

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21671

不同施肥处理对柚园土壤酸度及养分的影响

张晓彤^{1, 2}, 张亚东^{1, 2}, 普正仙³, 吴良泉^{1, 2}, 杨文浩^{1, 2*}

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350000; 2. 福建农林大学国际镁营养研究所, 福建 福州 350000; 3. 云南云天化股份有限公司研发中心, 云南 昆明 650000)

摘要:福建省平和县作为我国蜜柚主产区, 在生产中普遍存在施肥不合理的现象, 引起土壤酸化、养分不平衡等生产生态问题, 因此探究合理施肥模式对于指导蜜柚施肥具有重要意义。采用田间试验方法, 设置农户常规施肥(F)、减量施肥(RF)、减量施肥+石灰(RFL)、减量施肥+调理剂(RFC)、减量施肥+石灰+有机肥替代部分化肥(RFLM) 5个施肥措施, 开展为期两年(2018~2020年)的田间试验, 探究不同施肥处理对土壤酸度和养分的影响。结果表明:(1) RFL、RFC、RFLM处理在短期(2年)内对土壤表层(0~20 cm)酸度有显著提升, 以RFLM效果最佳, 但不能显著改变亚表层(20~40 cm)土壤酸度。(2) 0~20 cm土层F处理交换性酸和交换性铝浓度最高, 盐基饱和度最低, 3种减肥调酸处理较F处理的交换性酸、交换性铝显著降低, 盐基饱和度显著提高, RFL、RFLM阳离子交换量显著高于F; 20~40 cm土层各处理间交换性酸、交换性铝和CEC均无显著差异。(3) 土壤表层F处理2020年 NH_4^+ 、 NO_3^- 、有效磷和速效钾浓度较2018年分别上升56.7%、60.4%、38.7%和51.8%, 均显著高于其余减量施肥处理, 而交换性Mg浓度无显著变化。土壤亚表层2020年F处理 NH_4^+ 、 NO_3^- 和速效钾浓度较2018年分别上升120.9%、77.1%和25.9%, 均显著高于减量施肥处理, 交换性Ca、Mg浓度则随时间无显著变化。2020年较F处理, 其余优化施肥处理土壤各养分富集减少且仍能维持蜜柚生长需求。综合考虑土壤酸度改良、维持土壤速效养分、减少环境压力等方面可以得出, 减量施肥+石灰+有机肥替代部分化肥是本试验研究条件下一种较理想的柚园施肥管理措施, 减量施肥在一定时间内不会影响蜜柚产量及土壤速效养分供应。

关键词: 柚园; 减量施肥; 石灰; 有机替代; 动态变化

琯溪蜜柚是福建省漳州市平和县主要经济作物之一, 是平和县农民经济收入的主要来源。2018年种植面积4.67万 hm^2 , 产量130万t, 其产业链产值超过100亿元^[1]。由于经济效益的驱使, 果农在蜜柚生产过程中存在肥料投入类型单一、氮磷钾养分投入量大等行为^[2]。这一行为不仅导致了肥料利用率低下、大量元素富集、中微量元素缺乏等养分问题, 而且加速了土壤酸化的进程, 甚至还可能造成一系列的环境风险, 如农业面源污染的形成, 土壤重金属污染及地下水硝酸盐、亚硝酸盐含量上升等^[3]。目前已有研究中对土壤亚表层酸度及养分变化特征关注较少, 因

此, 改变施肥措施, 明确不同优化施肥处理对柚园土壤表层和亚表层酸度及养分的影响, 对于合理指导施肥和实现农业绿色发展具有重要意义。

土壤酸化指酸中和容量减少导致的酸度上升, 通常导致土壤板结、土壤退化、矿质元素有效性下降、盐基离子流失、生产力降低及有害重金属元素的活化等危害产生^[4], 大气酸沉降过程和化肥过量施用是造成土壤酸化的主要成因^[5]。由于长期不合理的施肥方式, 平和县琯溪蜜柚园土壤以强酸性($\text{pH}<4.5$)、酸性($\text{pH} 4.6 \sim 5.5$)为主, 有机质含量低^[6-9], 土壤质量严重下降, 对水资源、土壤、大气环境和作物生长产生极大威胁。同时有研究表明, 种植业化肥的过量投入引起了农业面源污染, 并成为水体污染和富营养化的主要原因, 造成农田土壤大量、中微量养分失衡^[10]。据调查, 平和县50.5%蜜柚园处于磷素环境高风险状态^[11], 73%的蜜柚果园土壤速效钾含量处于 $>120 \text{ mg/kg}$ 的过量水平^[12], 而土壤钙和镁等则处于缺乏状态^[13]。由于土壤酸化、土壤养分积累和

收稿日期: 2021-12-11; 录用日期: 2022-01-09

基金项目: 福建农林大学科技创新专项基金(CXZX2019075S, CXZX2019076G); 国际镁营养研究所项目(IMI2018-01)。

作者简介: 张晓彤(1998-), 硕士研究生, 从事土壤改良及修复研究。E-mail: zxtong0123@163.com。

通讯作者: 杨文浩, E-mail: whyang@fafu.edu.cn。

不均衡等现象普遍,蜜柚产量及品质也受到了极大影响^[14]。许多研究表明,施用石灰、调理剂及有机替代等是土壤酸化改良的有效措施,具有调节土壤 pH、减少养分流失、改善土壤理化性质等功能^[15-16]。

