



土壤调理剂对柴胡产量和品质及土壤性状的影响

柳 瀛¹, 张 龙^{2*}, 王 岩^{1, 3}, 袁庆军⁴, 杨朝辉⁵,
何雨桐¹, 王 婷¹, 桑梦瑶¹, 郭李萍^{1*}

(1. 农业农村部农业环境重点实验室, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 山东劲牛集团股份有限公司, 山东 济南 250102;
3. 山西农业大学农学院, 山西 晋中 030801; 4. 中国中医科学院中药资源中心, 北京 100700;
5. 河北省安国市祁八味中药材有限公司, 河北 保定 071200)

摘 要: 针对因中草药生长期长、次生代谢旺盛以及多年连续种植使土壤化学和生物学性状发生变化引发的中草药连作障碍问题, 通过在中药材之乡河北省安国市采用田间试验, 设计农民习惯 (CK)、施用石灰 (Lime) 和复合调理剂 (Com) (包含石灰、石膏和腐植酸及复合芽孢杆菌) 3 个不同的处理, 探究土壤调理剂对多年连种中草药土壤的化学性状及微生物学性状的影响, 检验其对土壤的调理作用及柴胡产量和品质的提升作用。研究结果表明, 调理剂使柴胡产量提高 33.8% ~ 41.9%, 且柴胡中总皂苷含量提高 16.0% ~ 38.3%; 调理剂对抑制根际土壤 pH 下降有积极作用; 调理剂还使得土壤中养分状况得到改善, 促进氮、磷、钾养分在土壤中的保存、利于植物吸收; 施用调理剂的处理, 土壤蔗糖酶和多酚氧化酶活性提高、土壤质量及健康指标改善; 调理剂处理后土壤微生物区系组成趋于合理, 致病性真菌如被孢霉属、篮状菌属、小不整球壳属、炭疽菌属等在群落中的组成占比降低, 而有益真菌如盾壳霉属、交链孢霉属的占比增加。因此, 复合调理剂能够调理土壤化学及生物学性状, 可作为减轻中药材种植土壤连作障碍的部分解决方案, 对典型中草药种植区土壤改良及中草药产量和品质提升有积极作用。

关键词: 柴胡; 复合调理剂; 石灰; 中草药种植; 土壤改良

由于中草药在治疗慢性病和调理健康方面的作用, 以及近年民众健康保健意识的提高和药食同源理念的倡导, 市场对中草药的需求不断增加^[1]。中国统计年鉴 (<http://data.stats.gov.cn/>) 数字显示, 2018 年全国中药材种植面积为 239.24 万 hm^2 , 占全部农作物种植面积的 1.4%; 其种植面积比 15 年前的 2003 年增加了近 1 倍、药粮轮作面积占比也增加了 0.8 个百分点。然而, 在中草药种植过程中, 由于其植株或功能器官内合成和积累的生理活性物质 (如皂苷、生物碱等) 含量较高, 土壤中根际微生物活跃, 存在土壤酸化及土传病害严重等问题, 易造成次生障碍, 特别是根茎类中草药, 由于其生长年份长、多年连作, 更容易形成多种土壤障碍^[2]。

对丹参种植土壤的 pH 进行测定后发现, 从头像到第四茬, 土壤 pH 呈逐渐降低的趋势; 且连作导致根系生长发育畸形、植物有效成分含量降低, 严重影响了丹参的生长, 产量和商品率都显著下降^[3]。有报道显示, 党参连作后, 土壤中硝态氮、速效钾、有效磷、有机质含量显著降低, 根际土壤中的过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶及蔗糖酶的活性也存在不同程度的降低^[4]。中草药连作使土壤理化性状改变, 还进一步造成了土壤中微生物区系发生变化、病虫害严重。对白及根部内生真菌物种丰度的研究表明, 土壤的理化性质如 pH、氮磷钾等均与白及根部内生真菌物种丰度存在一定的相关性^[5]。研究发现, 影响柴胡、党参、远志这 3 种植物根际土壤真菌群落结构的主要驱动因子为土壤 pH、总氮、蔗糖酶和脲酶^[6]。

中草药由于大多连作, 因此对土壤环境要求高, 土壤质量在一定程度上决定着中草药的产量和品质。因此, 为避免连作障碍发生, 需对其原有种植地土壤进行合理改良, 以保证土壤持续保持健康状态、满足中草药生长的需求, 如使用调理剂及微

收稿日期: 2023-12-12; 录用日期: 2024-02-06

基金项目: 2023 年度济南市海右计划产业领军人才支持工程项目; 中国农业科学院重大科技任务 (CAAS-ZDRW202417)。

作者简介: 柳瀛 (1998-), 硕士研究生, 研究方向为中草药种植障碍土壤改良。E-mail: Liuyingisme@163.com。

通讯作者: 郭李萍, E-mail: Guoliping@caas.cn; 张龙, E-mail: 45547479@qq.com。

生物菌剂对土壤进行调理。有研究人员将有益微生物菌剂应用于种植中草药的土壤，发现菌剂处理能使连作土壤中的有益菌含量增加、有害菌含量减少，可有效修复和构建三七根际土壤健康微生物群落、缓解连作障碍、提高三七产量^[7]。

柴胡为伞形科柴胡属植物，其药用部位为干燥根，具有解表退热、疏肝解郁、抗炎等功效。北柴胡主要在东北、华北、陕西、甘肃等地种植，但由于常在同一地块连续种植，柴胡产量及品质都受到严重影响^[8-9]。关于土壤调理剂对柴胡种植土壤的实践报道还鲜少，本研究拟结合化学调理剂和微生物菌剂配合形成复合调理剂，探究调理剂对柴胡产量及土壤性状的影响，包括对土壤速效养分、土壤胞外酶及土壤微生物区系组成的影响，为快速消减中草药种植土壤障碍及助力中草药基地可持续发展提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

河北省安国市是我国的中药材之乡及全国著名

的中药材集散地，该市中草药种植历史悠久、技术成熟，常年种植面积保持在 8670 hm² 左右，占全市耕地面积的 35% 以上，药材种植类型更达 200 多种^[10]。本研究试验点设在河北省安国市郑章镇行唐村，地理坐标为 38°24' N, 115°20' E。试验地位于冀中平原，平均海拔约 36 m，属温带大陆性半干旱季风气候，年平均气温 12.1 ℃，年平均降水量 505 mm，≥ 0 ℃ 年积温 4406.4 ℃，年无霜期 187 d，年平均日照时数 2685 h，土壤类型为砂壤质洪冲积潮褐土。该地块前 4 年连续种植中草药地丁，已出现连作障碍，植株出现生长缓慢及萎蔫症状。

1.2 供试土壤

本试验于 2022 年 4—11 月进行，供试土壤质地为粉砂质黏土，试验前取 0 ~ 20 cm 土壤样品进行测定，供试土壤黏粒、粉粒和砂粒占比分别为 14.1%、57.2% 和 28.7%，土壤化学性状见表 1。

表 1 春播前土壤化学性状

pH	有机质 (g · kg ⁻¹)	碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	有效磷 (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)	阳离子代换量 (cmol · kg ⁻¹)
7.6	7.10	58.9	23.6	127.8	10.0

