

云南咖啡园施肥-土壤-产量区域分异特征及分析

赵明珠,赵萍香*,蒋鑫磊,陈天明,王嘉毅,李梅方,李锦红

(云南省德宏热带农业科学研究所, 云南瑞丽 678600)

[摘要]针对云南咖啡园施肥失衡与土壤异质性制约产量的关键问题,通过采样调研与统计分析,揭示施肥-土壤-产量的区域分异特征及影响机制。结果表明:云南咖啡产区采样点氮、磷、钾施用水平因地域而不同,41.01%采样点氮肥施用缺乏;酸性土壤($\text{pH } 4.5 \sim 5.5$)占55.06%;土壤养分方面,德宏、普洱产区采样点土壤有机质很丰富,比例分别为62.50%、43.86%,怒江、文山产区采样点氮缺乏比例分别达100.00%、73.33%,文山产区采样点钾缺乏比例40.00%。施肥量与产量间显著相关,氮磷钾最佳施用量分别为288.70、92.43、299.96 kg/666.7 m²;通径分析显示,钾肥为产量第一驱动因子,土壤有机质与pH通过直接效应协同影响产量,构建的最优回归模型为 $Y=5594.817+74.03K+70.823OM-968.987pH$ ($R^2=0.849$)。研究表明,施钾量、土壤有机质含量和pH是造成产量区域差异的重要因素,该结果可为云南咖啡园精准施肥与土壤改良提供量化依据和技术路径。

[关键词]咖啡园;施肥;土壤养分;产量;通径分析

中图分类号:S571.2 文献标识码:A 文章编号:1672-450X(2025)04-0037-07

Regional Differentiation Characteristics and Analysis of Fertilization Soil Yield in Yunnan Coffee Gardens

ZHAO Mingzhu, ZHAO Pingxiang*, JIANG Xinlei, CHEN Tianming, WANG Jiayi, LI Meifang, LI Jinhong

Dehong Tropical Agriculture Research Institute of Yunnan, Ruili 678600, China

Abstract: Aiming to address the critical issue of fertilization imbalance and soil heterogeneity constraining yield in Yunnan coffee plantations, this study investigated the regional differentiation characteristics and influence mechanisms among fertilization, soil, and yield through sampling surveys and statistical analysis. The results showed that the nitrogen, phosphorus, and potassium application levels at sampling points in Yunnan coffee gardens vary by region. Acidic soils ($\text{pH } 4.5 \sim 5.5$) account for 55.06%. In terms of soil nutrients, the proportions of plantations with very abundant soil organic matter in Dehong and Pu'er are 62.50% and 43.86% respectively. The proportions of nitrogen deficiency in Nujiang and Wenshan reach 100.00% and 73.33% respectively, and the proportion of potassium deficiency in Wenshan is 40.00%. Fertilization rates exhibited a significant correlation with yield, with optimal N, P, and K application rates determined as 288.70, 92.43, and 299.96 kg·667 m², respectively. Path analysis identified K as the primary yield-driving factor, with soil organic matter and pH exerting direct synergistic effects on yield. The optimized regression model $Y=5594.817+74.03K+70.823OM-968.987pH$ ($R^2=0.849$) quantitatively characterized the yield effects of nutrient and soil factors. This study confirms that potassium application rate, soil organic matter content, and pH are important factors causing regional differences in yield, the results provided a quantitative basis and technical framework for precision fertilization and targeted soil amendment.

Key words: coffee plantations; fertilization; soil nutrients; yield; path analysis

收稿日期:2025-04-17

基金项目:国家热带植物种质资源库咖啡种质资源分库(NTPGRC2025-016);

国家木薯产业技术体系咖啡云南德宏综合试验站(CARS-11-YNLJH)