本研究针对平和县柚园土壤施肥过量、酸化严重等现状,通过田间试验,比较分析不同施肥处理下土壤表层、亚表层酸度和养分的动态变化特征及其差异并探讨其成因,为柚园合理施肥及土壤酸化改良提供一定的理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年 12 月到 2020 年 12 月在福建省平和县 (24° 22' N, 116° 18' E) 蜜柚园开展。该地区为亚热带季风气候,年均气温 17.5 ~ 21.3℃,年均降水量 1600 ~ 2000 mm,无霜期 324 d,适宜蜜柚生长。试验地面积 0.18 hm²,种植蜜柚品种为 8 年生红肉蜜柚。于 2018 年 12 月对树冠滴水线处土壤随机进行取样并测定其 pH 值和速效养分含量 (表 1) 作为供试土壤基础理化指标。

表 1 试验地土壤基础理化性质 (mg · kg⁻¹)

深度 (mm)	pH	铵态氮	硝态氮	有效磷	速效钾	交换性钙	交换性镁
0 ~ 20	4.4	23.70	24.51	559.27	330.19	365.00	79.97
20 ~ 40	4.2	14.64	28.90	388.64	237.03	224.72	67.19

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,共设 5 个处理:①农户常规施肥 (F),②减量施肥 (RF),③减量施肥 + 石灰 (RFL),④减量施肥 + 调理剂 (RFC),⑤减量施肥 + 石灰 + 有机肥替代部分化肥 (RFLM)。每个处理 4 个重复,共 20 个小区,每个小区 6 棵树,即每个处理 24 棵树。氮肥施用的是尿素,磷肥为磷酸二铵,钾肥为硫酸钾,石灰为氢氧化钙,调理剂为改性磷石膏、食用菌渣和改性牡蛎壳粉的混合物,有机肥为食用菌渣。除 F 处理外,其余处理均未施磷肥。根据蜜柚生长规律,氮、磷、钾肥施入时间为每年的 1、2、4、6 月,石灰分两次施入,时间为 2019 年 1、4 月,调理剂在 2019 年 1 月 1 次性施入。各处理施肥位置为距树干 0.2 ~ 0.8 m 的环形范围内,各处理具体施肥量见表 2。

表 2 各处理肥料及用量 (kg · hm⁻²)

养分投入量	F	RF	RFL	RFC	RFLM
氮 (N)	1084	200	200	160	160
磷 (P ₂ O ₅)	914	0	0	0	0
钾 (K ₂ O)	906	200	200	176	176
食用菌渣	7700	0	0	2000	2000
改性牡蛎壳	0	0	0	1517	0
氢氧化钙	0	0	3180	0	3180
改性磷石膏	0	0	0	628	0

1.3 样品采集与分析

土壤取样位点为施肥圈 (距离树干 0.8 ~ 1.2 m) 中心,即距离树干 1 m 的地方进行随机取样,取样深度为表层土壤 (0 ~ 20 cm) 和亚表层土壤 (20 ~ 40 cm) 两个深度。取样时间为 2018 年 12 月和 2019 年的 2、4、6、8、10、12 月及 2020 年 4、6、8、10、12 月。一部分土壤进行风干、研磨、过筛后测定土壤 pH、交换性酸 (EA)、交换性铝 (EAL)、阳离子交换量 (CEC)、盐基饱和度 (BS) 等土壤酸度指标和有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁等速效养分指标,另一部分立即放置于 4℃ 冰箱中短期保存,用于测定土壤硝态氮、铵态氮。测定方法均参照鲍士旦^[17]的土壤农化分析 (第 3 版)。

1.4 数据处理及分析

采用 Excel 2019、SPSS 23.0 和 Origin 21.0 对数据进行整理、分析和绘图。使用单因素方差分析 (One-way analysis of variance, ANOVA) 对相同时间不同处理间和相同处理间不同时期指标的差异显著性进行分析,用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤酸度的影响

2.1.1 不同处理土壤 pH 的动态变化

图 1 为各处理 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层 pH 动态变化。由图 1(a) 可知,在土壤表层, F 和 RF

处理 pH 随时间变化趋势较为稳定, 无明显升高或降低趋势; RFL 和 RFLM 处理变化趋势大致相同, 2019 年 2 到 6 月 pH 不断升高, 最高分别为 6.1 和 5.6, 随后开始急剧下降, 最后保持稳定。RFC 处理呈先上升后下降再上升的趋势, 2019 年 6 月达到最大值 5.3, 随后开始下降到 2019 年 10 月的 4.4, 最后呈缓慢的上升趋势。

图 1 (b) 为亚表层各处理 pH 动态变化趋

势。RF 处理变化趋势较为稳定, F 处理则呈缓慢下降趋势, 最低点为 2020 年 10 月的 3.8。RFL 和 RFLM 处理与表层变化趋势相同, 都在 2019 年 6 月达到最大值, 分别为 4.8 和 5.0, 随后开始下降, 2019 年 8 月后在较小的范围内波动。RFC 处理 pH 在 5.0 以下呈不断上升-下降的变化趋势, 2018 年 12 月和 2020 年 12 月 pH 均为 4.1, 总体保持不变。

