

不同施氮量对胶园间作五指毛桃的生产力和生态效益影响

黄坚雄¹, 董天站^{1,2}, 冼远然^{1,2}, 潘 剑^{1,3}, 陈源泉^{2*}, 王秀全^{1*}

1. 中国热带农业科学院橡胶研究所, 海南海口 571101; 2. 中国农业大学农学院, 北京 100193; 3. 农业农村部儋州热带作物科学观测试验站, 海南儋州 571737

摘 要: 明确五指毛桃适宜施氮量是构建高效生态的“橡胶–五指毛桃”模式关键种植技术。本研究设置 0、150、225、300、375 kg/hm² 5 个施氮水平 (分别记为 CK、N₁₅₀、N₂₂₅、N₃₀₀、N₃₇₅), 从间作五指毛桃的生产力、资源利用效率及生态足迹角度综合分析其适宜的施氮量。结果表明: 与 CK 相比, 施氮显著提高了五指毛桃的产量、生物量与经济效益, 其中 N₂₂₅ 和 N₃₀₀ 处理的综合表现最好, 产量分别为 15 438、15 150 kg/hm², 利润分别为 60 950、57 555 元/hm² ($P<0.05$)。与 CK 相比, 施氮能显著提高光能利用率, 增幅为 59.1%~76.9%, 但显著降低碳效率, 降幅为 46.2%~73.7%, 氮肥偏生产力也随施氮量增加而显著降低 ($P<0.05$), N₁₅₀ 处理的资源利用率综合表现最好, N₂₂₅ 处理次之。N₁₅₀ 处理的碳足迹和氮足迹综合表现最好, N₂₂₅ 处理次之。各处理五指毛桃的氮吸收量为 117.8~174.0 kg/hm², 其中 CK 和 N₁₅₀ 处理的氮吸收量高于氮投入量。综合考虑生产力、资源利用率、生态足迹和氮素供给可持续性, 本研究得出 N₂₂₅ 处理为适宜的施氮处理, 是构建高效生态的“橡胶–五指毛桃”模式的合理措施。

关键词: 橡胶农林复合; 五指毛桃; 生产力; 资源利用率; 生态足迹

中图分类号: S794.1 文献标志码: A

Effect of Productivity and Ecological Benefits of Intercropping *Ficus Hirta* Vahl. with Different Nitrogen Application Rates in Rubber Plantations

HUANG Jianxiong¹, DONG Tianzhan^{1,2}, XIAN Yuanran^{1,2}, PAN Jian^{1,3}, CHEN Yuanquan^{2*}, WANG Xiuquan^{1*}

1. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agriculture University, Beijing 100193, China; 3. Danzhou Investigation & Experiment Station of Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou, Hainan 571737, China

Abstract: Determining the appropriate nitrogen application rate for *Ficus hirta* Vahl. is one of the key cultivation techniques for establishing an efficient and ecological "rubber-*Ficus hirta* Vahl." agroforestry system. This study evaluated five nitrogen application treatments, 0, 150, 225, 300 and 375 kg/hm² (denoted as CK, N₁₅₀, N₂₂₅, N₃₀₀ and N₃₇₅), and conducted a comprehensive analysis of the suitable nitrogen rate from the perspectives of productivity, resource use efficiency, and ecological footprint. The results showed that, compared with the CK treatment, nitrogen application significantly increased the yield, biomass, and economic benefits. Among the treatments, N₂₂₅ and N₃₀₀ performed the best, achieving a yield of 15 438 and 15 150 kg/hm² and an economic benefit of 60 950 and 57 555 yuan/hm², respectively ($P<0.05$). Compared with CK, nitrogen application significantly improved solar utilization efficiency by 59.1%–76.9%, but significantly reduced carbon efficiency by 46.2%–73.7%. The partial factor productivity from applied nitrogen also decreased significantly with increasing nitrogen application ($P<0.05$). N₁₅₀ exhibited the best overall performance in

收稿日期 2025-10-08; 接受日期 2025-11-29

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 321RC657); 中国热带农业科学院国家热带农业科学中心科技创新团队项目 (No. CATASCXTD202507); 国家天然橡胶产业技术体系项目 (No. CARS-33-ZP3)。

作者简介 黄坚雄 (1985—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 橡胶农林复合模式构建技术与理论。*通信作者 (Corresponding author): 陈源泉 (CHEN Yuanquan), E-mail: chenyzq@cau.edu.cn; 王秀全 (WANG Xiuquan), E-mail: wangxqjialiuxw@126.com。

resource use efficiency, followed by N_{225} . Similarly, N_{150} showed the best overall performance in terms of carbon and nitrogen footprints, followed by N_{225} . Nitrogen uptake in *Ficus hirta* Vahl. across different treatments ranged from 117.8 to 174.0 kg/hm², with the CK and N_{150} showing higher nitrogen uptake than nitrogen input. Taking into account the productivity, resource use efficiency, ecological footprint and sustainability of nitrogen supply, this study concludes that N_{225} is the suitable nitrogen application rate for establishing an efficient and ecological “rubber-*Ficus hirta* Vahl.” agroforestry system.

Keywords: rubber-based agroforestry; *Ficus hirta* Vahl; productivity; resource use efficiency; ecological footprint

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.02.012

农业生产是利用光、土地等自然资源的过程,同时,农田生态系统不断产出籽粒、秸秆等,以及病虫害防治需求,农业生产往往还需额外投入氮、碳、农药等非自然资源,以维持其可持续性^[1-3]。采用合理的品种、施肥、种植密度、间作与轮作等措施,可提高农业系统对光、氮、碳、水等资源的利用率,是促进生态农业发展的关键举措^[4-6]。大气温室气体 (greenhouse gas, GHG) 浓度升高导致全球气候变暖已成为国际共识,农业系统的土壤 GHG 直接排放及化肥、农药、柴油等投入的间接排放是其主要排放源,氮肥施用通常是促进农业 GHG 直接和间接排放的主要因素^[7-9]。另外,在农业生产中未被作物吸收的氮素以活性氮的形式释放到环境中,氮素损失率可达 70%,不仅降低氮肥利用率,还可导致环境污染^[10]。通过碳、氮生态足迹分析,可评价农业系统种植管理措施并提出优化建议,对挖掘农业生态效益具有重要意义。

天然橡胶是我国的战略物资之一,主要来源于巴西橡胶树 [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Muell. Arg.], 其生长周期可达 30 a 以上,幼龄阶段约 7~8 a,是我国热带地区重要的人工经济林,面积约 1.20×10^6 hm²^[11]。近十年来,橡胶价格持续低迷,常规单一种植效益低的问题突出,并存在光热资源利用不足、资源循环率低等问题^[12-13]。农林复合系统通常具有综合经济效益、固碳量和资源利用率更高等优点,是一种更具可持续性的农业管理策略,发展橡胶园农林复合系统是应对上述问题的潜在措施^[14-16]。目前,橡胶园复合种植系统常见的间作作物包括香蕉、玉米、菠萝、竹芋、辣椒、益智、砂仁等经济作物^[11]。然而,不同作物市场容量有限,仍需筛选更多经济作物以满足橡胶复合种植需求。

