

卢明,王帅,王洋,等.优化施肥下种植绿肥对青花椒生产增效减排的影响[J].环境工程技术学报,2024,14(5):1494-1503.

LU M,WANG S,WANG Y,et al.Effects of planting green manure on the production efficiency and environmental benefit of *Zanthoxylum armatum* v. *novemfolius* based on optimized fertilization[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(5): 1494-1503.

优化施肥下种植绿肥对青花椒生产增效减排的影响

卢明¹,王帅¹,王洋²,李志琦²,罗博²,梁涛³,方林发⁴,赵敬坤^{1*},王洁⁴

1.重庆市农业技术推广总站

2.重庆市江津区农业技术推广中心

3.重庆市农业科学院

4.西南大学资源环境学院/长江经济带农业绿色发展研究中心

摘要 发展现代绿肥可有效引导我国农业绿色发展,探究优化施肥下种植绿肥对重庆青花椒高产高效、绿色低碳生产意义重大。2021—2022年在重庆市江津区开展田间试验,以九叶青花椒为试材,对比研究椒农常规管理和优化施肥下种植绿肥对青花椒产量、年生长干物质累积量及品质、绿肥生物量及养分累积量、椒园土壤化学性质、经济效益和生态效益的影响。结果表明:较常规管理,优化施肥下种植绿肥显著提高椒园土壤有机质、碱解氮、有效磷含量,种植光叶苕子、箭筈豌豆、白三叶和紫云英分别显著提高青花椒产量51.2%、17.3%、4.52%和4.03%,并可提高青花椒麻味物质浓度10.7%~24.6%、挥发性芳香油含量10.7%~22.7%,其中光叶苕子和箭筈豌豆处理下椒园实现增收3871~21968元/hm²;环境效应评价结果显示,种植绿肥明显降低椒园年生产周期活性氮损失13.8%(氮足迹17.0%~42.9%)和温室气体排放量12.7%(碳足迹16.2%~42.2%)。基于青花椒产量、品质综合效应、经济效益和生态效益等多指标综合分析,优化施肥下种植光叶苕子或箭筈豌豆是保障重庆青花椒优质高产高效、绿色低碳生产的适宜模式。

关键词 九叶青花椒;绿肥;优化施肥;高产优质;增效减排

中图分类号:X82,S142 文章编号:1674-991X(2024)05-1494-10 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20240270

Effects of planting green manure on the production efficiency and environmental benefit of *Zanthoxylum armatum* v. *novemfolius* based on optimized fertilization

LU Ming¹, WANG Shuai¹, WANG Yang², LI Zhiqi², LUO Bo², LIANG Tao³, FANG Linfa⁴,
ZHAO Jingkun^{1*}, WANG Jie⁴

1.Chongqing Agro-Tech Extension Station

2.Chongqing Jiangjin Agro-Tech Extension Center

3.Chongqing Academy of Agriculture Science

4.College of Resources and Environment/Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in the Yangtze River Basin, Southwest University

Abstract The development of modern green manure is one of the effective approaches to guide the green development of agriculture in China. It is of great significance to explore the effect of planting green manure on the high yield, high efficiency, and green low-carbon production of Chinese prickly ash in Chongqing municipality based on optimized fertilization. Using *Zanthoxylum armatum* v. *novemfolius* as test material, a field experiment was conducted from 2021 to 2022 in Jiangjin County, Chongqing, to investigate and compare the effects of farmers' conventional management and planting green manure under optimized fertilization on the yield, net above-biomass accumulation and quality of Chinese prickly ash, aboveground biomass and nutrients accumulation of green manure, soil chemistry, and economic benefit and environmental costs of Chinese prickly ash. The results showed that compared with conventional planting management, the contents of soil organic matter, alkali-hydrolyzed nitrogen and available phosphorus were significantly increased by planting green manure based on the optimized fertilization.

收稿日期:2024-04-30

基金项目:重庆市农业技术推广总站化肥定额施用配套技术集成示范重点项目

作者简介:卢明(1991—),男,博士,主要从事养分资源管理与化肥减量增效技术研究, xiaomeinv0324@163.com

* 责任作者:赵敬坤(1983—),男,高级农艺师,主要从事土壤肥料技术应用推广研究, 155100901@qq.com

Planting *Vicia villosa* Roth, *Vicia sativa* L., *Trifolium dubium* Sibth., *Astragalus sinicus* L. increased the yields of Chinese prickly ash by 51.2%, 17.3%, 4.52% and 4.03%; the concentrations of fruit numb-taste components and volatile aromatic oil were significantly increased by 10.7%-24.6% and 10.7%-22.7%, respectively. The net income increased by 3 871-21 968 yuan/hm² as affected by planting *Vicia villosa* Roth and *Vicia sativa* L. Environmental cost analysis showed that planting green manure based on the optimized fertilization could obviously reduce the active nitrogen loss and N footprint by 13.8% and 17.0%-42.9%, respectively, meanwhile reduce the greenhouse gas emission and C footprint by 12.7% and 16.2%-42.2%, respectively, in the annual production cycle of Chinese prickly ash. According to a comprehensive analysis of multiple indicators such as productivity, quality, economic and environmental benefits, planting green manure (such as *Vicia villosa* Roth and *Vicia sativa* L.) should be a suitable model to ensure high-quality, high yield, high efficiency, green and low-carbon production of Chinese prickly ash in Chongqing.

Key words *Zanthoxylum armatum* v. *novemfolius*; green manure; optimized fertilization; high yield and high quality; efficiency increase and emission reduction

花椒是我国特有的香辛科,也是西南地区 and 西北山区重要的经济树种,其经济价值高,提高花椒产量和品质是助力区域农民增收和实现乡村振兴的有效路径之一。研究表明,重庆青花椒产量为 1.23~16.7 t/hm²^[1],椒园的氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)养分平均投入分别为 341、216 和 281 kg/hm²,远高于粮食作物^[2-3],且椒园的活性氮损失和温室气体排放量分别为 56.7~92.5 kg/hm²(以 N 计)和 4 077~6 111 kg/hm²(以 CO₂ 计)^[4],化肥过量施用和管理粗放是限制重庆花椒产量及品质提升、减缓系统环境代价的主要影响因素^[1-2,4]。因此,探究减量化施肥管理及优化椒园管护方式以实现重庆花椒生产提质增效、绿色增收具有重要意义。

