

荔枝钾氮肥滴施比例及施肥方式对土壤 pH 和盐分的影响

白翠华¹, 周昌敏¹, 王祥和², 罗东林¹, 朱陆伟¹, 姚丽贤^{1*}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州 510642; 2. 海南省农业科学院热带果树研究所, 海南 海口 570100)

摘要: 灌溉施肥引起的土壤酸化和次生盐渍化问题是限制其可持续应用的重要因素。2013~2018 年在海南省澄迈县进行了荔枝滴灌施肥试验, 探讨在磷肥土施条件下以不同比例滴施钾氮肥 ($K_2O/N = 0.6, 0.8, 1.0$ 和 1.2) 及在 $K_2O/N = 1.0$ 条件下以不同方式施肥 (磷肥土施而钾氮肥滴施、全部肥料滴施及全部肥料土施) 对砖红壤荔枝园 0~30 和 30~50 cm 土层土壤 pH 和盐分的影响。结果表明, 连续 5 年以不同比例滴施钾氮肥, 土壤 pH、盐分及盐分阳离子 (K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 和阴离子 (Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^-) 含量变化与钾氮肥比例之间均缺乏密切关系。然而, 在试验结束时, 偏施氮肥 (钾氮肥滴施比例为 0.6) 由于促进 Ca^{2+} 在两个土层的淋失而降低土壤 pH, 而合理滴施钾氮肥 (钾氮肥比例为 1.0) 则稍提高土壤 pH, 对盐分及盐分阴阳离子含量影响则未达显著水平。全部肥料土施比全部肥料滴施有利于盐分阳离子的保存, 对盐分阴离子的影响则不大, 从而也有利于维持土壤 pH。在荔枝滴灌施肥中, 可将钾氮肥以 1:1 的比例滴施且将磷肥土施, 即使在降雨丰沛的荔枝产区长期应用, 也可避免土壤酸化及次生盐渍化。

关键词: 荔枝; 水肥一体化; 钾氮比; 土壤酸化; 次生盐渍化

中图分类号: S158, S146 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)05-1104-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020112501

白翠华, 周昌敏, 王祥和, 罗东林, 朱陆伟, 姚丽贤. 荔枝钾氮肥滴施比例及施肥方式对土壤 pH 和盐分的影响 [J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1104-1113

BAI Cui-hua, ZHOU Chang-min, WANG Xiang-he, LUO Dong-lin, ZHU Lu-wei, YAO Li-xian. Soil pH and Salinity as Affected by Fertilizer Ratio of Potassium and Nitrogen in Drip Fertigation and Fertilization Method in Litchi [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(5): 1104-1113

荔枝是我国重要的热带亚热带水果。2016 年全国荔枝种植面积 542 千公顷, 产量为 229.6 万吨^[1]。我国荔枝主要种植在坡地, 立地土壤物理性质差, 养分肥力低^[2-3], 而且绝大部分荔枝园没有灌溉条件。在干旱气候条件下, 仅有少数荔枝园可从山塘水库、河涌及地下水抽水进行灌溉。另外, 绝大部分荔枝园施肥仍以传统的沟施、穴施和撒施为主^[4], 费时费力。随着劳动力减少及人力成本增加, 传统人力施肥成本越来越高, 而且往往不能及时施肥, 对荔枝生长发育造成一定不良影响。

不少报道指出, 灌溉施肥技术 (Fertigation, 国内一般称为水肥一体化技术) 可将肥料养分和水分同时供应到作物根区, 不但省时省力, 而且肥、水利用率高, 不破坏土壤结构, 在美国、西班牙和意大利等国的柑橘^[5-7] 及南非^[8] 和澳大利亚^[9] 的荔枝生产上已普遍采用。滴灌施肥是灌溉施肥中的一种常

用方式。滴灌施肥虽然具有多种优点, 但不管在露地还是温室大棚, 滴灌施肥引起的土壤酸化及次生盐渍化都是一个影响其可持续应用的重要限制因素^[10-12]。国内有文献报道了荔枝水肥一体化技术应用效果^[13], 但缺乏技术细节, 对荔枝园土壤性质的影响也未考虑。

我们已经通过连续多年田间试验, 提出了华南典型荔枝园土施钾氮肥的适宜比例^[14-15]。另外, 于 2013—2018 年在海南省澄迈县荔枝主产区开展了荔枝滴灌施肥试验, 探讨在滴灌条件下钾氮肥适宜施用比例及不同施肥方式 (除磷肥外的其他所有肥料滴施、全部肥料滴施及全部肥料土施) 的应用效果。关于钾氮肥滴施比例及施肥方式对荔枝树体生长发育、产量及品质的影响已经另行撰文^[16] 介绍, 本文则针对钾氮肥滴施比例及施肥方式对土壤 pH 和盐分含量变化的影响, 从土壤质量变化角度为荔枝生产

收稿日期: 2020-11-25; 修订日期: 2021-01-27

基金项目: 国家荔枝龙眼产业技术体系建设专项 (CARS-32) 资助

作者简介: 白翠华 (1988-), 女, 讲师, 主要从事土壤养分资源管理及环境功能材料的制备及应用工作。E-mail: bai_ch@scau.edu.cn

*通讯作者: E-mail: lyaolx@scau.edu.cn

中确定适宜的钾氮肥滴施比例及选用合适的施肥方式提供参考。

1 材料与方法

本试验于 2013 年 7 月—2018 年 6 月在位于海南省澄迈县的海南省农科院热带果树研究所永发试验基地进行。澄迈县属热带季风气候北缘,受季风影响大,光照充足,高温多雨,雷暴多,台风频繁,四季不明显,干雨季分明,干凉同季,雨热同期,降雨丰沛。

1.1 供试材料

供试品种为妃子笑。试验树在 1995 年用嫁接苗种植,株行距规格为 3 m × 4 m。在 2012 年 6 月间伐,株行距规格变为 6 m × 4 m,密度为 390 株 hm^{-2} 。2013 年 7 月布置试验时,试验树树冠均完整且大小基本一致。

供试土壤为玄武岩发育的砖红壤。该基地荔枝一直采用开沟施肥及撒施的方式进行施肥。2013 年试验开始前,每小区采集 0~50 cm 土壤样本测试基本性质,结果见表 1。

表 1 试验前各处理土壤理化性质
Table 1 Physiochemical characteristics of soils in all treatments prior to the initiation of the experiment