五指毛桃 (*Ficus hirta* Vahl.) 是一种药食两用的中药材,主要分布于东亚地区林下,其根为主要经济部位^[17]。近年来,由于五指毛桃的野生

资源无法满足市场需求,人工栽培成为重要应对措施^[18]。橡胶园作为南方典型人工林系统,其中常有野生五指毛桃分布,表明五指毛桃可作为橡胶复合种植的潜在间作作物,部分学者已初步开展了相关的研究。前人采用“3414”肥效试验方案研究得出,在成龄常规胶园 (株行距为 3 m × 7 m) 中间作五指毛桃 (株行距为 0.5 m × 0.6 m) 的适宜施氮量为 146 kg/hm²,氮肥对五指毛桃的增产效应高于磷肥与钾肥,间作五指毛桃的干质量产量最高达 2.88 t/hm²^[19]。PAN 等^[20]选用光照更充足的幼龄宽窄行胶园 (宽行行距为 20 m、窄行行距为 4 m,株距为 2 m) 开展研究,得出施氮量为 240 kg/hm² 时间作五指毛桃的鲜质量产量为 17.55 t/hm²,折合干质量产量为 8.78 t/hm²,表明基于幼龄宽窄行胶园的“橡胶-五指毛桃”模式可行性更高,橡胶园郁闭度对间作产量影响较大。

截至目前,橡胶园间作五指毛桃的栽培技术上,主要结论为光照充足的幼龄胶园适宜间作五指毛桃,其他栽培技术尚待研究。施氮是保障作物产量的重要措施之一,合理施肥可以有效提高作物地上部及地下部的生物量^[21-23]。同时,合理的施氮量对农业生态系统的资源利用率、碳氮足迹影响重大^[24-25],明确其合理施氮量是构建关键种植技术的重要环节。因此,本研究在幼龄宽窄行胶园中间作五指毛桃并设置不同的施氮量,从生产力、资源利用效率及生态足迹角度,综合分析适宜的施氮量,为构建与推广高效生态的“橡胶-五指毛桃”模式提供理论和技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在中国热带农业科学院橡胶研究所儋州试验基地 (19°32'47"N, 109°28'0"E) 进行。试验地海拔为 142.8 m,地势平坦,属于热带海洋性季风气候,年平均气温为 23.7 °C,年降雨量为

1760 mm，雨季主要集中在 7—9 月，约占全年降雨量的 70%，年日照时数为 2175.7 h，种植期间的月平均气温和降雨量如图 1 所示。试验地土壤类型为花岗岩风化形成的砖红壤，为砂质黏壤土。橡胶树采用宽窄行种植（宽行行距为 20 m、窄行

行距为 4 m，株距为 2 m），品种为窄冠直立型的热研 7-20-59，东西行向种植，于 2016 年 9 月定植。胶园基础地力条件如下：土壤有机质含量为 14.1 g/kg，全氮含量为 1.6 g/kg，有效磷含量为 31.9 mg/kg，速效钾含量为 318 mg/kg，pH 4.8。

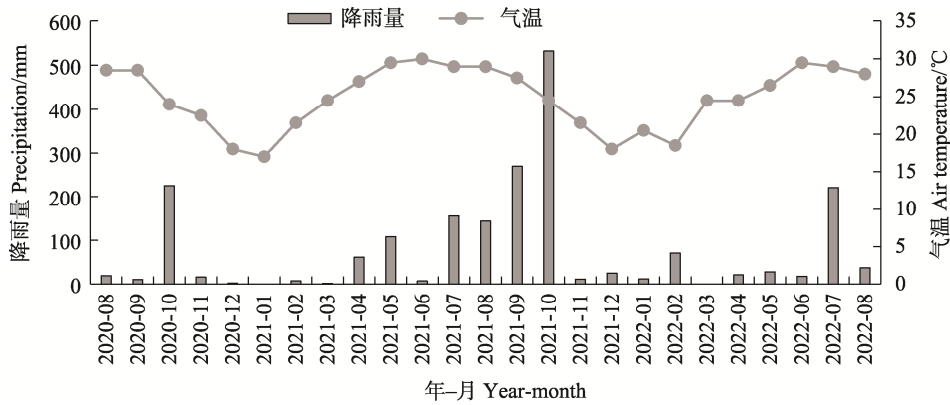


图 1 试验期间降雨量和气温动态变化
Fig. 1 Dynamic changes of precipitation and air temperature during study period

1.2 方法

1.2.1 试验设计 受间作小区 50 m 外防风林(高约 30 m)影响，东西侧小区光照略有短暂差异，故本试验采用完全随机区组设计，于 2020 年 8 月 25 日在幼龄(5 龄)宽窄行胶园宽行中间按 1 m 行距和 40 cm 株距起垄(垄高 30 cm、垄宽 60 cm)种植 11 行五指毛桃(理论占宽行 11 m)，种植行向与橡胶树行向相同，小区理论面积为 66 m²，相邻小区边缘起 20 cm 小垄，小垄之间间隔 1 m。小区两侧五指毛桃距橡胶树 5 m(图 2)。设置施氮量分别为 0、150、225、300、375 kg/hm²，分

别记为 CK、N₁₅₀、N₂₂₅、N₃₀₀、N₃₇₅ 处理，各处理磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)用量均为 100 kg/hm²，每处理重复 3 次。在五指毛桃株间挖穴施入肥料：2020 年 9 月(20%氮肥、50%磷肥、50%钾肥)、2021 年 3 月(40%氮肥、50%磷肥、50%钾肥)、2021 年 6 月(40%氮肥)，肥料种类为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 16%)和硫酸钾(K₂O 50%)。第二年施肥时间、施肥量与第一年保持一致。作物的除草、灌溉等大田管理均按常规进行，种植 2 a 后，先人工砍除地上部分，再采用小型挖掘机收获五指毛桃的根。

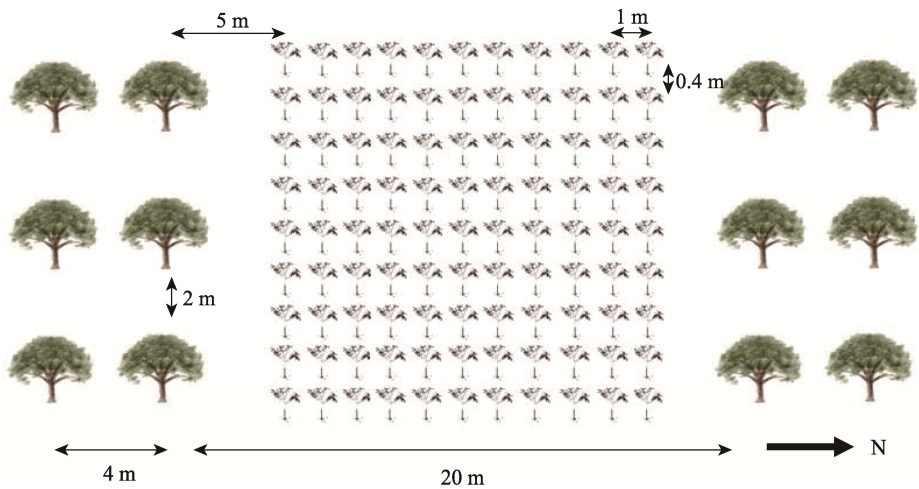


图 2 “橡胶-五指毛桃”种植示意图
Fig. 2 Schematic diagram of “rubber-*F. hirta* Vahl.” agroforestry system

1.2.2 指标测定 (1) 产量、生物量、植株氮和经济效益。2022 年 8 月下旬, 于各处理小区分别选取长势一致、生长良好的植株 11 株(每行 1 株), 对地上部及地下部进行收获, 截取分离部位为地上地下结合部位, 测定根的鲜质量。