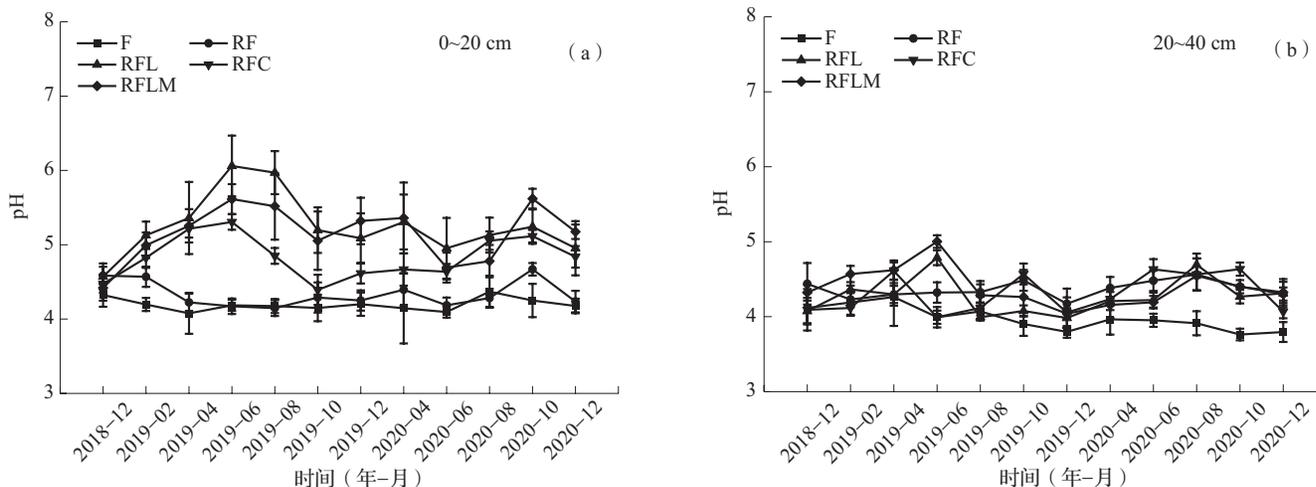


图 1 各处理土壤 pH 动态变化

2.1.2 不同处理对土壤 pH 的影响

对 2018 ~ 2020 年 12 月的土壤 pH 进行测定, 同一年份不同处理间和同一处理不同年份间的土壤 pH 值差异如表 3 所示。在 0 ~ 20 cm 深度, 通过对比不同处理间差异可知, 2019 年 RFLM 处理 pH 为 5.3, 为所有处理中最高, 显著高于 F、RF 和 RFC 处理, 与 RFL 间无显著差异, F、RF 和 RFC 三者之间无显著差异; 而 2020 年 RFL、RFC 和 RFLM 处理间土壤 pH 均无显著差异, 其中 RFLM 处理 pH 最高, 为 5.2, 显著高于 F 和 RF 处理, F 和 RF 之间不存在显著差异。从时间尺度来看, RFLM 处理

2019 和 2020 年土壤 pH 无显著差异, 但均显著高于 2018 年, 升高幅度分别为 20.5% 和 18.2%, 其余处理 3 个年份之间差异不显著, 对比 2020 和 2018 年土壤 pH 可知, RFL 和 RFC 2020 年比 2018 年分别升高了 13.6% 和 6.7%, F 和 RF 分别降低了 2.3% 和 8.7%。

20 ~ 40 cm 土层各处理和年份之间土壤 pH 均无显著差异。

2.1.3 不同处理对土壤交换性酸、交换性铝、阳离子交换量、盐基饱和度的影响

表 4 比较了 2020 年 12 月不同处理间交换性酸

表 3 不同处理和年份间土壤 pH

土壤深度 (cm)	年份	F	RF	RFL	RFC	RFLM
0 ~ 20	2018	4.3 ± 0.3Aa	4.6 ± 0.5Aa	4.4 ± 0.2Aa	4.5 ± 0.5Aa	4.4 ± 0.3Ba
	2019	4.2 ± 0.3Ac	4.3 ± 0.5Ac	5.1 ± 0.7Aab	4.6 ± 0.2Abc	5.3 ± 0.6Aa
	2020	4.2 ± 0.2Ac	4.2 ± 0.3Abe	5.0 ± 0.4Aa	4.8 ± 0.3Aab	5.2 ± 0.2Aa
20 ~ 40	2018	4.1 ± 0.4Aa	4.4 ± 0.6Aa	4.1 ± 0.4Aa	4.1 ± 0.3Aa	4.3 ± 0.2Aa
	2019	3.8 ± 0.2Aa	4.2 ± 0.4Aa	4.0 ± 0.3Aa	4.1 ± 0.1Aa	4.0 ± 0.1Aa
	2020	3.8 ± 0.5Aa	4.3 ± 0.2Aa	4.3 ± 0.4Aa	4.1 ± 0.2Aa	4.3 ± 0.3Aa

注: 大写字母表示同一处理同一深度不同年份间差异显著, 小写字母表示同一深度同一年份不同处理间差异显著 (P<0.05)。

(EA)、交换性铝(EAI)、阳离子交换量(CEC)和盐基饱和度(BS)等土壤酸度指标的差异。由表4可知,在0~20 cm土层,F处理EA浓度最高,为2.04 cmol/kg,RFLM处理最低,为1.02 cmol/kg,RFL、RFC及RFLM处理EA均显著低于F处理。各处理之间EAI的差异性与EA类似,不同点在于RFL处理显著低于F和RF处理。对于CEC来说,

RFLM处理最高,为7.78 cmol/kg,与RFL均显著高于其余处理,RFC的CEC显著高于RF。与CEC相同,RFLM处理的BS同样是在所有处理中最高,为86.9%,与RFL、RFC均显著高于F和RF处理。

