

余高,陈芬,卢心,等.不同施肥对幼龄柑橘园土壤养分及酶活性变化的影响[J].江苏农业科学,2023,51(20):218-223.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.20.031

# 不同施肥对幼龄柑橘园土壤养分及酶活性变化的影响

余高<sup>1,2</sup>,陈芬<sup>1</sup>,卢心<sup>1</sup>,滕明欢<sup>1</sup>,田霞<sup>1</sup>,罗有亮<sup>1</sup>

(1.铜仁学院贵州省梵净山地区生物多样性保护与利用重点实验室,贵州铜仁 554300; 2.贵州精源科技有限公司,贵州铜仁 554300)

**摘要:**以爱媛 38 号幼龄柑橘园为对象,通过田间试验,以不施肥处理(CK)为对照,研究了施用生物炭(SWT)、有机肥(YJF)、农家肥(NJF)、化肥(HF)4 种施肥处理下幼龄柑橘春梢期、夏梢期、秋梢期土壤 pH 值、有机质和速效养分含量、土壤酶活性变化。结果表明,与 CK 相比,4 种施肥模式均在一定程度上有效改善了果园土壤有机质和养分含量水平,其中 SWT 处理效果最好,在柑橘秋梢期土壤 pH 值、有机质(OM)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)含量较其他处理分别提高 13.22%~28.69%、7.70%~30.77%、9.99%~51.58%、23.36%~117.86% 和 15.19%~132.76%。除 HF 处理降低了柑橘夏梢期、秋梢期土壤过氧化氢酶活性外,其他施肥处理均有效提高了柑橘夏梢期、秋梢期 4 种土壤酶活性,其中 SWT 处理秋梢期土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性较其他处理分别显著提高 31.73%~163.46%、10.81%~127.78%、15.72%~94.71%、20.56%~67.04%。冗余分析(redundancy analysis, RDA)结果表明,不同施肥处理下柑橘园土壤 pH 值、有机质、有效磷、碱解氮和速效钾含量对土壤酶活性的影响均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。SWT 处理可以显著提高柑橘生育期土壤有机质含量和养分供应水平,增强土壤酶活性,可优先作为黄壤土幼龄柑橘园土壤培肥方式。

**关键词:**柑橘;生物炭;有机肥;农家肥;土壤;酶活性;RDA 分析

**中图分类号:**S666.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)20-0218-06

柑橘是世界产量位居第一的水果<sup>[1]</sup>,中国作为世界上柑橘种植面积最大和产量最高的国家,在过去 20 年主要依赖高量化肥的投入获得高产,随之带来了土壤酸化、土壤板结、树体早衰、果实品质下降<sup>[2]</sup>,以及水体富营养化等一系列不利于农业可持续发展的问题。

土壤是柑橘生长发育和养分吸收利用的基础<sup>[3]</sup>,柑橘产量的高低、品质的优劣与土壤质量有着不可分割的联系。黄壤是贵州省旱地主要的土壤类型,占到全省土壤面积的 46.40%,但由于贵州属于典型的喀斯特地形地貌,土层贫瘠,土壤蓄水

保肥能力较差,养分含量低,易发生水土流失,科学合理施肥对提高果园土壤肥力,保障贵州地区果园长久良性发展具有重要意义。研究表明,施肥可以改善土壤结构,调节土壤养分供应能力,提高土壤肥力,进而促进农作物生长发育,但对于不同的施肥类型,因肥料特性差异,土壤理化特性和微生物活性也会有所差异<sup>[4-5]</sup>。石丽红等研究表明,化肥长期施用会降低土壤 pH 值和土壤酶活性,进而影响土壤养分循环及生态系统的稳定性<sup>[6]</sup>。蒲全明等研究发现,长期大量施用有机肥可以通过提高土壤微生物活性促进土壤中速效养分的释放,使得土壤速效养分含量明显高于只施用化肥或有机肥替代部分化肥的土壤<sup>[7]</sup>。冯慧琳等研究表明,生物炭能改善土壤微环境,提高土壤有机碳等养分含量及土壤酶活性<sup>[8]</sup>。此外,季节变化也会引起土壤微生物活性的变化,进而引起土壤酶活性差异和作物对土壤养分的利用能力<sup>[9]</sup>。