对收获的植物茎秆、叶片、果实和根分离, 105 ℃杀青 1 h 后, 于 85 ℃烘干至恒重, 用于生物量测定。将植株样品粉碎后过 1 mm 筛, 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法, 利用连续流动分析仪测定植株全氮含量^[26], 根据生物量计算植株氮含量。各小区其余植株去除地上部后, 集中收获其地下部分。

记录五指毛桃种植期间的投入 (包括耕地、灌溉、种苗、化肥、人力等) 及其根鲜质量的产值 (价格为 9.2 元/kg), 计算其净收益。因橡胶树尚未投产, 故未考虑橡胶种植部分的效益。

(2) 光照时长和根密度。由于不同施氮处理的胶园环境高度一致, 本研究选取 N225 处理为代表, 测定光照时长和根密度。

受太阳高度角及橡胶树树冠 (5 a 时树高约 5 m) 影响, 间作区不同位置的光照时长在不同季节存在一定差异。夏至与冬至差异最大, 春分与秋分差异较小。本试验代表性选择 2021 年 6 月下旬 (夏至) 和 2022 年 3 月下旬 (春分) 的晴朗天气, 在间作小区的 11 行五指毛桃中选取第 1、3、6、9、11 行, 从南向北分别记为 S-5、S-7、M-10、N-7、N-5 (数字代表距树距离, 单位: m), 记录各位置阳光直射的起止时间, 计算间作区不同位置的光照时长, 并以试验小区附近的空地作为对照 (CK)。测定高度与五指毛桃冠层高度一致。受间作小区 50 m 外防风林 (高约 30 m) 影响, 间作区光照时长略有缩短 (约较 CK 提前 1 h 结束阳光直射)。因光照环境较为一致, 难以区分, 故未设置重复。

在五指毛桃收获前, 挖取 30 cm×30 cm×20 cm (长×宽×高) 的土方, 测定橡胶树与间作物种植区域之间 0~20 cm 土层的根系分布, 以间接分析“橡胶-五指毛桃”系统是否存在地下竞争。测定位置距橡胶树 3 m 和 4 m, 将获取的根系于烘箱中烘干后称量干质量, 用于计算根密度, 单位: g/m^3 。

(3) 资源利用率。本研究表征资源利用率的指标为光能利用率 (solar utilization efficiency, SUE)、氮肥偏生产力 (partial factor productivity from applied N, PFPN) 和碳效率 (carbon efficiency, CE), 其数值越大, 表明其生态效益越好。

① SUE。通过气象站获得试验期间的太阳总辐射量 (MJ/m^2), SUE 计算公式如下^[27]:

$$\text{SUE} = H \times Y_d / S \times 100\% \quad (1)$$

式中, H 为干物质燃烧热, 单位: J/kg , 取 $1779 \times 10^4 \text{ J}/\text{kg}$; Y_d 为五指毛桃根的干质量生物量, 单位: kg/hm^2 ; S 为生长期内的太阳总辐射, 单位: MJ/m^2 。

② PFPN。采用 PFPN ($\text{kg}/\text{kg N}$) 表征不同处理的氮肥利用率, 其计算公式如下^[28]:

$$\text{PFPN} = Y_f / N \quad (2)$$

式中, Y_f 代表不同处理的五指毛桃鲜质量产量 (kg/hm^2); N 代表试验期间不同处理的氮肥施用量, 单位: kg/hm^2 。CK 处理未施氮, 不做计算。

③ CE。CE 指单位碳投入下的碳吸收量 (单位: kg/kg), 是衡量农业生产可持续性的关键指标之一, 参照杨博文等^[5]的研究, 其计算公式如下:

$$\text{CE} = B_d \times 44 / 12 / C_{\text{input}} \quad (3)$$

式中, B_d 为五指毛桃干质量生物量, 单位 kg/hm^2 , 生物量的含碳量按 40% 计; 44/12 为折算成 CO_2 的系数; C_{input} 代表不同处理投入物资生产过程产生的 CO_2 排放。不同物资的 CO_2 排放系数如表 1 所示。

表 1 农业物资投入的 CO_2 排放和氮损失系数
Tab. 1 CO_2 emission and nitrogen loss coefficients for agricultural material inputs

项目 Item	温室气体排放系数 ^[9] GHG coefficient	氮损失系数 ^[29] N loss coefficient
氮肥/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	7.76	7.15×10^{-3}
磷肥/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	2.33	1.83×10^{-4}
钾肥/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.66	1.00×10^{-4}
柴油/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	2.50	4.69×10^{-3}
农药/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	18.00	2.86×10^{-2}
电力/ $(\text{kg} \cdot \text{kwh}^{-1})$	0.95	1.97×10^{-3}

(4) 生态足迹。本研究测定的生态足迹包含碳足迹 (carbon footprint, CF) 和氮足迹 (nitrogen footprint, NF), 可以确定农业生产中 GHG 和活性氮排放的问题, 用于评价和优化农业生产管理措施^[24]。一般情况下, CF 和 NF 指功能单位 (如单位产量、单位产出、单位面积等) 下的 GHG 和活性氮总量^[9, 30]。鉴于本研究是不同施氮量试验, 以单位面积为功能单位时, 必得出施氮量越大, CF 和 NF 越大的结果, 指向不施氮是最好的措施, 忽略了施氮可增加产出的作用, 与现实不

符。因此,本研究采用单位产量和单位产出作为功能单位进行综合评价。

① CF。不同处理的单位产量碳足迹(CF_y, 单位: kg/kg)和单位经济效益碳足迹(CF_e, 单位: kg/万元)分别采用以下公式计算^[31-32]:

$$CF_y = (NPP + C_{import} - NPP_{output} - CH_4 - R_h - N_2O - C_{input}) / Y_f \quad (4)$$

$$CF_e = (NPP + C_{import} - NPP_{output} - CH_4 - R_h - N_2O - C_{input}) / Y_e \quad (5)$$

式中, NPP 为净初级生产力(net primary productivity, NPP), 试验期间作物的累计生物量; C_{import} 为投入系统的有机物, 本研究无投入有机物; NPP_{output} 为输出系统的有机物, 本研究指收获后移出系统的五指毛桃, 橡胶无生物量移出, 生物量的含碳量按 40% 计, 44/12 为折算成 CO₂ 的系数; CH₄、 R_h 和 N₂O 分别指土壤排放的 CH₄、土壤异养呼吸和 N₂O, 其中, 因旱地 CH₄ 极少, 本研究忽略, R_h 根据吴志祥^[33]的研究进行估算, N₂O 排放则参照张强等^[34]根据 IPCC 推荐的参数法进行修正的结果, 以 N 肥投入量的 1.05% 计算, N₂O 转换为 CO₂ 当量的系数为 44/28×296; C_{input} 则为投入物资的生产制造过程产生的 CO₂ 排放, 根据投入量和表 1 的 CO₂ 排放参数进行计算; Y_f 和 Y_e 分别为不同处理的鲜质量产量(单位: kg/hm²)和经济效益(单位: 万元/hm²)。

② NF。不同处理的单位产量氮足迹(NF_y, 单位: g/kg)和单位经济效益氮足迹(NF_e, 单位:

kg/万元)分别采用以下公式计算^[29-30]:

$$NF_y = (N_{leach} + N_{NH_3} + N_{N_2O} + N_{indirect}) / Y_f \quad (6)$$

$$NF_e = (N_{leach} + N_{NH_3} + N_{N_2O} + N_{indirect}) / Y_e \quad (7)$$

式中, N_{leach} 为投入氮肥的淋洗量, 参照王大鹏等^[35]对施氮后土壤淋洗量的研究, 按施氮量的 2.23% 计; N-NH₃ 为投入氮肥的 NH₃ 挥发量, 参照王大鹏等^[36]对不同施氮量的 NH₃ 挥发研究, 按施氮量的 28.19% 计; N-N₂O 为氮肥通过 N₂O 形式损失的氮, 参照张强等^[34]的研究, 以施氮量的 1.05% 计算; $N_{indirect}$ 为投入物资生产制造过程产生的氮损失, 根据投入量和表 1 的氮损失参数进行计算; Y_f 和 Y_e 分别为不同处理的鲜质量产量(单位: kg/hm²)和经济效益(单位: 万元/hm²)。