1.3 试验设计

由于石灰可中和土壤酸性且具备一定的短期杀菌作用，经过前期盆栽试验观测植株长势探索出了效果较好的复合调理剂，本试验拟对其在田间进行效果验证及土壤化学与生物学性状进行全面监测。本试验拟探究调理剂对柴胡种植土壤的综合调理作用，设置 3 个处理，每个处理 3 次重复，小区面积为 2 m × 5 m，小区随机区组排列。3 个处理为：

1) 当地农民习惯管理方式 (CK)：基肥和追肥各施用复合肥 750 kg · hm⁻²。基肥为播前撒施后旋耕入土、根茎膨大期追肥方式为撒施复合肥配合灌溉进行。复合肥中 N-P₂O₅-K₂O 含量为 14-4-28 (%)，全生育期折合施用 N、P₂O₅、K₂O 分别为 210、60、420 kg · hm⁻²。

2) 施用石灰调理剂 (Lime)：在农民习惯施肥基础上增施生石灰 750 kg · hm⁻²，石灰于播前撒施、旋耕入土。其余管理措施与 CK 一致。

3) 施用复合调理剂 (Com)：用量 8100 kg · hm⁻²，于播前撒施、旋耕入土。其余管理措施与 CK 一致。调理剂含石灰 20%、石膏 30%、有机肥

28%、杏鲍菇基质渣 20%、菌剂 2%。其中，腐熟商品有机肥中有机质含量 47%、腐植酸 30%、N-P₂O₅-K₂O 含量为 2-15-15 (%)，折碳、氮、磷、钾 (C、N、P₂O₅、K₂O) 为 552.1、40.5、30.4、30.4 kg · hm⁻²；菌剂为 3 株芽孢杆菌复合菌。

1.4 田间管理

柴胡品种为“竹叶柴胡”，学名: *Bupleurum marginatum* Wall. ex DC。2022 年 5 月 3 日整地施肥并灌溉，基肥后灌溉量 750 m³ · hm⁻²，灌溉方式为漫灌，调理剂及肥料施用 1 周后完成对土壤的初步调理再行播种。于 5 月 10 日撒播柴胡，株行距为 15 cm × 15 cm；9 月 2 日追肥并漫灌，结合追肥的灌溉量为 600 m³ · hm⁻²；2022 年 10 月 25 日收获柴胡测产。试验期间，各处理除施用调理剂 (Lime 和 Com 处理) 操作外，其他田间耕作、灌溉、施肥量、除草等与当地农民习惯处理完全一致。生育期间属本地雨季，没有再进行除配合施肥外的其他灌溉，本年度 5—10 月平均气温为 22.5 ℃、降水量为 414 mm (图 1)。

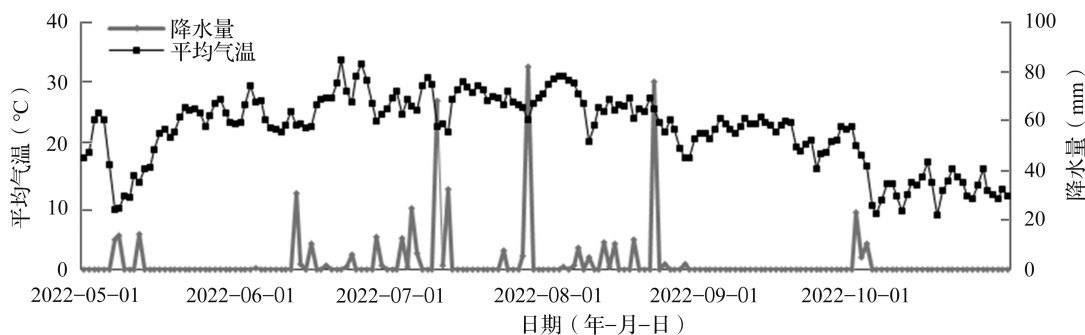


图1 试验期间日均气温和降水量

1.5 取样方法及测定指标

(1) 作物生长指标: 株高、生物量、入药根产量, 取 1 m^2 样方进行测定, 柴胡品质主要测定柴胡皂苷, 送测样公司采用高效液相色谱法 (通则 0512) 进行检测。

(2) 土壤基础理化性状: 整地播种前, 用土钻多点取 $0 \sim 20\text{ cm}$ 土样, 测定土壤基本理化性状, 包括有机质、pH、速效氮磷钾等, 均采用常规方法^[11]。

(3) 生育期土壤养分及土壤健康指标: 分别于8月12日盛花期、9月8日根茎膨大期及10月25日收获期取 $0 \sim 20\text{ cm}$ 根区土测定土壤中的速效氮磷钾含量、取根际土 (抖土法取样) 测 pH 和可溶性有机碳 (DOC); 在盛花期、根茎膨大期加测根区土胞外酶活性。基础养分测定均采用常规方法^[11-12]; 土壤酶测定指标包括碳氮磷水解酶 (蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶和中性磷酸酶) 以及多酚氧化酶, 测定采用新鲜土 (冰盒带回实验室 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存, 1周内测定)。其中, 土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定; 土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定; 土壤蔗糖酶活性采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定; 土壤多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法测定, 详见文献^[13]。土壤速效氮、磷、钾采用风干土样进行测定, 采用 $2\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ KCl}$ 土水比 $1:5$ 提取、流动分析仪测定铵态氮和硝态氮; 有效磷采用 $0.5\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 提取-钼蓝比色法测定; 速效钾采用 $1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 醋酸铵提取-原子吸收光谱法测定, 详见文献^[11]。

(4) 土壤细菌和真菌群落组成: 于盛花期取根际土 (抖土法取样), 贮于干冰盒带回室内 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存, 1周内提取土壤微生物 DNA 送测序公司对细菌 16S rRNA 和真菌 ITS 进行 qPCR 定量和群落

组成测定及生信分析^[14], 测序工作由北京奥维森生物技术有限公司完成。

1.6 数据处理与统计分析

试验原始数据采用 Excel 2020 进行整理, 试验处理方差分析采用 R 语言进行, 其中多重比较用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 调理剂对柴胡产量及品质的影响

柴胡视生长状况 $1 \sim 2$ 年均可收获, 本试验柴胡于 2022 年 10 月 25 日当年收获, 从出苗到收获经过约 158 d 的生长期, 收获时全株生物量数值见图 2。柴胡的主要入药部位是膨大的块状根, 根的干重即柴胡的产量。测定结果显示, CK 全株生物量 (图 2a) 为 $3334.20\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, Lime 和 Com 处理的生物量分别比 CK 高 31.0% 和 34.5% ($P < 0.05$), 可见石灰单一调理剂和复合调理剂均对增加柴胡生物量有显著作用。对于柴胡入药部位干燥根, CK 处理的产量为 $478.6\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, Lime 和 Com 处理的柴胡根产量 (图 2b) 分别比 CK 高 33.8% 和 41.9%, 说明石灰和复合调理剂对柴胡商品产量有显著增加作用。此外, 3 个处理的经济系数 (入药根占生物量的比例) 在 8.5% ~ 9.0% 之间, 处理间差异不显著。

测定的 3 个处理柴胡根中的氮、磷、钾含量 (图 2c) 和皂苷含量 (图 2d) 显示, 2 个调理剂处理 (Lime 和 Com) 的全氮、全磷、全钾及总皂苷含量分别显著高于 CK 62.0% 和 90.5%、71.3% 和 121.3%、69.8% 和 161.2% 以及 38.3% 和 16.0%, 调理剂处理的柴胡入药品质及养分含量都显著高于农民习惯处理, 其中 2 个调理剂处理的皂苷 B 含量分别是 CK 的 2.86 和 2.14 倍, 调理剂对柴胡的增产提质作用显著。