前人对施肥措施的研究大多集中于作物某一特定时期,较少关注不同施肥措施下作物生育期内土壤环境因子及酶活性的动态变化,特别是在贵州果园黄壤有关不同施肥对柑橘不同生育时期内土壤养分动态变化和酶活性特征的变化规律研究还

收稿日期:2023-02-28

基金项目:贵州省重点实验室项目(编号:黔科合平台人才[2020]2003);贵州省教育厅自然科学研究项目(编号:黔教合 KY 字[2022]067 号);铜仁市科技支撑计划(编号:铜市科研[2020]81 号);铜仁学院硕士点及学科建设研究项目(编号:Trxyxwxdxm-036);国家级大学生创新创业训练计划项目(编号:202110665005;202210665034);省级大学生创新创业训练计划项目(编号:S202110665025)。

作者简介:余高(1988—),男,湖南益阳人,硕士,副教授,主要从事土壤改良相关研究。E-mail:htywwwyu1014@sina.com。

通信作者:陈芬,博士,教授,主要从事土壤肥力改良与植物营养研究。E-mail:chenfen2018@126.com。

不够深入。本研究以贵州黄壤幼龄柑橘园为对象,研究不同施肥处理下柑橘生育期土壤 pH 值、速效养分含量、土壤酶活性的变化规律及其间的相关性,以期为贵州黄壤选择适宜的果园培肥方式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于贵州省铜仁市松桃苗族自治县铜仁学院的长期定位试验基地爱媛 38 号柑橘园(28°33'N, 109°21'E),海拔 681 m,土壤类型为黄壤土。试验地属中亚热带湿润季风气候,冬冷夏热,春温秋爽,四季分明,气候宜人,雨量充沛,热量丰富,年平均气温 16.5℃,年均降水量 1 378.3 mm,年均无霜期 293 d,年均日照数为 1 228 h。供试土壤 pH 值和有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 5.35、25.53 g/kg、1.62 g/kg、154.91 mg/kg、71.22 mg/kg、190.77 mg/kg。供试柑橘品种为爱媛 38 号果冻橙,于 2019 年 4 月定植(2 年生),株行距 3 m×4 m,试验当年树龄 3 年。

### 1.2 试验设计

采用定点施肥试验,试验共设 5 个处理:对照(不施肥,CK);化肥处理(复合肥 450 kg/hm<sup>2</sup>,HF)、农家肥(6 000 kg/hm<sup>2</sup>,NJF)、有机肥(1 500 kg/hm<sup>2</sup>,YJF)、生物炭(4 800 kg/hm<sup>2</sup>,SWT)。其中,复合肥是由中化化肥有限公司生产的三元复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量≥40%);农家肥取自松桃县某养牛场风干牛粪[pH 值 6.28、有机质含量 14.5%、氮(N)含量 0.44%、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)含量 0.51%、钾(K<sub>2</sub>O)含量 2.03%];有机肥为巴彦淖尔市德源肥业有限公司生产的商品有机肥(pH 值 6.57,有机质含量≥90%,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量≥12%);生物炭由辽宁金和福农业科技股份有限公司生产的玉米秸秆生物炭(pH 值 8.43,有机质含量≥50%,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量≥5%)。每个处理 3 次重复,随机区组排列,每个处理选择树势一致、无病害的柑橘树 5 株为 1 个小区。各处理肥料均于 2020 年 11 月全部作为基肥在距幼龄柑橘树干 50~80 cm 处开 20~30 cm 深的环形沟均匀施入,并及时回土覆盖,各处理生育期采用人工除草,其他田间管理均一致。其中,在 2021 年 6—9 月柑橘生长旺盛期,平均每 3 周喷施 1 次 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 质量比=15:15:15 的叶面肥,共喷施 4 次。

### 1.3 土壤样品采集与分析

于 2021 年 4 月 11 日(春梢期)、6 月 12 日(夏梢期)和 9 月 25 日(秋梢期)分别在各处理小区内距柑橘树干 30~50 cm 的位置,避开施肥沟,随机、多点采集耕层土壤(0~20 cm)样品并均匀混合、剔除石块和杂质后带回实验室,自然风干后分别过 1、0.25 mm 筛装袋保存,用于土壤理化指标测定。土壤 pH 值采用水浸提(水土比为 5 mL:1 g),酸度计测定;土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量采用土壤农化分析常规方法<sup>[10]</sup>测定;土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶活性参照关松荫的方法<sup>[11]</sup>测定。