作者简介:赵明珠(1989—),女,助理研究员,硕士,研究方向为咖啡农艺学。E-mail:kaboly@163.com

*通信作者:赵萍香(1997—),女,研究实习员,研究方向为咖啡农艺学。E-mail:1537254982@qq.com

云南凭借独特的地理气候条件,咖啡种植面积和产量均占全国的98%以上,成为支撑我国咖啡产业发展的核心产区^[1]。近年来,随着国内咖啡消费市场的持续扩容(年增长率超15%),云南咖啡产业的规模化、专业化发展对提升农民收入、促进乡村振兴及增强国际市场竞争力具有重要意义^[2]。施肥管理是调控作物产量与品质的关键农艺措施,直接影响土壤养分循环、植株生理功能及果实发育^[3-5]。合理施肥不仅能通过优化氮、磷、钾配比提升光合作用效率,还可配合咖啡壳还田等措施改善土壤结构,将有机质含量年提升0.5%~1.0%,进而促进根系发育与养分吸收^[3,6]。然而,长期以来,云南咖啡园普遍存在养分投入失衡问题,这种不合理施肥现象不仅导致部分区域土壤硝态氮累积、酸化加剧,还引发产量波动和品质不稳定等问题,成为制约产业升级的核心瓶颈^[1,6]。

土壤养分异质性显著影响植物的生长,而不合理施肥是造成土壤养分异质性的主要方式,可导致施肥效应波动达20%~30%^[7]。高海拔地区虽利于咖啡风味物质积累,但低温环境也导致有机质分解缓慢,加剧了对外源养分的依赖^[8];酸性土壤虽促进铁锰活化,却易引发铝离子毒性和磷素固定,形成“施肥—固定—缺乏”的恶性循环^[9]。当前针对云南咖啡园施肥-土壤-产量的交互作用机制尚缺乏系统性研究,尤其在养分需求量量化、土壤因子协同效应解析及区域精准调控策略等方面存在明显研究缺口。基于此,本研究以云南咖啡主产区(普洱、保山、临沧、德宏、怒江、文山)为研究区域,通过田间调查、实验室分析与统计建模,以揭示施肥量的区域分异特征,通过量化氮磷钾施用量与产量的关系,确定最佳施肥阈值;解析土壤pH、有机质、速效性养分等因子对产量的直接与间接作用路径;构建基于土壤-施肥参数的产量预测模型,提出分区分级的精准施肥策略。研究结果可为云南咖啡园的养分高效管理与可持续生产提供理论支撑,助力突破“产量不稳定、品质不均衡”的产业发展瓶颈,推动我省咖啡产业向数据驱动精准化管理转型。

1 材料和方法

1.1 材料

以云南普洱、保山、临沧、德宏、怒江、文山咖啡主产区为研究区域,选取典型咖啡种植园(品种均为卡蒂姆7963)作为采样点(表1,采用GPS精确定位)。2024年1月,对每个采样点按“梅花形”多点混合法在两行咖啡植株的中间位置(行间)采集1份0—20 cm耕作层土壤样品,共获取178份土壤样本。同时收集采样点对应的土壤理化性质、施肥量、咖啡生豆产量数据。

表1 云南咖啡园采样点分布

州市	县市区
临沧(33)	沧源县(6),耿马县(2),临翔区(4),双江县(4),永德县(8),镇康县(9)
普洱(57)	江城县(7),景东县(3),景谷县(4),澜沧县(6),孟连县(16),墨江县(5),宁洱县(2),思茅区(7),西盟县(4),镇沅县(3)
保山(36)	龙陵县(12),隆阳区(24)
怒江(13)	泸水市(13)
德宏(24)	芒市(7),盈江县(13),瑞丽市(4)
文山(15)	广南县(5),麻栗坡(10)

注:括号内数字为样本数量。

1.2 方法

土壤样品测定指标包括pH、有机质(g/kg)、无机氮(mg/kg)、速效磷(mg/kg)和速效钾(mg/kg),具体方法为:pH计法(水土比为2.5:1)测定土壤pH;重铬酸钾容量法加热法测有机质;1.0 mol/L NaOH碱解扩散法测碱解氮;0.03 mol/L NH₄F-0.025 mol/L HCl浸提比色法测速效磷;1.0 mol/L NH₄OAc浸提火焰光度法测速效钾^[10]。

土壤养分分级参照相关标准^[11];施肥量划分以当地常规施肥量为基准,界定不同施肥水平梯度;产量划分以150 kg/666.7 m²为界,超此值为高产,且按50 kg间隔设级别梯度;海拔划分依云南小粒种咖啡宜植区实际情况。分级划分如表2、表3所示。