在20~40 cm土层,各处理之间EA、EAI和CEC均无显著差异,而RF处理的BS显著低于其余处理,其余处理间无显著差异。

表4 不同处理间土壤EA、EAI、CEC、BS(2020年)

土壤深度 (cm)	处理	交换性酸 (cmol·kg ⁻¹)	交换性铝 (cmol·kg ⁻¹)	阳离子交换量 (cmol·kg ⁻¹)	盐基饱和度 (%)
0~20	F	2.04±0.6a	1.49±0.3a	5.56±0.3bc	63.3±10.6b
	RF	1.73±0.5ab	1.27±0.5ab	4.71±0.6c	63.4±9.0b
	RFL	1.22±0.2bc	0.74±0.3c	7.37±1.4a	82.9±4.0a
	RFC	1.41±0.2bc	0.93±0.1bc	6.09±0.1b	77.0±3.6a
	RFLM	1.02±0.1c	0.70±0.2c	7.78±0.5a	86.9±1.4a
20~40	F	2.50±0.6a	1.92±0.5a	4.77±0.2a	54.9±11.1a
	RF	2.92±1.2a	1.99±0.5a	5.25±1.2a	37.2±16.2b
	RFL	2.75±0.8a	2.29±0.7a	5.73±0.8a	61.8±11.4a
	RFC	2.42±0.5a	1.88±0.5a	4.80±0.8a	60.2±9.5a
	RFLM	2.59±0.7a	2.06±0.7a	5.16±0.8a	66.9±8.5a

注:不同字母表示同一深度不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同处理对土壤速效养分的影响

表5分析了不同深度不同土壤养分在处理间的差异性。在0~20 cm土层,2018年各处理间不同土壤养分浓度均无显著差异。2019及2020年,除F处理NH₄⁺显著高于其余处理外,其余处理间无显著差异;RF处理NO₃⁻浓度显著低于其余处理,F、RFL、RFC、RFLM处理间差异不显著。2019年,除RFC外,F处理有效磷浓度显著高于其余3个处理,而RFC显著高于RF、RFL,与F、RFLM间无显著差异,RF、RFL处理间有效磷浓度也无显著差异;2020年存在相似差异,而F有效磷浓度较其余处理差异均达显著水平。RF、RFL、RFC处理2019年的速效钾浓度较F显著降低,而RFLM与其余处理间差异不显著;2020年,F处理速效钾浓度最高,为533.91 mg/kg,显著高于其余处理,RF浓度最低,且显著低于RFLM。对于交换性钙,2019、2020年浓度差异相似,F、RF均显著低于RFL、RFC、RFLM处理。对比交换性镁浓度处理间差异可知,2019年F显著高于RFC、

RFLM,且RFLM交换性镁浓度显著低于RFL处理。

在20~40 cm的土壤亚表层,不同处理间各土壤养分浓度于2018年仍不存在显著差异。2019、2020年的NH₄⁺浓度表现差异与土壤表层相似;NO₃⁻浓度均为F处理最高,分别为47.97、44.83 mg/kg,RF处理最低,分别为25.24、21.04 mg/kg。2019年,F处理有效磷浓度显著高于其余处理;2020年,F处理有效磷显著高于RF、RFLM,而RFL、RFC与其余3个处理间差异不显著。2019和2020年,RF、RFL、RFC、RFLM处理的速效钾浓度较F显著降低,而四者间差异不显著。RFL处理的交换性钙浓度在2019年显著高于F处理,其余处理间差异不显著;2020年F处理交换性钙显著低于RFL、RFLM,其余处理间差异未达到显著水平。而对于亚表层的交换性镁,2019和2020年各处理间差异均不显著。

2.3 不同处理间养分年际变化

从表5可以看出不同处理下土壤养分年际间的

变化。0 ~ 20 cm 土层, 2020 年 F 处理 NH_4^+ 浓度较 2018 年显著提高 56.7%, 而与 2019 年之间无显著差异, RF、RFL、RFC、RFLM 分别显著降低 31.7%、41.5%、40.2%、26.4%。对于 NO_3^- , F 处理 2020 年浓度较 2018 年显著升高 60.4%, 与 2019 年无显著差异, RF 处理 NO_3^- 浓度 3 年间无显著变化, 2020 年 RFL、RFLM 处理较 2018 年 NO_3^- 浓度分别显著提高 48.2%、34.7%, RFC 处理 2019 与 2020 年间 NO_3^- 差异不显著, 但显著高于 2018 年。2020 年 F 处理有效磷浓度分别高于 2018、2019 年 38.7%、21.0%, 且差异显著, RF、RFLM 处理 2020 年有效磷浓度较 2018 年显著降低, RFL、RFC 处理的有效磷浓度 3 年间无显著差异。F 处理的速效钾浓度 2020 年较 2018 年显著提高 51.8%, 其余处理差异不显著。F、

RF 处理交换性钙浓度在 3 年间没有显著变化, 而 RFL、RFC、RFLM 处理 2020 年较 2018 年分别显著提高 135.1%、138.4%、172.5%, 与 2019 年无显著差异。对于土壤表层交换性镁浓度, 各处理试验前后均无显著提高。