项目	滴施 NK0.6	滴施 NK0.8	滴施 NK1.0	滴施 NK1.2	滴施 NPK1.0	土施 NPK1.0
pH	4.82 ± 0.34 a	4.90 ± 0.24 a	4.70 ± 0.23 a	4.80 ± 0.42 a	4.68 ± 0.25 a	4.63 ± 0.16 a
有机质 (g kg^{-1})	26.2 ± 0.4 a	27.9 ± 4.7 a	27.9 ± 4.0 a	24.5 ± 5.2 a	27.3 ± 2.2 a	29.8 ± 4.4 a
碱解 N (mg kg^{-1})	104.3 ± 6.3 a	119.4 ± 33.7 a	118.0 ± 18.6 a	116.4 ± 21.1 a	115.3 ± 7.1 a	122.2 ± 19.5 a
有效 P (mg kg^{-1})	210.8 ± 173.1 a	254.8 ± 174.1 a	119.0 ± 66.6 a	207.4 ± 120.3 a	192.2 ± 70.1 a	219.0 ± 110.1 a
速效 K (mg kg^{-1})	181.7 ± 35.6 ab	211.3 ± 69.1 a	156.7 ± 62.0 ab	139.7 ± 19.6 b	195.3 ± 75.1 ab	158.3 ± 25.0 ab
有效 Ca (mg kg^{-1})	966.5 ± 663.3 a	1094.8 ± 329.9 a	607.3 ± 261.9 a	871.8 ± 542.1 a	688.9 ± 230.9 a	934.5 ± 199.9 a
有效 Mg (mg kg^{-1})	147.3 ± 125.2 a	115.8 ± 24.1 a	71.5 ± 14.2 a	114.4 ± 81.8 a	91.3 ± 21.1 a	80.8 ± 18.0 a
有效 Zn (mg kg^{-1})	7.9 ± 2.7 a	16.5 ± 11.6 a	7.3 ± 2.3 a	10.7 ± 9.8 a	10.8 ± 4.6 a	9.8 ± 6.0 a
有效 B (mg kg^{-1})	0.34 ± 0.08 a	0.34 ± 0.03 a	0.36 ± 0.04 a	0.35 ± 0.15 a	0.38 ± 0.01 a	0.41 ± 0.05 a
盐分 (g kg^{-1})	0.63 ± 0.22 ab	0.68 ± 0.24 a	0.45 ± 0.24 bc	0.57 ± 0.05 abc	0.37 ± 0.01 c	0.41 ± 0.01 bc

注:表中每行数据后面字母不相同者表示差异显著 ($P < 0.05$)。

供试肥料均为市售易溶化肥。所用肥料有尿素(含 N 46%),氯化钾(白色粉状,含 K_2O 60%)、硝酸钙(含 N 15%, Ca 18%)、磷酸氢二铵(含 N 18%, P_2O_5 46%)和无水氯化镁(含 Mg 25.26%)。所用硼砂为化学纯试剂(含 B 11.7%)。

1.2 试验设计

共设置 6 个处理,分别为:(1)钾氮肥($\text{K}_2\text{O}/\text{N}$)比例为 0.6 进行滴施,磷肥土施,简写为滴施 NK0.6;(2)钾氮肥比例为 0.8 进行滴施,磷肥土施,简写为滴施 NK0.8;(3)钾氮肥比例为 1.0 进行滴施,磷肥土施,简写为滴施 NK1.0;(4)钾氮肥比例为 1.2 进行滴施,磷肥土施,简写为滴施 NK1.2;(5)钾氮肥比例为 1.0 进行滴施,同时磷肥也滴施,简写为滴施 NPK1.0;(6)钾氮肥比例为 1.0 进行土施,磷肥同时土施,简写为土施 NPK1.0。

试验除施用氮磷钾肥外,还施用钙、镁和硼肥。其中,所有滴施处理的钙、镁和硼肥也均为滴施;土施 NPK1.0 处理的钙、镁和硼肥也均为土施,而且不进行人为灌溉。

2013—2018 年期间,每年施氮量分别为 379、447、447 和 492 g kg^{-1} ,以 $\text{P}_2\text{O}_5/\text{N}$ 为 0.3 的比

例计算每年施磷量,以 $\text{K}_2\text{O}/\text{N}$ 为 0.6、0.8、1.0 和 1.2 的比例计算每年不同处理施钾量,每年 Ca 用量分别为 80、100、100、100 和 110 g kg^{-1} ,Mg 用量为 Ca 用量的一半,硼砂用量分别为 27、5、5、5 和 5.5 g kg^{-1} 。各种养分不同时间分配比例可详见另一文章^[6]。

每个处理 3 次重复,随机区组排列。每个小区包括 3 株树。在试验开始前,为避免滴灌处理小区之间的水肥渗透和根性交叉生长,在每个小区土壤之间埋入长为 3.8 m、宽为 0.5 m 的木夹板作为分隔。共埋设 16 块木夹板。

1.3 滴灌系统

滴灌系统采用防滴漏压力补偿式滴灌管,用以色列泰丰比例注肥器进行滴灌施肥,用高精度水表计量灌溉用水量。将周长为 8 m、有 28 个滴头的滴灌管以圆形铺放在每株荔枝树盘下,以树干为圆心。每个滴灌处理的 3 个小区共用 1 个注肥器,注肥比例为 4%。每次滴灌时将 3 个小区总肥量加入预先装水至固定刻度的施肥桶,待全部肥料完全溶解后进行滴施。每个滴头出水速率为 1.35 L h^{-1} ,每次每株滴水量约为 37.8 L。肥料滴施完毕后,再用等量清水

滴灌一次,以清洗滴灌系统。

1.4 土样采集及测试

2013 年在试验开始前,在距每株树的滴水线内外约 10 cm 处各采集 1 钻 0~50 cm 土样。每株树采集 4 钻土样,3 株树的 12 钻土样合并为该小区的土壤样本。2014 年采果后,在每个小区采集 0~30 cm 和 30~50 cm 两个土层土样,以后均在每年采果后分两层采集土样。采样时,在每株树滴灌管内外约 10 cm 及与其中两个滴头等距之间的位置采集 4 钻土,3 株树的 12 钻土样合并为该小区的土壤样本。土样经剔除杂质,风干、粉碎和过筛后备用。

土壤 pH 用水:土比为 2.5:1 的溶液以电位法测定,土壤盐分用水浸提—质量法测定,土壤 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 用水浸提—原子吸收分光光度法测定,土壤 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 用水浸提—离子色谱法测定,土壤 HCO_3^- 用水浸提—滴定法测定^[17]。