1.3 数据分析

采用Excel、SPSS、Sanger Box等软件完成数据处理与方差分析、相关性分析、通径分析等及可视化绘图。

表 2 施肥量、土壤养分等级划分标准

级别	施肥量/ (kg · 666.7 m ²)		土壤有机质/ (g · kg ⁻¹)	土壤无机氮/ (mg · kg ⁻¹)	土壤速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	土壤速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	土壤 pH
	氮肥、钾肥	磷肥					
极缺	<50	<10	<6	<30	<3	<30	<4.5
很缺	50~100	10~30	6~10	30~60	3~5	30~50	4.5~5.5
缺乏	100~150	30~60	10~20	60~90	5~10	50~100	5.5~6.5
中等	150~200	60~100	20~30	90~120	10~20	100~150	6.5~7.5
丰富	200~250	100~150	30~40	120~150	20~40	150~200	7.5~8.5
很丰富	>250	>150	>40	>150	>40	>200	>8.5

注: 土壤 pH 值从小到大依次代表强酸、酸性、微酸、中性、碱性、强碱。

表 3 海拔和产量等级划分标准

级别	海拔/m					产量/ (kg · 666.7 m ²)						
	极低	低	中等	中高	高	很高	极低	很低	偏低	中等	中高	高产
范围	<500	500~800	800~1 000	1 000~1 200	1 200~1 500	>1 500	<30	30~60	60~90	90~120	120~150	>150

2 结果与分析

2.1 咖啡园施肥现状

调查结果显示, 云南咖啡园施肥情况差异显著(图1)。氮肥施用方面: 41.01%的采样点为缺乏, 其中文山、普洱产区采样点的比例为 80.00%、57.89%, 德宏产区采样点施氮水平为很丰富, 比例为 70.83%。磷肥施用方面: 54.49%的采样点为中等, 德宏、怒江、普洱、文山、临沧、保山产区采样点中等比例分别为 66.67%、61.54%、61.40%、60.00%、39.39%、30.56%。钾肥施用方面: 30.90%的采样点为中等, 德宏、临沧、普洱产区采样点中等比例分别为 54.17%、39.39%、35.09%; 保山、怒江产区采样点为很缺的比例为 44.44%、38.46%, 文山、怒江产区采样点为极缺的比例分别为 40.00%、38.46%。

2.2 咖啡园海拔与土壤养分现状

各产区采样点海拔与土壤养分分布如图1所示。在海拔分布上, 45.51%的采样点位于高海拔(1 200~1 500 m)区域, 其中文山、保山产区的高海拔采样点比例分别达 60.00%、55.56%。土壤酸碱度方面, 55.06%的采样点呈酸性(pH 4.5~5.5), 普洱产区采样点酸性土壤比例高达 82.46%, 而文山产区采样点微酸性土壤比例为 40.00%。土壤有机质缺乏的采样点占 30.34%, 其中以文山、怒江产区采样点尤为突出, 比例分别为 66.67%、61.54%; 德宏、普洱产区采样点土壤有机质很丰

富的比例分别为 62.50%、43.86%。无机氮方面, 32.02%的采样点很丰富, 但怒江、文山产区采样点的缺乏比例却分别达 100.00%、73.33%。速效磷方面, 29.78%的采样点为中等水平, 保山、怒江产区采样点丰富的比例分别为 38.89%、61.54%, 文山产区采样点则呈现两极分化(极缺与丰富的比例各为 33.33%)。速效钾方面, 中等水平的采样点占 47.75%, 保山产区采样点丰富的比例为 50.00%, 文山产区采样点缺乏的比例为 40.00%。

2.3 咖啡园产量现状

云南咖啡园产量区域差异显著(图2)。采样点中咖啡产量很低(30~60 kg/666.7 m²)的占 26.4%, 其中保山产区采样点产量中等的占 27.78%; 临沧、德宏、普洱、文山产区采样点高产的比例突出, 分别达 60.61%、54.17%、54.39% 和 40.00%; 怒江产区采样点极低产量的比例达 46.15%。

2.4 施肥-土壤-产量的影响机制

2.4.1 关联分析

由图3和表4可知, 云南省咖啡园施肥量与产量呈二次曲线关系, 存在最佳施肥阈值。分析表明, 氮、磷、钾肥施用量与产量均呈极显著二项式关联($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.645 8、0.714 2、0.823 2, 其中钾肥相关性最强。当施氮量超过 288.70 kg/666.7 m²、施磷量超过 92.43 kg/666.7 m²、施钾量超过 299.96 kg/666.7 m²时, 产量随施肥量增加而下降。这验证了过量施肥的减产效应, 凸显精准施肥对产量提升的关键作用。