在化肥农药“双减”绿色低碳发展形势下,绿肥作为养分完全的生物肥源,发展现代绿肥解决土地退化问题是引导我国农业绿色发展的一个重要方向^[5]。绿肥种植还田是实现高施肥经济作物有机肥替代化肥的重要途径之一,同时对改善土地退化状况、提升土壤生物理化性质以及提高作物产量品质有积极作用^[6-8]。近年来,多地学者围绕粮食作物、果园、茶叶、烟草等特种经济作物生产,开展了大量种植绿肥对其生产产量及品质影响的相关研究^[5-10];但椒园种植绿肥对花椒生产化肥减量、产量、品质的影响研究鲜见,且未见覆盖栽培管理下椒园生态效益的研究报道。农作系统的温室气体排放评估已成为当前农业研究热点^[11-13],分析不同管理模式下的椒园生态效益和经济效益,对于准确评价花椒可持续性生产和温室气体减排意义重大^[13]。重庆是我国四大花椒主产区之一,该区主栽品种为九叶青花椒,优化区域种植管理模式将有助于重庆青花椒产业体系健康发展及末端产业链延伸。

因此,本研究选用中产期青花椒为研究对象,以椒农常规施肥及椒园清耕管理为对照,通过在优化施肥(减氮减磷减钾)条件下设置 4 个不同种类绿肥种植还田处理,对比研究常规管理和优化施肥下种植绿肥对青花椒绿肥复合生产系统产量、干物质积累量、品质、植株养分积累量、椒园土壤常规化学性质、经济效益和生态效益等的影响,以期为绿肥种植利用条件下青花椒生产的化肥科学减施及提质增效提供数据支撑与理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验材料

试验于 2021—2022 年在重庆市江津区(北部)吴滩镇花椒种植基地进行,海拔高度为 330 m。区域地处亚热带季风气候区,年均气温为 18.2 ℃,年均降水量为 880 mm,年均无霜期为 300 d;土壤为侏罗系沙溪庙组灰棕紫泥土,土壤 pH 为 7.80,有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 16.2、116、20.8、128 mg/kg。选用中产期青花椒为试材,避免个体差异,品种为九叶青花椒,挂牌标记。株行距为 2 m×3 m,种植密度在 1 600 株/hm² 左右。供试肥料包括商品有机肥和农民习惯用复合肥(N-P₂O₅-K₂O 配合式有 15-15-15、22-8-10、15-7-13 和 15-7-20),尿素(含 N 46.0%),过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),硫酸钾(含 K₂O 50%)。

1.2 试验设计

田间小区试验,共设 5 个处理:处理 1,农户常规管理(FP);处理 2,优化施肥+种植光叶苕子(OPT+*Vicia villosa* Roth);处理 3,优化施肥+种植箭筈豌豆(OPT+*Vicia sativa* L.);处理 4,优化施肥+种植白三叶(OPT+*Trifolium dubium* Sibth.);处理 5,优

化施肥+种植紫云英(OPT+*Astragalus sinicus* L.)。各处理依当地常规种植管理(重化肥轻有机肥+清耕)或示范优化施肥管理(氮磷钾减量化+补施有机肥),农户常规管理的 N、P₂O₅、K₂O 平均施用量分别为 278、123、229 kg/hm²,本地示范优化的 N、P₂O₅、K₂O 施肥量则分别为 240、106、195 kg/hm²,增施商品有机肥 7 500 kg/hm²。

于田间每行内选择正常生长、统一树龄、长势均匀的植株 9 株设为 1 个处理,每 3 株为 1 个小区,共 3 个重复。施肥管理上,分别于 9 月、11 月以及 4 月初施用基肥、越冬肥和壮果肥,详见表 1。9 月雨后撒播绿肥种子,光叶苕子、箭筈豌豆、三叶草、紫云英用种量分别为 30、30、60、45 kg/hm²。施肥方式上,常规处理为撒施;优化施肥各处理为覆土条施,施肥位置为接近花椒树体两侧的滴水线处各挖 1 条深长宽为 0.15 m×1 m×0.2 m 的条沟,肥料与土壤拌匀后回填,并标记施肥区域。果园的病虫害防治和其他田间管理按常规技术管理统一进行。

表 1 化肥施用量信息

Table 1 Information details of fertilizer application amount

处理	化肥	秋基肥/ (kg/hm ²)	越冬肥/ (kg/hm ²)	壮果肥/ (kg/hm ²)	总用量/ (kg/hm ²)	养分 比例
常规管理 (FP)	N	132	78.8	67.5	278	1.00
	P ₂ O ₅	48.0	52.5	22.5	123	0.44
	K ₂ O	60.0	78.8	90.0	229	0.82
优化施肥 (OPT)	N	116	67.5	57.0	240	1.00
	P ₂ O ₅	42.0	45.0	18.8	106	0.44
	K ₂ O	52.5	67.5	75.0	195	0.81

1.3 测产及采样

1.3.1 测产

在花椒成熟期(6 月),按单株下枝全采调查花椒产量和枝叶生物量,小区单位面积产量(鲜重)及净干物质累积量(干重)依每重复 3 株的产量、下枝植株生物量及含水量换算。绿肥生物量采取样方为 2 m×3 m,以测产花椒树为样方对角线交点,各小区绿肥生物量以 3 个收获样方平均值计。

1.3.2 样品采集

各小区混合样中采集代表性花椒鲜样约 1 000 g 置保鲜盒临时保存,并分别采集花椒树四周枝条、叶片以及绿肥样方代表性植株样,装入密封口袋,带回实验室后用去离子水洗净擦干样品。花椒籽粒样均分 2 袋,一袋置于冰箱临时保存用于品质检测,另一袋与其余植株样处理一致,于恒温干燥鼓风箱中 105 ℃ 杀青 30 min,再 80 ℃ 烘干至恒重,称重后粉碎,

装袋备用。

1.3.3 土样采集

测产后,避开施肥区域,沿树冠滴水线四周朝内 15~20 cm 处采集 0~20 cm 表层土壤,每株树采集 4~6 个样点,3 株样点混合为 1 个土样。室内剔除杂质,自然风干后过 1 mm 孔径尼龙网筛,装袋备用。

1.4 分析指标与方法

1.4.1 指标检测

按照文献[14]的研究方法,植物全碳用重铬酸钾容量法-外加热法测定;全氮、全磷、全钾用 H₂SO₄-H₂O₂ 消解结合半微量凯氏定氮法、钼锑抗比色法、火焰光度法分别测定。花椒麻味物质浓度采用紫外分光光度计测定^[15],挥发性油浓度采用蒸馏-回流冷凝法测定^[16],醇溶抽提物和不挥发性乙醚抽提物浓度的测定参照 GB/T 12729.10—2008《香辛料和调味品 醇溶抽提物的测定》^[17]和 GB/T 12729.12—2008《香辛料和调味品 不挥发性乙醚抽提物的测定》方法^[18]。土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾按照常规土壤化学分析方法测定^[14]。

