

周霞,李成忠,梁大刚. 有机水溶肥对牡丹脂肪酸含量、土壤碳活性与利用的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(4):239-244.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.04.035

有机水溶肥对牡丹脂肪酸含量、土壤碳活性与利用的影响

周霞,李成忠,梁大刚

(江苏农牧科技职业学院,江苏泰州 225300)

摘要:采用田间试验,以牡丹品种紫斑为试验材料,施用化肥液态肥(LF)、沼液提取物(T1)、牛粪提取物(T2)、厨余垃圾提取物(T3)、海藻提取物(T4)、病死动物提取物(T5)有机水溶肥,以不施肥为对照(CK),探索不同有机水溶肥对牡丹籽粒脂肪酸组分、土壤有机碳含量及微生物碳利用的影响。结果表明,在紫斑中共检测到16种脂肪酸,包含9种饱和脂肪酸、4种单不饱和脂肪酸以及3种多不饱和脂肪酸,其中 α -亚麻酸(C18:3n3)与亚油酸(C18:2)含量较高。有机水溶肥处理提高了紫斑脂肪酸、土壤有机碳组分含量及微生物碳利用效率,以T1处理整体较优。T1处理下土壤总有机碳(SOC)、活性有机碳组分(MBC、DOC、ROC)、平均颜色变化率、不同碳源利用效率均具有较大值,C18:2、C18:3n3含量较其他处理分别提高0.532~8.040、0.956~8.431百分点。冗余分析(RDA)结果进一步表明,土壤碳指标(SOC、MBC、DOC、ROC)与碳源利用存在密切关系。综上,施用沼液提取物有机水溶肥可有效提高土壤活性有机碳含量及微生物碳利用效率,促进脂肪酸累积,是应用于紫斑牡丹种植的最佳有机水溶肥处理。

关键词:有机水溶肥;紫斑牡丹;脂肪酸组分;活性有机碳;微生物碳利用

中图分类号:S685.110.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)04-0239-06

牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)为毛茛科(Ranunculaceae)芍药属(*Paeonia*)多年生灌木,具有较高的观赏、药用与医美等综合利用价值,现为全球广泛种植的花卉品种^[1]。油用牡丹是牡丹组植物中种籽出油率大于22%的牡丹品种,其与油茶树、橄榄树、油桐树及棕榈树等植物被称为新兴木本油料植物^[2-3]。木本植物籽油含有人体必需的 α -亚麻酸等不饱和脂肪酸,具有良好的改善心血管、抗菌及抗肿瘤等功效^[4]。近年来,油用牡丹已成为我国华南、西南和西北多区域大面积种植的木本植物油用类型。施肥是人为影响油用牡丹籽粒产量和品质的主要措施,然而长期施用化肥,植物养分利用率、产量及品质呈递减趋势^[5]。据联合国粮农组织统计,50%以上的化学氮肥、磷肥和钾肥无法被植物有效利用而产生流失^[6]。降低化肥使用量

及寻找化肥替代品已成为未来农业发展方向之一。

研究表明,长期使用有机肥料可改善培肥地力、提高肥料利用率、减少作物病害及促进植物生长^[7],然而目前关于有机肥种类的研究主要集中于传统的固体有机肥料产品,如秸秆和固态块状粪肥。在牡丹的田间生产中,施用有机肥料并非常规的施肥措施,其主要原因与牡丹养分需求期短而有机肥肥效慢有关^[8]。有机水溶肥通常提取自天然产品,施用稀释的液体剂量仍表现出较高的养分活性^[9]。与传统的固体有机肥料相比,提取物的有机水溶肥有机质含量更高,养分种类更全面,养分活化更快,同时具有化肥肥效迅速和有机肥养分齐全的共同特点^[10-11]。此外,有机水溶肥含有多种功能物质,如有机酸、腐殖酸和黄腐酸以及其他生物活性物质,可作为植物的生物刺激剂^[12]。周金燕等研究表明,从鱼虾中提取的有机水溶肥可显著促进杭白菊苗期根系的形态特征,增强光合作用,调节植株的碳氮比从而促进发育代谢^[13]。

根际是土壤微生物栖息的重要生态位区域,是根系与微生物交流的主要微域,被称为植物的“第二基因组”^[14]。土壤的生态过程表现为植物根系、土壤养分和根际微生物之间复杂的相互作用。根际土壤微生物活动在养分循环和土壤保肥保水中

