

海南荔枝养分投入限量标准及减量潜力分析

吴小巧^{1,2,3}, 朱 镕^{1,2}, 钟于秀^{1,2}, 王鸿霖^{1,2}, 李伟芳^{1,2}, 洪秀杨^{1,2}, 李 菊^{1,2},
阮云泽^{1,2}, 李婷玉^{1,2*}

1. 海南大学三亚南繁研究院, 海南三亚 572000; 2. 海南大学热带作物学院, 海南海口 570228; 3. 唐河县中等职业学校, 河南南阳 473400

摘 要: 海南是我国荔枝最南端的生产区, 但生产中养分过量投入和土壤退化的问题较为严重, 缺乏合理的养分投入标准。本研究根据作物产量水平及当下优化管理获得氮素盈余关键阈值, 解析不同类型农户养分管理水平的差异以及对土壤肥力的影响。通过对海南主产区荔枝产量、养分管理和土壤肥力现状进行剖析, 基于养分平衡原理, 通过定量作物养分需求规律及优化条件下的合理氮素盈余水平, 明确荔枝养分用量上限, 提出海南荔枝氮、磷、钾养分投入减量目标, 对不同经营规模的农户养分收支平衡和土壤肥力差异开展评价。结果表明: (1) 不同产量水平下荔枝氮、磷、钾用量上限分别为 200、100、260 kg/hm² (产量 < 10 t/hm²); 273、136、355 kg/hm² (产量为 10~20 t/hm²); 439、220、571 kg/hm² (产量为 20~42 t/hm²)。农户施肥过量投入现象较为突出, 且随着经营规模的增加, 养分过量投入加剧。小农户、中等经营主体、规模化经营主体氮素投入分别高于氮肥投入上限的 60%、97%、131%; 磷素投入量分别高于磷肥投入上限的 204%、236%、258%; 钾素投入量分别高于钾肥投入上限的 70%、101%、119%。同时海南荔枝氮、磷、钾养分投入均显著高于全国荔枝施肥平均水平的 70.8%、189.9%、123.4%。(2) 海南荔枝园氮、磷、钾养分盈余分别为 365、377、542 kg/hm², 养分利用效率 (NUE) 分别为 34%、21%、27%, 大量磷素在土壤中固定或损失。不同类型农户养分管理存在较大差异, 只有 1.2% 的小农户处于高氮产出和低氮盈余区间, 而中高经营主体均处于高氮素盈余水平区间。(3) 荔枝果园土壤磷素过量积累和土壤酸化问题突出, 46% 的果园土壤全磷含量超过 0.96 g/kg, 处于较丰富水平。94% 的果园为酸性土 (pH 4.5~5.5), 77% 的果园土壤质量指数 (IFI) 综合评级较低。针对目前海南荔枝养分投入不合理及土壤退化问题, 应尽快采取和推广肥料定额制度, 同时提高有机肥和化肥利用效率, 推动荔枝产业的绿色发展。

关键词: 荔枝; 养分投入; 养分平衡; 化肥减量

中图分类号: S667.1 文献标识码: A

Analysis of Nutrient Input Limit Standards and Reduction Potential of Litchi in Hainan

WU Xiaoqiao^{1,2,3}, ZHU Rong^{1,2}, ZHONG Yuxiu^{1,2}, WANG Honglin^{1,2}, LI Weifang^{1,2}, HONG Xiuyang^{1,2},
LI Ju^{1,2}, RUAN Yunze^{1,2}, LI Tingyu^{1,2*}

1. Sanya Institute of Breeding and Multiplication, Hainan University, Sanya, Hainan 572000, China; 2. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 3. Tanghe County Secondary Vocational School, Nanyang, Henan 473400, China

Abstract: Hainan is the southernmost litchi production area in China, but the problems of excessive nutrient input and soil degradation are serious, and the reasonable nutrient input standard is lacking. The study analyzed the current situation of litchi yield, nutrient management and soil fertility in the main producing areas of Hainan, based on the principle

收稿日期 2022-11-02; 修回日期 2022-12-20

基金项目 海南省院士创新平台科研专项 (No. YSPTZX202019); 海南省重大科技计划项目 (No. ZDKJ2021008); 海南省院士工作站 (No. SQ2019ysgzz0037)。

作者简介 吴小巧 (1997—), 女, 硕士, 研究方向: 资源利用与植物保护, 作物养分管理与施肥技术。*通信作者 (Corresponding author): 李婷玉 (LI Tingyu), E-mail: lity@hainanu.edu.cn。

of nutrient balance, by quantifying the crop nutrient demand law and the reasonable nitrogen surplus level under the conditions, specifying the upper limit of litchi nutrient usage, proposing the reduction target of nitrogen, phosphorus and potassium nutrient inputs for litchi in Hainan, and analyzing the differences in nutrient management levels of different types of farmers and the impact on soil fertility. The upper limit of nitrogen, phosphorus and potassium dosage of litchi at different yield levels in Qionghong region was 200 kg/hm², 100 kg/hm², and 260 kg/hm² (<10 t/hm²), 273 kg/hm², 136 kg/hm², 355 kg/hm² (10–20 t/hm²), 439 kg/hm², 220 kg/hm², 571 kg/hm² (20–42 t/hm²), respectively. The phenomenon of excessive fertilizer input of farmers was prominent, and the excess nutrient input was aggravated with the increase of management scale. 60%, 97% and 131% of small farmers, medium operators and large-scale operators were higher than the upper limit of nitrogen fertilizer input. Phosphorus input was 204%, 236%, 258% higher than the upper limit of input; potassium content was 70%, 101% and 119% higher than the upper limit. The fertilization intensity was also significantly higher than the national NPK fertilization level of 70.8%, 189.9%, 123.4%. The surplus of nitrogen, phosphorus and potassium in Hainan litchi orchard was 365 kg/hm², 377 kg/hm² and 542 kg/hm², respectively, and the nutrient use efficiency (NUE) was 34%, 21% and 27%, respectively. A lot of phosphorus was fixed and lost in the soil. There were significant differences in the nutrient management among different types of farmers. Only 1.2% of small farmers were in the range of high N output and low N surplus, while the middle and high operators were all in the range of high N surplus. Soil phosphorus accumulation and soil acidification were prominent problems in the litchi orchards, and 46% of the orchards had soil phosphorus content over 0.96 g/kg, which was at a relatively rich level. 94% of the orchards were acidic soil (pH 4.5–5.5), and 77% of the orchards had low soil quality index (IFI) comprehensive rating. For the current Hainan litchi nutrient inputs unreasonable and soil degradation, the quota system should be adopted and promoted as soon as possible, and the use efficiency of organic and chemical fertilizer should be greatly improved, so as to realize the sustainable development of litchi fruit industry.