### 1.4 数据处理与分析

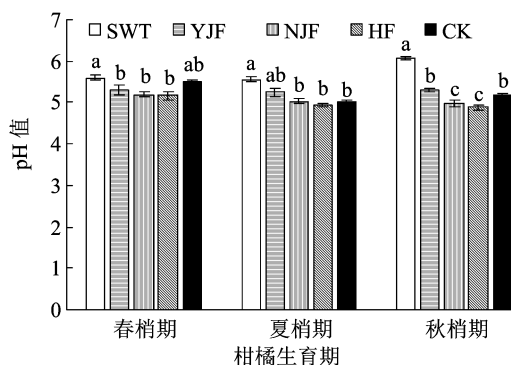
采用 Excel 2010 进行数据处理和作图,SPSS 25.0 软件对数据进行显著性检验和多重比较分析,采用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥种类对柑橘园土壤 pH 值和养分含量的影响

2.1.1 土壤 pH 值的动态变化 由图 1 可知,不同施肥处理下柑橘各生育期土壤 pH 值变化趋势不同,SWT、YJF、CK 处理的 pH 值呈先降后增的趋势,NJF、HF 处理的 pH 值呈不断下降的趋势。柑橘春梢期 SWT 处理 pH 值最高,达到 5.60,较其他施肥处理提高 5.46%~8.53%,且差异显著,与 CK 处理间差异不显著,但仍提高 2.00%;柑橘夏梢期各处理土壤 pH 值表现为 SWT>YJF>NJF>CK>HF;柑橘秋梢期 SWT 处理 pH 最高,较其他处理显著提高 13.22%~28.69%。

### 2.1.2 土壤有机质含量的动态变化 由图 2 可见,



柱上不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。图 2~图 9 同图 1

图1 不同施肥种类土壤 pH 值动态变化

各处理土壤有机质含量随着生育期的推进呈逐渐降低的趋势。各处理土壤有机质含量均在柑橘春梢期达到最高,为 21.40 ~ 26.58 g/kg。柑橘春梢期、夏梢期、秋梢期 SWT 处理土壤有机质含量较 CK 处理分别提高 22.88%、26.79%、30.77%,较 HF 和 NJF 处理分别显著提高 24.21% 和 17.45%、23.45% 和 12.37%、22.93% 和 11.10%;与 YJF 处理差异不显著,但仍提高 6.37% ~ 9.43%。

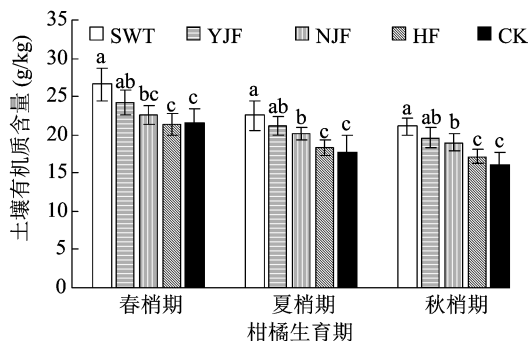


图2 不同施肥种类土壤有机质含量动态变化

2.1.3 土壤碱解氮含量的动态变化 由图 3 可以看出,与 CK 相比,施肥均提高了柑橘各生育期土壤碱解氮含量。SWT、YJF、NJF 和 CK 处理柑橘生育期碱解氮含量均呈先升高后下降的趋势,而 HF 处理则呈逐渐降低趋势。春梢期 HF 处理碱解氮含量最高,达到 189.29 mg/kg,较其他处理显著提高 8.76% ~ 22.79%;夏梢期、秋梢期均以 SWT 处理碱解氮含量最高,较 CK 处理分别显著提高 69.11%、51.58%,较其他施肥处理分别显著提高 24.47% ~ 65.96%、9.99% ~ 33.81%。

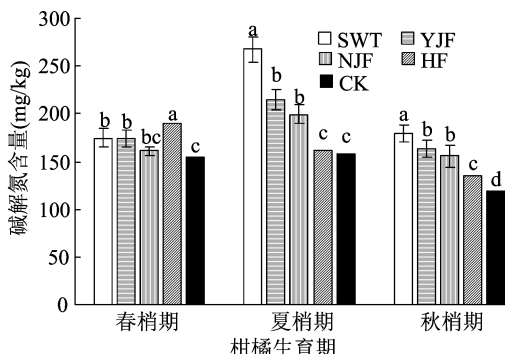


图3 不同施肥种类土壤碱解氮含量动态变化

2.1.4 土壤有效磷含量的动态变化 由图 4 可以看出,施肥均有效提高了柑橘园各生育期有效磷含量,各处理柑橘生育期土壤有效磷含量均呈先升高后降低的趋势。柑橘春梢期 SWT 处理有效磷含量最高,较 YJF、NJF、CK 分别显著提高 23.11%、