在 20 ~ 40 cm 土层, F 处理 2020 年 NH_4^+ 浓度显著高于 2018 年 120.9%, 与 2019 年无显著差异, 其余处理均不随时间发生显著变化。2020 年 F 处理 NO_3^- 浓度较 2018 年显著提高 77.1%, 与 2019 年无显著差异, 其余处理无显著变化。2020 年 F 速效钾浓度较 2018 年显著提高 25.9%, RFL、RFLM 处理 2020 年交换性钙浓度分别高于 2018 年 106.1%、92.7%, 其余处理差异不显著。各处理有效磷、交换性镁浓度 3 年间差异均不显著。

表 5 处理间养分差异及其年间变化

($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土壤深度 (cm)	处理	铵态氮			硝态氮			有效磷		
		2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年
0 ~ 20	F	25.86Ab	42.70Aa	40.52Aa	24.95Ab	42.56Aa	40.01Aa	598.05Ab	685.39Ab	829.61Aa
	RF	21.66Aa	17.29Bab	14.80Bb	22.42Aa	27.16Ba	20.69Ba	542.84Aa	509.46Ca	463.61BCb
	RFL	24.17Aa	16.29Bb	14.13Bb	22.99Ac	46.99Aa	34.07Ab	556.91Aa	486.78Ca	473.66BCa
	RFC	22.76Aa	19.81Ba	13.61Bb	26.21Ab	39.94Aa	30.52Aab	520.93Aa	612.93ABa	547.48Ba
	RFLM	21.05Aa	20.58Ba	15.50Bb	26.69Ac	51.57Aa	35.95Ab	565.05Aa	532.83BCb	436.62Cc
20 ~ 40	F	15.17Ab	30.39Aa	33.51Aa	25.32Ab	47.97Aa	44.83Aa	427.64Aa	472.58Aa	486.05Aa
	RF	13.64Ab	19.00Ba	12.52Bb	29.69Aa	25.24Ca	21.04Ca	381.22Aa	349.88Ba	305.54Ba
	RFL	13.30Ab	18.00Ba	12.65Bb	27.92Ab	36.70Ba	31.95Bab	408.11Aa	352.62Ba	396.97ABa
	RFC	13.44Ab	22.01Ba	11.87Bb	28.96Ab	37.27Ba	25.36BCb	393.92Aa	324.21Ba	406.46ABa
	RFLM	15.16Aa	18.12Ba	10.93Bb	32.61Aab	40.85ABa	26.09BCb	348.65Aa	327.40Ba	314.59Ba
土壤深度 (cm)	处理	速效钾			交换性钙			交换性镁		
		2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年	2018 年	2019 年	2020 年
0 ~ 20	F	351.68Ab	452.04Aab	533.91Aa	382.95Aa	358.36Ca	385.97Ba	87.21Aab	96.70Aa	73.21ABb
	RF	305.87Aa	233.05Ba	282.03Ca	355.43Aa	340.40Ca	298.70Ba	82.48Aa	81.33ABCa	64.05ABa
	RFL	357.13Aa	224.16Ba	349.28BCa	397.19Ab	990.02Aa	933.75Aa	85.39Aa	91.01ABa	76.35Aa
	RFC	301.41Aa	233.04Ba	342.32BCa	367.58Ab	745.32Ba	876.40Aa	73.77Aa	63.66BCa	42.65Bb
	RFLM	324.48Aa	324.84ABa	404.04Ba	342.68Ab	1096.52Aa	933.71Aa	71.56Aa	57.34Ca	61.50ABa
20 ~ 40	F	251.50Ab	317.42Aa	316.55Aa	223.55Aa	168.24Ba	191.97Ca	63.53Aa	48.95Aa	52.70Aa
	RF	218.64Aa	195.55Ba	266.00Ba	241.52Aa	268.72ABa	242.48BCa	73.22Aa	65.94Aa	59.46Aa
	RFL	233.33Aa	208.37Ba	258.88Ba	205.33Ab	428.24Aa	423.11ABa	59.71Aa	54.57Aa	45.43Aa
	RFC	233.71Aa	166.80Bb	225.81Bab	218.86Aa	299.12ABa	304.98ABCa	76.46Aa	62.90Aa	66.45Aa
	RFLM	228.62Aab	206.00Bb	265.95Ba	239.36Ab	309.01ABa	461.15Aa	65.18Aa	63.19Aa	67.05Aa

注: 大写字母表示同一深度同一年份不同处理间差异性显著, 小写字母表示同一深度同一处理不同年份间差异性显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对土壤酸度的影响

土壤酸度主要受交换性氢、交换性铝等含量的影响,而酸化过程常伴随土壤盐基离子的淋失,因此土壤 CEC 和 BS 可作为土壤酸化的敏感性指标^[17]。2010 年的调查发现,肥料的过度施用加速了中国集约农业土壤的酸化^[18],且长期单施化肥使得以交换性铝为主的交换性酸度显著提高^[19]。而许多研究表明,化肥配施有机肥、秸秆还田与化肥减量配施等措施可有效降低土壤酸化速度,提高土壤 pH 值^[20-22]。2020 年表层土壤以 RFLM 处理 pH 最高,其次是 RFL 处理,两者皆显著高于 F、RF 处理,而两年试验前后只有 RFLM 处理 pH 显著升高,这表明石灰配施有机肥较单施石灰效果更好,因为有机肥对土壤的酸度也具有一定改良效果。李歆博等^[23]对琯溪蜜柚园土壤酸化特征研究发现,表层土壤平均 pH 为 4.4,亚表层为 4.2。本文中表层土壤的 pH 平均为 4.5,显著高于 pH 为 4.2 的亚表层,交换性铝表层显著低于亚表层,与其研究结果相似。亚表层土壤酸化较表层更为严重,且各处理间 pH 随时间均无显著变化,这是由于石灰是一种固体材料,在土壤中移动性较差,需要较长时间才能改善亚表层酸度^[24],同时,其余调酸处理对土壤亚表层的酸化改良效果也需要通过长期定位试验进一步探究。