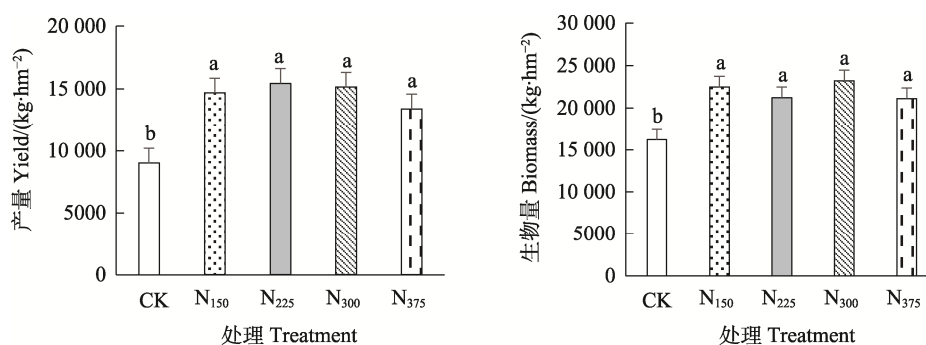
1.3 数据处理

采用 Microsoft office 2016 软件进行数据处理和图表制作, 采用 DPS 9.50 软件在 $P < 0.05$ 水平下进行方差分析(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量对五指毛桃生产力的影响

由图 3 可知, 施氮可显著提高五指毛桃的产量和生物量。与 CK 产量(9025 kg/hm²)相比, 4 个施氮处理的产量(13 415~15 438 kg/hm²)均显著提高($P < 0.05$), 产量增幅为 48.6% 以上。4 个施氮处理的生物量(21 121~23 233 kg/hm²)均较 CK(16 193 kg/hm²)显著提高($P < 0.05$), 生物量增幅为 30.4% 以上。不同施氮处理产量和生物量之间均差异不显著。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同施氮处理五指毛桃产量和生物量差异

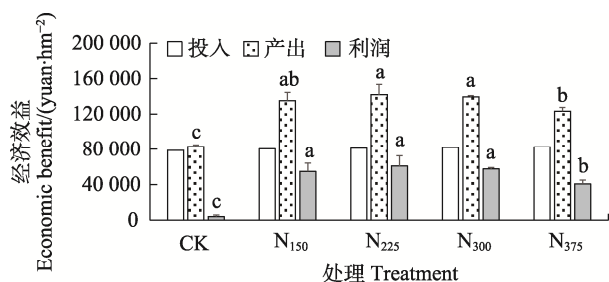
Fig. 3 Differences in yield and biomass of *F. hirta* Vahl. under different nitrogen application treatments

由图 4 可知, 施氮处理均显著提高间作五指毛桃的利润。CK 与施氮处理的投入成本为 97 206~100 223 元/hm², 差异很小, 但产出差异

较大, CK 产出为 82 110 元/hm²; 其利润仅为 4205 元/hm², 而 4 个施氮处理产出(123 414~142 025 元/hm²)大幅提高, 显著高于 CK; 其利

润(40839~60950元/hm²)亦显著增加($P<0.05$)。4个施氮处理中, N₃₇₅处理的产出与 N₁₅₀处理差异不显著, 但显著低于 N₂₂₅和 N₃₀₀处理; 在利润方面, N₃₇₅处理显著低于其他3个施氮处理($P<0.05$)。综合产出和利润表现, N₂₂₅和 N₃₀₀处理表现最好。

综上所述, 综合分析产量、生物量和经济效益, N₂₂₅和 N₃₀₀处理的生产力表现最佳。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 4 不同施氮处理五指毛桃的经济效益

Fig. 4 Economic benefits of *F. hirta* Vahl. under different nitrogen application treatments

2.2 光照和根分布

由图 5 可知, 胶园中间作五指毛桃区域的光照较充足。受太阳高度角影响, 在夏至时期, 间作小区两侧的光照时长不同, 表现为 N-5 (6.9 h) 小于 S-5 (11.2 h), 而 S-5 则与 CK (11.8 h) 相当。而在春分时期, 间作区不同位置光照时长基本相同 (9.3~10.1 h), 且与 CK (11.6 h) 接近。整体来看, 间作五指毛桃小区光照时长总体上略短于 CK, 光照仍较充足。

在根系分布方面 (图 6), 距树 3 m 处, 橡胶树根质量密度为 161.5~448.4 g/m³, 其中 CK 显著

高于 N₁₅₀、N₂₂₅、N₃₀₀ 处理 ($P<0.05$), 而五指毛桃根系则几乎未检测到 (0.29~4.87 g/m³)。距树 4 m 处, 橡胶树根系则明显减少 (24.2~43.5 g/m³), 且不同处理之间差异不显著; 而五指毛桃根系则明显增加 (43.9~307.3 g/m³), 其中 CK 与 4 个施氮处理之间差异不显著, 而 N₁₅₀、N₂₂₅ 与 N₃₇₅ 处理之间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同施氮量五指毛桃总氮吸收量

不同处理五指毛桃的含氮量差异较小 (0.69%~0.79%), 因此不同处理五指毛桃氮吸收量的变化趋势与生物量高度一致, 地上和地下部分氮吸收量分别为 85.3~114.9、32.5~61.4 kg/hm² (图 7)。其中, CK 的地下部分氮吸收量 (32.5 kg/hm²) 显著低于施氮处理 (53.2~61.4 kg/hm²), 而各处理地上部分氮吸收量则差异不显著。与 CK (117.8 kg/hm²) 相比, 不同施氮处理的氮吸收量增加 38.5~49.5 kg/hm², 达到 156.3~174.0 kg/hm², 但仅 N₃₀₀ 处理显著高于 CK ($P<0.05$)。所有处理中, CK 和 N₁₅₀ (167.3 kg/hm²) 处理氮供给低于氮吸收。

2.4 不同施氮量对间作五指毛桃资源利用率的影响

不同处理的 SUE、PEPN 和 CE 差异如图 8 所示, 与 CK 相比, 施氮处理的 SUE (0.18%~0.20%) 显著提高, 增幅为 59.0%~76.9%, 但不同施氮处理之间差异不显著。随着施氮量增加, 4 个施氮处理的 PFNP (17.9~49.0 kg/kg N) 呈降低趋势, 且各处理之间均差异显著 ($P<0.05$)。施氮处理显著降低了 CE, 与 CK 处理 (40.3 kg/kg) 相比, 4 个施氮处理的 CE 为 10.6~21.7 kg/kg, 其中 N₁₅₀ 处理最高, 且与其他 3 个施氮处理差异显著 ($P<0.05$)。