收稿日期:2023-08-04

基金项目:江苏省现代农业(花卉)产业技术体系建设项目(编号:JATS[2022]393);江苏农牧科技职业学院科研项目(编号:11710120032)。

作者简介:周霞(1983—),女,江苏泰州人,硕士,副教授,主要从事植物资源保护与利用研究。

通信作者:李成忠,博士,教授,主要从事植物资源与利用及栽培研究。E-mail:lichengzhong@126.com。

发挥着关键作用,可进一步促进养分活化、养分周转和植物生长发育^[15]。Biolog 微孔板是检测土壤微生物功能多样性的重要技术,可反映微生物的活性及多样性^[16]。微生物碳利用和碳活化能力对于评估液体有机肥料的养分有效性至关重要。本研究基于沼液、牛粪、病死动物、海藻以及餐厨垃圾的有机提取物,探索了不同有机水溶肥对土壤有机质、微生物碳源代谢及牡丹籽粒脂肪酸品质的影响。研究结果可为兼顾环境效益和农艺效益的科学施肥实践提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试地点与材料

试验于 2021 年 11 月至 2022 年 8 月于江苏省常州市武进区礼嘉镇庞家村十车垛(120°01'68"E, 31°59'23"N)进行。试验地属亚热带季风气候,年均降水量 1 180 mm,年均日照 2 330 h,年均温 28 ℃,全年无霜期 226 d。供试田块土壤为黄褐土,耕作层土壤信息为:酸碱值(pH 值) 6.34,有机质含量 20.45 g/kg,碱解氮、有效磷及速效钾含量分别为 49.56、18.37、90.36 mg/kg。

供试牡丹品种为定植 4 年的紫斑。供试普通化肥为牡丹液态肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 15%、

1%、10%),购自南京禾稼春生物科技有限公司。沼液提取物有机水溶肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 10%、2%、5%),购自江苏绿汇宿动实业有限公司;牛粪提取物有机水溶肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 17%、2%、10%)、海藻提取物有机水溶肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 7%、1%、4%),购自江苏威博生物科技有限公司;病死动物提取物有机水溶肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 20%、1%、14%),来自江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心;厨余垃圾提取物有机水溶肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 11%、4%、4%),购自湖南浩博有机农业有限公司。

1.2 试验设计

试验设置 7 个处理(表 1),CK:不施肥;LF:施用牡丹化学液态肥;T1:沼液提取物有机水溶肥;T2:牛粪提取物有机水溶肥;T3:厨余垃圾提取物有机水溶肥;T4:海藻提取物有机水溶肥;T5:病死动物提取物有机水溶肥。每个处理重复 3 次,共 21 个小区。栽植密度 4.95 万株/hm²,行距×株距为 65 cm×30 cm,相应施肥处理以牡丹种植 343.2 kg/hm² 最佳纯氮用量^[17]为标准进行施用量换算。于 2021 年 11 月、2022 年 1 月、2022 年 3 月分 3 次施入,施用比例为 4:4:2。

表 1 不同处理信息

处理	肥料来源	活性物质	肥料 pH 值	养分施用量(kg/hm ²)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	—	—	—	—	—	—
LF	化学肥料	—	8.1	343.2	22.8	228.8
T1	沼液提取物	腐殖酸	7.7	343.2	68.64	171.6
T2	牛粪提取物	有机酸	8.3	343.2	40.38	201.88
T3	厨余垃圾提取物	氨基酸	7.5	343.2	124.8	124.8
T4	海藻提取物	海藻酸	8.1	343.2	17.16	240.24
T5	病死动物提取物	氨基酸	6.8	343.2	49.03	196.11

1.3 指标测定与分析

1.3.1 籽粒脂肪酸组分含量测定 脂肪酸组含量参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》测定。称取样品 2.00 g,并加入 1 mL 稀硫酸(5%)和 2 mL 甲醇,在 80 ℃恒温中进行甲酯化反应 5 min,采用涡旋混匀器(HD-2500,山东欧莱博仪器有限公司)充分溶解 45 s;接着加入 1.0 mL 1 mol/L 的甲醇溶液,采用涡旋混匀器进行 2 次混匀溶解 45 s,静置 10 min;采用去离子水进行转移。采用气相质谱仪(API5000,美国戴安公司)测定,色谱条