1.4.2 品质综合效应

花椒品质综合效应评价参考 Kuzyakov 等^[19]的雷达面积法,所有参评指标进行标准归一化后,计算每个处理各指标在雷达图上的覆盖面积,处理与对照的面积比值用于表征对应处理的综合效应。该评价方法不受指标个数及其权重影响。具体计算公式如下:

$$stP_i = P_i / P_{\max} \quad (1)$$

$$Area = 0.5 \times \sum_{i=1}^n stP_i^2 \times \sin(2\pi/n) \quad (2)$$

$$Ratio = Area_{\text{treatment}} / Area_{\text{control}} \quad (3)$$

式中: stP_i 为 i 指标的标准归一化; P_i 为当前处理小区 i 指标的观测值; $P_{\max}$ 为所有处理 i 指标观测值的最大值; $Area$ 为标准化参评指标构成的雷达图面积; n 为参评指标个数; $Area_{\text{treatment}}$ 与 $Area_{\text{control}}$ 分别为处理及对照参评指标在雷达图上的覆盖面积。

1.4.3 经济效益

$$Benefit_{\text{net}} = Yield \times Price_{\text{unit}} \times 1\,000 - Cost_{\text{input}} \quad (4)$$

式中: $Benefit_{\text{net}}$ 为花椒生产的净收益,元/hm²; $Yield$ 为花椒产量, t/hm²; $Price_{\text{unit}}$ 为花椒销售单价,元/kg; 1 000 为 t 与 kg 换算系数; $Cost_{\text{input}}$ 为花椒生产成本,元/hm²,包括化肥和有机肥、绿肥种子、耕作机械(含燃料及农业用电)、病虫害防治、人工等各项投入成本。

1.4.4 区域施肥环境效应评价的经验模型

本研究环境效应评价的系统边界为青花椒采后至翌年采收的完整生产周期,包含农资阶段和农作

阶段。农资阶段主要关注各投入物(肥料、农药、柴油燃料等)的生产和运输过程。农作阶段主要关注肥料农药的施用以及农机或灌溉设备使用过程中消耗的柴油、电力和人工等。

其中活性氮排放与损失(Nr_{loss})的计算模型参考文献[20], 公式如下:

$$Nr_{loss} = Nr_{AMSloss} + N_2O_{emission} + NO_3^-_{leaching} + NH_3_{volatilization} \quad (5)$$

$$Nr_{AMSloss} = \sum_{j=1}^m EF_j \times Rate_j \quad (6)$$

$$N_2O_{emission} = 0.0116 \times N_{rate} \quad (7)$$

$$NO_3^-_{leaching} = 0.2326 \times N_{rate} \quad (8)$$

$$NH_3_{volatilization} = 0.0446 \times N_{rate} \quad (9)$$

式中: $Nr_{AMSloss}$ 为农资阶段肥料、农药和燃油等农资材料生产和运输过程产生的活性氮排放及损失量; EF_j 为投入项 j (j 取 1, 2, ..., m) 在生产和运输过程中活性氮排放或损失的相关排放因子^[12], 氮、磷、钾、农药、柴油、电力消耗对应的 EF 分别为 7.15×10^{-3} kg/kg、 1.84×10^{-4} kg/kg、 1.46×10^{-4} kg/kg、 4.69×10^{-3} kg/kg、 1.97×10^{-3} kg/L、 2.81×10^{-3} kg/(kW·h); $Rate_j$ 为作物生产中投入项 j 的消耗量[化肥投入见表 1, 每 hm^2 椒园单季燃油量、农药用量和电力消耗分别为 60.2 L、22.0 kg(绿肥处理 17.6 kg)和 79.1 kW·h]; $N_2O_{emission}$ 、 $NO_3^-_{leaching}$ 、 $NH_3_{volatilization}$ 分别为农作阶段由作物施肥直接产生的 N_2O 累积排放量、N 淋溶损失及 NH_3 挥发损失量, 对应的排放因子分别为 0.0116、0.2326 和 0.0446^[11-12]; N_{rate} 为化学氮肥用量(以纯氮计)。

温室气体排放的计算参考文献[20], 作物生产单个生产周期内的排放计算公式如下:

$$GHG_{emission} = GHG_{AM} + N_2O_{totalemission} \times \frac{44}{28} \times 265 \quad (10)$$

$$GHG_{AM} = \sum_{j=1}^m PEC_j \times Rate_j \quad (11)$$

$$N_2O_{totalemission} = N_2O_{emission} + 1\% \times NH_3_{volatilization} + 2.5\% \times NO_3^-_{leaching} \quad (12)$$

式中: GHG_{AM} 为农资阶段肥料和农药等农资材料生产和运输过程与农作阶段燃油、电力、人工等投入项消耗产生的温室气体排放量; PEC_j 为投入项 j 在生产和运输过程中的温室气体排放系数^[12], 氮、磷、钾、农药、柴油、电力及人工消耗对应的 PEC 分别为 8.3 kg/kg、0.79 kg/kg、0.55 kg/kg、19.12 kg/kg、3.75 kg/L、0.75 kg/(kW·h)、0.86 kg/人; $Rate_j$ 为作物生产中投入项 j 的施用量, 试验地常规、光叶苕子、箭筈豌豆、白三叶和紫云英处理的人工投入分别为 225、255、247.5、240 和 240 人/ hm^2 ; $N_2O_{totalemission}$ 为农作

阶段由氮肥施用造成的 N_2O 排放总量, 分为直接排放与间接排放途径; 1% 和 2.5% 分别为与 NH_3 挥发和 NO_3^- 淋洗相关的 N_2O 间接排放系数^[21]; 44/28 为 N_2O -N 转化为 N_2O 的分子量比值; 265 为 N_2O 的 100 a 全球增温潜势^[22]。

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 25.0 软件进行数据整理、分析与绘图。当方差分析达到显著水平时($P < 0.05$), 采用 Duncan 新复极差法比较处理间的差异。