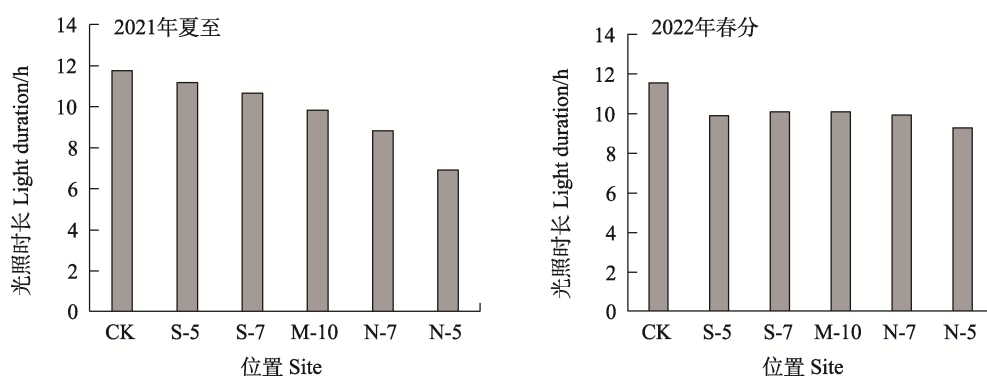
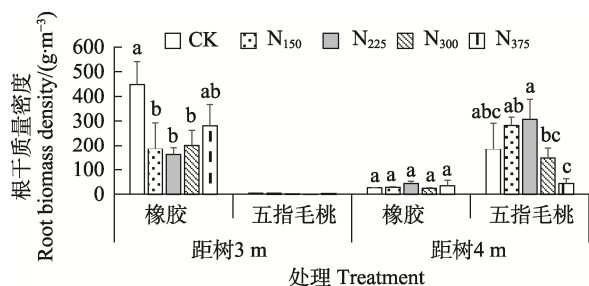


图 5 不同季节不同位置光照时长

Fig. 5 Light duration at different sites during various seasons

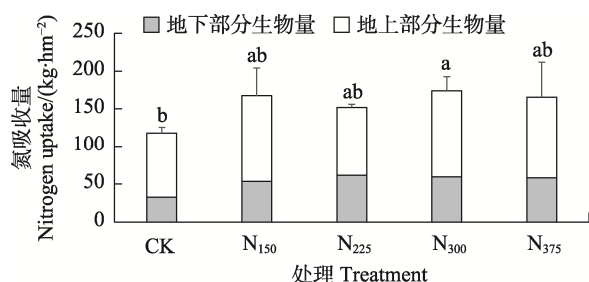


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图6 “橡胶-五指毛桃”系统根系分布

Fig. 6 Root distribution in the “rubber-*F. hirta* Vahl.” agroforestry system



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图7 不同施氮处理五指毛桃植株氮含量差异

Fig. 7 Nitrogen uptake of *F. hirta* Vahl. under different nitrogen application treatments

综上所述,就 PFPN 和 CE 而言,施氮处理中 N₁₅₀ 处理最高,在 SUE 上则与其他施氮处理无显著差异,表明 N₁₅₀ 处理的综合资源利用率表现最佳,其次是 N₂₂₅ 处理。

2.5 不同施氮量对间作五指毛桃氮和碳足迹的影响

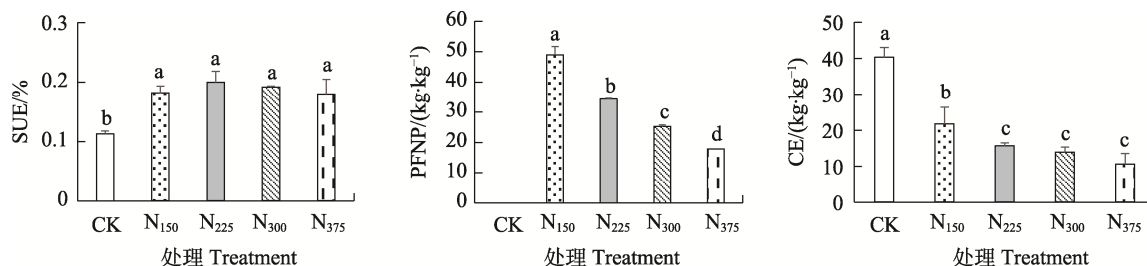
由图 9 可知,不同处理的不同功能单位下的 NF 变化趋势不同。在 NFy 角度下,CK 处理 (0.20 g/kg) 表现最好,施氮处理则显著提高

NFy, 且随着施氮量的增加而显著增加 (3.61~9.65 g/kg); 不同处理的 NFe (4.8~31.9 kg/万元) 变化趋势与 NFy 一致,除 N₁₅₀ 和 N₂₂₅ 处理外,不同处理间均差异显著 ($P<0.05$)。综合而言,CK 处理的 NF 表现最好, N₁₅₀ 处理次之。

不同处理不同功能单位下的 CF 变化趋势亦不同。在 CFy 角度下,随着施氮量的增加,CFy 呈增加趋势,与 CK 处理相比 (590 g/kg), N₁₅₀ 处理的表现最好 (623 g/kg), 未显著增加 CFy, 而 N₂₂₅、N₃₀₀ 和 N₃₇₅ 处理则显著提高; 不同处理的 CFe 则表现为 CK 处理 (13 878 kg/万元) 显著高于 4 个施氮处理 (1701~3656 kg/万元), 且不同施氮处理间差异不显著。综合而言, N₁₅₀ 处理的 CF 表现最好, N₂₂₅ 处理次之。

3 讨论

近十年来,胶价长期低迷,维持在 12~14 元/kg 之间,产值约为 8000~10 000 元/hm², 种植效益低下。保持种植面积与更新老残胶园以维持橡胶供应潜力是国内共识,但植胶者更新老残胶园后再植橡胶的意愿不强^[37-39]。因此,通过复合种植提升综合产出成为重要应对措施,可在维持植胶面积的同时增加额外收入。五指毛桃常生于疏林中,具一定耐阴性,可作为农林复合系统的配套间作物,例如,五指毛桃在马尾松林间作产量可达 10 800~18 220 kg/hm²^[40-41],在桉树林(树高约 18 m, 密度 1100 株/hm²)间作,株产为 1.25~1.71 kg/株^[42]。本研究的产量为 13 415~15 438 kg/hm², 与前述研究结果接近。常规胶园(行距 7 m)通常在定植后前 3 a 较适宜间作,本研究选用宽窄行种植模式胶园(宽行行距 20 m),更适宜间作^[43],当前处于幼龄阶段(5~7 a),光照较充足,且橡胶树根系对间作区域的影响小,此条件下间作五指毛



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图8 不同施氮处理间作五指毛桃的光能利用率 (SUE)、氮肥偏生产力 (PFNP) 和碳效率 (CE) 差异

Fig. 8 Solar utilization efficiency (SUE), partial factor productivity from applied nitrogen (PFNP), and carbon efficiency (CE) of *F. hirta* Vahl. under different nitrogen application treatments