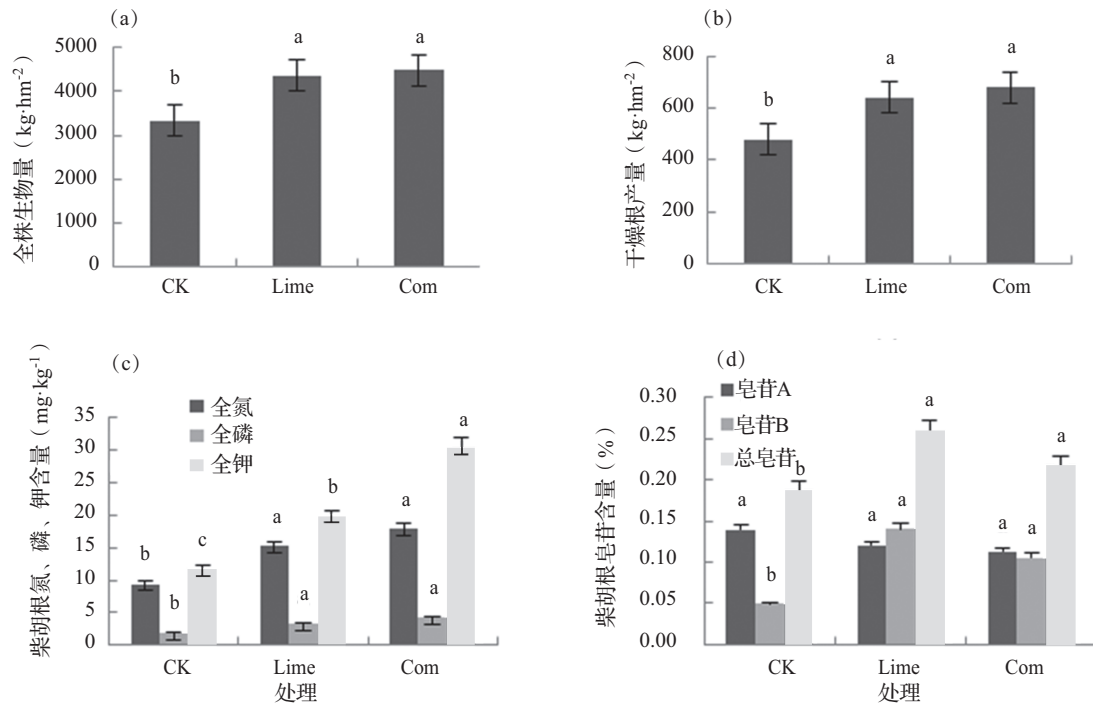


图2 不同处理的柴胡生物量、产量和品质

注：柱上不同字母表示同一指标不同处理差异显著， $P < 0.05$ 。

2.2 调理剂对土壤养分及土壤化学性状的影响

2.2.1 土壤主要化学性状

pH: 土壤 pH 是反映土壤化学性质及土壤中众多元素有效性和微生物群落的重要指标，土壤酸化会活化土壤中的重金属离子、促进盐基离子流失、增加根际土壤中适于低 pH 条件生长的致病菌比例，并使养分转化的方向或强度发生变化，影响植物生长。由图 3 可见，在当地传统施肥处理下种植柴胡，根际土壤 pH 下降明显，在播种后第 128 d 取样时测得土壤 pH 下降了 0.53 (图 3a)，在播种后的第 175 d 取样时土壤 pH 下

降了 1.09，相比于前一次取样的第 47 d 时间点又下降了 0.56；而施用调理剂的 2 个处理其土壤 pH 没有明显降低。这说明，施用石灰和复合调理剂能在一定程度上抑制中草药种植土壤的酸化状况。

土壤 DOC: 不同处理的根际土壤 DOC 含量如图 3b 所示，柴胡生长的 2 个主要时期土壤 DOC 含量在 $45.7 \sim 53.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间，不同处理及时期差异不大。对于 CK 和 Lime 处理，根茎膨大期 (9 月 8 日) 数值略低于盛花期的数值；而对于 Com 处理，不同时期 DOC 含量差异不大。

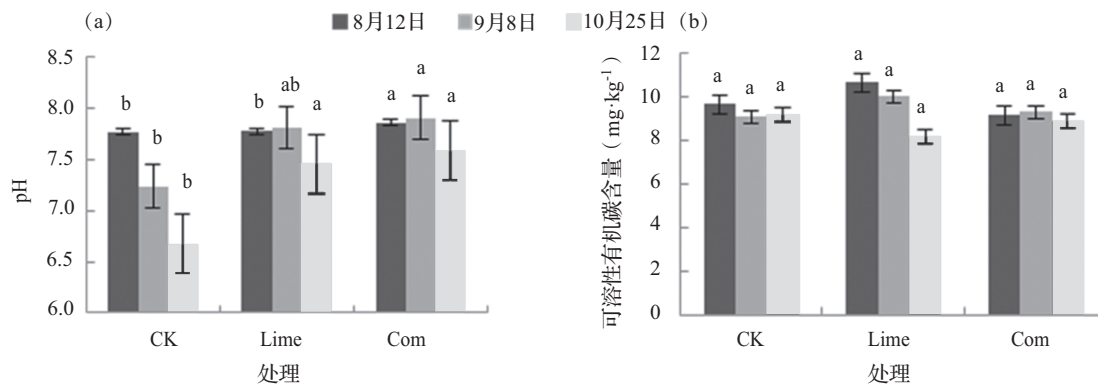


图3 不同生育期各处理土壤的 pH 和可溶性有机碳

注：图中指标各时期分别进行显著性检验及标注，柱上不同字母表示同一时期不同处理间差异显著， $P < 0.05$ 。下同。

2.2.2 土壤速效养分

土壤铵态氮：从图 4a 可以看出，由于旱地土壤通气性好、硝化作用强烈，土壤铵态氮含量整体不高，追肥前各处理间含量差异不显著，追肥后第 5 d 其含量已经降到 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。根茎膨大期追肥后，Lime 和 Com 处理的土壤铵态氮含量略高于农民常规施肥处理，但 2 个调理剂处理间差异不显著。

土壤硝态氮：图 4b 显示，与土壤中铵态氮不同，土壤中无机氮形态主要为硝态氮，盛花期追肥前土壤硝态氮含量在 $10.5 \sim 12.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间，收获期土壤硝态氮含量在 $11.8 \sim 12.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间，处理间差异不显著。由于追肥后硝化作用速率高，根茎膨大期追肥 5 d 后各处理硝态氮含量升高到 $20.1 \sim 31.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其中，Com 处理的含量相对较低，CK 与 Lime 处理的含量显著高于 Com 处理，这与复合调理剂处理中石膏及其他成份对铵态氮有一定吸附或固定作用、减缓了硝化作用有关。

土壤有效磷：图 4c 显示，盛花期土壤中有效磷含量在 $34.2 \sim 36.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间，其中，CK 处理含量较低，为 $34.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，Lime 和 Com 处理的土壤有效磷含量比 CK 处理高 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。根茎膨大期植株对各种养分的吸收量都较大，加之