Keywords: litchi; nutrient input; nutrient balance; fertilizer decrement

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.02.010

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 果实色泽鲜艳、肉质细嫩多汁, 素有“岭南果王”之美称。我国是荔枝的原产国, 截至 2017 年, 荔枝种植面积和产量均占世界的 65% 以上^[1], 主要分布于广东、广西、海南等省 (区)^[2], 对当地农村经济发展及农民增收具有重要作用。海南是我国荔枝最南端的生产区, 得天独厚的地理和气候优势使其成为我国上市时间最早的荔枝产区, 具有十分重要的产业地位。目前, 海南荔枝产业发展已趋于稳定, 种植规模位于热带果树第二位, 仅次于芒果, 是海南发展“三高”农业和振兴山区经济的主要支柱产业之一。

近年来, 由于市场经济的驱动和管理水平的停滞, 果农盲目追求早产高产, 忽视肥料的科学施用, 导致荔枝园普遍存在土壤板结、营养失衡、肥料利用率下降及酸碱度失衡等一系列问题^[3-4], 限制了荔枝产业的可持续发展。目前, 农业生产中施肥引起的环境问题受到越来越多的关注, 但绝大部分的研究对象多为大田作物, 对果树养分管理和土壤肥力现状仍然缺乏定量分析。虽然荔枝在我国种植历史悠久, 但由于多年生木本果树养分需求特点的研究难度较大, 国内荔枝施肥技术研究也相对较少, 导致目前果树的养分管理进展滞后。国外报道曾指出, 虽然荔枝对土壤的敏

感度低于气候^[5], 但中国荔枝产量很低, 而且中国的土壤类型及荔枝施肥技术往往令人不解^[6]。这从侧面反映我国荔枝园施肥和土壤管理技术的不足可能是低产的主要原因。鉴于此, 本研究选取海南荔枝产业较发达的琼山区荔枝园为研究对象, 对不同类型经营主体施肥现状及土壤肥力开展调查分析, 解析不同类型经营主体的管理水平差异及其对土壤肥力的影响, 为当地及全国的荔枝科学施肥提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 调研及采样地点

本研究调研和土壤样品采集地点位于海南省海口市琼山区, 该区荔枝种植面积为 5580 hm², 占全省荔枝种植面积的 1/4, 是琼北连片种植面积最大的荔枝生产基地 (图 1)。该区经纬度 (110°34'12"N, 19°42'0"E), 年均气温为 24~29 °C, 年均降雨量为 1724.5 mm。

1.2 方法

1.2.1 农户调研 (1) 调研方法。采取随机抽样的方法, 对荔枝种植户进行面访式一对一问卷调研。(2) 调研内容: 主要包括荔枝单产、肥料施用情况 (实际施入化肥及有机肥用量)、主要栽培

管理措施、农户及地块基本信息等。(3) 荔枝品种及树龄: 荔枝品种为妃子笑和白糖罂, 树龄为 15~20 a。(4) 调研对象: 涵盖荔枝企业、专业合作社、种植农户等不同类型经营主体。

区域调研面积共达 982.73 hm², 共收集调研样本 212 份, 经筛查后有效样本 168 份。根据农户种植荔枝规模, 将其分为 3 类, 即种植株数小于 1000 株的小农户经营主体、种植株数在 1000~2000 株的中等经营主体, 及种植株数大于 2000 株的规模化经营主体。

1.2.2 样品的采集与测定 基于前期农户调研得到的产量和经营主体类型进行分类, 采取分层采样的方法采集土壤和果实样本。荔枝树龄为 18~20 a 的成年果树, 品种为妃子笑, 种植密度一般为(4~5)m×(5~6)m 的株行距, 即每 667 m² 种植 22~33 株。土壤样品采集采用“X”形布点法, 每个果园至少采集 5 个点, 在树冠滴水线以外 10~20 cm 范围内的 4 个对角方向按四分法充分混匀后采集土样约 1 kg。采样深度为 0~40 cm 表层土壤, 土壤样品测定指标包括土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁、有效硼^[7]。果实样本采集依据果园面积, 在东、南、西、北、中 5 个方位随机选 5 棵荔枝

树, 每棵荔枝树取具有代表性的 60 颗成熟红果。果实样品测定指标包括全氮、全磷、全钾。其中土壤样本量为 35 份, 果实样本为 15 份。

测定方法: 土壤测定指标参考土壤农业化学分析方法。采用电位法进行 pH 的测定(水土体积比为 2.5:1); 有机质测定采用沙浴加热重铬酸钾容量法; 全氮测定采用半微量凯氏定氮法; 碱解氮测定采用 1 mol/L NaOH 碱解扩散法; 速效磷测定采用盐酸-氟化铵浸提-钼锑抗比色法; 速效钾测定采用 1 mol/L 醋酸铵浸提-火焰光度法; 交换性钙和镁测定采用原子吸收分光光度法; 有效硼测定采用沸水浸提-甲亚胺比色法; 所有的测试均用标样(GBW07416a)控制质量。采用第二次全国土壤普查土壤养分分级指标评价荔枝园土壤性质^[8]。果实样品用去离子水洗净, 于 105 ℃ 杀青 30 min, 在 70 ℃ 下烘至恒重, 称取干物质质量, 研磨后放置自封袋中, 测定荔枝果实的氮、磷、钾养分浓度系数。果实测定指标及方法如下: 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮植株后用流动分析仪(德国 seal 公司)测定植株 N 含量; 采用浓硝酸-高氯酸(4:1)消煮, ICP-OES710(电感耦合等离子体发射光谱仪)测定 P、K 含量, 用标准物质 GBW07603 控制测试质量^[7]。