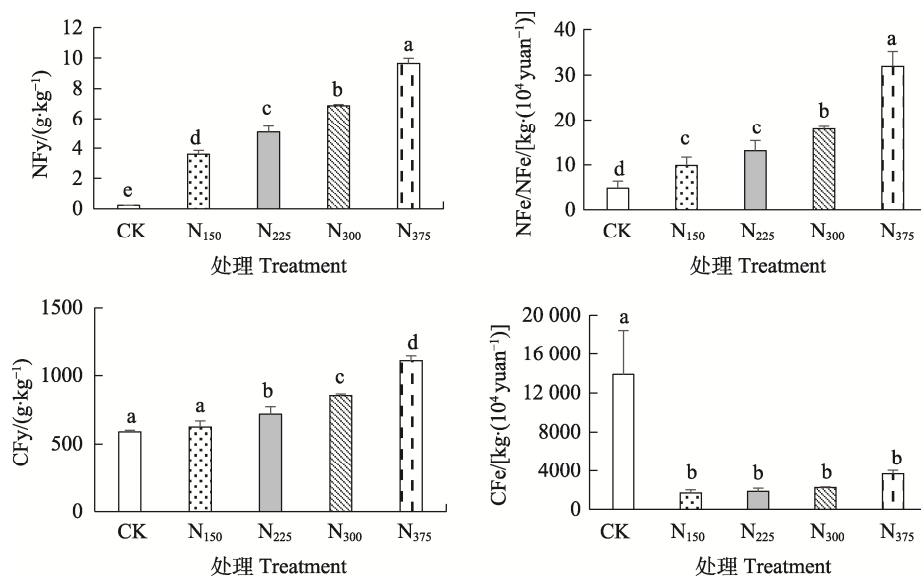


图 9 不同施氮处理间作五指毛桃的氮足迹 (NF) 和碳足迹 (CF) 差异

Fig. 9 Carbon and nitrogen footprint of *F. hirta* Vahl. under different nitrogen application treatments

桃的产量显著高于成龄常规胶园^[19], 可获得可观额外经济效益 (40 839~60 950 元/hm²)。以上结果表明, 在选用适宜胶园类型的前提下, “橡胶-五指毛桃”是一种可行的橡胶复合种植模式。氮是影响作物生物量的首要养分, 施氮有利于生物量积累^[22, 44-45]。本研究得出类似结论, 4 个施氮处理均显著提高了五指毛桃产量与生物量, 产值与利润亦显著提高, 其中 N₂₂₅ 和 N₃₀₀ 处理的产值增幅最大。结合经济效益分析, N₂₂₅ 和 N₃₀₀ 处理是最佳的施氮措施。

因作物类型不同, 其资源利用率亦存在差异。本研究中五指毛桃的 SUE 为 0.11%~0.20%, 低于玉米 (1.14%~2.13%)、小麦 (0.43%~0.52%) 和水稻 (0.63%~0.67%) 等作物^[27, 46]; 五指毛桃的 CE 为 10.6~40.3 kg/kg, 而棉花、小麦和玉米的 CE 则为 3.0~11.0 kg/kg^[47], 通常情况下, 作物产量越高, 其 SUE 越高, 施氮通常能提高 SUE, 然而较高的施氮量会降低 PFPN 和 CE。综合各个资源利用率指标, 本研究得出 N₁₅₀ 处理为适宜的施氮措施, N₂₂₅ 处理次之。尽管氮肥对增产起到重要作用, 但通常亦是造成生态环境压力的主要因素^[9, 48]。本研究中, 随着氮肥投入增加, 其 CF 和 NF 均显著下降, N₁₅₀ 处理的生态足迹表现最佳, N₂₂₅ 处理次之。因此, 结合资源利用率和生态足迹分析, N₁₅₀ 处理是最佳的施氮措施, N₂₂₅ 处理次之。

通常情况下, 作物的氮肥利用率在 30%~35% 之间, 其余的氮流向为土壤残留和损失。例如,

“麦-玉”轮作系统的周年氮损失率可达到 34.50%~47.0%^[49-50]。可持续的农业种植系统离不开氮素投入和输出的平衡。本研究中, N₀ 和 N₁₅₀ 处理植株吸收的氮分别达到 117.8、167.3 kg/hm², 总氮投入量低于吸收量 (本研究中秸秆未还田), 不利于种植系统的可持续发展。在海南地区的砖红壤, 施氮后 2 年的土壤残留比例为 22%~33%^[51], 约 35% 的氮可通过氨挥发、淋洗、N₂O 排放等途径损失^[34-36]。本研究中, 尽管 N₁₅₀ 处理的综合生态效益最佳, 但从氮素平衡的角度, 仍需投入相对较高的氮肥进行维持。

因此, 综合考虑生产力和氮素供给的可持续性, 本研究认为五指毛桃适宜的施氮量为 225 kg/hm², 是构建高效生态的“橡胶-五指毛桃”模式的合理措施。因五指毛桃地上部分的含氮量为 85.3~114.9 kg/hm², 在种植措施上建议将五指毛桃秸秆进行还田, 进一步提升其生态效益并适当降低化学氮的投入量。

参考文献

- [1] YANG B J, LI M X, HU L Q, LIU N, HUANG G Q. Comparison of resource utilization efficiency and comprehensive benefits among different multiple cropping rotation patterns in the middle reaches of Yangtze river[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(9): 1501-1510.
- [2] FURBANK R T, JIMENEZ BERNI J A, GEORGE JAEGGLI B, POTGIETER A B, DEERY D M. Field crop phenomics: enabling breeding for radiation use efficiency

- and biomass in cereal crops[J]. *New Phytologist*, 2019, 223(4): 1714-1727.
- [3] QIAN X, ZHOU J, LUO B, DAI H, HU Y, REN C, PEIXOTO L, GUO L, WANG C, ZAMANIAN K, ZHAO B, ZANG H, ZENG Z. Yield advantage and carbon footprint of oat/sunflower relay strip intercropping depending on nitrogen fertilization[J]. *Plant and Soil*, 2022, 481(1/2): 581-594.
- [4] CHENG Y, DAI X, REN H, WANG Y, LIU P, HE M. Precision double cropping synergistically improves wheat and maize yields as well as resource efficiency[J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(2): 1035-1048.
- [5] 杨博文, 梁修仁, 秦明广, 曹英健, 航熊, 茗展. 基于能量效率与碳效率的长江中游不同水旱轮作系统可持续性分析[J]. *作物学报*, 2024, 50(11): 2801-2817.
- YANG B W, LIANG X R, QIN M G, CAO Y J, HANG X, MING Z. Sustainability analysis of different upland-paddy rotation systems in the middle reaches of the Yangtze River based on energy efficiency and carbon efficiency[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(11): 2801-2817. (in Chinese)
- [6] RAZA M A, GUL H, WANG J, YASIN H S, QIN R, BIN KHALID M H, NAEEM M, FENG L Y, IQBAL N, GITARI H, AHMAD S, BATTAGLIA M, ANSAR M, YANG F, YANG W. Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: a case study in punjab province, pakistan[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 308: 127282.
- [7] BAKER J M, GRIFFIS T J. Examining strategies to improve the carbon balance of corn or soybean agriculture using eddy covariance and mass balance techniques[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128(3/4): 163-177.
- [8] KOCHSIEK A E, KNOPS J M H, WALTERS D T, ARKEBAUER T J. Impacts of management on decomposition and the litter-carbon balance in irrigated and rainfed no-till agricultural systems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1983-1993.
- [9] HUANG J, CHEN Y, PAN J, LIU W, YANG G, XIAO X, ZHENG H, TANG W, TANG H, ZHOU L. Carbon footprint of different agricultural systems in China estimated by different evaluation metrics[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 939-948.
- [10] 庞茹月, 王明辉, 孔洁, 李宁, 王铭伦, 邹晓霞. 湖北省不同花生轮作种植体系碳氮足迹[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3997-4003.
- PANG R Y, WANG M H, KONG J, LI N, WANG M L, ZOU X X. Carbon and nitrogen footprint of different peanut rotation systems in Hubei province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3997-4003. (in Chinese)
- [11] HUANG J, PAN J, WEI Y, DONG T, ZHANG X, TU H, WANG X. Yield performance of intercropped *Marantha arundinacea* L. (arrowroot) in two rubber plantation designs[J]. *Agronomy-Basel*, 2023, 13(11): 2754.
- [12] 黄坚雄, 潘剑, 周立军, 陈俊明, 李娟, 郑定华, 林位夫. 全周期间作模式胶园内间作豆薯的产量及其抗逆生理的特征[J]. *热带作物学报*, 2015, 36(4): 639-644.
- HUANG J X, PAN J, ZHOU L J, CHEN J M, LI J, ZHENG D H, LIN W F. Characteristic of yield and physiology of stress tolerance of yam bean intercropped in rubber plantation with paired row planting system[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2015, 36(4): 639-644. (in Chinese)
- [13] XIAN Y R, LI J L, ZHANG Y, SHEN Y Y, WANG X Q, HUANG J X, SUI P. Determining suitable sampling times for soil CO₂ and N₂O emissions helps to accurately evaluate the ability of rubber-based agroforestry systems to cope with climate stress[J]. *Forests*, 2024, 15(6): 950.
- [14] MUTHURI C W, KUYAH S, NJENGA M, KURIA A, ÖBORN I, VAN NOORDWIJK M, SVERIGES L. Agroforestry's contribution to livelihoods and carbon sequestration in east africa: a systematic review[J]. *Trees, Forests and People* (Online), 2023, 14: 100432.
- [15] HOND VACCARO C, SIX J, SCHÖB C. How do different functional crop groups perform in temperate silvoarable agroforestry systems? A swiss case study[J]. *Journal of sustainable agriculture and environment*, 2023, 2(2): 157-167.
- [16] HUANG J, PAN J, ZHOU L, ZHENG D, YUAN S, CHEN J, LI J, GUI Q, LIN W. An improved double-row rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation system increases land use efficiency by allowing intercropping with yam bean, common bean, soybean, peanut, and coffee: a 17-year case study on hainan island, china[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121493.
- [17] CHENG J, YI X, WANG Y, HUANG X, HE X. Phenolics from the roots of hairy fig (*Ficus hirta* vahl.) exert prominent anti-inflammatory activity[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 31: 79-88.
- [18] LU Y, CHEN J L, CHEN B, LIU Q Q, ZHANG H L, YANG L Y, CHAO Z, TIAN E W. High genetic diversity and low population differentiation of a medical plant *Ficus hirta* vahl., uncovered by microsatellite loci: implications for conservation and breeding[J]. *BMC Plant Biology*, 2022, 22(1): 334.
- [19] 李娟, 王秀全. 成龄胶园间作五指毛桃施肥量的研究[J]. *中国热带农业*, 2020(6): 73-76.
- LI J, WANG X Q. Study on the fertilizing amount applied to *Ficus hirta* Vahl. intercropping in the mature rubber plantations[J]. *China Tropical Agriculture*, 2020(6): 73-76. (in Chinese)