件及质谱条件参照郑雅琪等的研究^[18]。

1.3.2 土壤有机碳及其组分含量测定 土壤活性有机碳指标的测定参照张文丽等的方法^[19]进行。可溶性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)及易氧化有机碳(ROC)分别采用蒸馏水浸提法、三氯甲烷熏蒸法及高锰酸钾氧化法测定,DOC、MBC、ROC 及总有机碳(TOC)皆采用 TOC 自动分析仪(HTY-DH1000C,浙江泰林生物技术股份有限公司)测定。

1.3.3 土壤微生物功能测定 油用牡丹种植土壤微生物功能测定采用 Biolog-Eco 微孔板法进行。

称取 5.00 g 根际土壤,加入 45 mL 无菌 85% 氯化钠溶液混合,以 500 次/min 往复振荡 30 min、低速 (180 r/min) 离心 5 min,吸取 150 μ L 上清液添加至孔微板孔中,其后续培养操作参照 Yu 等的研究^[6]。土壤微生物代谢碳源类型分为 6 种底物来源:胺类化合物、碳水化合物、羧酸化合物、芳香化合物、氨基酸化合物、多聚化合物。微孔板在 25 $^{\circ}$ C 下孵育 192 h,每隔 12 h 记录微孔液体的吸光度 $D_{590\text{ nm}}$ 。

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析 (One - Way ANOVA),邓肯法检验不同处理间的差异显著性 ($\alpha = 0.05$),所有图形皆采用 Origin 9 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 有机水溶肥对油用牡丹籽粒脂肪酸组分含量的影响

由表 2 可知,在紫斑牡丹中检测到 16 种脂肪

酸,其中 9 种饱和脂肪酸 (C10:0、C12:0、C14:0、C16:0、C18:0、C20:0、C21:0、C22:0、C24:0)、4 种单不饱和脂肪酸 (C14:1、C16:1、C18:1、C20:1) 以及 3 种多不饱和脂肪酸 (C18:2、C18:3n3、C20:5n3);且不同有机水溶肥对紫斑牡丹籽粒饱和脂肪酸组分含量产生了一定影响。在 9 种饱和脂肪酸 (SFA) 中,以 C16:0、C18:0 含量最高,分别为 5.701% ~ 6.741%、1.214% ~ 1.721%;在 C16:0、C18:0 中,与不施肥处理 (CK) 相比,LF 均显著升高;与化学液态肥处理 (LF) 相比,不同有机水溶肥处理 (T1 ~ T5) 在 C16:0、C18:0 中变幅分别为 -0.453 ~ 0.416、-0.308 ~ 0.071 百分点,且二者含量均以 T1、T2 处理存在较大值。各处理花生酸 (C20:0) 含量规律与 C16:0、C18:0 规律基本一致。在癸酸 (C10:0)、肉豆蔻酸 (C14:0) 中则整体以 T1 ~ T5 含量高于 CK、LF 处理。在 C12:0、C21:0、C22:0、C24:0 中,各处理含量差距较小,处理间均无显著差异。