1.5 数据处理

所有数据用 Excel 处理及作图。计算 2015—2018 年每年每个处理两个土层土壤 pH、盐分及盐分离子含量与 2014 年的差值,并用 SAS 9.2 进行单因素方差分析及 Duncan's 多重比较 ($P < 0.05$)。

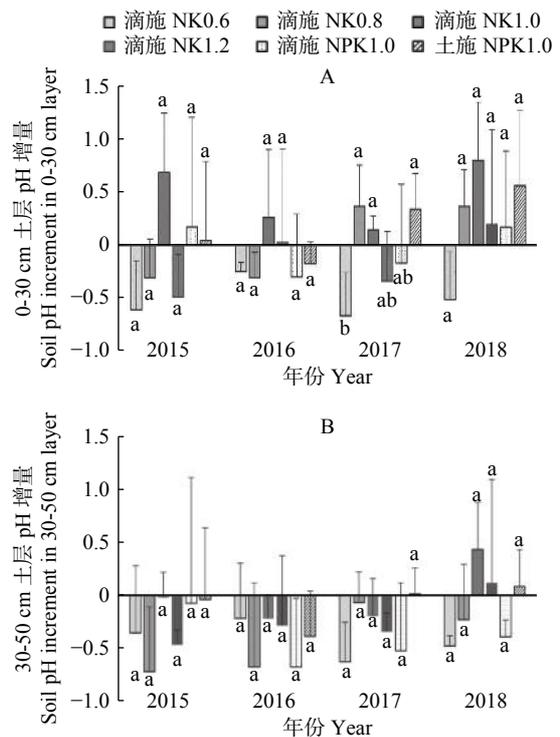
2 结果与分析

从表 1 可知,试验前不同处理小区土壤除速效钾和盐分含量差异达到显著水平外 ($P < 0.05$),其他性质虽存在一定差异,但均未达显著水平。这表明基础土壤性质具有一定的空间变异性。由于本试验在 2014 年采果后才开始分层采样,因此,分别将每个处理的 2015、2016、2017 和 2018 年不同土层土样指标数据与 2014 年的相减,考察不同处理每年土壤 pH、盐分及盐分阴阳离子含量增量的变化。

2.1 土壤 pH 增量变化

每年采果后土壤 pH 增量变化见图 1。如图 1A 所示,与 2014 年 0~30 cm 土层相比,2015—2018 年滴施 NK0.6 处理同层土壤 pH 均降低,下降了 0.25~0.66 个单位;滴施 NK0.8 处理土壤 pH 在 2015 和 2016 年下降,但在 2017 和 2018 年有所提高;滴施 NK1.0 处理土壤 pH 在 4 年间均比 2014 年有不同程度的提高,pH 提高 0.15~0.80 个单位;滴施 NPK1.2 和滴施 NPK1.0 处理土壤 pH 在不同年份则均有所提高或下降;土施 NPK1.0 处理土壤 pH 除在 2016 年有所下降外,其他 3 年均有不同程度提高。

整体来看,2015—2018 年不同处理间土壤 pH 增量的差异均未达显著水平。虽然土壤 pH 增量与钾氮肥滴施比例间也未表现有密切关系,但基本上滴施 NK0.6 处理降低土壤 pH 而滴施 NK1.0 处理提高土壤 pH。氮磷钾肥施用方式(滴施 NK1.0、滴施 NPK1.0 与土施 NPK1.0 处理)对土壤 pH 的影响差异不大。



注:图中每年直方标注的字母不相同者表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 不同施肥处理 2015—2018 年两个土层(A 为 0~30 cm, B 为 30~50 cm)土壤 pH 比 2014 年的增量变化

Fig.1 Variations of soil pH increments in two soil layers (A: 0~30 cm and B: 30~50 cm) with different treatments during 2015—2018 compared to 2014

与 2014 年 30~50 cm 土层相比,2015、2016 和 2017 年几乎所有处理土壤 pH 均有不同程度降低,下降范围为 0.72~0.02 个单位,其中以滴施 NK1.0 处理的降幅最小(图 1B)。但是,在 2018 年试验结束时,滴施 NK1.0、滴施 NK1.2 和土施 NPK1.0 处理两个土层 pH 比 2014 年均有所提高,其他 3 个处理的 pH 仍比 2014 年时有所下降。与 0~30 cm 土层类似,30~50 cm 土层同一年份不同处理间土壤 pH 增量差异也均未达到显著水平。整体来看,滴施钾氮肥比例及施肥方式对 30~50 cm 土层 pH 的影响差异并不大。如将两个土层进行比较,则 30~50 cm 土层 pH 的下降更为明显和强烈。

2.2 土壤盐分含量增量变化

不同处理土壤盐分含量增量变化(图 2A 和 2B)

表明,与 2014 年相比,所有处理 0~30 cm 土层在 2015~2017 年均出现盐分累积,但这些累积的盐分在 2018 年几乎全部被淋洗出该土层。对于 30~50 cm 土层,所有处理在 2015 和 2016 年也均出现盐分的累积。但是,在 2017 年除滴施 NK1.0、滴施 NPK1.0 和土施 NPK1.0 处理的盐分含量仍略有累积外,其他 3 个处理在前两年累积的盐分全部被淋洗出该土层。在 2018 年,则所有处理累积的盐分均全部被淋洗,盐分含量均稍低于 2014 年的。这说明施肥后,盐分不但累积在表层,而且有相当部分淋洗到下层土壤暂时累积。整体来看,2015 和 2017 年两个土层及 2018 年 30~50 cm 土层不同处理间的盐分累积存在显著差异,而其他年份其他处理间的差异均未达显著水平。而且,2015 年两个土层土壤盐分累积随钾氮肥滴施比例的提高出现先增加后下降的趋势,而两个土层盐分的淋失则表现为随钾氮肥滴施比例的提高而降低的趋势。换言之,滴施氮肥比例越高,则盐分淋洗程度越大。如将滴施 NK1.0、滴施 NPK1.0 与土施 NPK1.0 处理进行比较,除 2015 年均为土施 NPK1.0 比其他两个处理促进两个土层盐分的相对累