土壤中的磷移动差以及可能被土壤固定的缘故，追肥后第 5 d 各处理的土壤有效磷含量在 $26.4 \sim 27.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内，处理间差异不大，但略低于盛花期。随着植株对土壤中养分的吸收，土壤有效磷含量随时间呈下降趋势，收获期土壤中有有效磷含量在 $19.9 \sim 22.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间，其中 Lime 和 Com 处理的土壤有效磷含量比分别比 CK 显著低 11.3% 和 7.0%。

土壤速效钾：图 4d 显示，土壤中速效钾的含量动态与有效磷类似，由于生育盛期植株的吸收及可能被土壤吸附的缘故，追肥后 5 d 土壤中含量并未显示增加。盛花期各处理土壤速效钾含量在 $165.5 \sim 167.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，各处理间差异不显著。追肥后第 5 d，土壤中速效钾含量在 $127.7 \sim 160.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间，其中 Lime 和 Com 处理的土壤速效钾含量比 CK 低 25.3% 和 6.7%；收获期土壤中速效钾含量在 $123.33 \sim 157.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间，其中 Lime 和 Com 处理的速效钾含量分别比 CK 显著低 27.3% 和 16.3%。可能是由于作物对钾离子的吸收及石灰成份提高了土壤交换性钙含量，造成土壤溶液中 $\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比例发生变化，增加了土壤对钾的短期固定，导致 Lime 处理中土壤速效钾含量低于 Com 处理。

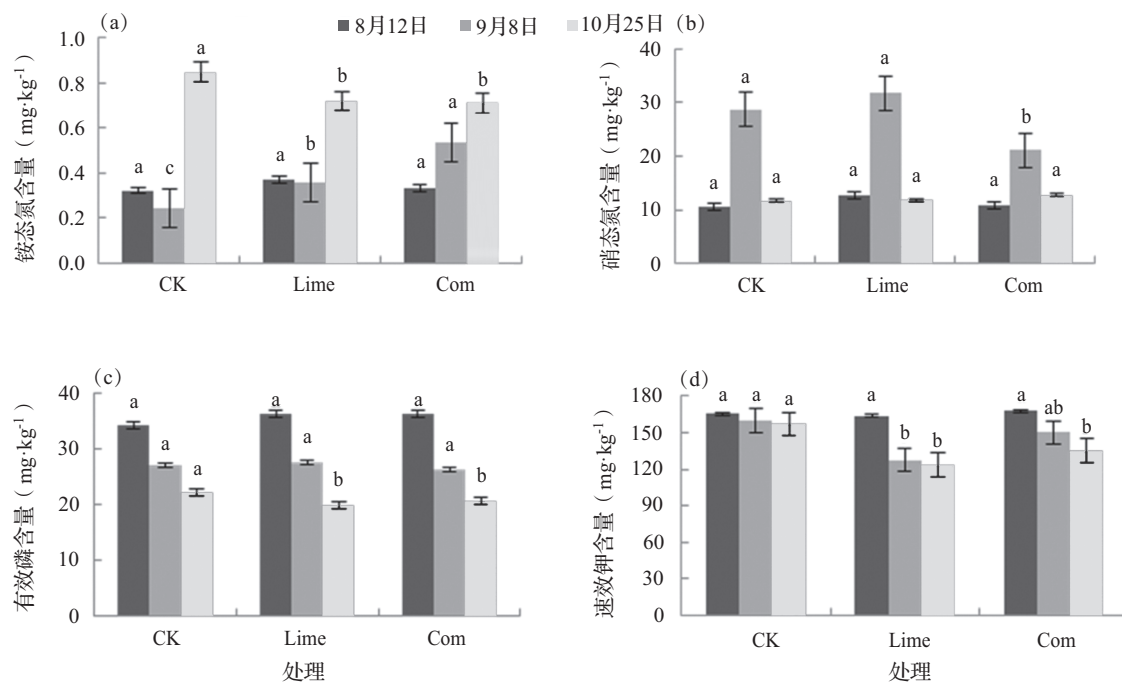


图 4 不同时期各处理土壤速效养分含量

2.2.3 土壤酶活性

本研究在柴胡盛花期和根茎膨大期追肥 5 d 后测定了 3 种与土壤氮磷转化相关的水解酶, 分别是脲酶、酸性磷酸酶和中性磷酸酶 (图 5a ~ c), 结果显示, 除酸性磷酸酶盛花期 Lime 和 CK 差异显著外, 这两个时期 3 个不同处理间的脲酶和磷酸酶活性都无显著差异。两种氮磷水解酶活性在柴胡不同生育期差异也不大, 脲酶活性在 $2.03 \sim 2.37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (以尿素计) 之间, 酸性磷酸酶和中性磷酸酶活性分别在 $1.18 \sim 1.38 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (以苯酚计) 和 $0.22 \sim 0.27 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (以苯酚计)。

土壤蔗糖酶的测定结果显示 (图 5d), 盛花期其活性在 $24.3 \sim 30.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (以葡萄糖计), 其中 Lime 和 Com 处理的蔗糖酶活性分别显

著高于 CK 处理 13.9% 和 26.1%, 充分反映了调理剂施用对土壤蔗糖酶活性的改善作用。根茎膨大期追肥后第 5 d, 各处理的蔗糖酶活性比盛花期低 14.0% ~ 31.3%, 但不同处理间差异不显著, 可能是受施肥抑制的缘故。

土壤多酚氧化酶测定结果显示 (图 5e), 柴胡盛花期其活性在 $12.93 \sim 15.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (以紫色没食子计), 其中, Lime 处理的酶活性和 CK 处理数值接近, Com 处理的酶活性较高, 显著高于 CK 处理 17.1%。根茎膨大期追肥后第 5 d, 各处理多酚氧化酶活性比盛花期高 7.2% ~ 22.2%; 各处理间比较, 该时期 Lime 和 Com 处理的多酚氧化酶活性分别比 CK 处理显著提高了 11.0% 和 11.4%, 但 2 个调理剂处理之间没有显著差异。