19.15%、31.00%,与 HF 处理差异不显著,但仍可提高 7.41%;柑橘夏梢期、秋梢期 SWT 处理有效磷含量分别较其他处理显著提高 20.40% ~ 86.98%、23.36% ~ 117.86%,各处理土壤有效磷含量均表现为 SWT > YJF > NJF > HF > CK,且各处理间差异显著。

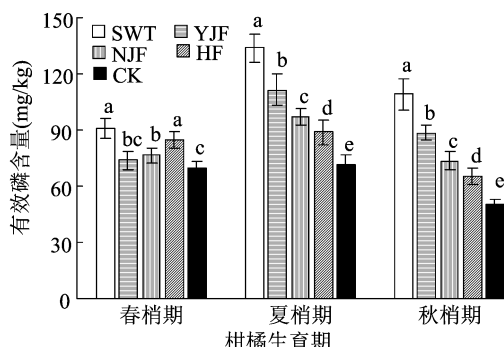


图4 不同施肥种类土壤有效磷含量动态变化

2.1.5 土壤速效钾含量的动态变化 由图 5 可知,各处理土壤速效钾含量在柑橘生育期呈现先降低后增加的趋势。柑橘春梢期 SWT 处理速效钾含量最高,分别较 CK、YJF 处理提高 39.11%、15.60%,与 NJF、HF 处理间差异不显著;柑橘夏梢期 SWT 处理速效钾含量显著高于 NJF、HF、CK 处理,但与 YJF 处理差异不显著;柑橘秋梢期各处理土壤速效钾含量表现为 SWT > YJF > NJF > HF > CK,且各处理间差异均达到显著水平,SWT 处理速效钾含量较其他处理显著提高 15.19% ~ 132.76%。

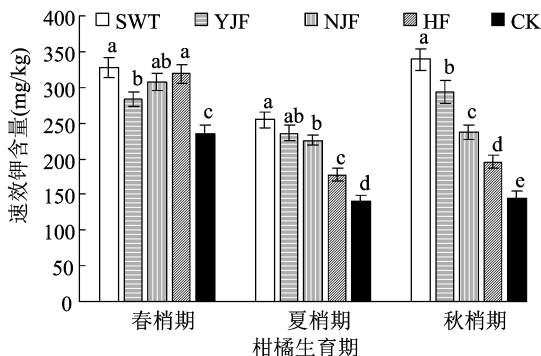


图5 不同施肥种类土壤速效钾含量动态变化

## 2.2 不同施肥种类对柑橘园土壤酶活性的影响

2.2.1 土壤过氧化氢酶活性的动态变化 由图 6 可见,不同施肥处理柑橘园土壤过氧化氢酶活性均呈先降低后增加的趋势。柑橘春梢期 SWT 处理土壤过氧化氢酶活性最高,较 CK 和其他施肥处理分别显著提高 62.11% 和 15.79% ~ 57.14%,NJF、HF 和 CK 处理间差异不显著,但均显著低于 YJF 处理;柑橘夏梢期各处理土壤过氧化氢酶活性表现为

SWT > YJF > NJF > CK > HF, 其中, SWT 处理显著高于 NJF、HF、CK 处理, 但与 YJF 处理差异不显著; 柑橘秋梢期 SWT 处理土壤过氧化氢酶活性最高, 较其他处理显著提高 31.73% ~ 163.46%, HF 处理最低。