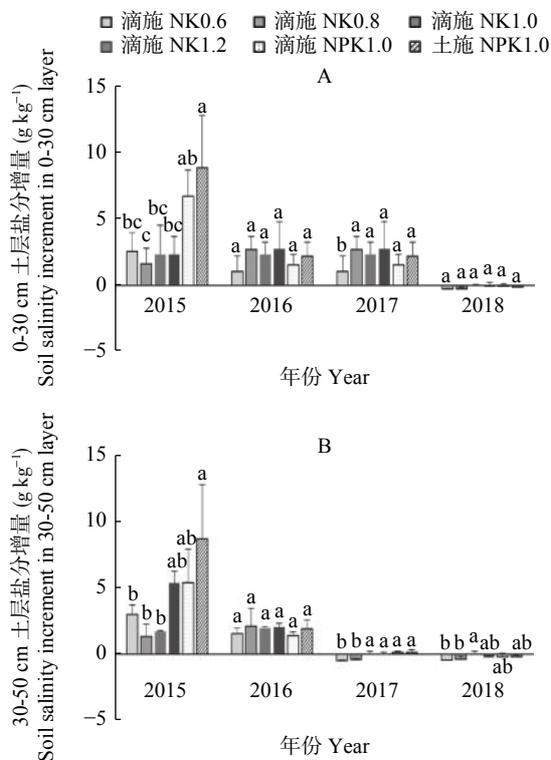
积外,其他年份 3 个处理间差异未表现出明显规律。

2.3 土壤盐分离子含量增量变化

2.3.1 盐分阳离子 与 2014 年 0~30 cm 土层相比,2015—2018 年除土施 NPK1.0 处理 K^+ 含量有提高外,其他处理均以降低为主(图 3A)。与 2014 年 30~50 cm 土层相比,不同年份的不同处理 K^+ 含量或提高或降低,但土施 NPK1.0 处理均高于 2014 年的,而且以 2018 年的提高最明显(图 3B)。这表明试验期间 K^+ 从表层淋洗到下层,并暂时累积。两个土层的 K^+ 含量增量与钾氮肥滴施比例之间缺乏密切关系。将氮磷钾肥不同施用方式进行比较,则土施 NPK1.0 处理比两个滴施处理有利于 K^+ 的保存,滴施 NK1.0 处理 K^+ 含量降低最为明显,滴施 NPK1.0 处理则处于两者之间。

与 2014 年相比,0~30 cm 土层 2015 年除滴施 NK0.6 和滴施 NK1.2 处理外,其他处理土壤 Ca^{2+} 含量均有所提高(图 3C)。但随着施肥年限延长,越来越多处理的 Ca^{2+} 含量下降,至 2018 年全部处理 Ca^{2+} 含量明显降低。对于 30~50 cm 土层,除 2015 年部分处理出现 Ca^{2+} 的累积外,其他年份几乎所有处理的 Ca^{2+} 含量均明显降低(图 3D)。这说明施肥后 0~30 cm 土层的 Ca^{2+} 逐渐被淋洗到 30~50 cm 土层,而 30~50 cm 土层的 Ca^{2+} 则继续向下淋失。虽然两个土层部分年份不同处理间的 Ca^{2+} 含量增量存在显著差异,但这些差异与钾氮肥滴施比例缺乏密切关系。从整体来看,2015—2018 年期间两个土层以滴施 NK0.6 处理 Ca^{2+} 含量下降最大,而且降幅随时间延长而提高,意味着偏施氮肥会促进 Ca^{2+} 的淋失。这种现象是由于滴施 NK0.6 处理施钾量最低,尿素降解形成的 NH_4^+ 占阳离子的饱和度相对最高, NH_4^+ 将土壤颗粒吸附的 Ca^{2+} 交换出来并脱去^[18-19],而降低其在土壤溶液的含量。另外,土施 NPK1.0 处理相对比滴施 NPK1.0 处理有利于减少 Ca^{2+} 的淋失。

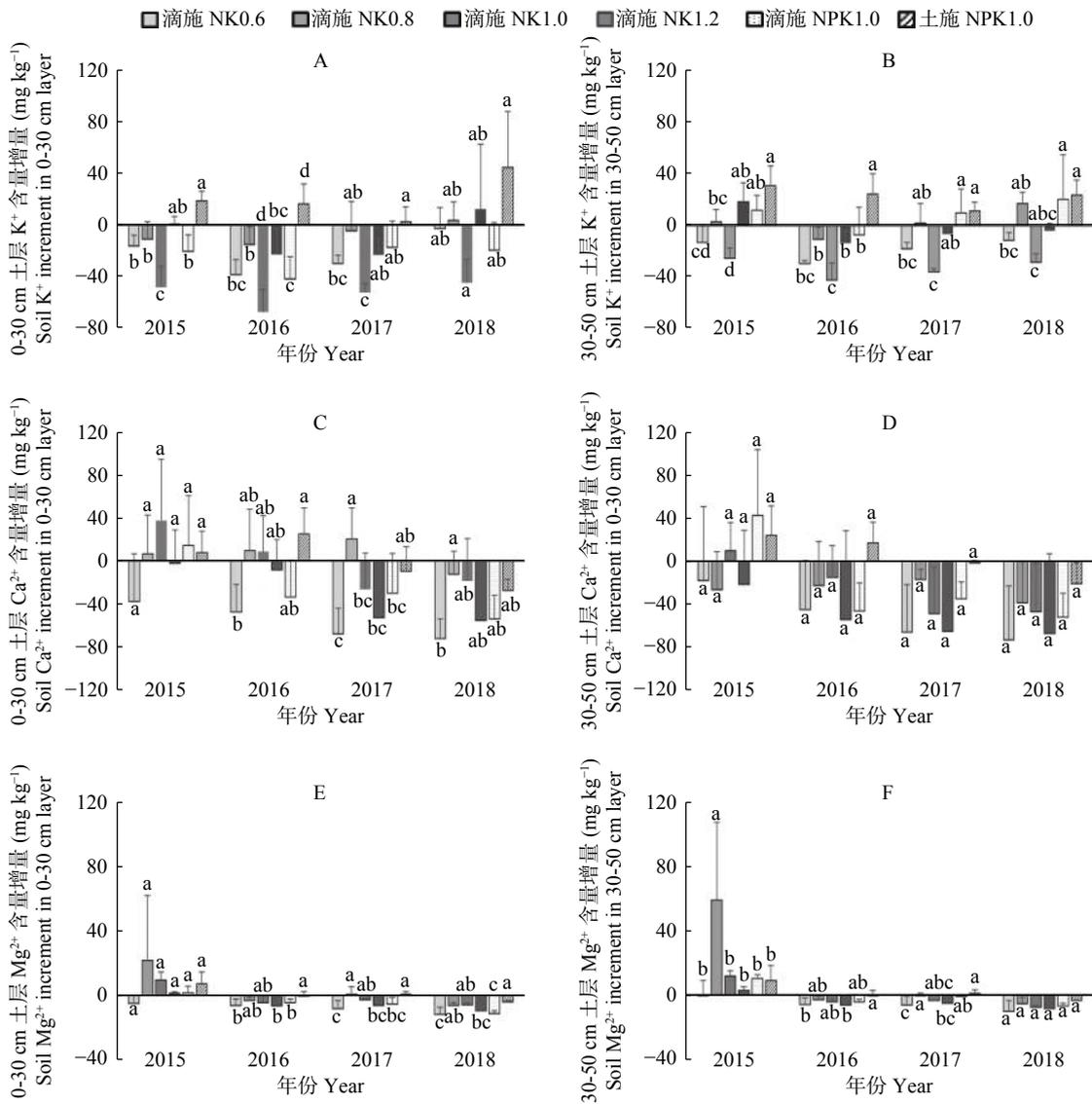
对于 Mg^{2+} 含量,2015 年两个土层均除滴施 NK0.6 处理比 2014 年降低外,其他处理均有不同程度提高,而 2016~2018 年则所有处理均出现下降(图 3E 和 3F)。而且,虽然不同年份处理间 Mg^{2+} 含量增量存在显著差异,但差异并未随滴施钾氮肥比例提高而有规律变化。同时,两个土层 Mg^{2+} 含量增幅基本为土施 NPK1.0 处理大于滴施 NPK1.0 处理,而滴施 NK1.0 与滴施 NPK1.0 处理则差别不大,说明土施肥料也有利于 Mg^{2+} 在土壤的存留。