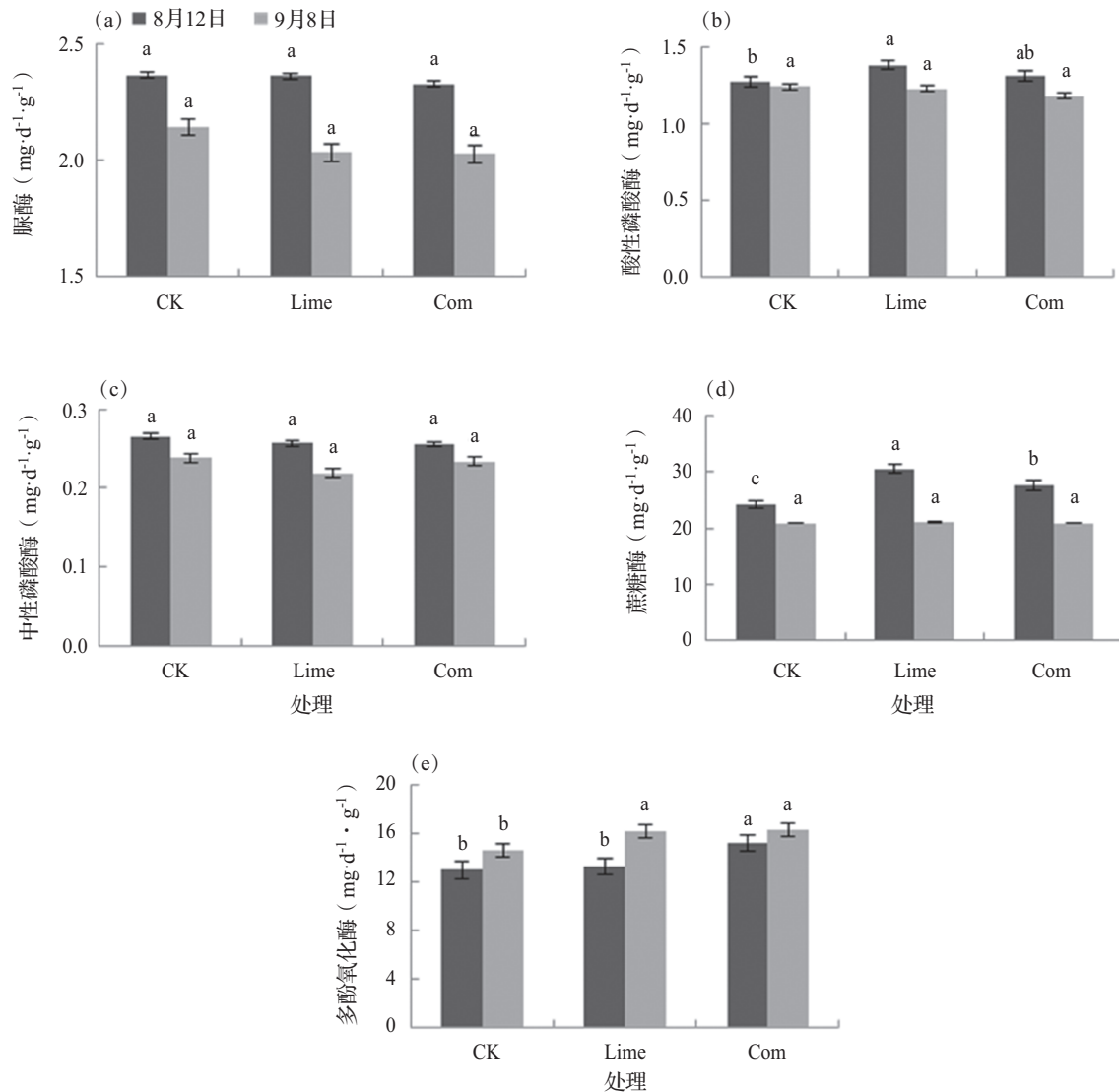


图 5 不同时期各处理土壤酶活性

2.3 不同施肥处理对土壤微生物丰度及区系组成的影响

为避免施肥对土壤微生物区系的短期应激影响,本研究在柴胡根茎膨大期后1周(追肥后38 d),取植物根际土壤测定了土壤细菌和真菌的丰度和群落组成结构。结果显示,各处理间细菌和真菌的丰富度和多样性没有显著差异(因篇幅缘故数据略),不同处理对细菌和真菌的丰富度和多样性指数也都没有显著影响(因篇幅缘故数据略)。

细菌群落组成(图6a):测序结果显示,不同处理间土壤中细菌的群落组成中优势菌的类别及组成占比差异明显,总体来讲,在种的水平上,不可培养菌(Uncultured bacterium)和未确认的菌(Unidentified)

分别占32.9%~35.5%和32.9%~35.7%,其他种还包括鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas*_sp._JGI_0001002-C18)以及不可培养的酸杆菌(Uncultured *Acidobacteria* bacterium)、拟杆菌(Uncultured *Bacteroidetes* bacterium)、 β 变形杆菌(Uncultured *beta* *Proteobacterium*)、宝石单胞菌(Uncultured *Gemmatimonadetes* bacterium)、 γ 变形杆菌(Uncultured *gamma* *Proteobacterium*)和 α 变形杆菌(Uncultured *alpha* *Proteobacteria* bacterium)等,各自的组成占比都在4.3%以下。