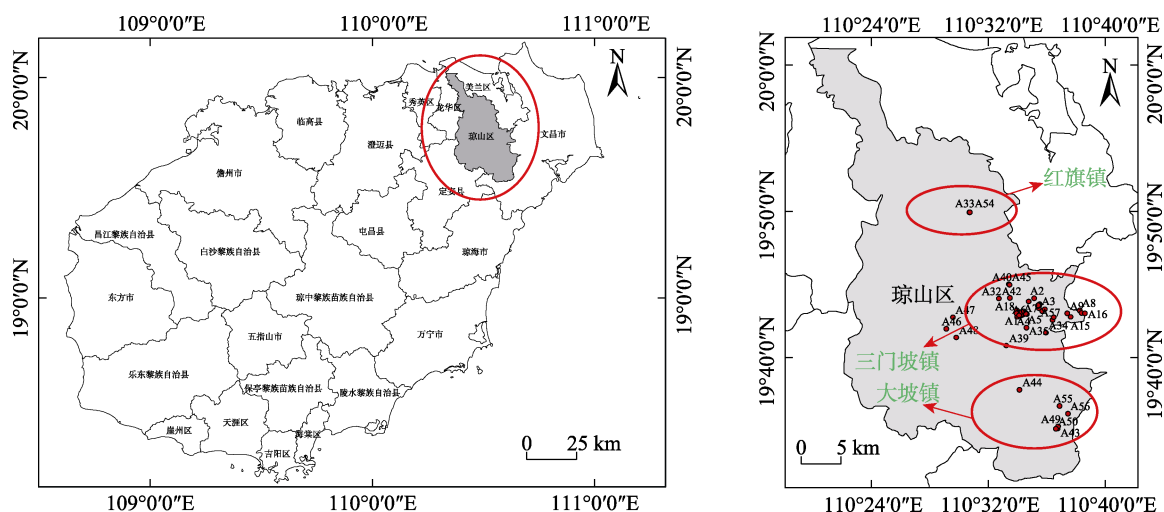


图 1 调研区域分布

Fig. 1 Survey area distribution

1.2.3 评价指标 (1) 养分投入上限及减量潜力: 为有效评价该区荔枝养分管理的科学性, 本研究基于目标产量导向方法, 对荔枝开展了氮肥定额标准核算。确定合理施氮量的原则为既要保证目标产量的实现、提高或维持土壤肥力, 同时需控

制在环境可接受的范围, 从而实现多目标共赢^[9-10]。目前较为推崇的养分平衡方法是通过目标产量和合理盈余来确定总的氮素投入。氮素盈余为田块或区域尺度总氮投入与产出之差, 投入包括化学肥料、有机肥、生物固氮及大气氮沉降,

产出氮素是指农作物收获部分的氮素^[11-12]。为避免过量氮素损失污染环境，氮素盈余应控制在环境安全的临界水平之内，并以此临界阈值来计算相应的氮素投入^[13]。此方法根据已获得的大量田间试验数据，可以快捷地针对不同目标产量确定作物氮素需求，具有较强的实用性，在国际上应用也较为普遍^[9]。基于该方法，作物氮素投入量应为作物氮素收获量与氮素盈余之和（公式 1），氮素投入上限为作物产量潜力下的氮收获量与氮素盈余阈值之和（公式 2），其中产量潜力为实际生产中农户可实现的最大产量，氮素盈余阈值可参考为优化管理水平下可达到的水平^[9]。根据养分投入上限确定减量潜力。

$$N_{input}=N_{har}+N_{surplus} + \text{soil N change in stock} \\ (\approx 0 \text{ in long-term run}) \tag{1}$$

$$\text{Max. N}=N_{har_yield\ potential}+\text{critical N surplus} \tag{2}$$

式中， N_{input} 为氮素投入， N_{har} 为作物收获氮素， $N_{surplus}$ 为氮素盈余。Max. N 为氮素投入上限， $N_{har_yield\ potential}$ 为最大产量下作物氮素收获量。

（2）养分平衡：养分平衡的计算方法采用土壤表观盈余（Soil-surface balance）核算法，将荔枝园养分的输入与输出视为一个系统，养分的盈余为养分的投入总量与收获总量之差。养分输入（input）包括化肥、有机肥、沉降、灌溉、生物固氮的总和^[14]，本研究只考虑有机肥与化肥的总输入。养分输出（output）指果实采收和树体修剪移出果园的养分，本研究中的养分输出为收获的作物产品携出养分，荔枝剪梢、枯枝落叶和落花落果等没有带出荔枝园而被作为养分最后归于土壤，视为内部循环^[15]。

（3）氮素利用效率（NUE）：本研究中定义为氮素产出与氮素投入的比值，用于对氮素利用情况进行评价。公式： $NUE=N_{output}/N_{input}\times 100\%$ 。

（4）土壤养分等级评价：参照同类型研究^[3]，根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[16]，对调查荔枝园的土壤养分状况进行土壤养分等级评价。

土壤综合肥力分析：采用改进的内梅罗指数法^[17]，处理如下。

$$IFI_i = \begin{cases} X / X_a, & X \leq X_a \\ 1 + (X - X_a) / (X_c - X_a), & X_a < X \leq X_c \\ 2 + (X - X_c) / (X_p - X_c), & X_c < X \leq X_p \\ 3, & X > X_p \end{cases}$$

其中：IFI_i 为分肥力系数；X 为该指标测定值； X_a 、 X_c 、 X_p 为分级标准的值，本研究中分级标准

值见表 1。

表 1 土壤肥力分级标准值

Tab. 1 Soil fertility classification standard values

指标 Index	X_a	X_c	X_p
pH	4.5	5.5	6.5
有机质	10	20	30
全氮	0.75	1.5	2
全磷	0.2	0.6	1
全钾	5	15	25
速效氮	60	120	180
速效磷	5	10	20
速效钾	50	100	200

计算各项指标的分肥力系数后，代入下式进行肥力系数计算：

$$IFI = \sqrt{\frac{IFI_{iAvg}^2 + IFI_{iMin}^2}{2}} \times \frac{(n-1)}{n}$$

（5）养分可持续管理评价：基于区域养分可持续管理评价体系^[18]，将管理水平划分为 4 个分区（图 3），Win-Win（高氮产出&低氮盈余）、Win-Lose（高氮产出&高氮盈余）、Lose-Win（低氮产出&低氮盈余）、Lose-Lose（低氮产出&高氮盈余），评价不同类型农户管理水平在 4 个分区的分布情况（表 4）。基于荔枝目标产量和优化管理实验，确定氮盈余和氮产出的阈值。

2 结果与分析

2.1 荔枝养分投入上限

最大氮素收获量：根据农户调研的荔枝产量和分布情况，将产量分级为<10 t/hm²、10~20 t/hm²、20~42 t/hm²。通过实地采样和室内分析得到海南荔枝 3 个产量水平下荔枝果实含氮量别为 7.91、7.84、7.59 g/kg。根据农户调研，相应的最大氮素收获量分别为 78.9、152.5、318.8 kg/hm²。

