壤结构中发挥了重要的作用,高丰度的土壤微生物群落对于维持土壤功能具有重要的作用<sup>[6]</sup>。在重金属的胁迫下,土壤中微生物量及活菌菌落数量明显下降,且土壤微生物群落结构和功能均发生变化<sup>[7-8]</sup>。研究表明,与其他生物相比,土壤微生物对重金属更加敏感,重金属污染能够干扰土壤微生物的生长、形态和代谢<sup>[9]</sup>。Ros 等研究证实,Cd 污染能影响半干旱土壤中的微生物

收稿日期:2021-11-15

基金项目:国家自然科学基金(编号:41771286、41271255);常州市科技支撑计划(农业)项目(编号:CE20192017);武进区科技支撑计划(社会发展)项目(编号:WS202036);2021 年江苏省青蓝工程项目。

作者简介:吴 玲(1981—),女,江苏常州人,博士,副教授,主要从事土壤与水体沉积物污染及 N 循环微生物的生态功能及代谢多样性研究。E-mail:lwu@czie.edu.cn。

[52] Wang Y T, O'Halloran I, Zhang T Q, et al. Phosphorus sorption parameters of soils and their relationships with soil test phosphorus [J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79: 672–680.

[53] 王新民,侯彦林. 有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 440–443.

[54] 刘建玲,廖文华,张作新,等. 磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评价[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 959–965.

[55] 戚瑞生,党廷辉,杨绍琼,等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1136–1146

[56] 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.

[57] 李冬初,王伯仁,黄 晶,等. 长期不同施肥红壤磷素变化及其对产量的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3830–3841.

[58] 陈波浪,盛建东,文启凯,等. 不同施肥制度对红壤耕层磷的吸持特性影响的研究[J]. 新疆农业大学学报, 2005, 28(1): 22–26.

[59] 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.

[60] 颜 晓,王德建,张 刚,等. 长期施磷的产量效应及其环境风险评价[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3205–3210.