真菌群落组成(图6b):真菌ITS测序结果显示,不同处理中真菌的优势种类群相似,其中盾壳霉属(*Coniothyrium*)占比4.0%~7.6%、被孢霉属

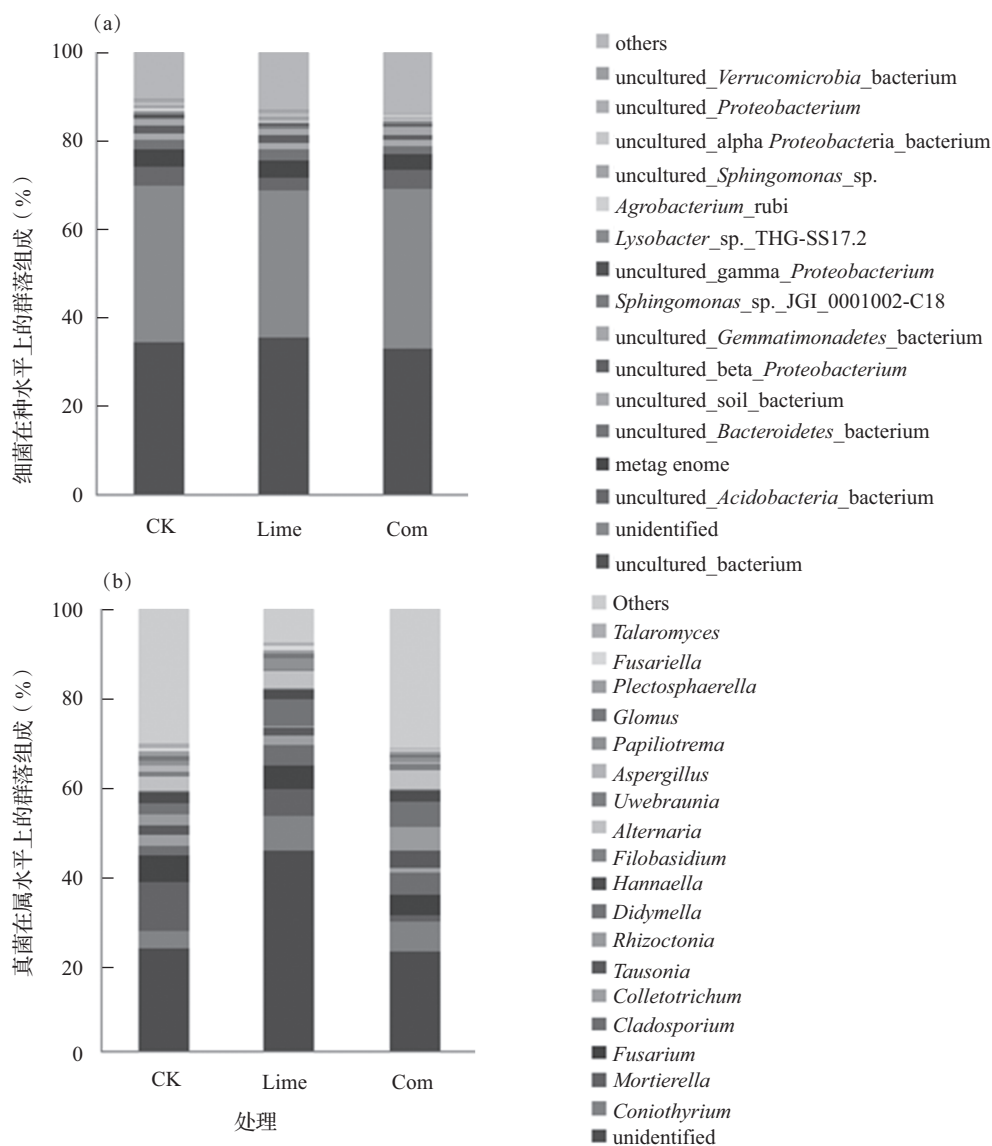


图6 不同处理下土壤细菌和真菌的群落组成结构

注: (a) 细菌 16S rRNA; (b) 真菌 ITS。



(*Mortierella*) 占比 1.4% ~ 11.1%、镰刀菌属 (*Fusarium*) 占比 4.9% ~ 5.7%、亚隔孢壳属 (*Didymella*) 占比 2.7% ~ 6.0%、枝孢属 (*Cladosporium*) 占比 2.4% ~ 4.8%、交链孢霉属 (*Alternaria*) 占比 3.0% ~ 4.2%、刺盘孢菌属 (*Colletotrichum*) 占比 1.0% ~ 2.4%、丝核菌属 (*Rhizoctonia*) 占比 0.5% ~ 5.1%。

然而, 不同处理间各菌属的组成占比不尽相同, 与 CK 处理相比, Lime 处理中不可鉴定属从 CK 处理的占比 23.1% 增加到 45.1%; 而其他组成占比低于 1% 的小比例属总和从 CK 处理的 31.2% 降到 8.4% (Lime)。Lime 处理相比 CK 处理, 占比增加的真菌属还有交链孢霉属, 从 CK 处理的占比 3.0% 增加到在 Lime 处理中占比 3.7% ($P<0.05$)。此外, 相比 CK 处理, Lime 处理中一些属的真菌占比还呈现显著降低, 如曲霉 (*Aspergillus*) 占比从 1.4% 降到 0.3% ($P<0.05$)、*Uwebraunia* 占比从 1.0% 降到 0.3%、*Plectosphaerella* 占比从 1.1% 降到 0.6% ($P<0.05$)。

对于 Com 处理, 一些真菌属的占比相对于 CK 也显示显著增加, 与 Lime 处理一样, 盾壳霉属和交链孢霉属在 Com 处理中的占比也显著增加, 分别从 CK 中占比 4.0% 和 3.0% 增加至 6.7% ($P<0.05$) 和 4.2% ($P<0.05$); 此外, 与 Lime 处理不同的是, Com 处理中, 茁芽丝孢属 *Tausonia* 占比从 CK 处理的 2.2% 增加至 4.0% ($P<0.05$), 而 Lime 处理中该属占比与 CK 处理相当。对于占比降低的真菌属, Com 处理和 Lime 处理一样, 主要体现在被孢霉属、篮状菌属 (*Talaromyces*)、小不整球壳属 (*Plectosphaerella*) 以及刺盘孢菌属, 且下降幅度大于 Lime 处理或与 Lime 处理相当。此外, 还有一些属的占比仅在 Com 处理中表现为显著降低, 如刺盘孢菌属的占比在该处理中占比为 1.0%, 而在 CK 和 Lime 处理中的占比分别为 2.4% 和 2.3%。总体来讲, Com 处理中, 一些真菌属占比显示增加、而另一些属显示降低, 且占比降低的属与 Lime 处理不完全相同, 说明复合调理剂对柴胡种植土壤中真菌群落组成有更加多样化的综合调理作用。

3 讨论

3.1 调理剂对柴胡产量及土壤养分的影响

石灰能有效减缓土壤酸化, 有机肥对提高土壤的缓冲能力及改善土壤养分供应状况有积极作用。前人在其他中草药上有研究显示, 以生石灰和

腐植酸颗粒肥作为土壤改良剂能提高白术药材单株的鲜质量和白术药材浸出物含量^[15]; 施用不同的改良基质 (稻草、腐熟猪粪) 改良土壤, 对人参的株高、茎粗、叶长、叶宽、根粗、主根长、鲜重、干重及总皂苷含量有显著的促进作用^[16]。本研究试验结果显示, Lime 和 Com 处理的生物量及产量以及柴胡总皂苷含量均显著高于 CK 处理 (图 2), 可见本研究采用的调理剂对北柴胡生长有积极作用, 与一些在中药材上使用调理剂的研究结果相似。

在浙江省衢州市新耕的低丘红砂田和黄筋泥田 (分别代表砂质和黏质土壤) 中, 施用石灰能明显提高土壤的 pH 和阳离子交换量 (石灰在砂土、黏土的施用量分别为 3.0、4.5 t · hm⁻²)。其中, 施用石灰处理 pH 约增加 1.5、阳离子交换量约增加 2.3 cmol · kg⁻¹^[17]。在柚园的试验发现, 减量施肥的同时施用石灰和调理剂, 两年后 pH 分别升高了 13.6% 和 6.7%, 而常规施肥和仅减量施肥的处理土壤 pH 分别降低 2.3% 和 8.7%, 其中减量施肥 + 石灰 + 有机肥替代部分化肥处理的土壤 pH 是所有处理中最高的, 施用 1 年后由 4.4 增加到 5.3^[18]。房雪等^[16]研究发现, 有机肥能调节农田参土壤 pH, 增强土壤蛋白酶、β-葡萄糖苷酶和脱氢酶的活性, 提升土壤对矿质养分的供应及缓冲能力。本试验测定结果发现, CK 处理的根际土壤 pH 在柴胡根茎膨大期和收获期显著低于两个施用土壤调理剂的处理 0.7 ~ 0.8, 表明北柴胡种植地的根际土壤同样有酸化趋势, 也说明含有一定量石灰的调理剂能在一定程度上减缓北柴胡地根际土壤 pH 下降的趋势, 复合调理剂中的有机肥也对调节土壤 pH 有一定作用, 与其他农田的报道得到的趋势相一致, 但 pH 变化幅度略低。

本研究测定了柴胡不同时期的土壤养分状况, 对于土壤速效氮, 本研究中盛花期各处理间无显著差异。这是由于土壤通气性较好、有利于硝化作用进行, 根茎膨大期追肥后第 5 d, 土壤中铵态氮含量已较低, 各处理间含量的差异也不明显; 但不同处理间土壤硝态氮含量有一定差异, 复合调理剂处理的硝态氮含量低于农民习惯处理及石灰处理, 而农民习惯处理和石灰处理间差异不显著, 这可能与复合调理剂处理中的石膏、腐殖酸、菇渣等其他成分对铵态氮有一定固定作用, 使一部分铵暂时得到保存, 而本试验中测得的速效铵态氮并没有包括这部分缓效态铵。有研究表明, 在种植番茄的土壤中, 施用有机肥的土壤



中固定态铵含量均显著高于不施用有机肥的处理^[19]。化肥配施有机肥在 0 ~ 20 与 20 ~ 40 cm 土层中的固定态铵含量均维持在较高水平,起到了土壤固铵保氮及防止氮素损失的作用^[20]。