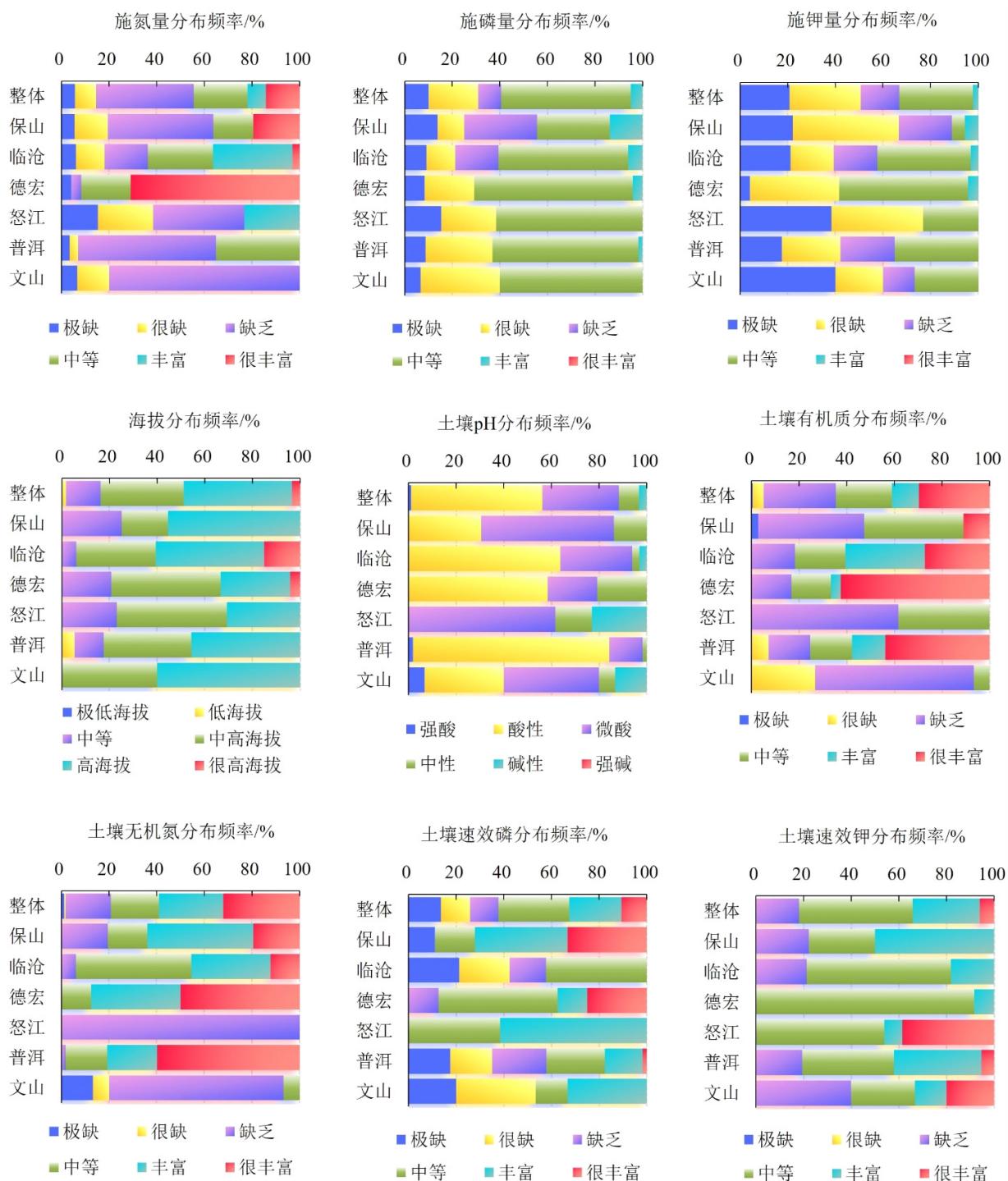


图 1 云南咖啡产区施肥、海拔与土壤养分调查结果

由图 4 可知, 云南咖啡园产量与多种因素显著正相关, 钾肥施用量与产量极显著正相关($r=0.815$), 为主要驱动因子; 磷肥施用量、土壤有机质含量与产量显著正相关, 相关系数分别为 0.665 和 0.605; 氮肥施用量与产量呈中等正相关($r=$