2 结果与分析

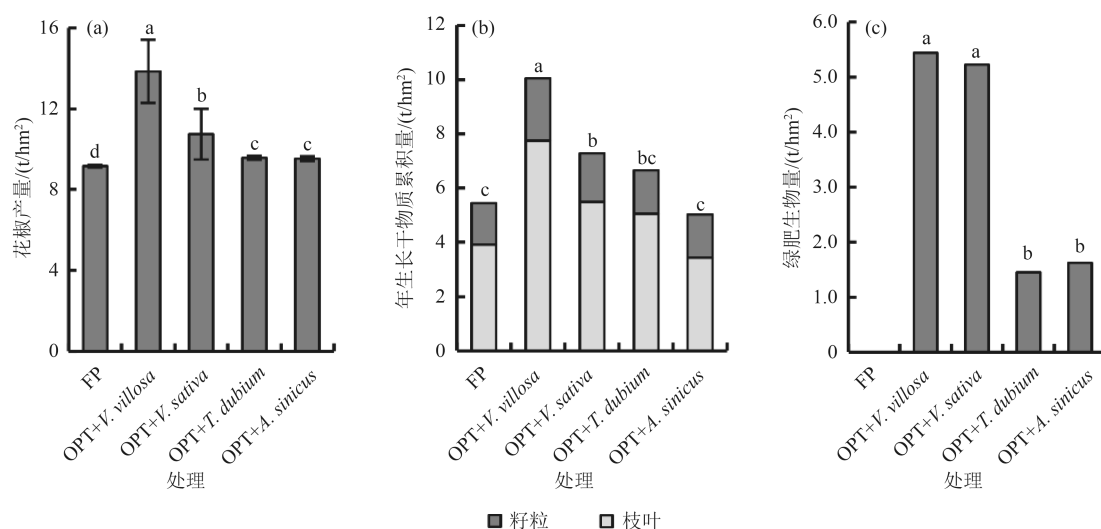
2.1 优化施肥下种植绿肥对青花椒产量和年生长干物质累积量、绿肥生物量的影响

如图 1(a)(b)所示, 相比于常规管理(产量 9.16 t/ hm^2 、年生长干物质累积量 5.45 t/ hm^2), 优化施肥下种植适宜种类绿肥可显著提高青花椒产量和年生长干物质累积量。种植光叶苕子、箭筈豌豆、白三叶和紫云英处理的花椒产量涨幅分别为 51.2%、17.3%、4.52% 和 4.03%, 平均为 19.2%; 除紫云英处理外(减幅 7.78%), 光叶苕子、箭筈豌豆、白三叶绿肥处理的花椒植株干物质累积量涨幅分别为 84.5%、33.6% 和 22.1%, 平均为 33.1%。此外, 优化施肥下光叶苕子、箭筈豌豆、白三叶和紫云英的生物量分别为 5.44、5.22、1.45 和 1.62 t/ hm^2 (以干重计), 4 种绿肥生物量均值为 3.44 t/ hm^2 [图 1(c)]。

2.2 优化施肥下种植绿肥对青花椒品质的影响

如图 2 所示, 优化施肥下种植绿肥较常规处理显著提高花椒麻味物质浓度 10.7%~24.6%(平均为 17.2%)和挥发性芳香油含量 10.7%~22.7%(平均为 15.4%), 光叶苕子和箭筈豌豆处理的品质提升效果最佳。种植光叶苕子处理的花椒醇溶抽提物和乙醚抽提物浓度分别提高 23.5% 和 40.2%, 紫云英处理下二者浓度分别提高 12.8% 和 47.7%; 箭筈豌豆处理下乙醚抽提物浓度显著提高 13.1%, 但对醇溶抽提物浓度无明显影响, 而白三叶处理则显著降低了花椒醇溶抽提物和乙醚抽提物浓度, 降幅分别为 11.0%、5.61%。

对花椒品质综合分析, 归一化后各品质指标构成的效应面积如图 3(a)所示。相比于常规管理处理, 优化施肥下种植光叶苕子、箭筈豌豆、白三叶和紫云英的花椒品质综合效应(效应图面积比值)分别为 1.58、1.31、1.05 和 1.43[图 3(b)]。除白三叶处理外, 其余绿肥处理均表现出显著的综合品质提升效果, 涨幅为 31%~58%。



注: FP 为常规管理, OPT 为优化施肥, *V. villosa* 为光叶苕子, *V. sativa* 为箭筈豌豆, *T. dubium* 为三叶草, *A. sinicus* 为紫云英; 不同小写字母表示相同土层不同施肥处理间差异在 0.05 水平显著。全文同。

图 1 优化施肥下种植绿肥对青花椒产量、年生长干物质累积量、绿肥生物量的影响

Fig.1 Effects of planting green manure on fruit yield, net above-biomass accumulation of Chinese prickly ash, and aboveground biomass of green manure based on optimized fertilization

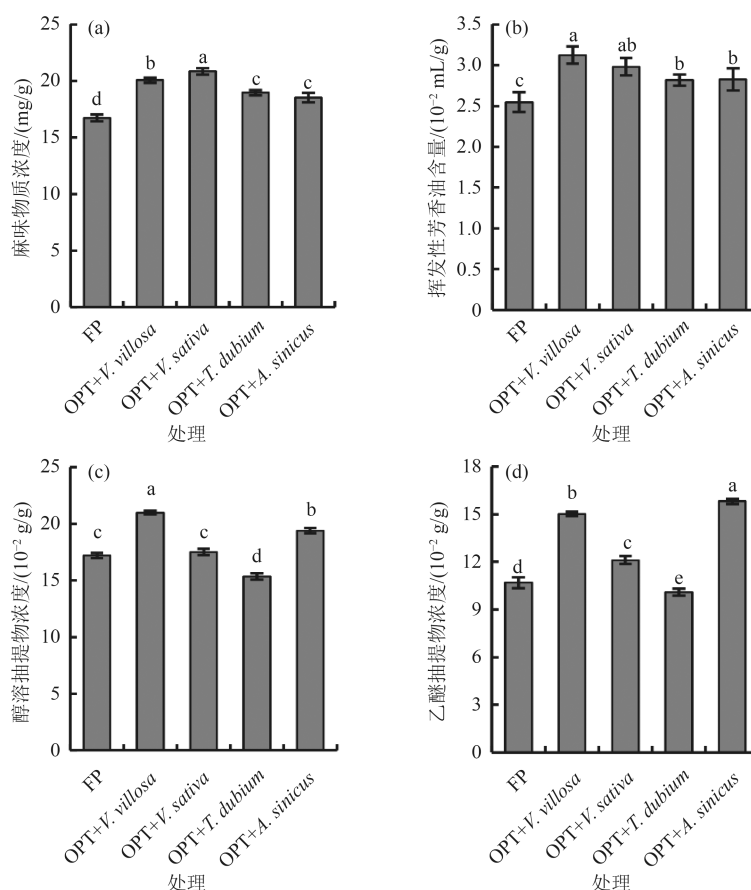


图 2 优化施肥下种植绿肥对青花椒果实品质的影响

Fig.2 Effects of planting green manure on fruit qualities of Chinese prickly ash based on optimized fertilization

2.3 优化施肥下种植绿肥对绿肥地上部养分累积及椒园土壤养分的影响

优化施肥条件下, 不同绿肥的地上部养分浓度

及养分累积量如表 2 所示。各绿肥植株磷浓度表现为光叶苕子最高 (8.14 g/kg), 紫云英最低 (7.05 g/kg); 植株钾浓度表现为紫云英最高 (31.7 g/kg), 箭