注:图中每年直方标注的字母不相同者表示差异显著($P < 0.05$)。

图 2 不同施肥处理 2015—2018 年两个土层土壤盐分含量(A 为 0~30 cm, B 为 30~50 cm)比 2014 年的增量变化

Fig. 2 Variations of the increments of soil salinity in two soil layers (A: 0~30 cm and B: 30~50 cm) with different treatments during 2015—2018 compared to 2014



注:图中每年直方标注的字母不相同者表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同施肥处理 2015~2018 年两个土层土壤盐分阳离子(A 和 B 为 0~30 cm 和 30~50 cm 的 K^+ , C 和 D 为 Ca^{2+} , E 和 F 为 Mg^{2+})比 2014 年的含量增量变化

Fig.3 Variations of the concentration increments of soil base cations in two layers (A and B for K^+ , C and D for Ca^{2+} and E and F for Mg^{2+} in 0~30 cm and 30~50 cm, respectively) with different treatments during 2015~2018 compared to 2014

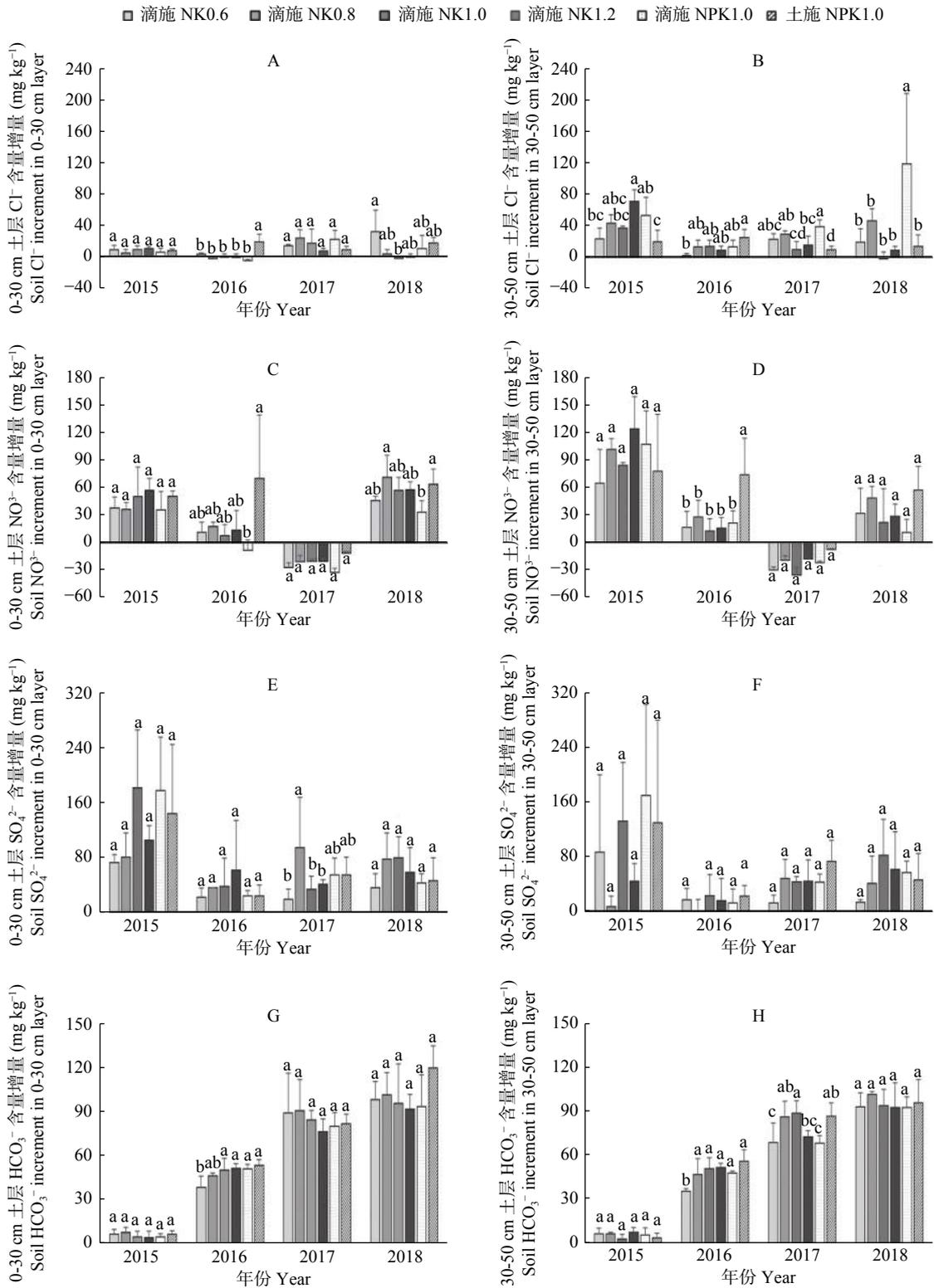
如对 3 种盐分阳离子两个土层的含量增量情况进行比较, 则 K^+ 在 0~30 cm 土层的淋失大于 30~50 cm 土层的, Ca^{2+} 在 30~50 cm 土层的淋失更大, Mg^{2+} 的淋失在两个土层相当, 反映 3 种阳离子向下淋失的能力为 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ 。这与前人认为 Ca^{2+} 在土壤的吸附能力低于 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 H^+ 的研究结果大致相同^[20]。