合理氮素盈余：根据对已有研究的文献汇总分析^[19]，本研究定量了在合理优化施肥条件下的氮肥投入产出及盈余水平，盈余计算方法如上所述。其中优化管理措施主要采用“以果定肥”法，根据荔枝生长周期对养分的需求采用有机肥和无机肥配合施用。目前我国华南荔枝园的氮素盈余可以控制在 100~150 kg/hm² 之间，本研究以平均合理氮素盈余均值 123 kg/hm² 作为荔枝盈余阈值的标准（表 2）^[20-24]。

根据计算得出，荔枝的氮素投入上限分别为：

表 2 华南地区荔枝优化管理下的氮素盈余量
Tab. 2 Nitrogen surplus of litchi under optimal management in South China

荔枝品种 Litchi varieties	产量 Yield (t·hm ⁻²)	N 投入 N input (kg·hm ⁻²)	N 产出 N output (kg·hm ⁻²)	N 盈余 N surplus
白糖罂	7.0	147.1	54.1	93.0
白糖罂	8.8	204.0	68.4	135.0
陈紫	15.0	225.0	116.7	108.3
广东荔枝	22.5	310.5	175.1	135.5
广东荔枝	22.5	292.5	175.1	117.5
广东陈紫	22.5	310.5	175.1	135.5
桂味	22.5	315.0	175.1	140.0
海南妃子笑	22.5	294.0	176.4	117.6
平均	17.9	262.3	139.5	122.8

200 (<10 t/hm²)、273 (产量为 10~20 t/hm²)、439 kg/hm² (产量为 20~42 t/hm²)。磷钾养分按照氮、磷、钾合理配比计算相应的投入上限,砖红壤上妃子笑的施肥比例为氮(N):磷(P₂O₅):钾(K₂O)=0.8~1.0:0.4~0.5:1.1~1.3^[25]。计算得出不同荔枝产量水平下的磷、钾肥投入上限分别为:100、260 kg/hm²(产量<10 t/hm²);136、355 kg/hm² (产量为 10~20 t/hm²);220、571 kg/hm² (产量为 20~42 t/hm²)。

2.2 荔枝养分投入强度与减量潜力

海南荔枝总体养分投入强度较高,氮、磷、钾养分平均投入量分别为 495、445、671 kg/hm²,其中化肥的氮、磷、钾养分投入分别为 298、304、531 kg/hm²,有机肥的氮、磷、钾投入量为 203、

145、143 kg/hm²,常用有机肥(含农家肥)为鸡粪、牛粪、猪粪、羊粪。168 份调研问卷中,有 164 户农户施用有机肥(含农家肥),有机肥使用率为 97.62%,有机肥整体替代比例为 40%,高于全国有机肥替代比例水平(34%)^[18]。不同农户类型化肥及有机肥施用强度不同(表 3),规模化经营主体施肥强度高于小农户和中等经营主体,化肥的氮投入相比于小农户和中等经营主体分别高 62%、46%;化肥的磷投入量分别高 29%、43%,化肥的钾投入分别高 46%、45%,有机肥的氮施用量分别比小农户及中等农户高 44%、41%。

小农户、中等经营主体、规模化经营主体的氮(化肥+有机肥)投入分别高于氮肥投入上限的 60%、97%、131%;磷肥投入量分别高于磷肥投入上限的 204%、236%、258%;钾肥投入量分别高于钾肥投入上限的 70%、101%、119%。3 个经营主体的氮、磷、钾肥减量潜力分别为 19.4%、54.8%、14.4% (小农户);14.6%、49.1%、4.0% (中等经营主体);37.5%、57.1%、36.3% (规模化经营主体)。

海南荔枝平均产量为 15.2 t/hm²,比全国荔枝果园平均水平高 24%,不同类型农户产量水平差异显著(图 2)。小农户、中等和规模化经营主体的平均产量分别为 15.5、12.3、17.3 t/hm²。3 种类型农户有机肥氮养分投入量分别为 198、202、285 kg/hm²,相比全国荔枝种植户高 814%、862%、1257%。

表 3 不同差异水平农户养分投入与产量分析
Tab. 3 Analysis of nutrient input and yield of farmers at different levels

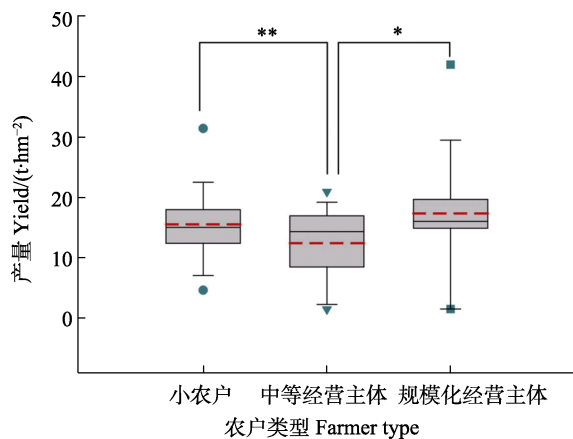
农户类型 Farmers classification	化肥投入量 Fertilizer input amount/(kg·hm ⁻²)			有机肥投入量 Amount of organic fertilizer in- put/(kg·hm ⁻²)			肥料总投入 Total fertilizer in- put/(kg·hm ⁻²)			产量 Yield (t hm ⁻²)
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	
小农户	263	129	407	198	62	121	460	191	527	15.5
中等经营主体	292	117	409	202	67	114	487	182	519	12.3
规模化经营主体	426	167	594	285	78	131	681	236	711	17.3
全国荔枝种植户	297	64	246	21	6	16	318	70	262	12.3

2.3 区域荔枝养分平衡及管理现状评估

根据计算,海南荔枝园氮、磷、钾养分盈余量分别为 365、377、542 kg/hm²,养分利用效率(NUE)分别为 34%、21%、27%。我国荔枝园氮、磷、钾养分盈余量分别为 222、107、220 kg/hm²,养分效率(NUE)分别为 30%、33%、

30%^[18]。与全国相比,海南荔枝氮、磷、钾养分盈余量分别高于全国 65%、253%、146%。整体来说,海南荔枝果园养分投入高、利用率低的现状,对区域生态环境造成的污染风险不容小觑。