表 2 有机水溶肥对紫斑牡丹籽粒脂肪酸组分含量的影响

脂肪酸类型	组分	含量 (%)						
		CK	LF	T1	T2	T3	T4	T5
SFA	癸酸 (C10:0)	0.105 \pm 0.003d	0.108 \pm 0.008d	0.397 \pm 0.012b	0.266 \pm 0.007c	0.551 \pm 0.013a	0.258 \pm 0.009c	0.534 \pm 0.021a
	月桂酸 (C12:0)	0.005 \pm 0.001a	0.006 \pm 0.001a	0.006 \pm 0.001a	0.005 \pm 0.001a	0.007 \pm 0.001a	0.006 \pm 0.001a	0.006 \pm 0.001a
	肉豆蔻酸 (C14:0)	0.057 \pm 0.002b	0.056 \pm 0.003b	0.060 \pm 0.004ab	0.061 \pm 0.006ab	0.063 \pm 0.005ab	0.065 \pm 0.009ab	0.072 \pm 0.011a
	棕榈酸 (C16:0)	5.701 \pm 0.097e	6.325 \pm 0.079b	6.567 \pm 0.208ab	6.741 \pm 0.115a	6.061 \pm 0.088cd	5.872 \pm 0.103de	6.346 \pm 0.051b
	硬脂酸 (C18:0)	1.214 \pm 0.017e	1.650 \pm 0.012b	1.721 \pm 0.028a	1.715 \pm 0.013a	1.342 \pm 0.013d	1.598 \pm 0.014c	1.663 \pm 0.023b
	花生酸 (C20:0)	0.099 \pm 0.005b	0.115 \pm 0.002a	0.116 \pm 0.004a	0.118 \pm 0.004a	0.117 \pm 0.002a	0.101 \pm 0.002b	0.111 \pm 0.003a
	二十一碳酸 (C21:0)	0.042 \pm 0.003a	0.043 \pm 0.003a	0.037 \pm 0.002a	0.040 \pm 0.003a	0.043 \pm 0.005a	0.042 \pm 0.002a	0.041 \pm 0.004a
	山嵛酸 (C22:0)	0.021 \pm 0.002a	0.023 \pm 0.001a	0.022 \pm 0.003a	0.021 \pm 0.003a	0.024 \pm 0.002a	0.022 \pm 0.002a	0.026 \pm 0.003a
	木蜡酸 (C24:0)	0.018 \pm 0.003a	0.020 \pm 0.001a	0.022 \pm 0.003a	0.022 \pm 0.002a	0.019 \pm 0.003a	0.021 \pm 0.002a	0.023 \pm 0.001a
MUFA	肉豆蔻烯酸 (C14:1)	0.562 \pm 0.086a	0.459 \pm 0.151a	0.493 \pm 0.073a	0.555 \pm 0.129a	0.462 \pm 0.065a	0.411 \pm 0.145a	0.427 \pm 0.071a
	棕榈烯酸 (C16:1)	0.148 \pm 0.009b	0.162 \pm 0.008ab	0.180 \pm 0.013a	0.176 \pm 0.010a	0.177 \pm 0.003a	0.162 \pm 0.007ab	0.159 \pm 0.009ab
	油酸 (C18:1)	19.459 \pm 0.035e	22.388 \pm 0.027c	23.337 \pm 0.139a	22.631 \pm 0.058b	23.179 \pm 0.126ab	21.109 \pm 0.029d	22.478 \pm 0.046c
	二十碳烯酸 (C20:1)	0.192 \pm 0.009b	0.193 \pm 0.010b	0.228 \pm 0.006a	0.232 \pm 0.017a	0.211 \pm 0.011ab	0.208 \pm 0.010ab	0.225 \pm 0.007a
PUFA	亚油酸 (C18:2)	25.287 \pm 0.231d	25.377 \pm 0.522cd	33.327 \pm 0.887a	32.102 \pm 2.126ab	30.059 \pm 1.291b	26.909 \pm 1.012c	32.795 \pm 1.241ab
	α -亚麻酸 (C18:3n3)	40.543 \pm 0.739c	40.833 \pm 0.465c	48.974 \pm 1.533a	47.201 \pm 0.673a	44.135 \pm 0.547b	47.932 \pm 1.118a	48.018 \pm 0.873a
	二十碳五烯酸 (C20:5n3)	1.419 \pm 0.204c	1.458 \pm 0.175c	2.014 \pm 0.481b	3.294 \pm 0.325a	1.463 \pm 0.490c	1.631 \pm 0.158c	2.918 \pm 0.261a

注:同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。SFA、MUFA 及 PUFA 分别表示饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸及多不饱和脂肪酸。

在 4 种单不饱和脂肪酸 (MUFA) 中,以油酸 (C18:1) 含量占据绝对优势,其含量为 19.459% ~ 23.337%,且有机水溶肥处理含量皆高于 CK、LF,其中以 T1 处理 C18:1 含量最高,显著大于 CK、LF。在棕榈烯酸 (C16:1)、二十碳烯酸 (C20:1) 中,亦以施肥处理 (LF、T1 ~ T5) 含量高于 CK;在肉豆蔻烯酸 (C14:1) 中,施肥处理含量均小于 CK,但各处理差距较小,两两处理间均无显著差异。在 3 种多不饱