2.3.2 盐分阴离子 试验期间两个土层盐分阴离子含量增量变化见图 4。与 2014 年相比, 除 2016 年 0~30 cm 土层大部分处理及 2018 年两个土层滴施 NK1.0 处理土壤 Cl^- 含量有所下降外, 2015—2018 年期间其他处理两个土层均出现 Cl^- 的累积 (图 4A 和

4B)。整体而言, 不同年份不同处理间 Cl^- 含量增量差异缺乏规律性。

与 2014 年相比, 除 2017 年两个土层 NO_3^- 含量降低外, 其他年份几乎所有处理两个土层均出现 NO_3^- 的累积 (图 4C 和 4D)。然而, 每年不同处理 NO_3^- 含量增量变化均与滴施钾氮肥比例及施肥方式关系不大。

所有施肥处理两个土层 SO_4^{2-} 在 2015 年就出现了明显累积, 但在 2016 年累积量明显减少, 而在 2017 和 2018 年累积量又稍有提高 (图 4E 和 4F)。与 NO_3^- 类似, 不同年份不同处理 SO_4^{2-} 含量增量变化也缺乏明显一致的规律。



注:图中每年直方标注的字母不相同者表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同施肥处理 2015 ~ 2018 年两个土层土壤盐分阴离子(A 和 B 为 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 的 Cl⁻, C 和 D 为 NO₃⁻, E 和 F 为 SO₄²⁻, G 和 H 为 HCO₃⁻) 比 2014 年的含量增量变化

Fig.4 Variations of the concentration increments of soil base anions in two soil layers (A and B for Cl⁻, C and D for NO₃⁻, E and F for SO₄²⁻ and G and H for HCO₃⁻ in 0 ~ 30 cm and 30 ~ 50 cm, respectively) with different treatments during 2015 ~ 2018 compared to 2014

0~30 和 30~50 cm 两个土层在 2015 年就出现了 HCO_3^- 的少量累积, 而且累积量随施肥时间延长而明显提高 (图 4G 和 4H), 说明 HCO_3^- 不易于被淋洗。但是, 每年处理间 HCO_3^- 的累积差异仍然缺乏规律性。

试验结束时对 4 种阴离子的含量增量进行比较, 总体上每年 Cl^- 在 30~50 cm 土层的累积均大于 0~30 cm 土层的, 不同年份两个土层 NO_3^- 的累积则各有高低且在 2017 年两个土层均出现淋失, 每年 30~50 cm 土层的 SO_4^{2-} 累积则稍低于 0~30 cm 土层的, 而每年两个土层 HCO_3^- 的累积则十分接近。因此, Cl^- 和 NO_3^- 均容易向下淋洗, 而且 NO_3^- 可被继续淋洗至更深的土层。 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 被淋洗的程度相对较弱, SO_4^{2-} 更多累积在 0~30 cm 土层, HCO_3^- 在两个土层的累积相当且持续增加。

3 讨论

3.1 不同年份土壤 pH 和盐分含量增量变化差异

根据本试验结果, 土壤 pH、盐分及盐分离子含量增量变化在不同年份间存在较大差异。除 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 在两个土层含量分别随时间延长不断降低或累

积外, 土壤 pH、盐分及其他盐分离子含量增量的变化并未表现出类似规律。这表明在滴灌施肥条件下, 钾氮肥施用比例对土壤 pH 及盐分的影响可能与不同年份的气候条件有关。

从本试验荔枝 5 个完整生长周期气象数据 (由海南省海口市气象局提供) 来看 (表 2), 试验点周边气象观测站 2013—2014 年生长周期的最大日降雨量最低, 仅为 110.4 mm, 约为其他 4 个生长周期的一半左右; 最大月降雨量则 2014—2015 年、2016—2017 年和 2017—2018 年的相当, 均明显高于 2013—2014 年及 2015—2016 年的; 年降雨量以 2017—2018 年的最高, 2013—2014 年和 2016—2017 年次之, 2015—2016 年最低。这表明, 2013—2014 年降雨较为均匀, 雨强较小, 2015—2016 年最为干旱, 且雨强也较小; 2017—2018 年的某月降雨集中、雨强大且年降雨量最大, 对土壤的淋洗相对最为强烈和持久。荔枝不同生长周期期间的降雨情况, 在一定程度上解释了与 2014—2015 年相比, 2015—2016 年和 2016—2017 年土壤盐分累积变化不大, 但 2018 年 6 月试验结束时土壤盐分含量明显降低及易被淋洗的 Ca^{2+} 在不同年份含量增量变化的规律。

表 2 2013~2018 年期间试验点部分气象数据
Table 2 Selective climate data in the experiment spot during 2013~2018

年份 Year	最大日降雨量 (mm) Maximum daily rainfall	最大月降雨量 (mm) Maximum monthly rainfall	年降雨量 (mm) Annual rainfall
2013年7月—2014年6月	110.4	459.9	1943.2
2014年7月—2015年6月	215.5	600.0	1747.1
2015年7月—2016年6月	192.1	395.9	1496.2
2016年7月—2017年6月	244.8	607.6	1888.4
2017年7月—2018年6月	236.9	610.9	2289.6

3.2 钾氮肥滴施比例及施肥方式对土壤 pH 和盐分累积的影响

整体而言, 本试验除 2015 年两个土层土壤盐分含量增量随钾氮肥滴施比例的提高出现先增加后下降的规律外, 钾氮肥滴施比例对土壤 pH、盐分及盐分离子含量变化关系并不密切。这大概与多方面因素有关。首先, 土壤具有天然的空间变异。试验前, 该试验点为开沟或穴施肥, 在一定程度上也加剧了土壤性质的不均匀性。如表 1 所示, 不同处理基础土壤速效 K 和盐分含量差异已达显著水平。其次, 荔枝为多年生作物, 根系空间分布不均匀, 根系养分吸收也会加剧土壤养分的空间差异。同时, 试验期间荔枝地上部生长和果实收获养分带走量存在年