0.579), 土壤速效氮含量与产量相关性较弱($r=0.268$); 土壤 pH 与产量显著负相关($r=-0.416$); 海拔与产量呈弱正相关($r=0.211$); 土壤速效磷含量与产量呈弱负相关($r=-0.175$), 土壤速效钾含量与产量几乎无相关性($r=0.053$)。

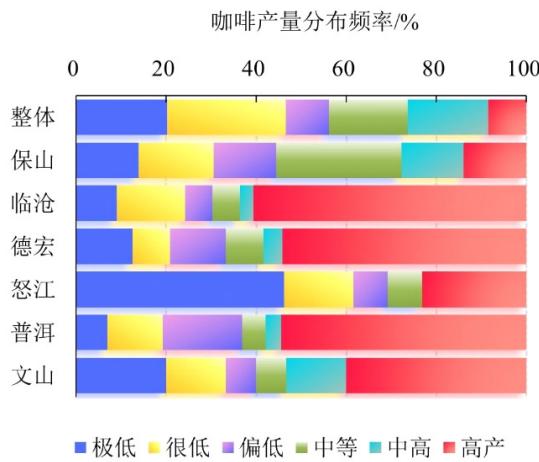


图 2 云南咖啡产区咖啡产量调查结果

2.4.2 通径分析与回归模型

通径分析显示(图5):施钾量(直接通径系数

0.673 5)、土壤有机质(直接通径系数 0.201 0)和 pH(直接通径系数-0.120 9)为直接影响产量的显著因子。施钾量直接效应最强,钾素对光合作用及抗逆性具有调控作用;土壤有机质可改善土壤结构;pH呈负向调控,表明需维持适宜酸性环境。

基于逐步回归分析构建产量预测模型($R^2=0.849$, $P < 0.01$),方程为: $Y=5594.817 + 74.03K + 70.823OM - 968.987pH$ 。模型显示:施钾量(K)为核心驱动因子,经显著性检验($t=6.82$, $P < 0.001$),施钾量每增加 $1 \text{ kg}/666.7 \text{ m}^2$,产量提升 $74.03 \text{ kg}/666.7 \text{ m}^2$,该结果与关联分析确定的最佳施钾阈值($299.96 \text{ kg}/666.7 \text{ m}^2$)吻合;土壤有机质(OM)为长效支撑因子($t=5.37$, $P < 0.01$),每增加 1%,产量提高 $70.82 \text{ kg}/666.7 \text{ m}^2$,建议有机质含量小于 2% 的区域长期增施有机肥。