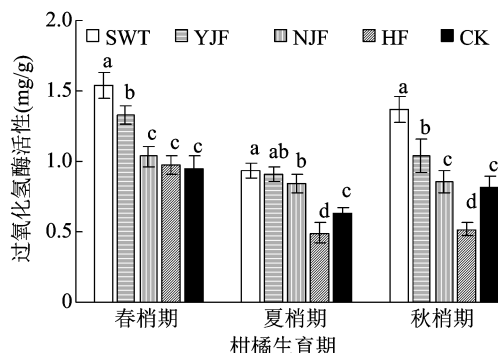


图6 不同施肥种类土壤过氧化氢酶活性动态变化

2.2.2 土壤脲酶活性的动态变化 由图 7 可以看出, 不同施肥处理下柑橘各生育期土壤脲酶活性的变化略有不同, SWT、YJF 处理呈先升高后降低的趋势, HF、CK 处理呈不断降低的趋势, 而 NJF 处理则呈现先升高后保持不变的趋势。春梢期 HF 土壤脲酶活性最高, 较其他处理显著提高 32.26% ~ 57.69%; 夏梢期 SWT 处理土壤脲酶活性最高, 较 CK 显著提高 140.00%, 较其他施肥处理显著提高 17.07% ~ 45.45%, NJF 和 HF 处理间差异不显著, 但均显著低于 YJF 处理; 秋梢期 SWT 处理土壤脲酶活性较 CK 显著提高 127.78%, 较其他施肥处理显著提高 10.81% ~ 51.85%, YJF 和 NJF 处理间差异不显著, 但显著高于 HF 和 CK 处理。

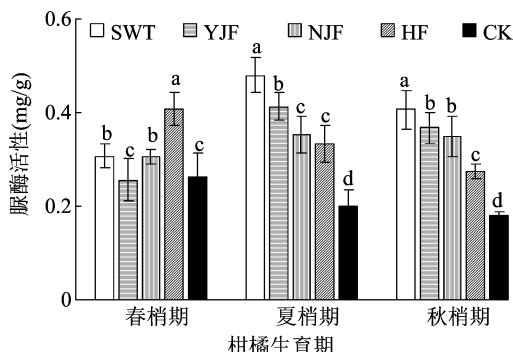


图7 不同施肥种类土壤脲酶活性动态变化

2.2.3 土壤蔗糖酶活性的动态变化 不同施肥处理下柑橘生育期土壤蔗糖酶活性均呈先增加后降低的趋势, 且各生育期土壤蔗糖酶活性均以 SWT 处理最高。春梢期 SWT 处理蔗糖酶活性较其他处理显著提高 16.77% ~ 50.00%, YJF、NJF、CK 处理间差异不显著, 但显著低于 HF 处理; 夏梢期、秋梢期

SWT 处理土壤蔗糖酶活性较其他处理分别显著提高 28.91% ~ 103.38%、15.72% ~ 94.71%, YJF、NJF 处理差异不显著, 但显著高于 HF 和 CK 处理(图 8)。

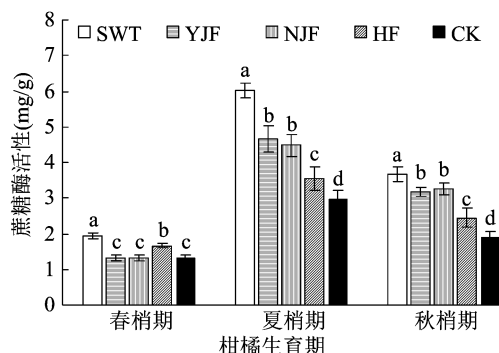


图8 不同施肥种类土壤蔗糖酶活性动态变化

2.2.4 土壤酸性磷酸酶活性的动态变化 由图 9 可以看出, 不同施肥处理柑橘生育期土壤酸性磷酸酶活性均呈不断升高的趋势, 与 CK 相比, 施肥均有效提高了柑橘园土壤酸性磷酸酶活性。柑橘各生育期阶段均以 SWT 处理酸性磷酸酶活性最高, 较其他处理分别提高了 17.88% ~ 29.45%、14.95% ~ 41.38%、20.56% ~ 67.04%, 且差异均达到显著性水平; 春梢期 CK 处理显著低于 HF 处理, 但与 YJF、NJF 处理间差异不显著; 夏梢期 YJF 处理土壤酸性磷酸酶活性均显著高于 HF 和 CK 处理, 但与 NJF 处理间差异不显著。