- [20] PAN J, ZENG X, TIAN Z, ZHANG Y, XIAN Y, TU H, HUANG J, WANG X. Rubber-*Ficus hirta* vahl. Agroforestry system enhances productivity, resource utilization efficiency, and reduces carbon footprint[J]. Agriculture, 2025, 15: 1750.
- [21] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(4): 783-795. (in Chinese)
- [22] 田志刚, 刘志增, 田俊芹, 李林英, 曹治彦, 张耀辉. 氮肥追施量和比例对夏玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 122-126.
TIAN Z G, LIU Z Z, TIAN J Q, LI L Y, CAO Z Y, ZHANG Y H. Effect of N fertilizer rate applied and its ratio on yield of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(3): 122-126. (in Chinese)
- [23] TOFA A I, KAMARA A Y, ALIYU K T, GARBA I I, OMOIGUI L O, BEBELEY J F, SOLOMON R, PETER-JEROME H, KOFARMATA A H. Modelling the response of maize to nitrogen rates and planting windows in the semi-arid savannas of nigeria[J]. Field Crops Research, 2025, 333: 110079.
- [24] 侯相成, 李涵, 董思奇, 于清军, 冯国忠, 李晓宇, 高强. 东北地区玉米种植系统碳足迹及氮足迹研究[J]. 吉林农业大学学报, 2024, 46(5): 911-922.
HOU X C, LI H, DONG S Q, YU Q J, FENG G Z, LI X Y, GAO Q. Carbon footprint and nitrogen footprint of maize planting system in Northeast China[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2024, 46(5): 911-922. (in Chinese)
- [25] 张晓钰, 郝凤明, 尹岩, 王娇月, 邴龙飞, 胡琴琴. 东北三省种植业碳氮足迹的时空特征及驱动因素[J]. 土壤通报, 2025, 56(2): 310-321.
ZHANG X Y, XI F M, YIN Y, WANG J Y, BING L F, HU Q Q. Spatial and temporal characteristics and drivers of plantation carbon and nitrogen footprints in the three north-eastern provinces of China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(2): 310-321. (in Chinese)
- [26] 王桂花, 吴敏, 王大鹏, 韦家少, 吴炳孙, 吴文冠, 陈志坚, 董荣书. 橡胶-豆科间作对植株生长和氮吸收的影响[J]. 热带农业科学, 2021, 41(6): 16-22.
WANG G H, WU M, WANG D P, WEI J S, WU B S, WU W G, CHEN Z J, DONG R S. Effects of plant growth and nitrogen absorption in the rubber-legume crops intercropping system[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(6): 16-22. (in Chinese)
- [27] 任永福, 李嘉怡, 陈国鹏, 蒲甜, 陈虹, 王小春. 不同栽培管理模式对带状套作玉米产量与效率的影响[J]. 作物杂志, 2025(2): 101-108.
REN Y F, LI J Y, CHEN G P, PU T, CHEN H, WANG X C. Effects of different planting patterns on the yield and efficiency of maize in strip intercropping system[J]. Crops, 2025(2): 101-108. (in Chinese)
- [28] HU H, CHEN Y, ZHANG L, LAI J, CHEN K, XIE Y, WANG X. Effects of different nitrogen substitution practices on nitrogen utilization, surplus, and footprint in the sweet maize cropping system in south china[J]. Agriculture-Basel, 2025, 15(8): 800.
- [29] 刘世举. 控释尿素与普通尿素配施对麦玉复种体系作物生产力和环境经济效益的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
LIU S J. The effects of combined application of controlled-release urea and normal urea on crop productivity and environmental economic benefits in the wheat and maize double cropping system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025. (in Chinese)
- [30] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 方福平. 基于农户调查的长江流域双季稻生产碳、氮足迹分析: 以江西和湖南为例[J]. 作物杂志, 2023(2): 229-237.
CHEN Z D, XU C C, JI L, FANG F P. Carbon and nitrogen footprints of double rice production in yangtze river based on farm survey data: a case study of Jiangxi and Hunan[J]. Crops, 2023(2): 229-237. (in Chinese)
- [31] CHEN D, WANG C, LI Y, LIU X, WANG Y, QIN J, WU J. Effects of land-use conversion from masson pine forests to tea plantations on net ecosystem carbon and greenhouse gas budgets[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 320: 107578.
- [32] MORI A. Farmyard manure application and associated root proliferation improve the net greenhouse gas balance of italian ryegrass - maize double-cropping field in Nasu, Japan[J]. Science of the Total Environment, 2021, 792: 148332.
- [33] 吴志祥. 海南岛橡胶林生态系统碳平衡研究[D]. 海口: 海南大学, 2013.
WU Z X. Carbon balance of the rubber plantation ecosystem in Hainan Island[D]. Haikou: Hainan University, 2013. (in Chinese)
- [34] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N₂O 排放量重新估算[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 7-13.
ZHANG Q, JU X T, ZHANG F S. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 7-13. (in Chinese)
- [35] 王大鹏, 马照娜, 吴敏, 韦家少, 张先, 王桂花, 詹杉, 茶正早. 橡胶林氮肥穴施下的氨挥发和氮淋洗损失[J]. 热带