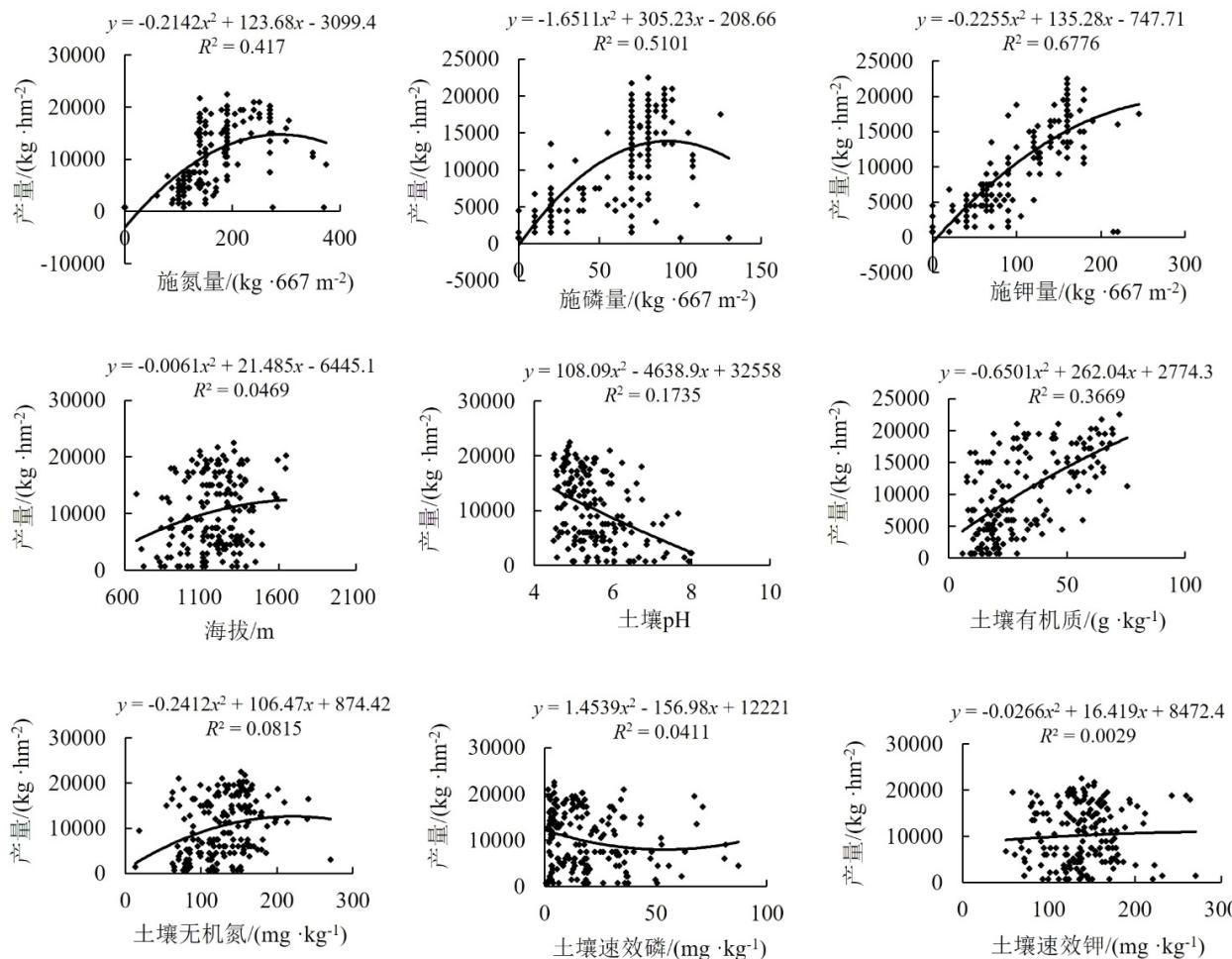
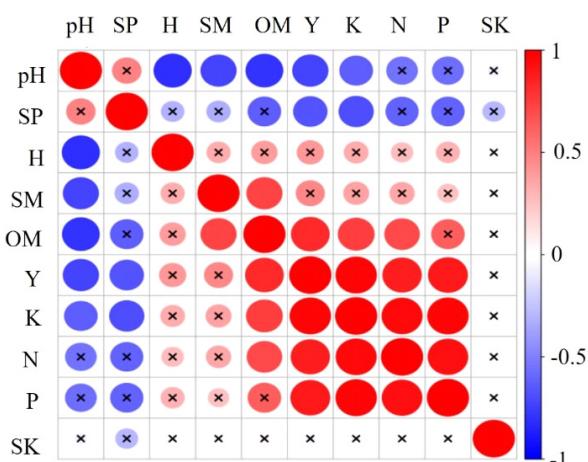


图 3 云南咖啡园施肥量、海拔、土壤养分与产量的回归分析

表 4 施肥量与产量的模拟方程

项目	与产量的二项式方程	相关系数	最佳值/ (kg · 666.7 m ⁻²)	最佳产量/ (kg · 666.7 m ⁻²)
施氮量	$y = -0.2142x^2 + 123.68x - 3099.4$	0.645 8**	288.70	14 753.94
施磷量	$y = -1.6511x^2 + 305.23x - 208.66$	0.714 2**	92.43	13 897.90
施钾量	$y = -0.2255x^2 + 135.28x - 747.71$	0.823 2**	299.96	19 541.29



H.海拔; OM.有机质; SN.无机氮; SP.有效磷; SK.速效钾; N.施氮量; P.施磷量; K.施钾量; Y.产量。图中“×”表示相关性不显著; 红色代表正相关, 蓝色代表负相关。