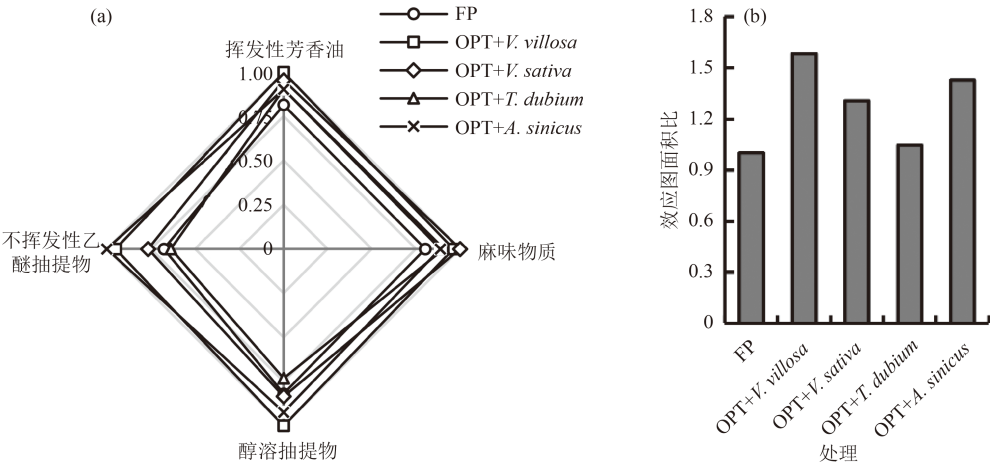


图 3 优化施肥下种植绿肥对青花椒果实品质综合效应的影响

Fig.3 Comprehensive assessment of fruit qualities of Chinese prickly ash as affected by planting green manure based on the optimized fertilization

筍豌豆最低(14.3 g/kg)。单位面积植株碳氮磷钾累积量上,均表现为光叶苕子最高、箭筍豌豆其次,二者碳、氮、磷、钾养分累积量分别约为三叶草和紫云英处理的 3.0、3.5、4.0 和 1.5~2.5 倍。

表 2 优化施肥对不同绿肥地上部养分浓度及其累积量的影响

绿肥种类	养分浓度/(g/kg)				养分累积量/(kg/hm ²)			
	碳	氮	磷	钾	碳	氮	磷	钾
<i>V. villosa</i>	427	31.5	8.14	18.8	2 324	172	44.3	102.0
<i>V. sativa</i>	438	30.5	7.81	14.3	2 288	159	40.8	74.7
<i>T. dubium</i>	437	35.9	7.87	30.8	635	52.1	11.4	44.8
<i>A.sinicus</i>	449	27.9	7.05	31.7	729	45.4	11.4	51.4

优化施肥下种植绿肥及原位覆盖对椒园土壤常规化学性质的影响如表 3 所示,对照常规处理,绿肥处理的椒园土壤 pH 和速效钾含量均无明显变化,但显著提高了土壤有机质含量 64.1%(均值);除箭筍豌豆处理外,光叶苕子、三叶草和紫云英处理平均提高土壤碱解氮、有效磷含量 23.5%、25.2%。

本试验中,青花椒植株养分累积量及果实品质与椒园土壤化学性质的相关关系如表 4 所示。各因变量指标与椒园土壤 pH 均呈负相关关系,且植株氮磷钾累积量、挥发性芳香油和醇溶抽提物浓度与其关系显著;与有机质、有效磷含量均呈正相关关系,其中青花椒果实乙醚抽提物浓度与椒园有效磷含量关系显著;青花椒植株钾累积量和果实麻味物质与椒园速效钾含量呈显著正相关关系。

2.4 优化施肥下种植绿肥对青花椒生产经济环境效益的影响

优化施肥下种植不同绿肥对青花椒生产的经济

表 3 优化施肥下种植绿肥对青花椒园土壤常规化学性质的影响

Table 3 Conventional soil chemistries of Chinese prickly ash affected by planting green manure based on optimized fertilization

处理	pH	有机质/(g/kg)	碱解氮/(mg/kg)	有效磷/(mg/kg)	速效钾/(mg/kg)
FP	8.09 a	19.2 d	102 c	18.9 c	141 a
OPT+ <i>V. villosa</i>	7.90 a	31.5 b	122 b	25.9 a	153 a
OPT+ <i>V. sativa</i>	7.96 a	28.1 c	107 c	19.1 c	151 a
OPT+ <i>T. dubium</i>	8.14 a	33.0 a	123 b	22.9 b	155 a
OPT+ <i>A. sinicus</i>	8.07 a	33.2 a	133 a	26.7 a	143 a

效益不尽相同(表 5)。对比常规施肥,种植光叶苕子和箭筍豌豆分别明显提高青花椒生产经济效益 68.9% 和 12.1%,实现增收 3 871~21 968 元/hm²;而种植三叶草和紫云英处理的经济效益则表现为降低,降幅分别为 12.9% 和 12.1%。

通过模型计算,农户常规管理下单位面积椒园的活性氮损失及温室气体排放通量分别为 82.9 kg/hm²(以 N 计)和 5 501 kg/hm²(以 CO₂ 计),各绿肥处理的活性氮损失为 71.5 kg/hm²,较常规管理明显降低 13.8%[图 4(a)];光叶苕子、箭筍豌豆、白三叶和紫云英处理的温室气体排放量分别为 4 809、4 802、4 796 和 4 796 kg/hm²,较常规管理分别降低 12.6%、12.7%、12.8% 和 12.8%[图 4(b)]。

在单位产量上,常规管理椒园的氮足迹和碳足迹分别为 9.05 和 601 kg/t。光叶苕子、箭筍豌豆、三叶草和紫云英处理氮足迹分别为 5.16、6.66、7.47 和 7.50 kg/t,较常规管理显著降低 42.9%、26.4%、17.4% 和 17.0%,平均为 25.9%[图 5(a)];各绿肥处

表 4 青花椒植株养分积累量及果实品质与椒园土壤化学性质的相关关系

Table 4 Pearson correlation analysis between shoot nutrients accumulation, fruit qualities and soil chemistries of Chinese prickly ash