根据优化试验结果的数据统计,得到荔枝平均合理氮盈余量为 123 kg/hm²,基于目标产量(调



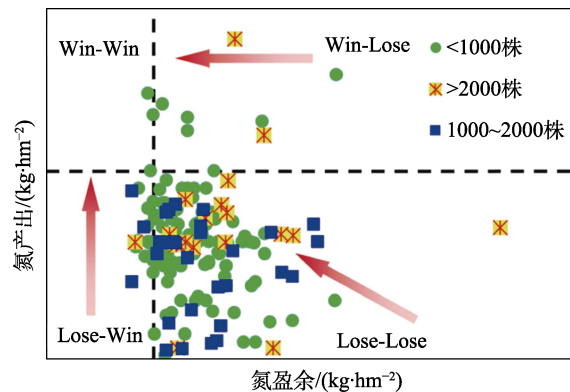
*表示处理间差异显著 ($P<0.05$) ,
**表示处理间差异极显著 ($P<0.01$) 。
* indicate significant difference among treatments ($P<0.05$),
** indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

图 2 海南荔枝不同经营主体产量水平差异
Fig. 2 Boxplots of yield levels of different operators of litchi in Hainan

研产量前 10%) 计算得到目标氮产出量为 188 kg/hm²。根据以上 2 个指标, 将农户管理水平划分为 4 种类型: Win-Win (高产出&低盈余)、Win-Lose (高产出&高盈余)、Lose-Win (低产出&低盈余)、Lose-Lose (低产出&高盈余) (表 4)。

表 4 不同管理水平农户的养分平衡效率分析				
Tab. 4 Analysis of nutrient balance efficiency of farmers with different management levels				
项目 Item	Win-Win (n=2)	Win-Lose (n=8)	Lose-Win (n=20)	Lose-Lose (n=134)
输入 (肥料投入含量)				
化肥氮/(kg·hm ⁻²)	201.2	516.7	115.93	300.8
有机肥氮/(kg·hm ⁻²)	149.2	288.5	77.2	223.9
氮素总投入量 (/kg·hm ⁻²)	350.4	805.2	193.1	518.0
氮素输出 (仅果实) (/kg·hm ⁻²)	254.8	247.1	122.7	107.4
氮素盈余/(kg·hm ⁻²)	95.6	558.1	70.4	410.5
氮素利用率 (/kg·hm ⁻²)	2.7	0.6	1.2	0.4
产量/(t hm ⁻²)	33.6	32.6	15.8	13.7

其中 1.2%的农户处于 Win-Win; 4.9%的农户处于 Win-Lose; 12.2%的农户处于 Lose-Win; 81.7%的农户处于 Lose-Lose (图 3)。处于 Win-Win 的农户均为小农户群体, 其平均氮盈余量为 95.6 kg/hm², 平均有效氮产出量为 254.8 kg/hm²。处于 Lose-lose 的农户平均氮盈余量为 410.5 kg/hm², 有效产出仅为 107.4 kg/hm²。



箭头表示氮素可持续管理的优化策略的目标路线。
虚线表示计算出的合理氮盈余量和氮产量。
Arrows indicate the target route of the sustainable nitrogen management. Dashed lines indicate the target N surplus and N production.

图 3 海南荔枝农户养分管理水平评价
Fig. 3 Evaluation of nutrient management level of litchi farmers in Hainan

2.4 荔科技园土壤肥力综合评价

采样点荔科技园土壤 pH 均值为 4.83±0.28, 变异系数为 5.75%, 94%的土壤为强酸性 (pH 4.5~5.5), 6%为极强酸性 (<4.5), 有机质平均含量为 2.73 g/kg。全氮(0.66 g/kg)、全钾(0.71 g/kg)、碱解氮 (80.07 mg/kg)、速效磷 (1.91 mg/kg)、速效钾 (98.07 mg/kg)、交换性钙 (311.29 mg/kg)、交换性镁 (44.74 mg/kg)、有效硼 (0.67 mg/kg) 含量较缺乏, 而全磷含量较高 (0.96 g/kg) (表 5)。35 个点位中, 土壤肥力系数 (IFI) 综合评级 77% 为三级水平, 23%为四级水平。整体来说, 琼山区荔科技园土壤肥力较低, 亟需加强有机物料还田、通过施用土壤改良剂等措施来提高土壤对养分的固持能力。此外, 不同农户间土壤肥力差异不显著。

3 讨论

3.1 区域荔枝产量与土壤状况影响因素分析

荔枝的生长发育及开花结果除了管理水平及气候因素外, 土壤肥力也是关键因素之一。科学施肥是保证荔枝稳产高产的重要途径, 然而, 对荔科技园土壤养分状况进行分析研究是科学施肥的基础 [3]。荔枝大部分种植于赤红壤及红壤丘陵山地, 土壤酸性强, 阳离子交换量和有机质含量低 [26]。不少研究表明, 土壤酸性或碱性过强会影响土壤化学和生物学性质 [27-28]。当 pH 达到一定阈值时, 可抑制植株生长发育, 降低作物产量和品质 [29-30]。有研究表明 [31], 最适合荔枝生长与结果的 pH 范

表 5 海南荔枝园不同类型农户土壤肥力
Tab. 5 Soil fertility of different types of farmers in Hainan litchi orchard

指标 Index	<1000 株 (n=17)	1000~2000 株 (n=13)	>2000 株 (n=5)	F	P
pH	4.92±0.30	4.77±0.28	4.69±0.10	1.838	0.176
有机质/(g·kg ⁻¹)	2.81±0.24	2.67±0.19	2.57±0.11	3.214	0.053
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.69±0.10	0.60±0.16	0.72±0.26	1.738	0.192
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	83.19±10.64	78.64±8.21	73.19±13.53	2.042	0.146
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	2.74±2.55	1.17±1.05	1.01±0.68	3.098	0.059
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	92.16±26.73	107.25±27.92	94.33±19.01	1.267	0.295
交换性钙/(mg·kg ⁻¹)	291.41±107.82	346.52±103.45	287.29±58.72	1.255	0.299
交换性镁/(mg·kg ⁻¹)	48.03±21.98	37.87±14.16	51.45±43.79	0.919	0.409

围是 5.5~6.5。相较于数年之前的研究数据^[32]，如今的荔枝园土壤呈现进一步酸化的趋势，说明长期以来荔枝园土壤酸碱性的改良举措没有得到重视，更进一步的土壤酸化将会导致土壤中重金属自身的生物有效性增强，从而抑制荔枝树对于有效硼、有效铁等微量元素的吸收^[33]。供试荔枝园土壤全氮、全钾含量偏低，全磷含量较高，与前人研究结果^[3]相比，全氮含量明显下降，全磷含量显著增加，全钾含量一直保持在极低水平。在调研中了解到荔枝种植户普遍比较喜好施用湛江牌过磷酸钙等磷肥，P₂O₅的施用量较为充足，数年过去，土壤全磷含量有显著的增长。有研究表明，随着氮肥与磷肥用量的增多，土壤中钾含量逐渐减少^[34]，荔枝周年多次抽梢和发根，其生长和结果需要大量矿质养分，而钾、氮是荔枝正常生长发育所需量最大的矿质营养元素^[35]，但荔枝园土壤氮、钾含量普遍偏低^[36-37]，且荔枝树体的钾营养也普遍偏低^[35]。