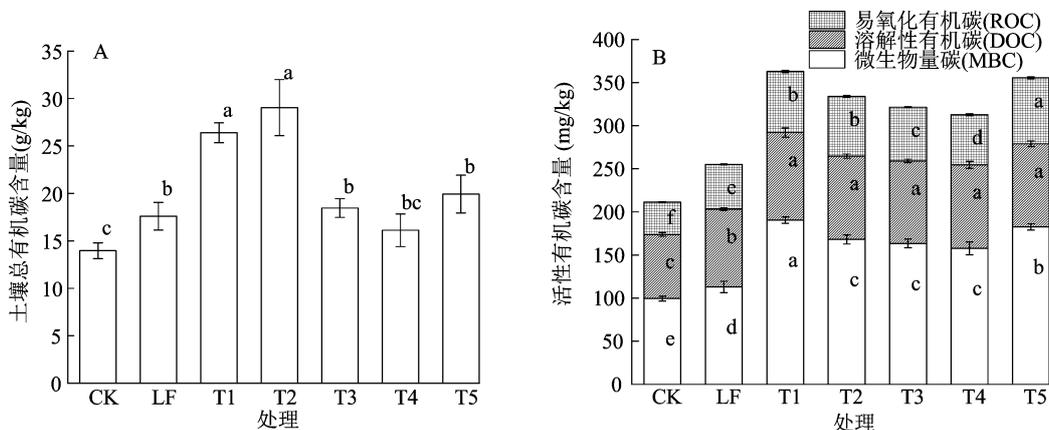
和脂肪酸 (PUFA) 中,组分含量表现为二十碳五烯酸 (C20:5n3) < 亚油酸 (C18:2) < α -亚麻酸 (C18:3n3),且在上述 PUFA 组分中,T1 处理下亚油酸 (C18:2)、 α -亚麻酸 (C18:3n3) 具有较大值,较其他处理增加 0.532 ~ 8.040、0.956 ~ 8.431 百分点。

2.2 有机水溶肥对土壤有机碳及活性有机碳含量的影响

由图 1 可知,各处理土壤总有机碳 (SOC) 含量

高低顺序表现为 $CK < T4 < LF < T3 < T5 < T1 < T2$, 与 CK 相比, 施肥处理 SOC 含量提高 15.47% ~ 108.02%, 其中除 T4 与 CK 无显著差异外, 其他施肥处理皆显著大于 CK 处理。在活性有机碳组分中, 各组分含量表现为易氧化有机碳 (ROC) < 溶解性有机碳 (DOC) < 微生物量碳 (MBC), 且在任一活

性有机碳组分中, 各处理均呈 $CK < LF < T1 \sim T5$, LF 处理均显著大于 CK; 与 LF 相比, 有机水溶肥处理 (T1 ~ T5) 在 ROC、DOC、MBC 指标中分别显著提高 39.68% ~ 68.71%、5.99% ~ 12.36%、12.19% ~ 47.80%, 其中以 T1、T5 整体存在较大值。



小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下图同
图1 有机水溶肥对土壤有机碳及活性有机碳含量的影响

2.3 有机水溶肥对土壤微生物碳源代谢活性的影响

由图 2 可知, 在培养的 0 ~ 48 h 内, 牡丹根际土壤的平均颜色变化率 (AWCD) 较低, 之后开始急剧提高; 培养 48 h 后, T1 和 T2 处理具有较高的 AWCD, 而 CK 处理表现出最低的 AWCD。与 CK 相比, 添加有机水溶肥均明显提高了 AWCD。培养 196 h 时, 有机水溶肥处理下根际土壤 AWCD 分别是 CK 处理土壤的 2.37、2.27、1.59、1.34、1.79 倍。由此可见, 添加有机水溶肥改善了紫斑牡丹根际土壤微生物群落的功能。此外, T1、T2 最有益于提高 AWCD; 培养 196 h 时, T3、T4 的 AWCD 与 LF 处理相比差异较小。T5 在培养初期的 AWCD 低于 LF 处理, 但在培养结束时的 AWCD 明显高于 LF。

2.4 有机水溶肥对土壤微生物不同碳源类型利用能力的影响

由图 3 可知, 土壤微生物不同碳源类型的 $D_{590 \text{ nm}}$ 中, 各组分表现为碳水化合物 > 羧酸化合物 > 氨基酸化合物 > 多聚化合物 > 胺类化合物 > 芳香化合物, 而不同处理影响了土壤微生物对不同碳源的利用能力。T1 处理条件下土壤微生物对碳水化合物、胺类化合物、氨基酸化合物的利用能力最强, 其他处理较 T1 分别降低 28.08% ~ 59.75%、5.51% ~ 42.91%、16.42% ~ 57.58%, 其中 T1 对碳水化合物、氨基酸化合物的利用能力均显著大于其他处理。羧酸化合物利用强度中, 各处理表现为 $CK < T4 < LF < T3 < T5 < T1 < T2$, 与 T2 相比, 其他处理显著降低 21.84% ~ 70.93%。T5 对多聚化合物、芳香化合物的利用能力最佳, 其多聚化合物利用能力显著大于 CK、LF、T2、T3、T4, 芳香化合物利用能力则显著大于 CK、LF、T1 处理。