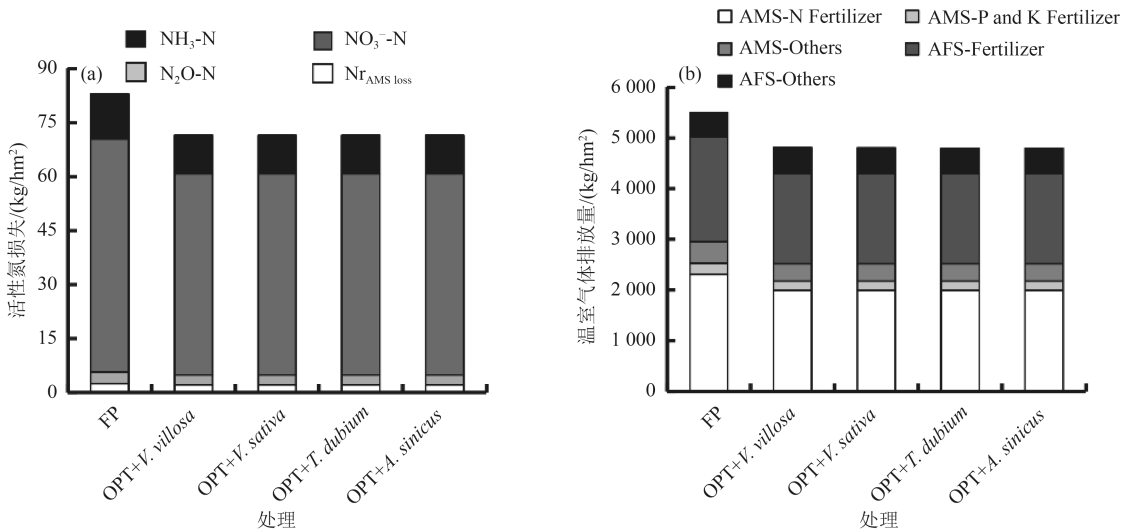
项目	植株氮积累量	植株磷积累量	植株钾积累量	挥发性芳香油	麻味物质	醇溶抽提物	乙醚抽提物
pH	-0.828*	-0.743*	-0.779*	-0.795*	-0.683	-0.746*	-0.535
有机质	0.153	0.406	0.412	0.658	0.571	0.213	0.478
碱解氮	-0.041	0.210	0.168	0.373	0.159	0.344	0.630
有效磷	0.213	0.416	0.358	0.469	0.145	0.609	0.776*
速效钾	0.569	0.691	0.730*	0.697	0.740*	-0.129	-0.159

注: *表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

表 5 优化施肥下种植绿肥对青花椒生产经济效益的影响

Table 5 Economic analysis of the effects of planting green manure on Chinese prickly ash production based on optimized fertilization

处理	投入/(元/hm ²)						产出			产投比(ROI)
	肥料	农药	绿肥	机械	人工	总支出	产量/(t/hm ²)	总收入/(元/hm ²)	净收益/(元/hm ²)	
FP	5 292	1 500	0	553	15 750	23 095	9.16	54 956	31 861	2.38
OPT+ <i>V. villosa</i>	9 042	1 200	600	553	17 850	29 245	13.8	83 074	53 829	2.84
OPT+ <i>V. sativa</i>	9 042	1 200	600	553	17 325	28 720	10.7	64 452	35 732	2.24
OPT+ <i>T. dubium</i>	9 042	1 200	2 100	553	16 800	29 695	9.57	57 441	27 746	1.93
OPT+ <i>A. sinicus</i>	9 042	1 200	1 575	553	16 800	29 170	9.53	57 170	28 000	1.96



注: 环境效应评价的系统边界包含农资生产运输过程(AMS-)和农作过程(AFS-)2个阶段。其中, AMS-N Fertilizer、AMS-P and K Fertilizer、AMS- Others 分别表示由农资阶段氮肥、磷钾肥、其他投入项(如农药)造成的温室气体排放, AFS-Fertilizer、AFS-Others 分别表示由农作阶段用肥及其他投入项(如油耗、电力及人工等)造成的温室气体排放。全文同。

图 4 优化施肥下种植绿肥对青花椒园单位面积活性氮损失和温室气体排放的影响

Fig.4 Reactive nitrogen loss and GHG emission per hectare of Chinese prickly ash affected by planting green manure based on optimized fertilization

理的碳足迹分别为 347、447、501 和 503 kg/t, 较常规管理分别降低 42.2%、25.6%、16.6% 和 16.2%, 平均为 25.1%[图 5(b)]。

3 讨论

3.1 优化施肥下种植绿肥提高青花椒产量和品质

绿肥种植还田不仅可高效助力农业生产系统化

肥的减量施用及培肥土壤, 还能有效促进作物生长以及提高作物产量和品质^[6-10]。与赵文军等^[6-10] 所得结论一致, 当前试验条件下优化施肥加种植绿肥显著提高重庆青花椒产量 4.03%~51.2%(平均为 19.2%), 尤以光叶苕子和箭筈豌豆增产效果最好, 分别为 51.2% 和 17.3%(图 1)。各绿肥处理间的增产效果差异可由绿肥本身还田养分带入量差异来解

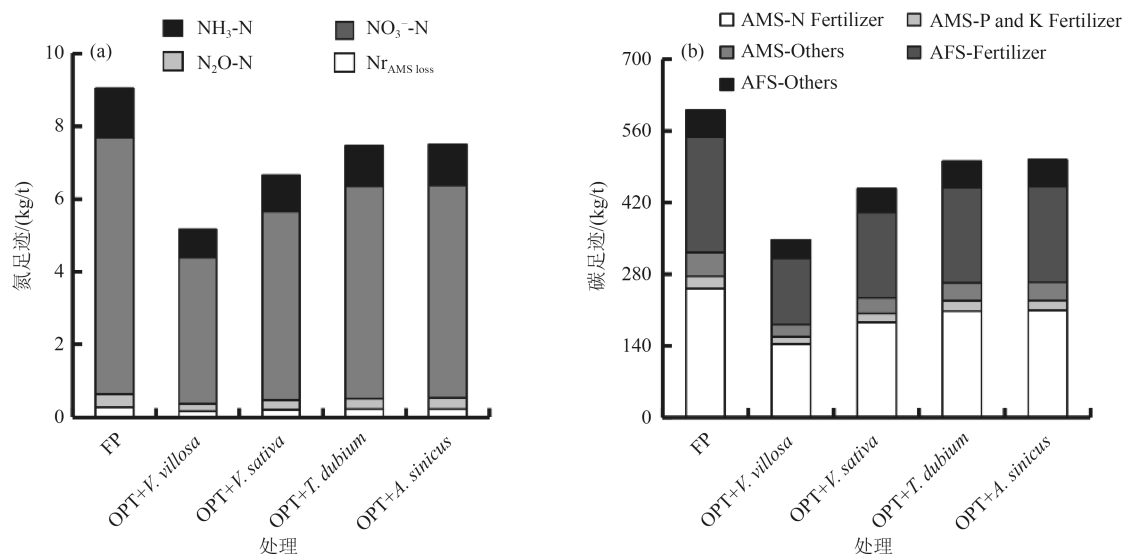


图5 优化施肥下种植绿肥对青花椒园单位产量活性氮损失和温室气体排放的影响

Fig.5 Reactive nitrogen loss and greenhouse gas emission per metric ton of Chinese prickly ash as affected by planting green manure based on the optimized fertilization

释, 光叶苕子和箭筈豌豆处理的绿肥还田〔图 1(c)〕与碳氮磷钾养分归还量数倍高于三叶草和紫云英(表 2), 收获期处理间椒园土壤化学养分变幅小间接表明前二者绿肥种植覆盖处理高效保障了青花椒生长发育所需养分供应, 改善植株养分生理状况以促进枝条抽发和生长^[2,7,23-24]是提高青花椒年生长干物质累积量的内在基础〔图 1(b)〕, 更高的植株干物质累积量保障了青花椒产量的提高。