针对土壤酸化问题，建议在施用有机肥改善土壤酸化的基础上，加强对土壤酸化的治理对策研究，如施用熟石灰或以钙镁磷肥代替过磷酸钙来调节土壤 pH 至合适的范围^[38-39]。一是防控重金属污染；二是改良土壤酸碱性的同时也有助于荔枝树的生长与结果。此外，要注意施用酸性土壤改良剂调节土壤酸碱度，增加钙镁养分的有效性。

3.2 区域荔枝产量与养分管理现状影响因素分析

施肥是提高荔枝产量、改善品质的主要措施之一，但肥料的不合理施用也会造成减产、肥料利用率低和环境污染等不良后果^[40-43]。过量施肥不但不会使作物产量进一步增加，反而会造成养分盈余，进而导致资源浪费和环境污染等问题^[44-46]。养分资源高效利用是农业绿色发展的重要环节，基于

大样本区域农户调研数据，以氮素优化为例，基于产量和氮肥利用率，定量评价区域荔枝生产过程中各管理措施相关性。4 种农户类型中，Win-Win（高氮产出&低氮盈余）的产量及氮肥利用率均高于其他 3 种类型，可见，荔枝产量并没有随着养分输入的增加而增加。

针对海南荔枝施肥过量问题，应全面提高作物养分管理水平，推动作物化肥定额制度的应用并提高有机肥施用比例。第一，推动实施化肥定额制（氮、磷、钾定额）引导养分合理投入。2020 年农业农村部印发《全国水稻产区氮肥定额用量（试行）》，首次针对水稻提出氮肥定额施用政策，以保障粮食稳产增产、土壤肥力培育和生态环境安全，实现了我国养分用量调控零的突破，为我国养分管理政策的发展奠定了基础。同期，浙江省农业农村厅印发《关于试行农业投入化肥定额制的意见》，通过标准制定实现氮肥限量施用，为全国化肥减量增效工作提供“浙江方案”。目前养分定额制度正日趋完善，各地方都在加大科研投入，建立更加完善的养分施用标准。海南省目前还未建立适宜不同作物体系、土壤类型、种植制度的差异化氮肥用量定额标准，应首先在主要热带作物上开展，并将肥料定额和作物科学施肥与本地的绿色农产品或地标农产品认证相结合。第二，优化肥料产品结构，研发作物专用配方肥，降低高磷配方复合肥的比例。市场上供应的复合肥（含作物专用肥）大多采用单一的氮、磷、钾养分配方比例，容易造成荔枝营养生长期与生殖生长期氮、磷、钾养分供应失衡，使肥料利用率下降。据调研了解，荔枝果农常用平衡肥（如：15-15-15、16-16-16）等高磷配方，其施用占比达 49%；同时有机肥整体替代比例为 40%，高于全国有机肥替代比例水平（34%）。有机肥替代比例

不宜过高,避免有机肥导致的磷素过量积累,推荐选择含磷量较低的有机肥。第三,提高区域有机肥高效利用。据调研了解,琼山区有66家畜禽养殖企业,年产各种畜禽粪便约44万t,产生的氮、磷养分约1.93万t和0.32万t,可为当地荔枝生产提供充足的养分资源,但目前由于岛内运输成本较高,有机肥厂利润低下,部分农户选择岛外购买有机肥且价格相对便宜等因素导致区域有机资源未被有效利用。未来应综合考虑畜禽粪便等有机肥资源利用问题,依托新型农业生产经营主体,强化政府支持,依靠科技进步,创新工作机制和技术模式,生产高质量有机肥支持荔枝提质增效和产业升级,发展生态循环农业。

4 结论

(1)通过对海南荔枝主产区果园施肥情况的实地调查及养分投入定额理论分析,结果表明,海南荔枝果园氮、磷、钾养分投入强度较大,且随着农户经营规模的增大,养分投入也逐渐增加,如规模化经营主体氮、磷、钾养分投入分别高于上限的131%、258%和119%。

(2)海南荔枝园氮、磷、钾养分盈余分别为365、377、542 kg/hm²,养分利用效率(NUE)分别为34%、21%、27%。与全国荔枝相比,海南荔枝氮、磷、钾养分盈余高于全国荔枝氮、磷、钾养分盈余65%、253%、146%。磷养分过量投入现象突出,造成大量磷素在土壤中固定或损失。

(3)海南荔枝园当前的土壤肥力较低,土壤酸化严重,全磷含量较高,中微量元素如交换性钙、交换性镁、有效硼较为缺乏,限制了荔枝品质的提高,农户可将过磷酸钙改为钙镁磷肥进行施用。小农户经营的荔枝园土壤肥力指标均高于中等经营主体和规模化经营主体。

(4)海南荔枝园农户整体管理水平较低,81.7%的农户处于Lose-Lose(低产出&高盈余)。仅1.2%小农户达到Win-Win(高产出&低盈余)水平。未来要提高区域养分综合管理水平,推动肥料定额制度的应用,促进荔枝产业的绿色发展。