2.5 土壤碳指标与微生物碳源代谢能力的冗余分析

由图 4 可知, 轴 1 (RDA1) 为 47.47% 形成横轴, 轴 2 (RDA2) 占 19.55% 构成纵轴, 二者总贡献率为 67.02%, 表明不同处理可在 67.02% 上解释土壤微生物对碳源底物的利用差异。土壤微生物对芳香化合物 (Phen)、多聚化合物 (Poly)、碳水化合物 (Carh)、

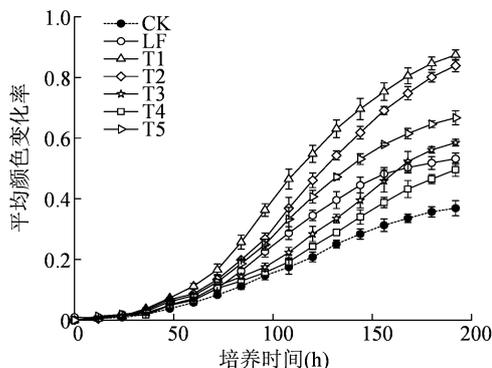


图2 有机水溶肥对土壤微生物碳源平均颜色变化率的影响

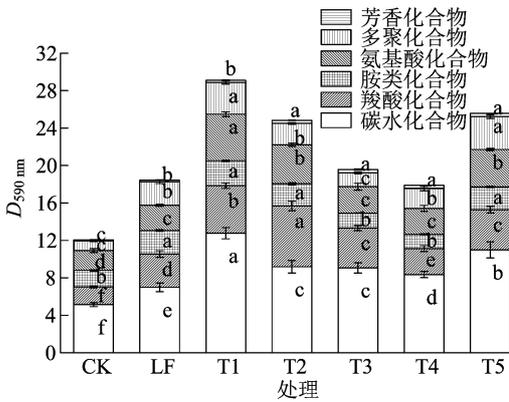


图3 有机水溶肥对土壤微生物不同碳源类型利用能力的影响

氨基酸化合物 (Amoa)、羧酸化合物 (Carx) 及胺类化合物 (Amin) 的利用能力与土壤总有机碳 (SOC)、易氧化有机碳 (ROC)、溶解性有机碳 (DOC)、微生物量碳 (MBC) 含量均呈密切正相关关系。可见, 有机水溶肥能够通过影响土壤碳组分从而介导土壤微生物对土壤碳源的利用能力。

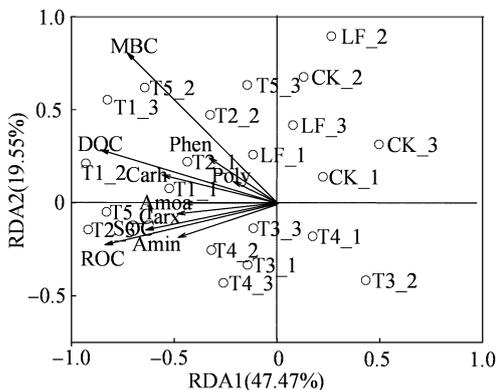


图4 土壤碳指标与微生物碳源代谢能力的 RDA 分析结果

3 讨论与结论

粗脂肪组成、含量及脂肪酸组分比例是反映籽粒的含油量、经济效益及营养价值的重要体现^[5,20]。本研究中, 通过比较脂肪酸甲酯标准品在牡丹籽粒中共鉴定出 16 种脂肪酸, 其中包括 9 种饱和脂肪酸 (SFA)、4 种单不饱和脂肪酸 (MUFA)、3 种多不饱和脂肪酸 (PUFA), 这与郑雅琪等的研究结果^[18] 存在差异: 本试验中未检测到十七烷酸 (C17:0)、十七烯酸 (C17:1)、二十二烯酸 (C22:1), 但检测到未被报道过的月桂酸 (C12:0)、棕榈烯酸 (C16:1)、癸酸 (C10:0) 等。本研究中, 在脂肪酸组分中, 以 PUFA

的亚油酸 (C18:2, 25.287% ~ 33.327%)、 α -亚麻酸 (C18:3n3, 40.543% ~ 48.974%) 含量最高, 这与前人研究基本一致: C18:2、C18:3n3 是牡丹籽粒含量最高的脂肪酸种类。C18:2、C18:3n3 是人体的必需脂肪酸, 具有降“三高”、调节免疫力等功效^[21]。试验数据表明, T1、T5 的 C18:2、C18:3n3 含量较高, 均显著大于 CK、LF, 表明 T1、T5 有利于促进亚油酸、 α -亚麻酸的合成。