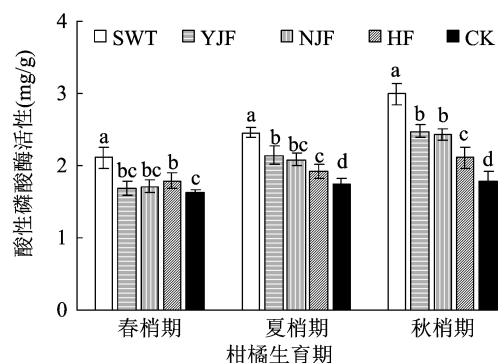


图9 不同施肥种类土壤酸性磷酸酶活性动态变化

## 2.3 土壤酶活性和土壤环境因子的 RDA 分析

通过对不同施肥处理下土壤酶活性与土壤环境因子进行 RDA 分析, 不同施肥处理下土壤酶活性用空心箭头连线表示, 土壤环境因子用实心箭头连线表示。由图 10 可知, 土壤环境因子对土壤酶活性的解释量为 71.15%, 其中, 前 2 个排序轴的解释变量分别为 45.14% 和 26.01%, 能较好反映土壤酶活性和土壤环境因子之间的关系。第一排序轴主要与 AP( $r = -0.952$ ) 和 AN( $r = -0.779$ ) 的相关性

较好;第二排序轴主要与 AK( $r = 0.869$ )、OM( $r = 0.747$ )和 pH 值( $r = 0.711$ )的相关性较好。采用 envfit 函数检验每个环境因子的显著性,结果显示, pH 值( $r^2 = 0.609$ )、OM( $r^2 = 0.522$ )、AP( $r^2 = 0.500$ )、AN( $r^2 = 0.749$ )和 AK( $r^2 = 0.792$ )对土壤酶活性的影响均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。以上结果说明 pH 值和 OM、AP、AN、AK 含量是影响土壤酶活性的主要环境因子。

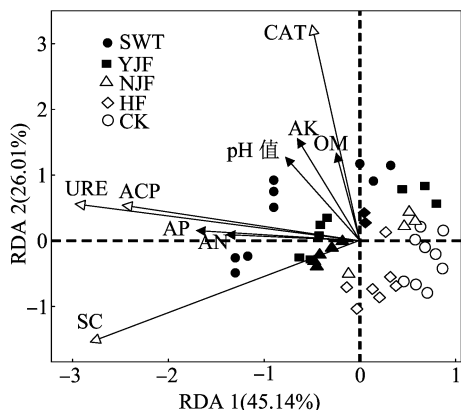


图10 土壤酶活性与养分之间的 RDA 分析

### 3 结论与讨论

土壤化学性质和水肥供应能力是柑橘生长所需营养供应的保障<sup>[12]</sup>,也是衡量土壤肥力状况的重要指标<sup>[9,13]</sup>。施肥可以改善果园土壤结构,调节土壤养分供应,提高土壤肥力,进而促进农作物生长发育<sup>[7]</sup>。幼龄期柑橘各生育期对土壤养分的需求旺盛,选择科学合理的施肥措施有利于提高土壤肥力和改善土壤质量,对保障贵州地区果园可持续发展具有重要意义。本研究发现,不同施肥处理下柑橘各生育期土壤 pH 值变化趋势有所差异,SWT、YJF、CK 处理的 pH 值呈先降后增的趋势,NJF、HF 处理的 pH 值呈不断下降的趋势,化肥施用会进一步导致土壤酸化,pH 值降低,而施用生物炭和有机肥在一定程度上有效提高了土壤 pH 值,这与袁访等的研究结果<sup>[14-15]</sup>一致。土壤有机质是土壤的重要组成部分,是土壤肥力的物质基础,土壤速效养分作为植物摄取养分的重要来源之一,是植物生长发育的物质基础<sup>[16]</sup>。本研究结果表明,与 CK 处理相比,施肥均在一定程度上提高了柑橘各生育期土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量,这是因为施肥增加了外源养分投入,改善了土壤结构和肥力状况,加快和调节土壤养分循环转化,进而增加了土壤速效养分含量<sup>[7]</sup>。同时,SWT 处理柑橘各生育