参考文献

- [1] 郑红裕,袁燕梅. 2018年中国国际荔枝产业大会在广州顺利召开[J]. 中国热带农业, 2018(4): 2-3.
ZHENG H Y, YUAN Y M. The 2018 China international litchi industry conference was successfully held in Guangzhou[J]. China Tropical Agriculture, 2018(4): 2-3. (in Chinese)
- [2] 赵飞,廖美敬,章家恩,黄敏,张湛辉. 中国荔枝文化遗产的特点、价值及保护——基于岭南荔枝种植系统(增城)的实证研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(9): 1435-1442.
ZHAO F, LIAO M J, ZHANG J E, HUANG M, ZHANG Z H. Characteristics, value, and conservation of litchi heritage in China: an case study of the Lingnan litchi cultivation system (Zengcheng)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(9): 1435-1442. (in Chinese)
- [3] 陈明智,林彬,谢国干,谢延坤,苏林啸. 海南荔枝园土壤基本养分状况分析[J]. 海南师范学院学报(自然科学版), 2001, 14(2): 57-59.
CHEN M Z, LIN B, XIE G Q, XIE Y K, SU L X. An analysis of the basic nutrients in the soil of Hainan's litchi orchards[J]. Journal of Hainan Normal University(Natural Science), 2001, 14(2): 57-59. (in Chinese)
- [4] 周兆禧,林兴娥,刘永霞,王必遵,明建鸿,高宏茂,毛海涛,许方瑜. 海南荔枝果园土壤存在的问题及提肥增效措施[J]. 中国热带农业, 2018(5): 23-24.
ZHOU Z X, LIN X E, LIU Y X, WANG B Z, MING J H, GAO H M, MAO H T, XU F Y. Problems in soil of litchi orchards in Hainan province and measures to improve fertilizer and efficiency[J]. China Tropical Agriculture, 2018(5): 23-24. (in Chinese)
- [5] GROFF G W. Some ecological factors involved in successful lychee culture[J]. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, 1943, 56: 134-155.
- [6] CHAPMAN K R. Tropical fruit cultivar collecting in S.E. Asia and China[R]. Queensland: Queensland Department of Primary Industries, 1984.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [8] 李国良,姚丽贤,何兆桓,张育灿,周修冲,涂仕华. 广东省荔枝园土壤养分肥力现状评价[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 800-804.
LI G L, YAO L X, HE Z H, ZHANG Y C, ZHOU X C, TU S H. Evaluation on soil nutrient fertility in litchi plantations of Guangdong[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 800-804. (in Chinese)
- [9] LI T Y, ZHANG W F, CAO H B, YING H, ZHANG Q S, REN S Y, LIU Z T, YIN Y L, QIN W, CUI Z L, LIU X J, JU X T, OENE O, WIM D V, ZHANG F. Region-specific nitrogen management indexes for sustainable cereal production

- in China[J]. Environmental Research Communications, 2020, 2(7): 075002.
- [10] 巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 1-13.
- JU X T, ZHANG C. The principle and indicators of rational n fertilization. Journal of Soil Science 2021, 58(1): 1-13. (in Chinese)
- [11] LEX B, KEES K G, KLAAS W V D H, ARTHUR H W B, DETLEF P V V, JAAP W, MARIANA C R, ELKE S. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(52): 20882-20887.
- [12] LIU J, YOU L Z, MANOUCHEHR A, MICHAEL O, MARIO H, ALEXANDER J B Z, YANG H. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(17): 8035-8040.
- [13] EILEEN L M, KENNETH G C, ALISON J E, PETER B W, SHAI S, CHRISTINA T, REBECCA D M, HAROLD M E. The nitrogen balancing act: tracking the environmental performance of food production[J]. BioScience, 2018, 68(4): 194-203.
- [14] 任思洋, 张青松, 李婷玉, 张福锁. 华北平原五省冬小麦产量和氮素管理的时空变异[J]. 中国农业科学, 2019, 52(24): 4527-4539.
- REN S Y, ZHANG Q S, LI T Y, ZHANG F S. Temporal and spatial variation of winter wheat yield and nitrogen management in five provinces of North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(24): 4527-4539. (in Chinese)
- [15] 万炜, 师纪博, 刘忠, 韩已文, 刘凡, 王佳莹, 郑曼迪. 栖霞市苹果园氮磷养分平衡及环境风险评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 211-219.
- WAN W, SHI J B, LIU Z, HAN Y W, LIU F, WANG J Y, ZHENG M D. Nitrogen and phosphorus nutrient balance and environmental risk assessment of apple orchard in Qixia city[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 211-219. (in Chinese)
- [16] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 111-116.
- National Soil Survey Office. Soil survey technology in China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1992: 111-116.
- [17] 邓南荣, 吴志峰, 刘平, 张坚, 马燕. 城市园林绿化用地土壤肥力诊断与综合评价——以广州市长虹苗圃为例[J]. 土壤与环境, 2000(4): 287-289.
- DENG N R, WU Z F, LIU P, ZHANG J, MA Y. Diagnosis and integrated evaluation on soil fertility of urban land: a case study of Changhong nursery in Guangzhou city[J]. Soil and Environment, 2000(4): 287-289. (in Chinese)
- [18] ZHANG Q S, CHU Y Y, XUE Y F, YING H, CHEN X H, ZHAO Y J, MA W N, MA L, ZHANG J Z, YIN Y L, CUI Z L. Outlook of China's agriculture transforming from small-holder operation to sustainable production[J]. Global Food Security, 2020, 26(9): 100444.
- [19] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281-296.
- JU X T, GU B J. Indexes of nitrogen management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(2): 281-296. (in Chinese)
- [20] 姚丽贤, 周昌敏, 王祥和, 何兆桓, 罗东林, 白翠华. 施用常用有机肥对荔枝产量、品质及土壤性质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 87-93.
- YAO L X, ZHOU C M, WANG X H, HE Z H, LUO D L, BAI C H. Effect of application of organic fertilizers on litchi[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(5): 87-93. (in Chinese)
- [21] 丁红萍. 陈紫荔枝施肥量的研究[J]. 福建果树, 2002(Suppl. 1): 5-6.
- DING H P. Studies on fertilizer application rate of Chenzi litchi[J]. Fujian Fruit Trees, 2002(Suppl. 1): 5-6. (in Chinese)
- [22] 王仁玠, 庄伊美. 国内外荔枝营养与施肥研究进展[J]. 四川果树, 1993, 21(2): 31-34.
- WANG R J, ZHUANG Y M. Research progress on nutrition and fertilization of litchi[J]. Sichuan Fruit Trees, 1993, 21(2): 31-34. (in Chinese)
- [23] 李晓河, 赖汉龙, 林镇雄, 陈盛文, 郑海东. 桂味荔枝无公害生产关键技术[J]. 中国热带农业, 2011(6): 72-74.
- LI X H, LAI H L, LIN Z X, CHEN S W, ZHENG H D. Key technology of pollution-free production of Guiwei litchi[J]. China Tropical Agriculture, 2011(6): 72-74. (in Chinese)
- [24] 农业农村部种植业管理司, 全国农业技术推广服务中心, 农业农村部科学施肥专家指导组. 2021年春季主要果树科学施肥指导意见[J]. 果农之友, 2021(4): 45-48.
- Planting Management Department of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Agricultural Technology Extension Service Center, Expert Guidance Group for Scientific Fertilization of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Guidance on scientific fertilization of main fruit trees in spring 2021[J]. Fruit Growers' Friend, 2021(4): 45-48. (in Chinese)
- [25] YAO L X, BAI C H, LUO D L. Chapter 45 - Diagnosis and management of nutrient constraints in litchi (Fruit Crops) [M]. Amsterdam: Elsevier, 2020: 661-679.
- [26] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 137-138, 171-172.
- Soil Survey Office of Guangdong Province. Soil of Guangdong province[M]. Beijing: Science Press, 1993: 137-138,