对于土壤有效磷,由于本研究中施磷量较低(P_2O_5 30 kg · hm⁻²),加之磷容易被土壤固定,因此前 2 个时期土壤中各处理间有效磷差异不显著(图 4c)。土壤磷很容易被土壤中的矿质离子如钙离子、铝离子和铁离子固定,形成钙磷(包括二钙磷、八钙磷和十钙磷)、铝磷、铁磷以及闭蓄态磷等非速效态磷^[21-22],因此快速提高土壤有效磷有一定难度。

对于土壤速效钾,可能由于土壤中背景值含量较高(127.8 mg · kg⁻¹),因此在柴胡盛花期不同处理间的土壤速效钾差异也不显著(图 4d),但在植株生长后期,不同处理土壤速效钾含量出现显著差异,这可能与植株后期对钾的吸收增加及土壤对钾的吸附有关。这与原发性酸性土的情况不同,例如在湖南祁阳红壤试验地施用石灰(施用量为 2550 kg · hm⁻²)降低了各处理 0 ~ 50 cm 土壤速效钾含量,增加了各处理 0 ~ 10 cm 土壤缓效钾含量^[23]。

总体来讲,本研究调理剂成份中的石灰、腐植酸等成分分别具有中和土壤中活性酸及增加土壤缓冲性能的作用,含腐植酸的有机肥还能促进速效养分与缓效养分间的转换及保存,对调节土壤养分的有效性、改善柴胡产量和品质有积极作用。

3.2 调理剂对土壤胞外酶活性的影响

蔗糖酶也称为转化酶,是微生物分泌的一种胞外酶,它能迅速将蔗糖分解转化为葡萄糖和果糖,可增加土壤中易溶性营养物质浓度,对微生物的生长和繁殖具有重要作用,且对土壤有机物及团聚体胶结有重要作用,它不仅能表征土壤的生物学活性,也是土壤熟化程度和土壤肥力的生物学指标之一^[24]。有研究发现,在四川紫色土中施用石灰、猪粪这 2 种改良剂均提高了土壤蔗糖酶活性,且作用都达到了极显著水平,其中猪粪处理中蔗糖酶活性最高,较对照高 58.0%,可能与猪粪中易分解的有机物多,利于激发土壤的生物学活性有关^[25]。在探究石灰和有机肥对芒果园酸性土壤改良效果试验中,发现单施石灰、单施有机肥以及有机肥与石灰混施均能不同程度地提高土壤蔗糖酶活性,分别较对照显著($P<0.05$)提高 16.66%、

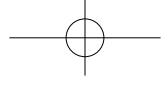
32.02% 和 41.15%^[26]。

土壤多酚氧化酶属于氧化还原酶,主要来源于土壤微生物、植物根系分泌物及动植物残体分解释放,它可以催化土壤中芳香族化合物如酚类和醛类氧化成醌,能减少酚类和醛类对土壤中微生物和植物的影响,且形成的醌类物质能够与土壤中蛋白质、氨基酸、糖类等物质反应生成有机质和色素,完成土壤芳香族化合物循环,对土壤环境修复具有重要意义^[27]。张猛等^[28]在贵州的试验发现,生石灰和腐植酸这 2 种改良剂能提高白术连作土壤中多酚氧化酶活性,其中生石灰对其活性影响更大,其次是腐植酸。在陕西省的试验发现,微生物肥料的施用能显著提高猕猴桃高龄果园土壤中的酶活性,其中多酚氧化酶活性较对照高 8.1% ~ 140.3%,其中微生物肥料中的有益菌(枯草芽孢杆菌和解磷细菌)起了积极作用^[29]。

关于不同处理对土壤胞外酶活性的影响,本研究表明,柴胡生长盛期(盛花期)不同处理的脲酶和磷酸酶活性没有显著差异,而 2 个调理剂处理的蔗糖酶和多酚氧化酶活性则都高于(追肥后蔗糖酶受施肥影响除外)农民习惯处理,与其他中草药及高龄果园中的结果相一致,即由于调理剂对土壤理化性状的改善,表征土壤健康的一些关键酶(蔗糖酶、多酚氧化酶)活性也得到了改善,对土壤养分转化有积极作用,这与前人在不同地区土壤上的研究结果一致。

3.3 调理剂对土壤微生物群落组成的影响

土壤的微生物数量和群落组成结构是土壤健康状况的重要指标,有试验报道,被孢霉属菌株是与土壤连作障碍相关的土壤真菌之一,被孢霉属在杨梅发病植株根际的含量均显著高于健康植株,与杨梅植株衰弱呈正相关关系^[30]。有研究指出,炭疽菌是辣椒、黄瓜、草莓等植物病害的病原菌^[31],可见调理剂处理能显著降低土壤中致病菌的比例。有试验发现,在田间设置脱硫石膏单施和脱硫石膏与有机肥复配 2 种处理,土壤真菌数量在植物的全生育期呈下降趋势^[32]。有研究发现,腐植酸钾能够抑制病原菌的生长发育,使土壤中尖刀镰孢菌 Foc4 含量的下降,在不同有机质含量的处理中, Foc4 的含量随腐植酸钾含量的增加而减少^[33]。生物有机肥能显著增加当归根际土壤细菌多样性,改变当归根际土壤细菌群落结构,使当归



根际土壤细菌的多样性指数显著升高,且细菌群落结构发生较大变化,放线菌门、未知的放线菌纲、厚壁菌门、芽孢杆菌纲等优势种群占比与对照相比显著增加,减轻当归根腐病的发生,显著提高当归产量^[34]。

本研究中,各处理的土壤细菌丰度及群落组成没有显著差异。对于真菌,各处理的真菌数量没有差异,但真菌不同属组成占比有变化。石灰处理和复合调理剂处理中一些致病真菌的组成占比减少,如被孢霉属、篮状菌属、*Uwebraunia*、小不整球壳属以及炭疽菌属等;而有益菌丰度占比增加,如盾壳霉属、交链孢霉属等;其中,被孢霉属在各处理间相对丰度差异最显著,CK处理中最多,占比11.1%,其次是石灰处理,占比6.2%,复合调理剂处理中占比最低,为1.4%。由于调理剂成分中的石灰、腐植酸有机肥和菇渣等在改善土壤性质,促进土壤养分的保存以匹配植株的连续吸收需求,由于调理剂对土壤化学和微生物学性状的改善,土壤中赖以生存的微生物群落结构也发生了相应的变化,促进了柴胡的健康生长。

4 结论

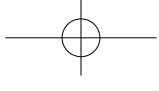
本田间试验结果显示,施用包含石灰、腐植酸、微生物菌剂等的复合调理剂能够使土壤化学性状和生物学性状改善,具体表现为能够抑制柴胡根际土壤pH下降的趋势;使土壤中真菌组成结构趋于健康,有益真菌占比增加、致病真菌占比降低;土壤蔗糖酶和多酚氧化酶的活性提高;调理剂中的成分可能促进土壤对铵态氮的固定以防止其过快转化为硝态氮而淋失或损失氮素,以持续供应植物生长,土壤养分供应和微生物组成更为协调;施用调理剂使柴胡产量及品质都得到提高,可为中草药传统产区土忌难题提供部分解决方案,促进中草药种植生产的可持续发展。

参考文献:

- [1] 张训. 中草药种植产业综述[J]. 农业技术与装备, 2021 (6): 73-74.
- [2] 朱铭, 刘琛, 林义成, 等. 不同调理剂组合对浙江红壤土壤肥力、微生物群落多样性和水稻产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34 (6): 1258-1267.
- [3] 张辰露, 孙群, 叶青. 连作对丹参生长的障碍效应[J]. 西北植物学报, 2005, 25 (5): 1029-1034.
- [4] 邱黛玉, 杜毛笑, 巫蓉, 等. 连作障碍对党参根际土壤微环

境的影响[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41 (5): 12-17, 22.