期土壤有机质和速效养分含量均高于 YJF、NJF 和 HF 处理,这可能是相较于有机肥、农家肥和化肥,生物炭在土壤中的降解矿化速度相对较慢,使得较多的氮、磷、钾等养分残留于土壤<sup>[17]</sup>。本研究还发现,季节性气候变化以及柑橘不同生育期对养分的需求不同而导致土壤养分呈现差异,各处理土壤有机质含量均在柑橘春梢期达到最高,随着生育期的推进而逐渐降低,土壤碱解氮含量除 HF 处理呈逐渐降低趋势外,其他处理均呈先升高后下降的趋势,土壤有效磷含量在柑橘生育期表现为先升高后降低的趋势,而土壤速效钾含量则呈现先降低后增加的趋势。这可能是由于夏梢期气温升高,柑橘生长迅速,对土壤养分的需求不断增加,导致土壤有机质矿化分解,进而降低了土壤有机质和速效养分含量。秋梢期后,随着气温降低,柑橘的生长速度逐渐减缓,对土壤矿物态钾的吸收减少,使土壤中速效钾含量升高,这与张成君等的研究结果<sup>[9]</sup>一致。

土壤酶作为土壤中的一种生物催化剂,能促进土壤有机物质的分解矿化,直接或间接参与土壤养分循环过程<sup>[18]</sup>,其活性高低可以用于衡量土壤健康和评价施肥效果的重要生物指标<sup>[19]</sup>。本研究结果表明,与 CK 相比,除 HF 处理降低了柑橘夏梢期、秋梢期土壤过氧化氢酶活性外,其他施肥处理均有效提高了柑橘夏梢期、秋梢期土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性,这是因为施肥能显著改善果园土壤理化性质,增加土壤有机质含量和养分有效性,促进土壤微生物活动和繁殖,进而提高土壤酶活性。相较于化肥,有机肥施入能为果园土壤带入更多的缓释性养分,提高土壤养分的维持供应能力,同时也有助于减少土壤中氮、磷、钾等养分的流失<sup>[17]</sup>。此外,季节变化能引起土壤微生物活性的变化,进而引起土壤酶活性差异<sup>[9]</sup>。本研究中,不同施肥模式下 4 种土壤酶活性在柑橘生育期表现出的动态变化,可能与季节更替导致的土壤水、气、热状况变化引起的土壤酶活性差异密切相关<sup>[20]</sup>,这有待于进一步深入研究。

前人研究发现,影响土壤酶活性变化的因素较复杂,与土壤类型、施肥种类及气候变化等因素有关<sup>[21-22]</sup>。许多研究证明,土壤养分含量与土壤酶活性呈显著正相关关系,表明土壤养分与酶活性存在协同变化效应<sup>[23-24]</sup>。张涵等研究发现,施肥会作用至土壤物质循环过程,从而导致土壤环境因子发生改变,进而影响土壤酶活性<sup>[25]</sup>。Liu 等研究发现,土

壤理化指标和土壤酶活性较其他土壤特性更能快速响应施肥管理的变化<sup>[26]</sup>。李欣等通过对土壤酶活性和环境因子的冗余分析,发现影响土壤酶活性的主要环境因子为全钾和有效磷含量,且排序靠前的多为养分因子,进一步说明土壤酶活性主要由土壤养分驱动<sup>[27]</sup>。因此,土壤环境因子与土壤酶活性结合可以较准确地反映土壤肥力的变化<sup>[28]</sup>。本研究通过土壤 pH 值、土壤酶活性和有机质、速效养分含量的 RDA 分析,定量分析了不同施肥处理下土壤环境因子对土壤酶活性的直接或间接作用及影响。结果表明,不同施肥处理下柑橘园土壤环境因子对土壤酶活性的影响均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。这与 Wang 等的研究结果<sup>[29-30]</sup>基本一致。

综上,施肥在一定程度上能改善幼龄柑橘园生育期土壤有机质含量和土壤养分供应水平,增强土壤酶活性,有机肥料效果要优于化肥。此外,SWT 处理还能改善土壤酸化,在提升土壤肥力和酶活性水平上优于其他施肥处理,可优先作为贵州黄壤土幼龄柑橘园土壤培肥方式。