- 171-172. (in Chinese)
- [27] KAZUO S, AKIRA T. Acidity neutralization mechanism in a forested watershed in central Japan[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1996, 88(3): 313-329.
- [28] GOULDING K W. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom[J]. Soil Use and Management, 2016, 32(3): 390-399.
- [29] RAESE J T. Response of apple and pear trees to phosphate fertilization: a compendium[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, 29(11-14): 1799-1821.
- [30] 赵静, 李欣, 张鲜鲜, 章超, 沈向, 王洪强, 陈浪波. 土壤 pH 值对黄金梨果实品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(27): 13037-13040.
- ZHAO J, LI X, ZHANG X X, ZHANG C, SHEN X, WANG H Q, CHEN L B. Effect of soil pH value on fruit characters of *Pyrus pyrifolia* Nakai. cv. Whangkeumbae[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(27): 13037-13040. (in Chinese)
- [31] 孙娟, 李松刚, 魏志远, 王登峰, 漆智平. 海南中西部荔枝园土壤养分分布特征[J]. 广东农业科学, 2013, 40(10): 62-64.
- SUN J, LI S G, WEI Z Y, WANG D F, QI Z P. Distribution of soil nutrients in the litchi orchard in the midwest Hainan[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(10): 62-64. (in Chinese)
- [32] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J]. 土壤通报, 1994, 25(6): 245-247.
- KAN W J, WU Q T. A method for quantitative and comprehensive evaluation of soil fertility[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25(6): 245-247. (in Chinese)
- [33] 邵建华, 黄彬, 秦征, 韩永圣, 高芝祥. 农作物微量元素缺乏的诊断及防治[J]. 广东微量元素科学, 2001(6): 1-14.
- SHAO J H, HUANG B, QIN Z, HAN Y S, GAO Z X. Diagnosis and prevention from deficiency of trace elements in crops[J]. Guangdong Trace Element Science, 2001(6): 1-14. (in Chinese)
- [34] 王笃超, 吴景贵, 李建明. 不同有机物料对连作大豆土壤养分含量及生物性状的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 258-262, 270.
- WANG D C, WU J G, LI J M. Effects of different organic materials on soil nutrient contents and biological properties of continuous cropping of soybean[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 258-262, 270. (in Chinese)
- [35] 杨苞梅, 李国良, 杨少海, 何兆桓, 周昌敏, 姚丽贤. 不同钾氮配比对荔枝果实矿质元素含量及其耐贮性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1294-1303.
- YANG B M, LI G L, YANG S H, HE Z H, ZHOU C M, YAO L X. Effect of application ratio of potassium and nitrogen on litchi fruit mineral element contents and their storage property[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(5): 1294-1303. (in Chinese)
- [36] 李国良, 张政勤, 姚丽贤, 杨苞梅, 何兆桓, 周昌敏. 广西壮族自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): 873-877.
- LI G L, ZHANG Z Q, YAO L X, YANG B M, HE Z H, ZHOU C M. Soil nutrient fertility in litchi orchards in Guangxi Zhuang Autonomous Region and Fujian province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(4): 873-877. (in Chinese)
- [37] 李国良, 姚丽贤, 张政勤, 杨苞梅, 何兆桓, 周昌敏, 黄连喜, 国彬, 涂仕华. 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.
- LI G L, YAO L X, ZHANG Z Q, YANG B M, HE Z H, ZHOU C M, HUANG L X, GUO B, TU S H. Temporal and spatial variation of nutrient fertility on Guangdong litchi plantation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1081-1086. (in Chinese)
- [38] 谢会雅, 陈舜尧, 张阳, 吕书记, 王青, 李迪秦, 祝利. 中国南方土壤酸化原因及土壤酸性改良技术研究进展[J]. 湖南农业科学, 2021(2): 104-107.
- XIE H Y, CHEN S Y, ZHANG Y, LYU S J, WANG Q, LI D T, ZHU L. Research progress on causes of soil acidification & acid soil improvement technology in south China[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2021(2): 104-107. (in Chinese)
- [39] 杨瑞兵. 土壤施用农用石灰防酸化效果试验[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(11): 67-69.
- YANG R B. Effect of soil application of agricultural lime on acidification control[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2016, 22(11): 67-69. (in Chinese)
- [40] 马文奇, 毛达如, 张福锁. 山东省蔬菜大棚养分积累状况[J]. 磷肥与复肥, 2000(3): 65-67.
- MA W Q, MAO D R, ZHANG F S. Nutrient accumulation in vegetable awning (green houses) in Shandong province[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2000(3): 65-67. (in Chinese)
- [41] 周建斌, 翟丙年, 陈竹君, 马爱生, 尚浩博. 设施栽培菜地土壤养分的空间累积及其潜在的环境效应[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 332-335.
- ZHOU J B, ZHAI B N, CHEN Z J, MA A S, SHANG H B. Nutrient accumulation in soil profiles under canopy vegetable cultivation and potential environmental impacts[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(2): 332-335. (in Chinese)
- [42] 黄化刚, 张锡洲, 李廷轩, 余海英. 典型设施栽培地区养分平衡及其环境风险[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):

- 676-682.
- HUANG H G, ZHANG X Z, LI T X, YU H Y. Nutrient balance and its environmental risk in typical greenhouse system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 676-682. (in Chinese)
- [43] 张福锁, 马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(2): 154-157.
- ZHANG F S, MA W Q. The relationship between fertilizer input level and nutrient use efficiency[J]. *Soil and Environment*, 2000, 9(2): 154-157. (in Chinese)
- [44] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1361-1368.
- JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1361-1368. (in Chinese)
- [45] YANG S M, LI F M, SUKHDEV S M, WANG P, SUO D G, WANG J G. Long-term fertilization effects on crop yield and nitrate nitrogen accumulation in soil in northwestern China[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(4): 1039-1049.
- [46] 杨新泉, 冯锋, 宋长青, 冷疏影. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 373-376.
- YANG X Q, FENG F, SONG C Q, LENG S Y. Fate and efficient use of nitrogen fertilizer in main agroecosystem[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2003, 9(3): 373-376. (in Chinese)