此外, 本研究还发现, 优化施肥下种植绿肥能显著提高青花椒麻味物质浓度 10.7%~24.6% 和挥发性芳香油含量 10.7%~22.7%, 以及差异化影响青花椒醇溶抽提物(涨幅-11.0%~23.5%)和乙醚抽提物浓度品质指标(涨幅-5.61%~47.7%)(图 2)。杨林生^[2]通过大样本分析指出, 九叶青花椒优化氮肥管理水平明显提高花椒生产力及其籽粒麻味物质浓度; 从化肥用量水平分析, 种植绿肥处理较农户常规施肥分别降低氮、磷、钾养分投入 13.7%、13.8% 和 14.8%, 优化施肥可以部分解释花椒品质变化结果; 具体的绿肥效应或优化施肥对青花椒品质提升的贡献率权重问题有待进一步研究。值得注意的是, 优化施肥下种植绿肥能显著改善椒园土壤养分状况(表 3), 其对椒园土壤有效磷含量的变化与其青花椒乙醚抽提物浓度变化关系, 以及土壤速效钾状况与对应青花椒麻味物质浓度变化的趋势分析, 均呈显著正相关关系, 与前人研究结果一致^[25], 说明适当提高土壤有效磷、速效钾含量是提升花椒品质的影响因素之一, 绿肥种植还田是有效、安全提升土壤磷钾养分的一个重要途径。此外, 本试验条件下青花椒

各品质指标均与椒园土壤 pH 呈负相关关系, 分析原因因为青花椒最适栽植土壤 pH 为 6.5~7.5^[2], 而试验地椒园处理前后的土壤 pH 均高于该范围上限值, 栽植土壤过酸过碱均将影响果实品质。就青花椒品质综合效应而言, 光叶苕子、箭筈豌豆和紫云英处理对花椒品质的提升效果显著优于三叶草处理, 后者效果与农户常规管理(清耕)基本一致, 不同绿肥种植还田差异化影响青花椒品质的营养生理学机制有待进一步研究。

3.2 优化施肥下种植绿肥提高椒园经济和生态效益

本试验条件下, 椒园种植光叶苕子和箭筈豌豆处理能有效降低农药成本和增加青花椒产量收入, 与常规管理相比, 每公顷可分别增收 21 968 元和 3 871 元(表 5), 二者绿肥种植还田节本增收表现与张先勋^[26]在其他经济林的研究结果一致。但是, 更高的绿肥种子成本及更低的增产效应导致三叶草与紫云英处理较常规管理表现为经济效益降低(表 5)。需要说明的是, 优化施肥下种植绿肥还可额外获得 1.44~5.44 t/hm² 的绿肥干物质(地上部), 其经济价值并未纳入当前经济效益分析中。若以加工牧草售卖价格或还田替代化肥养分投入降幅折算, 各绿肥处理的经济效应将大幅度增加^[7,26-28]。综上, 优化施肥下种植绿肥既能明显提高青花椒产量及品质, 也可有效实现化肥减量; 但种植不同绿肥对青花椒生产经济效益的差异化影响也需要被关注, 集成优质高效的青花椒绿肥间套作栽培模式需要后续开展更全面的探究。

本研究首次评估了种植绿肥下青花椒生产的活

性氮损失和温室气体排放。通过减少农资投入及人为活动以减轻农业生产的活性氮损失和温室气体排放,是改善农业农村生态环境及维持耕地可持续生产的关键战略^[11-13,20]。本研究中,优化施肥下种植绿肥明显降低了青花椒生产的农药及化肥投入,从而有效减少单位面积活性氮损失 13.8%[图 4(a)],氮足迹下降 17.0%~42.9%[图 5(a)]。重庆青花椒生产的活性氮损失主要以硝态氮淋失及径流损失为主(约占 78%),降水量大、坡耕地种植土层浅及表土质地轻、土壤风化程度低及发生发育弱等是造成该结果的主要影响因素^[11,20];同区域的粮食、蔬菜等种植系统上阻控氮素损失的研究较多^[20,29],而关注青花椒生产减排的报道较少,集成增效减排技术与创制高效阻控产品具有重要意义。

本研究还发现,农资生产运输阶段氮肥和农作阶段化肥投入构成青花椒园温室气体排放的两大贡献源[图 4(b)],为此,椒园化肥减量施用尤其是减少氮肥投入是降低重庆青花椒生产温室气体排放的关键举措;本研究中,优化施肥下种植绿肥有效降低了温室气体排放量 12.6%~12.8%,碳足迹下降 16.2%~42.2%,该结果有力支撑了上述论断。其中,光叶苕子和箭筈豌豆的氮归还量与碳生物固持量分别高达 159~172、2 288~2 324 kg/hm²(表 2),二者种植还田兼具较高的替代化肥潜力与温室气体减排潜力,可推荐为重庆青花椒高产高效、绿色低碳生产的重要覆盖作物。进一步的研究方向可集中于椒园绿肥翻压原位还田的遗留效应解析、绿肥替代化肥潜力分析、椒园减排及土壤增碳的经济效益分析等。

4 结论

(1)对比农户常规管理,重庆青花椒优化施肥下种植绿肥能实现生产绿肥 1.45~5.44 t/hm²(以干重计),由原位覆盖还田年均带入花椒生产系统碳、氮、磷、钾养分分别为 635~232 4、45.4~172、11.4~44.3、44.8~102.0 kg/hm²;有效改善了椒园土壤有机质、碱解氮及有效磷含量,说明优化施肥下种植绿肥具有高效固碳培肥效应。

(2)从花椒生产来看,优化施肥下种植绿肥模式通过保障青花椒树年生长干物质累积,较对照组平均提高了 33.1%,进而显著提高青花椒产量 19.2%、麻味物质浓度 17.2% 及挥发性芳香油含量 15.4%;受农资成本与人工投入差异影响,各绿肥处理经济效益各异,种植光叶苕子和箭筈豌豆分别较对照增收 68.9% 和 12.1%,而三叶草与紫云英处理表现为效益下降,降幅分别为 12.9%、12.1%。

(3)从系统减排来看,优化施肥下种植绿肥平均降低青花椒年生产周期的活性氮损失 13.8% 与氮足迹 25.9%,降低系统温室气体排放 12.7% 与碳足迹 25.1%,种植光叶苕子或箭筈豌豆的减排效应尤为突出。