试验前后各调酸处理即 RFL、RFC、RFLM 处理较 F、RF 处理均在一定程度上降低了表层土壤 EA 和 EAl,而提高了 BS、CEC,因此 3 种调酸处理都对过量施肥所造成的土壤表层酸度提高有一定的改良效果,且从 pH 变化趋势来看,若想达到改良土壤表层酸度的目的,除减量施肥之外还需设置相应的调酸处理;而亚表层各处理间 EA、EAl 和 CEC 均无显著差异,表明在两年内 3 种调酸处理对亚表层土壤酸度改良效果不显著。F、RF 处理两土层 pH 随时间无显著变化,处理间 EA、EAl、CEC 和 BS 均无显著差异,因此两处理对土壤酸度无显著影响。而调酸处理中 RFLM 处理 pH 最高,且 2019 与 2020 年均存在显著差异,EA、EAl 为所有处理中最低,BS 为最高,因此综合来看,RFLM 处理对土壤酸度的调节效果最好。土壤酸化是土壤退化的重要形式,会导致铝、锰、氢等对作物的毒害及土壤中营养元素磷、钼、钾、镁等的缺乏^[25],

并造成土保蓄能力下降、湖泊水体富营养化、水质劣化等不良后果^[26]。近些年来,国内对土壤酸化的研究大多关注酸沉降的影响,对农业措施在土壤酸化中的作用有所忽略,因此,探究更多施肥处理对土壤酸化的改良效果对农业生态和环境的健康发展具有重要作用^[27]。

3.2 不同施肥处理对土壤养分的影响

2020 年 F 处理两土层 NH_4^+ 浓度显著高于 2018 年,表明施用 N 肥能使 NH_4^+ 在土壤中累积且 NH_4^+ 能移动到亚表层^[28]。降低肥料用量可显著降低土壤表层矿质态氮的积累^[29],与 F 处理相比,其余处理 2020 年土壤 NH_4^+ 浓度均显著低于 2018 年,说明减少氮投入两年能显著降低表层 NH_4^+ 浓度,这表明其余处理可能存在减氮过量的问题,且 2020 年两土层 F 处理 NH_4^+ 浓度均显著高于其余处理,与何传龙等^[30]研究的减少氮肥投入可降低 20 ~ 80 cm 土层土壤 NH_4^+ 含量的结果相似。F 处理 2020 年 NO_3^- 浓度较 2018 年显著提高,说明常规施肥会导致土壤 NO_3^- 积累,茅国芳等^[31]研究表明,减氮能减少表层土壤 NO_3^- 的积累,而 2020 年各处理 NO_3^- 浓度较 2018 年无显著下降,表明不同施肥措施随时间变化不会显著降低土壤 NO_3^- 浓度;通过分析发现,RF 处理 2020 年表层土壤 NO_3^- 浓度较 2018 年无显著差异,而 RFL、RFC 和 RFLM 处理均有不同程度地提高,并在 2019 和 2020 年显著高于 RF 处理,原因可能是 RFL、RFC 和 RFLM 处理提高了表层土壤的 pH,从而加剧了土壤的硝化作用^[32]。试验前后,各处理亚表层土壤有效磷浓度无显著变化,这可能与磷在土壤中容易累积和固定有关^[33];谭海燕等^[34]研究了长期减量施肥对土壤养分含量的影响,发现长期不施磷肥能导致土壤磷浓度显著降低,赵伟等^[35]研究认为减量施肥可降低设施土壤表层有效磷的累积,本试验中,F 处理表层土壤有效磷浓度显著提高,RF、RFLM 处理显著降低,与上述结果相似。刘兆辉等^[36]研究表明,长期施肥下土壤速效钾有明显的积累,本试验中,F 处理速效钾随时间发生明显积累,其余处理无显著变化,表明在一定时间内减量施肥仍能使速效钾维持在一个稳定水平。施用石灰既可以调节土壤酸度,还可以增加土壤中交换性钙的浓度^[32]。本试验中,RFL、RFC 和 RFLM 处理均显著提高了土壤的交换性钙浓度,因为调酸处理中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaSO_4 中含 Ca^{2+} ,

直接导致土壤交换性钙浓度上升,亦可在一定程度上缓解柚园土壤钙缺乏的现状。王亮等^[37]研究发现,长期单施化肥,土壤表层的交换性镁呈明显下降趋势。本文中各处理表层、亚表层土壤交换性镁浓度随时间呈逐渐下降趋势,部分处理达显著水平,与上述研究结果相似。

虽然上述不同施肥处理之间土壤养分浓度的差异性不尽相同,但对比表6可以看出,除镁素需要进一步施肥补充,整体而言,较农户常规施肥处理,减量施肥及调酸处理在满足蜜柚需求的前提下降低了土壤养分富集,从而减少了环境风险。而从表7可以得出,2019及2020年各处理间蜜柚产量无显著差异,这说明与农户常规施肥相比,减量施肥及在此基础上进行各种调酸处理对蜜柚产量并无显著影响。因此两年内虽然减少了肥料的投入,但土壤各养分含量仍能满足蜜柚的生产需求。反观之,长期过量施肥会导致土壤大量元素的累积以及微量元素的固定、次生盐渍化的加重、土壤养分的失衡和pH的下降^[40],同时还存在过量氮、磷养分通过地表径流所造成的水体污染及N₂O等温室气体排放量增加等不良影响^[41-42]。因此减量施肥可在维持土壤肥力及保证蜜柚养分供给及生产需求的条件下减缓或改善以上危害,一定程度上降低农业施肥所带来的环境风险。