份间和处理间的差异^[16], 这也是导致试验期间土壤性质不均匀变化的重要因素。另外, 试验点地处热带季风气候区, 年降雨量大, 且试验期间经历了“威马逊”和“海鸥”等强台风, 多次强降雨的淋洗, 也可能在一定程度上将钾氮肥不同滴施比例与土壤 pH 和盐分含量之间的量化关系掩盖。

滴灌施肥造成的土壤酸化及次生盐渍化问题受到广泛关注^[11-12]。柑橘上连续 4 年的田间试验表明, 滴灌施肥可提高肥料利用率, 比灌溉 + 撒施肥料及撒施肥料显著提高柑橘产量, 但是, 会造成土壤酸化和 NH_4^+ 的累积^[21]。值得注意的是, 本研究所有处理两个土层土壤 HCO_3^- 含量增量均逐年增加, 这大概与以下因素有关。通常认为, 施用硝态氮时, 植

物根系分泌 OH^- 或 HCO_3^- 以平衡组织酸碱度^[22]。本研究所用氮源有尿素和硝酸钙, 可为根系提供硝态氮。其次, 荔枝为喜硝作物^[23], 可能根系会分泌相对较多的 HCO_3^- 而累积在土壤。另外, 土壤碳酸氢盐溶解度低而迁移能力差, 随时间延长有利于 HCO_3^- 的累积。

本研究对氮磷钾等肥料不同施用方式进行比较, 则土施 NPK1.0 处理比滴施 NPK1.0 处理相对提高土壤 pH、盐分和 3 种盐分阳离子含量, 两者对盐分 4 种阴离子含量变化则影响不大。滴施 NK1.0 处理对土壤性质的影响往往处于两者之间。在本试验条件下, 与土施肥料相比, 虽然滴灌施肥不利于土壤盐分阳离子的保存, 但以合理比例滴施氮钾肥, 在试验结束时土壤不但未出现酸化, pH 反而有所提高。

3.3 滴灌施肥中氮肥形态对土壤 pH 的影响

滴灌果园出现土壤酸化的一个重要原因是使用了铵态氮肥和/或尿素^[24-26]。一方面由于植物吸收铵态氮释放出 H^+ 而酸化土壤^[27], 另一方面, 铵态氮在土壤中经硝化过程也释放出 H^+ ^[28]。室内模拟滴灌试验显示, 酸化土壤能力为硝酸铵 = 硝酸脲铵 > 硝酸铵钙 > 硝酸钙^[29]。巴西研究人员以连续 8 年的柑橘滴灌试验比较硝酸铵和硝酸钙的滴施效果, 发现施用硝酸铵的产量及氮素利用率均低于硝酸钙的, 主要是由于滴施硝酸铵使土壤酸化严重, 同时硝化作用受到抑制, 土壤溶液 NH_4^+ 浓度高而抑制柑橘对阳离子、尤其是 Ca^{2+} 的吸收。因此, 以硝酸钙作为氮源, 可保持土壤离子平衡, 保持较高的土壤 pH 及降低 NH_4^+ 有效性, 是滴灌施肥良好的氮源^[30]。本试验结果表明, 以尿素、硝酸钙和磷酸二铵作为共同氮源, 并合理配施适量钾肥和其他肥料, 即使在热带降雨丰沛的地区连续滴施 5 年, 不但具有提高荔枝产量和果实品质等作用^[16], 而且不会降低土壤 pH, pH 在试验结束时反而稍有提高, 并未出现滴灌施肥中常见的土壤酸化和次生盐渍化问题。

另有研究指出, 如以硝酸铵作为滴灌氮源, 同时加入适量硅酸, 可有效减轻土壤酸化^[31]。在温室即使以鸡粪及尿素作为氮源进行滴灌施肥, 只要施氮量合理, 既可保证蔬菜产量, 也可减少土壤盐分累积及氮素盈余^[32]。一定用量范围内, 土壤 pH 随滴灌硝酸钙用量的增加而提高^[30]。因此, 如果将尿素、硝酸铵与硝酸钙等氮肥以一定比例混合作为滴灌施肥的氮源, 应可避免土壤酸化问题。但是, 对于不同的作物, 不同形态氮肥的混合比例需要进行研究来

确定。

4 结论

连续 5 年以不同比例 ($\text{K}_2\text{O}/\text{N}$ 0.6 ~ 1.2) 滴施钾氮肥, 土壤 pH 和盐分及盐分离子含量变化与钾氮肥比例之间缺乏密切关系, 但整体上试验期间施氮肥相对偏多的滴施 NK0.6 处理由于促进 Ca^{2+} 的淋失而降低土壤 pH, 而合理配施钾氮肥的滴施 NK1.0 处理则稍提高土壤 pH, 也未对土壤盐分含量及盐分离子组成有明显影响。氮磷钾等肥土施比滴施处理有利于土壤盐分阳离子的保存, 对盐分阴离子的影响则不大, 从而提高土壤 pH。在荔枝滴灌施肥中, 建议将不同氮源合理搭配, 并将钾氮肥以 1 : 1 的比例滴施且将磷肥土施, 可避免土壤酸化及次生盐渍化。

参考文献:

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会, 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [2] 李国良, 姚丽贤, 张政勤, 等. 广东荔枝园土壤养分肥力时空变化研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1081 - 1086.
- [3] 李国良, 张政勤, 姚丽贤, 等. 广西壮族自治区与福建省荔枝园土壤养分肥力现状研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 867 - 871.
- [4] 姚丽贤. 我国荔枝养分管理技术应用与需求调研报告[J]. 荔枝科技通讯, 2009, (3): 41 - 54.
- [5] 杨志维, 方向东, 董金和, 等. 西班牙及意大利南部柑橘考察报告[J]. 中国南方果树, 2003, 32(4): 21 - 24.
- [6] Syvertsen J P, Smith M L. Nitrogen leaching, N uptake efficiency and water use from citrus trees fertilized at three N rates[J]. Proceedings of Florida State Horticultural Society, 1995, 108: 151 - 155.
- [7] Weinert T L, Thomspson T L, White S A. Nitrogen fertigation of young navel oranges: Growth, N status and uptake of fertilizer N[J]. HortScience, 2002, 37: 334 - 337.
- [8] Villers E A, Joubert P H. The cultivation of litchi[M]. The 2nd edition ed.; ARC-Institute for Tropical and Subtropical Crops: 2010.
- [9] Rowlings D W, Grace P R, Scheera C, et al. Influence of nitrogen fertiliser application and timing on greenhouse gas emissions from a lychee (*Litchi chinensis*) orchard in humid subtropical Australia[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013, 179: 168 - 178.
- [10] Stork P R, Jerie P H, Callinan A P L. Subsurface drip irrigation in raised bed tomato production. II. Soil acidification under current commercial practice[J]. Australian Journal of Soil Research, 2003, 41(7): 1305 - 1315.
- [11] Darwish T, Atallah T E, Moujabber M, et al. Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro - climatic