图 4 云南咖啡园施肥量、土壤养分含量和产量的相关关系

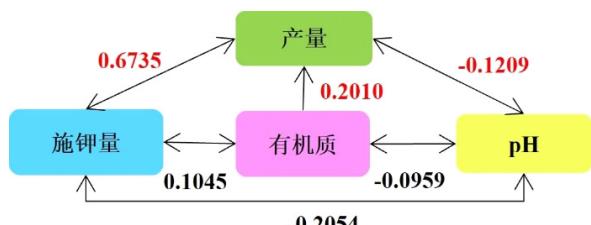


图 5 咖啡产量与施钾量、有机质和 pH 的通径分析

土壤 pH 值与产量呈显著负相关 ($t = -4.91$, $P < 0.01$), 采样范围内 pH 从 4.0 升高到 5.0, 产量平均下降 968.98 kg/666.7 m², 表明在一定范围内提升土壤 pH 值有利于咖啡产量的提高。

3 讨论与结论

调查显示云南咖啡园施肥状况与土壤养分空间异质性显著, 需从养分供需匹配角度探讨合适的施肥量。氮肥区域失衡, 41.01% 采样点氮肥施用缺乏, 文山产区样点 (80.00%) 氮肥施用缺乏情

况突出, 与该地土壤无机氮含量缺乏 (73.33%) 对应, 系氮肥投入不足致土壤氮库匮乏, 限制了咖啡营养生长与光合代谢^[12]; 德宏 70.83% 采样点氮肥施用过多, 结合其近半采样点土壤无机氮很丰富, 可能存在氮素淋溶与咖啡徒长风险^[13]。磷肥施用水平以中等为主, 土壤速效磷含量方面, 文山产区样点速效磷极缺与极丰富比例均为 33.33%, 但其 60.00% 采样点磷肥施用为中等, 这可能因为其 66.67% 采样点土壤有机质缺乏, 致磷素有效性降低^[14]。钾肥方面, 除文山产区采样点外, 各地钾肥施用及速效钾水平大多在中等以上, 文山产区采样点速效钾与钾肥施用均不足。

通过二次多项式回归分析, 发现施肥量超过最佳阈值后, 产量显著下降。模型拟合结果显示, 过量施肥导致产量递减。未来需结合区域土壤特征 (如高海拔区有机质分解慢导致的氮素固定^[15]), 推行“分区施策”: 在缺氮、缺磷的文山、普洱等产区, 针对性增加氮磷肥投入, 而在德宏等氮肥过剩区要严格控制氮肥用量, 以平衡产量增益与生态风险^[16]。

通径分析与回归模型拟合表明, 施钾量、土壤有机质和 pH 是影响产量的核心因素。钾肥能通过增强光合作用与抗病性提升作物产量^[17], 有机质则通过优化根际微环境间接促进植株养分吸收^[18]。德宏土壤有机质丰富且咖啡产量高, 也表明了有机质对产量的正向调控作用, 此外其与施钾量、无机氮含量显著正相关, 表明农田生态系统中养分间存在交互作用^[19]。土壤 pH 对产量具有负向直接效应, 表明咖啡植株虽然喜酸性土壤, 但也应维持适宜的土壤 pH 范围, 因为土壤酸性过强会抑制磷素有效性^[20]和诱发铝毒^[21], 不利于作物生长。

基于上述结果, 提出以下优化策略: 1) 钾肥优先补给, 针对文山、保山等产区钾肥缺乏现状,

通过增施钾肥(如硫酸钾)挖掘产量潜力,同时避免过量施用导致资源浪费;2)土壤改良与有机质提升,在酸性过强的土壤区(如普洱、临沧产区)施用石灰调节pH,提高磷素有效性,在有机质匮乏区(如文山、怒江产区)推广有机肥还田与绿肥种植,增强土壤保肥能力;3)区域化精准施肥,根据不同产区的土壤养分特征制定施肥方案,例如在缺氮的普洱产区增加缓释氮肥,在富氮的德宏产区优化氮肥利用率;4)生态协同管理,通过间作固氮作物、覆盖作物等措施,构建“养分循环—土壤健康—产量提升”的可持续发展模式,降低对化肥的依赖。未来需通过精准施肥、土壤改良和区域化管理等手段,破解养分供需矛盾,实现咖啡产量与品质的协同提升。