- [5] 邓文祥, 赵漫丽, 李永梅, 等. 白及根部内生真菌多样性研究[J]. 菌物学报, 2019, 38 (11): 1907-1917.
- [6] 李鑫, 刘怡. 晋东南3种道地药材植物根际真菌群落特性[J]. 生态环境学报, 2019, 28 (7): 1388-1393.
- [7] 赵涵予, 位小丫, 林煜, 等. 两种菌剂处理对连作三七根际土壤的修复效果分析[J]. 福建农业学报, 2018, 33 (11): 1181-1189.
- [8] 王蕾. 不同物料和间作模式对柴胡连作土壤的改良技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2022.
- [9] 刘丽. 生物菌肥和种植模式对北柴胡土壤微生态的影响[D]. 济南: 山东中医药大学, 2022.
- [10] 褚卓栋, 刘文菊, 肖亚兵, 等. 中草药种植区土壤及草药中重金属含量状况及评价[J]. 环境科学, 2010, 31 (6): 1600-1607.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] Liang B C, Mackenzie A F, Schnizer M, et al. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 26 (2): 88-94.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 294-297.
- [14] 章家恩, 蔡燕飞, 高爱霞, 等. 土壤微生物多样性实验研究方法概述[J]. 土壤, 2004, 36 (4): 346-350.
- [15] 唐乐, 曹国璠, 李金玲, 等. 土壤改良剂对连作白术质量、病害及土壤酶活性的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49 (3): 54-62.
- [16] 房雪, 叶强, 李翔国. 改良后农田参主要农艺性状、土壤养分及皂苷含量间相关性分析[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2022, 43 (2): 45-53.
- [17] 丁志峰, 陈宇航, 徐秋桐, 等. 组合调理剂对南方低丘新垦耕地肥力质量提升效果研究[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45 (4): 994-1005.
- [18] 张晓彤, 张亚东, 普正仙, 等. 不同施肥处理对柚园土壤酸度及养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023 (1): 81-89.
- [19] 段鹏鹏, 张玉玲, 丛耀辉, 等. 氮肥与有机肥配施协调土壤固定态铵与可溶性氮的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (6): 1578-1585.
- [20] 苗贺. 不同施肥措施对农田黑土铵晶格固定潜能的影响[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2023.
- [21] 刘洋, 彭正萍, 王艳群, 等. 不同褐土区菜地与相邻粮田土壤性状比对研究[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40 (6): 21-26.
- [22] Xu M P, Zhong Z K, Sun Z Y, et al. Soil available phosphorus and moisture drive nutrient resorption patterns in plantations on the Loess Plateau[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 461: 117910.
- [23] 周玲红, 黄晶, 王伯仁, 等. 南方酸化红壤钾素淋溶对施石



- 灰的响应[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 457-467.
- [24] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 1-7.
- [25] 卫怡君, 杨海滨, 辉建春, 等. 改良剂对镉胁迫茼蒿根际土壤酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2011(24): 178-181.
- [26] 罗玲, 潘宏兵, 钟奇, 等. 石灰和有机肥对芒果园酸性土壤的改良效果及对芒果品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 169-177.
- [27] 杨万勤, 王开运. 土壤酶研究动态与展望[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(5): 564-570.
- [28] 张猛, 曹国璠, 李金玲, 等. 土壤改良剂对连作白术的品质、发病率及根部土壤酶活性的影响[J]. 中药材, 2021, 44(4): 793-797.
- [29] 库永丽, 徐国益, 赵骅, 等. 微生物肥料对猕猴桃高龄果园土壤改良和果实品质的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2532-2540.
- [30] 任海英, 王程安, 俞浙萍, 等. 杨梅衰弱病根际土壤真菌的定量检测与分析[J]. 植物病理学报, 2022, 52(4): 529-536.
- [31] 刘晓然, 夏欢, 王阳. 辣椒炭疽病生防菌的筛选鉴定及其防治作用研究[J]. 西北农业学报, 2022, 31(8): 1067-1075.
- [32] 屈忠义, 孙慧慧, 杨博, 等. 不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 311-318, 350.
- [33] 谢衡萍, 李鹏飞, 李华平. 腐殖酸钾对土壤中香蕉枯萎病菌种群消长的影响[C]//中国植物病理学会. 植物病理科技创新与绿色防控——中国植物病理学会2021年学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021.
- [34] 王文丽, 李娟, 赵旭. 生物有机肥对连作当归根际土壤细菌群落结构和根腐病的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2813-2821.

Effects of soil conditioner on the yield and quality of *Bupleurum marginatum* and soil properties

LIU Ying¹, ZHANG Long^{2*}, WANG Yan^{1, 3}, YUAN Qing-jun⁴, YANG Zhao-hui⁵, HE Yu-tong¹, WANG Ting¹, SANG Meng-yao¹, GUO Li-ping^{1*} (1. Key Laboratory for Agro-Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Shandong Jingniu Group Co. Ltd., Jinan Shandong 250102; 3. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong Shanxi 030801; 4. National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700; 5. Anguo Qibawei Chinese Herbal Medicine Co. Ltd., Baoding Hebei 071200)

Abstract: In order to ameliorate the deteriorative soil properties in chemical and biological aspects in the fields where Chinese herbal medicine plants grow on-site for years with long growth period and robust secondary metabolism, a field experiment was conducted in Anguo city, Hebei province, the hometown of Chinese herbal medicine (CHM). Three different treatments were designed, including farmer's conventional fertilization pattern (CK), lime application (Lime), and compound conditioner application (Com) (complex of lime, gypsum, humic acid and *Bacillus*). The improvement effects of the soil conditioner on the chemical and microbiological properties of the soil where CHM were continuously planted for years, as well as the yield and quality of *Bupleurum marginatum* (BM) were examined. Results showed that the soil conditioners enhanced the yield and saponin content of BM by 33.8%-41.9% and 16.0%-38.3%, respectively. The conditioner had a positive effect on inhibiting the decrease of rhizosphere soil pH. Soil conditioners improved soil nutrient status, promoted the preservation of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients in the soil, and facilitated plant absorption. Treatments with conditioners showed enhancement on soil enzyme activities, including sucrase and polyphenol oxidase, which indicating the improvement of the soil quality and health status. Treatments with the conditioners exhibited the improvement on the microbial community with a decrease in the compositional proportion of pathogenic fungi, including *Mortierella*, *Talaromyces*, *Plectosphaerella*, *Colletotrichum*, while an increase in beneficial fungi such as *Coniothyrium*, *Alternaria*. This study demonstrated that the compound soil conditioner containing chemical components and microbial bacteria (*Bacillus* complex) could apply as a partial solution for reducing soil barriers resulted from continuous cropping of Chinese medicine plants. The compound soil conditioners could be recommended as an option for improving soil quality and increasing the yield and quality of Chinese herbal medicine.

Key words: *Bupleurum marginatum*; soil conditioner; lime; Chinese herbal medicine; soil amelioration