综合青花椒产量、品质综合效应、经济效益和生态效益等多指标分析,优化施肥下种植光叶苕子或箭筈豌豆是保障重庆青花椒优质高产高效、绿色低碳生产的推荐模式。

参考文献

- [1] 卢明,王帅,王洁,等.重庆市花椒生产的产量差及影响因素分析[J].中国土壤与肥料,2023(8): 206-213.
LU M, WANG S, WANG J, et al. Analysis of yield gaps and limiting factors in Chinese prickly ash (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.) production in Chongqing[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(8): 206-213.
- [2] 杨林生.重庆九叶青花椒养分管理现状及优化施肥研究[D].重庆:西南大学,2019.
- [3] 孔发明,魏勇,徐文静,等.九叶青花椒不同生育期矿质养分累积规律及分配特征研究[J].中国土壤与肥料,2023(4): 76-84.
KONG F M, WEI Y, XU W J, et al. Study on mineral nutrient accumulation and distribution characteristics of *Zanthoxylum armatum* var. *novemfolius* at different growth stages[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(4): 76-84.
- [4] 卢明,王帅,王洋,等.配方肥助力重庆江津青花椒增产增效[J].中国农技推广,2022,38(4): 69-72.
LU M, WANG S, WANG Y, et al. Formulated fertilizer supported increase production and efficiency in Chinese prickly ash production in Jiangjin, Chongqing[J]. China Agricultural Technology Extension, 2022, 38(4): 69-72.
- [5] 丁婷婷,段廷玉.果园绿肥对果树-土壤-微生物系统影响研究进展[J].果树学报,2021,38(12): 2196-2208.
DING T T, DUAN T Y. Research progress on the influence of orchard green manure on fruit trees-soil-microbe system[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(12): 2196-2208.
- [6] 赵文军,杨继周,尹梅,等.绿肥模式下减量施氮对烤烟产量与品质的影响[J].中国农业科技导报,2023,25(4): 189-196.
ZHAO W J, YANG J Z, YIN M, et al. Effects of combined application of green manure with reduced nitrogen fertilizer on yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(4): 189-196.
- [7] 方林发.豆科绿肥替代化肥对柑橘氮素营养及生长发育的影响[D].重庆:西南大学,2020.
- [8] 卢明,陈松柏,詹林庆,等.施用有机肥和间作绿肥对柑橘生产及其果园土壤的影响[J].中国农技推广,2022,38(11): 61-64.
LU M, CHEN S B, ZHAN L Q, et al. Effects of combined application of organic fertilizer and intercropping green manure on productivity and orchard soil characteristics in citrus production[J]. China Agricultural Technology Extension, 2022, 38(11): 61-64.
- [9] 姜超强,刘炎红,徐海清,等.烟-稻轮作区不同种植模式碳汇

- 效应及经济效益评价[J]. 中国烟草学报, 2023, 29(4): 44-53.
- JIANG C Q, LIU Y H, XU H Q, et al. Evaluation on carbon sink and economic benefit of different cropping systems in tobacco-rice rotation region [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2023, 29(4): 44-53.
- [10] 余跑兰, 孙永明, 吴艳, 等. 不同还田方式下白三叶腐解特征及对茶叶产量和品质的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(增刊): 186-192.
- YU P L, SUN Y M, WU Y, et al. Decomposition characteristics of white clover under different returning methods and the effects on yield and quality of tea[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(Suppl): 186-192.
- [11] 余婷, 翟壮, 高镜清, 等. 种植模式协同秸秆管理对稻田温室气体排放的影响[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(5): 1504 - 1512.
- YU T, ZHAI Z, GAO J Q, et al. Effects of crop patterns and straw management on greenhouse gas emissions in paddy fields[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(5): 1504 - 1512.
- [12] 梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 等. 重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 364-375.
- LIANG T, ZHAO J K, LI H M, et al. Analysis on driving factors, reduction potential, and environmental effects of inorganic fertilizer input in Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1): 364-375.
- [13] 张金鑫, 彭雄, 张金华, 等. 湖北省农作物碳汇的阶段性特征、空间差异与动态演进: 基于 1997—2022 年湖北省农作物数据[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(5): 1513 - 1522.
- ZHANG J X, PENG X, ZHANG J H, et al. Stage characteristics, spatial differences and dynamic evolution of crop carbon sink in Hubei Province based on the crop data from 1997 to 2022[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(5): 1513 - 1522.
- [14] 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, 1999.
- [15] 中国食品土畜进出口商会. 花椒及其制品中麻味物质的含量测定: T/CFNA 6503—2022[S]. 北京: 中国食品土畜进出口商会, 2022.
- [16] 国家林业局. 花椒质量等级: LY/T 1652—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 香辛料和调味品醇溶抽提物的测定: GB/T 12729.10—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 香辛料和调味品 不挥发性乙醚抽提物的测定: GB/T 12729.12—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [19] KUZYAKOV Y, GUNINA A, ZAMANIAN K, et al. New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7(3): 282-288.
- [20] WANG X Z, LIU B, WU G, et al. Cutting carbon footprints of vegetable production with integrated soil-crop system management: a case study of greenhouse pepper production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120158.
- [21] PERRIN A, BASSET-MENS C, GABRIELLE B. Life cycle assessment of vegetable products: a review focusing on cropping systems diversity and the estimation of field emissions[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19 (6): 1247-1263.
- [22] IPCC. Climate Change 2013: the physical science basis, contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [23] 宁万军, 张强, 黄闽敏, 等. 绿肥间作翻压处理对新新 2 号核桃性状及土壤养分的影响[J]. 果树学报, 2022, 39(11): 2124-2132.
- NING W J, ZHANG Q, HUANG M M, et al. Effects of intercropping with green manures on soil nutrients and traits of Xinxin 2 walnut[J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(11): 2124-2132.
- [24] 朱亚琼, 简大为, 郑伟, 等. 不同种植模式下豆科绿肥对土壤改良效果的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(5): 889-900.
- ZHU Y Q, JIAN D W, ZHENG W, et al. Effects of improving soil fertility by planting different leguminous green manure plants under different mixed cropping patterns[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(5): 889-900.
- [25] 单伟红. 不同磷钾肥配比对山东花椒产量和品质的影响[J]. 农业科技通讯, 2023(4): 107-109.
- [26] 张先勋. 不同生草对桃园生态经济效应的影响[J]. 福建热作科技, 2018, 43(3): 28-31.
- [27] 万水霞, 朱宏斌, 唐杉, 等. 紫云英与化肥配施对安徽沿江双季稻区土壤生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 387-395.
- WANG S X, ZHU H B, TANG S, et al. Effects of *Astragalus sinicus* manure and fertilizer combined application on biological properties of soil in Anhui double cropping rice areas along the Yangtze River[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 387-395.
- [28] 郭云周, 尹小怀, 雷素芬, 等. 等氮条件下烟草化肥绿肥合理配施初探[J]. 西南农业学报, 2010, 23(6): 1930-1934.
- GUO Y Z, YIN X H, LEI S F, et al. Effects of combining application of fresh vetch straw and chemical nitrogen fertilizer on tobacco under equal nitrogen rates[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23(6): 1930-1934.
- [29] 况福虹. 长江上游紫色土不同种植体系肥料氮去向及氮素平衡[D]. 北京: 中国农业大学, 2016. ⊕