- zones in Lebanon[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1): 152 – 164.
- [12] 李 刚, 张乃明, 毛昆明, 等. 大棚土壤盐分累积特征与调控措施研究[J]. *农业工程学报*, 2004, (3): 44 – 47.
- [13] 张承林, 谢永红, 李 柯, 等. 荔枝滴灌施肥技术应用效果初报[J]. *广东农业科学*, 2002, (2): 31 – 33.
- [14] Yang B M, Li G L, Yang S H, et al. Effect of application ratio of potassium over nitrogen on litchi fruit yield, quality, and storability[J]. *HortScience*, 2015, 50(6): 916 – 920.
- [15] Yang B M, Yao L X, Li G L, et al. Dynamic changes of nutrition in litchi foliar and effects of potassium - nitrogen fertilization ratio[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 15(1): 98 – 110.
- [16] 白翠华, 周昌敏, 王祥和, 等. 荔枝滴施钾氮肥适宜比例及不同方式施肥效果的比较[J]. *中国土壤与肥料*, 2021
- [17] 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.
- [18] 徐 海, 王益权, 王 浩, 等. 氮肥施用对石灰性土壤交换性钙含量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(5): 174 – 177, 218.
- [19] 吴 刚, 李金英, 曾晓舵. 土壤钙的生物有效性及与其它元素的相互作用[J]. *土壤与环境*, 2002, (3): 319 – 322.
- [20] 张 芸, 吕宪国, 杨 青. 三江平原典型湿地水化学性质研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 184 – 187.
- [21] Quaggio J A, Souza T R, Zambrosi F C B, et al. Citrus fruit yield response to nitrogen and potassium fertilization depends on nutrient-water management system[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 329 – 333.
- [22] Rollwagen B A, Zasoski R J. Nitrogen source effects on rhizosphere pH and nutrient accumulation by Pacific Northwest conifers[J]. *Plant and Soil*, 1988, 105: 792 – 861.
- [23] 朱陆伟, 周昌敏, 白翠华, 等. 荔枝在不同温度和氮素形态下的氮、磷吸收动力学特征. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(5): 869 - 878.
- [24] Wóhcik P. Ecological impact of nitrogen fertilization[J]. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 2001, 9: 117 – 120.
- [25] Parchomchurk P, Neilsen G H, Hogue E J. Effects of drip fertigation of $\text{NH}_4\text{-N}$ and P on soil pH and cation leaching[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1993, 73(2): 157 – 164.
- [26] Wóhcik P. Response of ‘Red Delicious’ apple trees to different liming strategies after drip fertigation with ammonium nitrate[J]. *Journal of Elementology*, 2018, 23(3): 913 – 925.
- [27] Yang X D, Ni K, Shi Y Z, et al. Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252(15): 74 – 82.
- [28] Bending G D, Turner M K I G, Burns I G. Fate of nitrogen from crop residues as affected by biochemical quality and the microbial biomass[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30: 2055 – 2065.
- [29] Peryea F J, Burrows R L. Soil acidification caused by four commercial nitrogen fertilizer solutions and subsequent soil pH rebound[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30(3-4): 525 – 533.
- [30] Quaggio J A, Souza T R, Zambrosi F C B, et al. Nitrogen - fertilizer forms affect the nitrogen - use efficiency in fertigated citrus groves[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(3): 404 – 411.
- [31] Wóhcik P. Response of ‘Red Delicious’ apple trees drip - fertigated with ammonium nitrate to application of silicic acid[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 15 – 21.
- [32] 王丽英, 武雪萍, 张彦才, 等. 适宜施氮量保证滴灌日光温室黄瓜番茄产量降低土壤盐分及氮残留[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 91 – 98.

Soil pH and Salinity as Affected by Fertilizer Ratio of Potassium and Nitrogen in Drip Fertigation and Fertilization Method in Litchi

BAI Cui-hua¹, ZHOU Chang-min¹, WANG Xiang-he², LUO Dong-lin¹, ZHU Lu-wei¹, YAO Li-xian^{1*}

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Institute of Tropical Fruit Trees, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, China)

Abstract: Soil acidification and secondary salinization caused by fertigation are important limiting factors for soil sustainable utilization in crop production. A successive 5-year drip fertigation in litchi grown in a latosol at Chengmai county, Hainan Province during 2013—2018 was conducted to investigate the effects of different fertilizer ratios of K and N in drip fertigation (i.e. $K_2O/N = 0.6, 0.8, 1.0$ and 1.2 , respectively) under the conventional P fertilization on soil pH and salinity in both layers of 0-30 cm and 30-50 cm, and these also as affected by different fertilization methods (i.e. the conventional P fertilization with K and N in drip fertigation, all fertilizers (N, K, Ca, Mg and B) in drip fertigation and all fertilizers in conventional fertilization) at the same ratio of $K_2O/N = 1.0$. The results showed that there was no close relation between the variations of soil pH, soil salinity and salty ions and the ratios of K_2O/N . However, at the end of the experiment, soil pH was reduced in the treatment of excessive N with the ratio of $K_2O/N = 0.6$ by promoting Ca^{2+} leaching in both soil layers. Meanwhile, drip fertigation of K and N fertilizers at the ratio of $K_2O/N = 1.0$ slightly increased soil pH, but by which there was no significant impact on soil salinity and salty ions. In contrast to the drip fertigation of all fertilizers, the conventional fertilization of them were beneficial to maintain soil pH due to preserve the salty cations within soil layers. Conclusively, drip fertigation of K and N fertilizers at $K_2O/N = 1.0$ in combination with the conventional P fertilization was recommended for the long-term litchi production to avoid soil acidification and secondary salinization even in the production areas with plentiful rainfall.

Key words: Litchi; Fertigation; K_2O/N ratio; Soil acidification; Soil secondary salinization

[责任编辑: 张玉玲]