#### 参考文献:

- [1] 李鸿平,陈昱辛,崔宁博,等. 水分亏缺对柑橘果实生长、产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉,2019(12):6-11.
- [2] 方林发,谢 军,孔 萌,等. 豆科绿肥替代化学氮肥促进柑橘幼苗生长和氮素吸收[J]. 植物营养与肥科学报,2021,27(11):1959-1970.
- [3] 王 杰,张春燕,卢加文,等. 广安区柑橘土壤养分状况及综合肥力评价[J]. 土壤通报,2021,52(6):1360-1367.
- [4] 郭乾坤,梁国庆,周 卫,等. 长期有机培肥提高红壤性水稻土生物学特性及水稻产量的微生物学机制[J]. 植物营养与肥科学报,2020,26(3):492-501.
- [5] 李 想,刘艳霞,陈风雷,等. 长期不同施肥处理对贵州植烟土壤酶活及微生物群落的影响[J]. 中国烟草学报,2019,25(6):50-59.
- [6] 石丽红,唐海明,孙 耿,等. 长期不同施肥模式对双季稻田土壤酸解有机氮组分的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(12):3345-3351.
- [7] 蒲全明,杨 鹏,邓榆川,等. 不同施肥方式对冬春茬甘蓝根际土壤酶活性、土壤养分及品质的影响[J]. 中国农业科技导报,2020,22(7):130-139.
- [8] 冯慧琳,徐辰生,何欢辉,等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学,2021,42(1):422-432.
- [9] 张成君,师尚礼,康文娟,等. 不同轮作模式土壤酶活性特征及与化学性质的关系[J]. 中国草地学报,2020,42(5):92-102.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [12] 曹 胜,杨水芝,裴碧涯,等. 有机无机肥配施碱性物料对柑橘园土壤性状和果实品质的影响[J]. 中国果树,2022(3):44-49.
- [13] 魏 鑫,林德喜,袁照年,等. 甘蔗关键生育期不同施肥处理对土壤养分及酶活性的影响[J]. 西南农业学报,2020,33(8):1741-1747.
- [14] 袁 访,李开钰,杨 慧,等. 生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学,2022,43(9):4655-4661.
- [15] 胡天睿,蔡泽江,王伯仁,等. 长期不同施肥下红壤酸碱缓冲性能变化[J]. 中国土壤与肥料,2022(6):48-54.
- [16] 闫 雷,周丽婷,孟庆峰,等. 有机物料还田对黑土有机碳及其组分的影响[J]. 东北农业大学学报,2020,51(5):40-46.
- [17] 周 南,陈 懿,叶 婵,等. 生物炭基产品对土壤碳氮矿化特性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(11):238-242.
- [18] 朱长伟,孟威威,石 柯,等. 不同轮耕模式下小麦各生育时期土壤养分及酶活性变化特征[J]. 中国农业科学,2022,55(21):4237-4251.
- [19] 周 芸,李永梅,范茂攀,等. 不同基肥处理对山原红壤土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J]. 应用与环境生物学报,2020,26(3):603-611.
- [20] 王国兵,徐 瑾,徐 晓,等. 蚯蚓与凋落物对杨树人工林土壤酶活性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(3):8-14.
- [21] Zhang L Y, Xiang Y Z, Jing Y M, et al. Biochar amendment effects on the activities of soil carbon, nitrogen, and phosphorus hydrolytic enzymes: a meta - analysis [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(22):22990-23001.
- [22] 李旭红,王雪玉,李章波,等. 长期温室栽培对玉米生长生理和土壤酶活性及养分平衡的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(6):60-65.
- [23] 胡庆兰,杨 凯,王金贵. 地膜覆盖及不同施肥处理对根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 西北农业学报,2023,32(3):429-439.
- [24] 肖汇川,李韦瑶,宋 雪,等. 黑龙江大庆农牧交错区草地-农田界面土壤养分与酶活性分析[J]. 中国草地学报,2023,45(1):106-114.
- [25] 张 涵,贡 璐,刘 旭,等. 氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性[J]. 环境科学,2021,42(1):403-410.
- [26] Liu E K, Zhao B Q, Mei X R, et al. Effects of no - tillage management on soil biochemical characteristics in northern China [J]. The Journal of Agricultural Science, 2010, 148:217-223.
- [27] 李 欣,陈小华,顾海蓉,等. 典型农田土壤酶活性分布特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报,2021,30(8):1634-1641.
- [28] Tan X P, Nie Y X, Ma X M, et al. Soil chemical properties rather than the abundance of active and potentially active microorganisms control soil enzyme kinetics[J]. Science of The Total Environment, 2021, 770:144500.
- [29] Wang Y J, Liu L, Luo Y, et al. Mulching practices alter the bacterial - fungal community and network in favor of soil quality in a semiarid orchard system [J]. Science of the Total Environment, 2020, 725:138527.
- [30] 陈小花,陈宗铸,雷金睿,等. 清澜港红树林湿地土壤酶活性与理化性质的关系[J]. 林业科学研究,2022,35(2):171-179.