- 作物学报, 2022, 43(7): 1393-1400.
- WANG D P, MA Z N, WU M, WEI J S, ZHANG X, WANG G H, ZHAN S, CHA Z Z. Ammonia volatilization and nitrogen leaching under specific cave-applied nitrogen fertilization of rubber plantation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(7): 1393-1400. (in Chinese)
- [36] 王大鹏, 杜玉赫, 罗雪花, 王文斌, 张永发, 薛欣欣, 赵春梅, 吴小平, 茶正早. 橡胶林下砖红壤不同氮肥处理氨挥发特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(4): 685-691.
- WANG D P, DU Y H, LUO X H, WANG W B, ZHANG Y F, XUE X X, ZHAO C M, WU X P, CHA Z Z. Characteristics of ammonia volatilization under different nitrogen managements in red latosol of rubber plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(4): 685-691. (in Chinese)
- [37] 何长辉, 刘锐金. 天然橡胶价格保险保障水平: 现状、问题和建议[J]. 热带农业科学, 2023, 43(11): 119-127.
- HE C H, LIU R J. The natural rubber price insurance's security level: status, problems and suggestions[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2023, 43(11): 119-127. (in Chinese)
- [38] 刘锐金, 伍薇, 何长辉. 橡胶种植户对价格低迷的反应——意愿表达与行为选择[J]. 林业经济问题, 2018, 38(4): 55-63, 107.
- LIU R J, WU W, HE C H. Study on the response of rubber growers to low prices: willingness expression and behavior choice[J]. Issues of Forestry Economics, 2018, 38(4): 55-63, 107. (in Chinese)
- [39] 黄坚雄, 魏元驹, 董天站, 潘剑, 王秀全. 不同类型橡胶园间作对竹芋生产力、经济效益和净温室气体排放的影响[J]. 西南农业学报, 2024, 37(6): 1239-1246.
- HUANG J X, WEI Y X, DONG T Z, PAN J, WANG X Q. Effect of intercropping in different rubber plantations on productivity, economical benefit and net greenhouse gases emission of arrowroot[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(6): 1239-1246. (in Chinese)
- [40] 陈英之, 李良波, 甘凤琼, 黄荣韶. 马尾松林下种植五指毛桃的生长评价[J]. 湖南农业科学, 2020(9): 60-64.
- CHEN Y Z, LI L B, GAN F Q, HUANG R S. Growth evaluation of *Ficus hirta* vahl planted under pinus massoniana forest[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2020(9): 60-64. (in Chinese)
- [41] 田茂秀, 高雅莉, 岑小妹, 田茂靖, 黄国旅, 莫子洪, 兰文明, 吴丽娜. 马尾松林下种植五指毛桃的生长性状及最佳采收期研究[J]. 绿色科技, 2023, 25(3): 119-123.
- TIAN M X, GAO Y L, CEN X M, TIAN M J, HUANG G L, MO Z H, LAN W M, WU L N. Study on the growth characters and the best harvest time of *Ficus simplicissima* Lour planted under *Pinus massoniana* Lamb. forest[J]. Journal of Green Science and technology, 2023, 25(3): 119-123. (in Chinese)
- [42] 郑俊强, 许冰, 沈茂芬. 桉树林下保留不同密度五指毛桃营造复层林效果分析[J]. 桉树科技, 2025, 42(1): 37-40.
- ZHENG J Q, XU B, SHEN M F. Analysis of effect of retaining different densities of *Ficus hirta* under eucalyptus plantations to create multi-layered forest[J]. Eucalypt Science & Technology, 2025, 42(1): 37-40. (in Chinese)
- [43] 黄坚雄, 潘剑, 周立军, 陈俊明, 李娟, 郑定华, 袁淑娜, 林位夫. 全周期间作模式胶园中间作大豆和玉米的生产力及其抗逆生理特性[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 57-65.
- HUANG J X, PAN J, ZHOU L J, CHEN J M, LI J, ZHENG D H, YUAN S N, LIN W F. Productivity and physiology of stress tolerance of soybean and maize intercropping in rubber plantation with paired row planting system[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(5): 57-65. (in Chinese)
- [44] 倪玉琼, 张强, 曹方琴, 杨琳. 不同施氮量对高粱产量及植株养分积累的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 95-99.
- NI Y Q, ZHANG Q, CAO F Q, YANG L. Effect of different nitrogen concentrations on sorghum bicolor yield and nutrient accumulation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(5): 95-99. (in Chinese)
- [45] 蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌. 华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 503-510.
- CAI Y Y, WANG R Q, WANG L L, LIU H F, YANG D L, TAN B C. Effects of nitrogen amount and fertilization patterns on crop yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(4): 503-510. (in Chinese)
- [46] 陈天晔, 袁嘉琦, 刘艳阳, 许轲, 郭保卫, 戴其根, 霍中洋, 张洪程, 李国辉, 魏海燕. 江淮下游不同播期对稻-麦周年作物产量、品质及温光资源利用的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(10): 1566-1578.
- CHEN T Y, YUAN J Q, LIU Y Y, XU K, GUO B W, DAI Q G, HUO Z Y, ZHANG H C, LI G H, WEI H Y. Effects of different sowing dates on crop yield, quality, and annual light-temperature resources utilization for rice-wheat double cropping system in the lower reaches of the Yangtze-Huaihe Rivers valley[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(10): 1566-1578. (in Chinese)
- [47] 杨璐, 乐凯迪, 张立杰. “双碳”目标下新疆主要农作物生产碳足迹[J]. 应用生态学报, 2025, 36(4): 1147-1158.
- YANG L, LE K D, ZHANG L J. Carbon footprint of major crop production under the goal of 'double carbon' in Xin-

- jiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(4): 1147-1158. (in Chinese)
- [48] 杨林生, 习敏, 涂德宝, 李忠, 周永进, 许有尊, 孙雪原, 吴文革. 长江三角洲地区主要类型水稻生产资源投入及碳、氮足迹评估[J]. 作物杂志, 2025(4): 150-156.
YANG L S, XI M, TU D B, LI Z, ZHOU Y J, XU Y Z, SUN X Y, WU W G. Assessment of resource input and carbon, nitrogen footprint for major types of rice in Yangtze river delta region[J]. Crops, 2025(4): 150-156. (in Chinese)
- [49] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 陈新平, 张福锁, 毛达如. 水氮优化条件下在华北平原冬小麦/夏玉米轮作中化肥氮的去向[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 334-340, 307.
PAN J R, JU X T, LIU X J, CHEN X P, ZHANG F S, MAO D R. Fate of fertilizer nitrogen for winter wheat/summer maize rotation in North China Plain under optimization of irrigation and fertilization[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, 23(2): 334-340, 307. (in Chinese)
- [50] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197.
JU X T, ZHANG F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(2): 192-197. (in Chinese)
- [51] 詹杉, 马照娜, 王桂花, 林琛茗, 吴敏, 茶正早, 王大鹏. 施氮与添加碳源对橡胶林土壤氮肥残留的影响[J]. 热带作物学报, 2025, 46(5): 1268-1277.
ZHAN S, MA Z N, WANG G H, LIN C M, WU M, CHA Z Z, WANG D P. Effects of nitrogen application and carbon addition on soil residual nitrogen in rubber plantation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2025, 46(5): 1268-1277. (in Chinese)