有机碳库水平是影响土壤微生物代谢、碳氮周转及生态碳循环的重要保证, 其中活性有机碳组分含量变化对外部环境的响应较为迅速, 是反映瞬时土壤质量和养分变化的主要指标^[22-23]。李瑞等的研究表明, 施用沼液可改变土壤微生物群落结构, 增加土壤碳氮库容量, 提高土壤氮矿化势, 增强土壤养分供给能力^[24]。李虎等的研究表明, 玉米秸秆添加牛粪、猪粪皆可显著提高土壤有机碳 (SOC)、微生物生物量碳 (MBC)、溶解性有机碳 (DOC)、土壤易氧化有机碳 (ROC), 并提高碳库活度指数^[25]。本研究中, 土壤总有机碳含量中, 除 T4 外, 其他有机水溶肥处理均高于 CK、LF; 而活性有机碳组分 (MBC、DOC、ROC) 中, 有机水溶肥处理均显著高于 CK、LF。

Biolog-Eco 是测定碳底物利用率的重要技术, 可检测土壤环境及功能微生物多样性的短期变化情况^[16,26]。本研究中, 与 CK、LF 处理相比, 施用有机水溶肥使牡丹根际土壤的平均颜色变化率 (AWCD) 分别提高了 34.42% ~ 136.87% 和 -6.77% ~ 64.29% (图 2), 其中 T1 的碳底物利用率最高, 培养结束时 AWCD 比其他有机水溶肥处理高 4.00% ~ 43.25%。这与熊湖等的结果基本趋于一致: 液态有机肥可显著提高马铃薯根际土壤酶活性, 刺激土壤碳基质的利用效率^[27]。前人研究表明, 施用浓缩有机水溶肥可改善土壤质量、提高养分有效性, 进而影响土壤微生物功能的多样性、土壤碳底物利用和植物生长的差异^[28]。

本研究中, 有机水溶肥处理下, 土壤微生物对 6 种碳源类型 [碳水化合物 (Carh)、羧酸化合物 (Carx)、氨基酸化合物 (Amoa)、多聚化合物 (Poly)、胺类化合物 (Amin)、芳香化合物 (Phen)] 的利用能力均高于 CK 和 LF 处理; 这与前人研究结论基本一致: 有机水溶肥可显著促进微生物对碳源的利用效率, 从而促进微生物繁殖、影响微生物群落构成^[9,29]。本研究中, T1 处理下土壤微生物对 Carh、

Amin、Amoa 的利用能力最强,在 Carx、Poly、Phen 的利用亦具有较大值。此外,冗余分析(RDA)表明,有机水溶肥处理下土壤微生物对 6 种碳源类型(Carh、Carx、Amoa、Poly、Amin、Phen)的利用能力与 SOC、MBC、DOC、ROC 含量均呈正相关关系(图 4),说明土壤微生物碳源利用能力与土壤有机碳指标间具有协同关系。综上,在油用牡丹种植过程中施用沼液有机水溶肥可有效提高土壤活性有机碳含量,提高土壤微生物对碳的利用能力,提高籽粒脂肪酸组分含量,是应用于紫斑牡丹种植的最佳有机水溶肥处理。

参考文献:

- [1] Liu J C, Li X, Bai H X, et al. Traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and pharmacokinetics of the root bark of *Paeonia × suffruticosa* Andrews: a comprehensive review [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2023, 308: 116279.
- [2] 侯静, 卜晓婷, 袁鸣, 等. 不同产地油用牡丹种实性状的多样性分析[J]. *经济林研究*, 2022, 40(4): 200–208.
- [3] 尹丹丹, 李珊珊, 吴倩, 等. 我国 6 种主要木本油料作物的研究进展[J]. *植物学报*, 2018, 53(1): 110–125.
- [4] 史帅营, 丁熙柠, 王占超, 等. 不同海拔‘凤丹’牡丹籽粒油脂品质形成及代谢相关基因差异表达[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(11): 2987–2996.
- [5] 吕向阳, 黄金秋, 王迅, 等. 不同基肥对油用牡丹结籽性及籽粒脂肪酸组分的影响[J]. *经济林研究*, 2020, 38(1): 59–65, 98.
- [6] Yu X M, Li H G, Doluschitz R. Towards sustainable management of mineral fertilizers in China: an integrative analysis and review [J]. *Sustainability*, 2020, 12(17): 7028.
- [7] Wang C Y, Qin J C, Yang Y W. Multifunctional metal-organic framework (MOF)-based nanoplatforms for crop protection and growth promotion [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(15): 5953–5972.
- [8] 王占超, 史帅营, 高双成, 等. 水溶肥对促成盆栽伊藤牡丹‘芭克拉’开花品质的影响[J]. *西北植物学报*, 2022, 42(5): 845–853.
- [9] Li H Y, Luo N Y, Ji C L, et al. Liquid organic fertilizer amendment alters rhizosphere microbial community structure and co-occurrence patterns and improves sunflower yield under salinity-alkalinity stress [J]. *Microbial Ecology*, 2022, 84(2): 423–438.
- [10] Wu R M, Chen M S, Qin Y F, et al. Combined hydrothermal and biological treatments for valorization of fruit and vegetable waste into liquid organic fertilizer [J]. *Environmental Research*, 2023, 221: 115262.
- [11] Shi X J, Hao X Z, Li N N, et al. Organic liquid fertilizer coupled with single application of chemical fertilization improves growth, biomass, and yield components of cotton under mulch drip irrigation [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12: 763525.
- [12] Ji R T, Dong G Q, Shi W M, et al. Effects of liquid organic fertilizers on plant growth and rhizosphere soil characteristics of *Chrysanthemum* [J]. *Sustainability*, 2017, 9(5): 841.
- [13] 周金燕, 纪荣婷, 董刚强, 等. 壳聚糖类有机水溶肥对杭白菊苗期生长影响及其机制研究[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 789–795.
- [14] 申建波, 白洋, 韦中, 等. 根际生命共同体: 协调资源、环境和粮食安全的学术思路与交叉创新[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 805–813.
- [15] 徐达勋, 颜振峰. 生物炭与根际促生菌对辣椒氮素利用率、产量及土壤氮转化的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(11): 133–139.
- [16] Wang X K, Cao X X, Liu H, et al. Effects of lactic acid bacteria on microbial metabolic functions of paper mulberry silage: a BIOLOG ECO microplates approach [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 689174.
- [17] 魏双雨, 李敏, 吉文丽, 等. 适宜氮磷钾用量和配比提高油用牡丹产量和出油量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 880–888.
- [18] 郑雅琪, 武艺, 袁玮琼, 等. 多产地油用牡丹籽粒脂肪酸构成及基本理化指标评价[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(15): 312–319.
- [19] 张文丽, 林启美, 李贵桐, 等. 生物炭对两种植烟土壤活性有机碳的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(9): 59–66.
- [20] 侯天兰, 王顺利, 米生权, 等. 牡丹籽油营养成分和功能作用研究进展[J]. *中国油脂*, 2021, 46(8): 51–55, 71.
- [21] Liu Y, Shen N, Xin H W, et al. Unsaturated fatty acids in natural edible resources, a systematic review of classification, resources, biosynthesis, biological activities and application [J]. *Food Bioscience*, 2023, 53: 102790.
- [22] 侯赛赛, 白懿杭, 王灿, 等. 土壤有机碳及其活性组分研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(13): 24–33.
- [23] 郭梦瑶, 唐文慧, 陈翔, 等. 有机物料还田对设施胡萝卜土壤碳组分及酶活性的影响[J]. *山东农业科学*, 2022, 54(11): 93–102.
- [24] 李瑞, 张巡, 杨阳, 等. 沼液替代化学氮肥对滨海稻田土壤有机氮和细菌群落的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(8): 1364–1375.
- [25] 李虎, 吴景贵, 李建明. 玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对黑土活性有机碳的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(9): 1944–1953.
- [26] 李慧, 李雪梦, 姚庆智, 等. 基于 Biolog-ECO 方法的不同草原中 5 种不同植物根际土壤微生物群落特征[J]. *微生物学通报*, 2020, 47(9): 2947–2958.
- [27] 熊湖, 郑顺林, 龚静, 等. 液态有机肥对酚酸胁迫下马铃薯生长发育和土壤酶活性影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 254–259, 267.
- [28] 夏秀波, 李涛, 姚建刚, 等. 液态有机肥部分替代化肥对设施番茄根区真菌菌群的影响[J]. *北方园艺*, 2021(12): 79–87.
- [29] Wang Y J, Wang S T, Yan X Y, et al. Preparation of liquid bacteria fertilizer with phosphate-solubilizing bacteria cultured by food wastewater and the promotion on the soil fertility and plants biomass [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 370: 133328.