参考文献:

- [1] 云南省农业农村厅. 云南咖啡产业阳光正好[EB/OL]. 2024-04-07. https://nync.yn.gov.cn/html/2024/yunnongkuanxun-new_0407/406228.html.
- [2] EUROMONITOR INTERNATIONAL. Coffee market report[R]. London: Euromonitor, 2025.
- [3] LI R, CHENG JH, LIU XG, et al. Optimizing drip fertigation at different periods to improve yield, volatile compounds and cup quality of Arabica coffee[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14:1148616.
- [4] 刘元芝, 谢甫绵, 张洪钧. 氮肥施用对沈玉系列玉米杂交种品质及产量的影响研究[J]. 种子, 2009, 28(10): 104-106, 117.
- [5] 田飞, 田恩阔, 程尚明, 等. 禾睦玉918高产高效栽培技术研究[J]. 种子, 2018, 37(3):108-112.
- [6] KURNIAWAN S, NUGROHO R, USTIATIK R, et al. Soil nitrogen dynamics affected by coffee (*Coffea arabica*) canopy and fertilizer management in coffee-based agroforestry[J]. *Agroforestry Systems*, 2024, 98(4): 1323-1341.
- [7] NZEYIMANA I, HARTEMINK AE, RITSEMA C, et al. Mulching effects on soil nutrient levels and yield in coffee farming systems in Rwanda[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(4):597-608.
- [8] 董云萍, 赵青云, 张昂, 等. 施用酸性土壤调节剂、腐熟咖啡果皮对咖啡苗生长及土壤养分含量、酶活性的影响[J]. 福建农业学报, 2022, 37(11):1493-1502.
- [9] MARTÍNEZ-ESTÉVEZ M, MUÑOZ- SÁNCHEZ A, LOYOLA-VARGAS V, et al. Modification of the culture medium to produce aluminum toxicity in cell suspensions of coffee (*Coffea arabica* L.)[J]. *Plant Cell Reports*, 2001, 20(6):469-474.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000:30-107.
- [11] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社, 1998:843-984.
- [12] BUSATO C, REIS EFD, OLIVEIRA M. Different nitrogen levels on vegetative growth and yield of conilon coffee (*Coffea canephora*)[J]. *Crop Production*, 2022, 52(12):e20200770.
- [13] WANG XY, ZHU H, SHUTES B. Nutrient runoff loss from saline-alkali paddy fields in Songnen Plain of Northeast China via different runoff pathways: effects of nitrogen fertilizer types[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 8(21):97977-97989.
- [14] ROLIM GDS, APARECIDO LEDO, DE SOUZA PS. Climate and natural quality of *Coffea arabica* L. drink[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 142(3/4):1151-1162.
- [15] EVIZAL R, ERY PRASMATIWI F. Nutrient deficiency induces branch and shoot dieback in robusta coffee[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. London:IOP, 2022:12032.
- [16] SELLAN G, THOMPSON J, MAJALAP N. Impact of soil nitrogen availability and pH on tropical heath forest organic matter decomposition and decomposer activity[J]. *Pedobiologia*, 2020, 76:150534.
- [17] ANIS R, NIKMATUL K, BAMBANG S. The effect of nitrogen dosage on N efficiency and protein content in potatoes[J]. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 2021, 16(1):1-10.
- [18] 李丽娟, 谢婷婷, 张松林. 三峡库区消落带4种适生植物根际与非根际土壤养分与酶活性特征研究[J]. 生态学报, 2020, 40(12):4123-4132.
- [19] BASHIR O, ALI T, BABA ZA. Soil organic matter and its impact on soil properties and nutrient status[J]. *Microbiota and Biofertilizers*, 2021, 4(1):129-159.
- [20] JOHAN PD, AHMED O, MARU A. Optimisation of charcoal and sago (*Metroxylon sagu*) bark ash to improve phosphorus availability in acidic soils[J]. *Agronomy*, 2021, 11(9):1758.
- [21] BONOMELLI C, ARTACHO P. Aluminum toxicity in sweet cherry trees grown in an acidic volcanic soil[J]. *Agronomy*, 2021, 11(6):1259.