表6 蜜柚土壤养分适宜指标

项目	适宜指标	参考文献
pH	5.0 ~ 6.5	[38-39]
有效氮 (mg · kg ⁻¹)	100 ~ 200	
有效磷 (mg · kg ⁻¹)	15 ~ 80	
速效钾 (mg · kg ⁻¹)	100 ~ 300	
交换性钙 (mg · kg ⁻¹)	500 ~ 2000	
交换性镁 (mg · kg ⁻¹)	80 ~ 125	

表7 不同施肥处理对蜜柚产量的影响 (t · hm⁻²)

年份	F	RF	RFL	RFC	RFLM
2019	52.54a	53.53a	54.10a	57.06a	55.86a
2020	58.91a	57.51a	61.86a	60.43a	63.80a

注:相同字母表示同一年份不同处理间差异不显著(P<0.05)。

4 结论

(1) 减量施肥 + 石灰、减量施肥 + 调理剂、减

量施肥 + 石灰 + 有机肥替代部分化肥在2年内对表层土壤酸度均有一定改良效果,但不能显著改变亚表层土壤酸度,整体而言,以减量施肥 + 石灰 + 有机肥替代部分化肥对土壤酸度的改良效果最佳。

(2) 常规施肥处理NH₄⁺、有效磷和速效钾在土壤表层和亚表层不断累积,与之相比,减量施肥在一定时间不会影响蜜柚产量及土壤速效养分的供应,同时改良了土壤酸度,且降低了环境风险。

参考文献:

- [1] 漳州市平和县人民政府. 平和年鉴 [A]. 漳州: 中共平和县委党史和地方志研究室, 2019.
- [2] 许修柱. 琯溪蜜柚生产中的碳排放及优化施肥的综合效应评价 [D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
- [3] 陈小明, 黄双勇, 黄新忠, 等. 平和蜜柚果园施肥存在的若干问题及建议 [J]. 东南园艺, 2017 (6): 44-46.
- [4] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策 [J]. 生态环境, 2004 (4): 656-660.
- [5] 刘娇娟, 崔骏, 刘洪宝, 等. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12 (1): 173-184.
- [6] 曾瑞琴. 平和县琯溪蜜柚果园土壤养分状况及其施肥建议 [J]. 福建农业科技, 2012 (10): 67-69.
- [7] 黄绿林. 平和县山地琯溪蜜柚果园土壤养分评价 [J]. 中国南方果树, 2015, 44 (2): 63-65.
- [8] 黄育宗, 李健, 吴少华, 等. 琯溪蜜柚主产区 (平和县) 果园的营养状况 [J]. 福建农业大学学报, 2001 (1): 40-43.
- [9] 章明清, 林琼, 杨杰, 等. 平和琯溪蜜柚果园养分状况与平衡施肥研究 [J]. 福建农业学报, 2003 (3): 163-167.
- [10] 潘丹, 郭巧苓, 孔凡斌. 2002-2015年中国主要粮食作物过量施肥程度的空间关联格局分析 [J]. 中国农业大学学报, 2019, 24 (4): 187-201.
- [11] 李发林, 曾瑞琴, 危天进, 等. 福建省平和县琯溪蜜柚果园土壤磷环境风险评价研究 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23 (8): 1001-1009.
- [12] 许修柱, 林瑞坤, 苏达, 等. 集约化果园钾肥施用现状及钾素表观平衡状况研究——以福建省平和县琯溪蜜柚为例 [J]. 南方农业学报, 2019, 50 (3): 533-539.
- [13] 张炎, 曹振, 周慧梅, 等. 琯溪蜜柚叶片黄化与缺镁的关系及叶面补镁的矫治效果 [J]. 果树学报, 2021, 38 (8): 1319-1329.
- [14] Li Y, Han M Q, Lin F, et al. Soil chemical properties, 'Guanximiyou' pummelo leaf mineral nutrient status and fruit quality in the southern region of Fujian province, China [J]. Journal of Soil Science & Plant Nutrition, 2015, 15 (ahead): 263-269.
- [15] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展 [J]. 土壤, 2015, 47 (2): 238-244.
- [16] 邹恒福. 不同土壤改良剂对酸性土壤化学性质影响的研究 [D]. 海南: 华南热带农业大学, 2004.

- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析(三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 6(9): 206-213.
- [19] Guo J H, Liu J X, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [20] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 260-270.
- [21] 张喜林, 周宝库, 孙磊, 等. 长期施用化肥和有机肥料对黑土酸度的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1221-1223.
- [22] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4446-4456.
- [23] 李歆博, 林伟杰, 李湘君, 等. 琯溪蜜柚园土壤酸化特征研究[J]. 经济林研究, 2020, 38(1): 169-176.
- [24] Scott B J, Ridley A M, Conyers M K. Management of soil acidity in long-term pastures of south-eastern Australia: a review [J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2000, 40(8): 1173-1198.
- [25] Cregan P D, Scott B J. Soil acidification—an agricultural and environmental problem [M]. *Agriculture and the Environmental Imperative*, 1998.
- [26] Ye X, Hao J, Duan L, et al. Acidification sensitivity and critical loads of acid deposition for surface waters in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 289(1-3): 189-203.
- [27] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境保护, 2002(5): 385-388.
- [28] 吕艳玲, 杨绍聪, 张艳军, 等. 施肥量对抚仙湖北岸水稻土氮磷钾垂直迁移的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(27): 148-155.
- [29] 赵伟, 杨圆圆, 刘梦龙, 等. 减量施肥对越夏番茄产量、品质及土壤养分的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(9): 1335-1342.
- [30] 何传龙, 马友华, 于红梅, 等. 减量施肥对保护地土壤养分淋失及番茄产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 846-851.
- [31] 茅国芳, 汪琦, 黄钊贞, 等. 设施栽培土壤化肥减量施用的生态效应研究[J]. 上海农业学报, 2007, 23(1): 52-58.
- [32] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤 pH 值及有效养分含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 72-77.
- [33] 赵斌, 通乐嘎, 曹凌贵. 免耕稻田土壤磷有效性的研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(2): 562-563.
- [34] 谭海燕, 马芳, 杨从林, 等. 长期减量施肥对设施耕地土壤养分含量的影响[J]. 农学学报, 2021, 11(2): 39-44.
- [35] 赵伟, 杨圆圆, 刘梦龙, 等. 减量施肥对越夏番茄产量、品质及土壤养分的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(9): 1335-1342.
- [36] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 设施菜地土壤养分演变规律及对地下水威胁的研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 293-298.
- [37] 王亮, 李双异, 汪景宽, 等. 长期施肥与地膜覆盖对棕壤交换性钙、镁的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1200-1206.
- [38] 庄伊美, 王仁玠, 谢志南, 等. 柑桔、龙眼、荔枝营养诊断标准研究[J]. 福建果树, 1995(1): 6-9.
- [39] 李金强, 李文云, 柏自琴, 等. 营养诊断配方施肥对琯溪蜜柚及桃产量与品质的影响初探[J]. 中国南方果树, 2013, 42(4): 54-56.
- [40] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 等. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005(S1): 81-84.
- [41] 张颖飞. 武进区种植业肥料施用的环境效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [42] 纪梦梦, 吴晓刚, 吴欣欣, 等. 过量施肥对设施菜田土壤菌群结构及 N₂O 产生的影响[J]. 微生物学通报, 2018, 45(6): 1323-1332.

Effects of different fertilization treatments on soil acidity and nutrients in pomelo orchard

ZHANG Xiao-tong^{1, 2}, ZHANG Ya-dong^{1, 2}, PU Zheng-xian³, WU Liang-quan^{1, 2}, YANG Wen-hao^{1, 2*} (1. School of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350000; 2. International Institute of Magnesium Nutrition, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350000; 3. Research and Development Center of Yunnan Yantian Co., Ltd., Kunming Yunnan 650000)

Abstract: Pinghe County, Fujian Province, as the main production area of pomelo in China, has the problem of excessive fertilization, which caused production ecological problems such as soil acidification and nutrient imbalance. Therefore, exploring the rational fertilization model is of great significance to guide the fertilization of honey pomelo. To explore reasonable fertilization mode, using field experiment method, 5 different fertilization treatments were set up: the farmer conventional fertilization (F), reducing fertilization (RF), reducing fertilizer + lime (RFL), reducing fertilizer + conditioner (RFC), reducing fertilizer + lime + organic fertilizer partly replacing of chemical fertilizer (RFLM). A two-year field experiment was conducted to investigate the effects of different fertilization treatments on soil acidity and nutrient concentration. The results showed that: (1) RFL, RFC and RFLM treatments significantly increased soil surface acidity (0 ~ 20 cm) in a short term (2 years), and RFLM had the best effect, but did not significantly change soil subsurface

acidity (20 ~ 40 cm). (2) In 0 ~ 20 cm soil layer, the concentration of exchangeable acid and exchangeable aluminum in F treatment was the highest, while the base saturation was the lowest. Compared with the exchangeable acid and exchangeable aluminum in F treatment, the base saturation was significantly increased, and the cation exchange capacity of RFL and RFLM was significantly higher than that of F treatment. There were no significant differences in exchangeable acid, exchangeable aluminum and CEC among treatments at 20 ~ 40 cm depth. (3) The concentrations of NH_4^+ , NO_3^- , available P and available K in soil surface under F treatment in 2020 increased by 56.7%, 60.4%, 38.7% and 51.8%, respectively, compared with those in 2018, which were significantly higher than those in other reduced-fertilization treatments, while exchangeable Mg concentration did not change significantly. In 2020, the concentrations of NH_4^+ , NO_3^- and available K under F treatment increased by 120.9%, 77.1% and 25.9%, respectively, compared with those in 2018, which were significantly higher than those under reduced fertilization, while exchangeable Ca and Mg concentrations did not change significantly over time. Compared with the F treatment in 2020, the enrichment of soil nutrients in other optimized fertilization treatments decreased and the growth demand of pomelo could still be maintained. Integrated soil acidity improving, soil available nutrients maintaining and the environmental pressure reducing into consideration, it can be concluded that RFLM is a kind of ideal fertilization management practice of pomelo orchard under the condition of the experimental study, in which the yield and soil available nutrient supply will not be affected when fertilization is reduced for a certain period of time.

Key words: pomelo orchard; reduction of fertilizer; lime; organic substitution; dynamic change