

侍浩良¹, 王继明², 郑元仙², 周红霞², 李文亭², 杨云丽², 李光洋², 田明慧², 余磊¹, 黄飞燕¹, 周厚发²

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.07.025

云南双江烟叶中微量元素与化学成分关联分析

侍浩良¹, 王继明², 郑元仙², 周红霞², 李文亭², 杨云丽², 李光洋², 田明慧², 余磊¹, 黄飞燕¹, 周厚发²

(1. 昆明学院农学与生命科学学院/云南省都市特色农业工程技术研究中心, 云南昆明 650214;

2. 云南省烟草公司临沧市公司, 云南临沧 677000)

摘要:为提高云南省临沧市双江县烟叶品质及烟叶产业的竞争力,以该县 5 个乡(镇)23 份 K326 品种 C3F 等级初烤烟叶为对象,系统测定 9 种中微量元素含量和 8 项化学成分指标数据,采用主成分分析、相关性分析、灰色关联模型等方法,探讨双江烟区初烤烟叶中微量元素、化学成分含量差异以及微量元素组分的内部互作关系,分析主要化学成分指标间的协同/拮抗效应及中微量元素对常规化学成分(如糖、氮、淀粉等)的调控机制,并进一步研究烟叶中微量元素和化学成分指标分别与工业可用性之间的关联。结果表明,双江县烟叶中钙、镁、铜、锌、铁、锰、硼、钼、硅等元素含量范围分别为 6.48 ~ 14.89 g/kg、1.13 ~ 4.62 g/kg、3.12 ~ 14.26 mg/kg、19.24 ~ 70.96 mg/kg、64.52 ~ 365.40 mg/kg、104.74 ~ 709.80 mg/kg、18.61 ~ 60.44 mg/kg、0.01 ~ 0.17 mg/kg、1 223.33 ~ 2 568.58 mg/kg。烟叶中还原糖、氧化钾和淀粉平均含量均处于最优区间,总植物碱平均含量略高于最优区间,总氮和蛋白质平均含量略低于最优区间。烟叶中硅含量与钼元素含量呈极显著正相关、锰含量分别与钼和含量硅元素含量呈显著负相关。化学成分中 4 个主成分累计贡献率为 91.475%。CCUI 分别与总植物碱、总氮和还原糖含量的关联性较强。总糖含量与还原糖、淀粉和氯含量呈正相关,而与总氮、总植物碱、蛋白质和氧化钾含量呈负相关;总氮、还原糖、氧化钾等含量与其他物质含量也分别存在正向、负向相关关系。可见,双江县烟叶存在总氮不足、总植物碱偏高等问题,要平衡施肥,重视钙肥、硅肥,综合考虑多种元素并严控氯肥,烟叶生产加工要监控关键化学成分含量。不同乡(镇)烟叶各具特色,需依此调整烘烤及种植调制技术,进而提升整体质量。

关键词:云南双江;微量元素;化学成分;关联分析;烟叶品质

中图分类号:TS44 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)07-0195-08

烟叶作为卷烟工业的核心原料,其品质直接决定卷烟的感官质量、化学协调性和香气特征。初烤烟叶作为烟叶加工的关键环节,其中微量元素及化学成分的构成与分布规律是优化烟叶原料利用、提升卷烟品质的重要基础^[1-2]。中微量元素在烟草的生理代谢过程中也扮演着关键角色,能够协调烟株的生理机能,增强烟草的抗逆性^[3]。烟叶中微量元素的缺失不仅会导致烟叶内化学成分的失调、工业可用性降低,还会影响烤烟品质。中微量元素如

钙、镁、铜、锌、铁、锰、硼、硅等是烟草生长发育所必需的营养元素,对烤烟的化学成分有着重要影响^[1]。如硼能够改善烟叶的组织结构,降低烟气中的焦油含量;铜能增加烟叶中烟碱的含量^[2];镁与烟叶中烟碱含量呈负相关关系^[2]。锌、锰等微量元素的含量对烤烟化学成分的协调性、香气质、香气量和余味也有一定的促进作用^[3]。烟叶化学成分涵盖了糖类、碱性物质、蛋白质、挥发性和非挥发性有机化合物这几大类^[4]。其中,烟碱是烟叶化学成分中最主要的碱性成分,其含量直接影响烟草产品的生理效应和口感^[5];糖类会影响烟叶的燃烧速率,从而影响烟雾温度和烟气浓度,进而影响烟草的口感和喉感^[6]。糖类还会在烘烤过程中起焦化反应,影响烟叶的表面质感和颜色深度^[7];蛋白质通过分解形成小分子挥发性化合物,可以形成独特的烟草香味^[8];总氮过量会导致烟叶过厚、烟碱含量过高、糖分降低、燃烧性差且杂气重^[9],总氮不足则会导致叶片薄、颜色浅、香气不足^[10];钾能提高还原糖含量,改善香气和吃味^[11];少量氯可以参与光

收稿日期:2025-04-27

基金项目:云南省烟草公司临沧市公司科技计划项目(编号:2024530900242001、2023530900242001);云南省基础研究专项(编号:202401AT070034)。

作者简介:侍浩良(2000—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事烟草栽培生产研究。E-mail:1816148023@qq.com。

通信作者:黄飞燕,博士,研究员,硕士生导师,主要从事烟草栽培与营养研究,E-mail:125593879@qq.com;共同通信作者:周厚发,硕士,农艺师,主要从事烟草质量评价研究,E-mail:670991024@qq.com。

合作用酶的激活,增强植株的抗逆性^[12],氯过量会降低燃烧性,导致熄火、增强吸湿性,烟叶灰分发黑且燃烧时有异味。需要控制氮钾比,避免氯干扰钾的吸收和代谢^[13]。双江县作为云南省重要的烟叶产区之一,其烟叶质量综合评价对优化区域烟叶产业布局、提升工业可用性具有关键意义^[14]。但现有研究表明,在外观质量评价中,双江县因颜色(缺镁、硼、锰、锌、铜等元素;钙镁拮抗、磷锌竞争性吸收)、成熟度(氮过量、磷不足、钾硫缺乏;硼与糖分协同运输受阻)等指标表现不佳^[15];在物理特性方面,燃烧性(缺钾、硫、磷等元素;烟碱与淀粉的拮抗作用)、灰色(硫和磷协同阻燃;糖分不足、氮含量过高)、刺激性(氮含量过高)等指标得分也低于沧源县、耿马县等周边区域^[15]。这种质量短板制约了双江县烟叶产业的竞争力。因此,本研究以双江县初烤烟叶为研究对象,系统分析其中微量元素和化学成分分布特征,通过主成分分析、相关性分析、逐步回归模型等统计方法,揭示双江县烟叶中微量元素对化学可用性的调控作用,进而为精细调控双江烟区烟叶中微量元素含量,改善化学成分的结构,增加工业可用性,提为提高双江县烟叶品质及烟叶产业的竞争力供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2024 年根据海拔、土壤类型、地形地貌、生产水平、种植规模等因素,在双江县勐勐镇(5 份)、大文乡(4 份)、邦丙乡(2 份)、忙糯乡(4 份)和沙河乡(8 份)采集 K326 品种 23 份 C3F 等级代表性烟叶,每份样品取 3.0 kg。

1.2 样品分析

1.2.1 烟叶中微量元素测定 采用火焰光度计 M410 按照相应方法^[16]测定烟叶中钙、镁、锌、铜、硅[《森林植物与森林枯枝落叶层全氯的测定》(LY/T 1270—1999)]、硼[《森林植物与森林枯枝落叶层全硼的测定》(LY/T 1273—1999)]、钼[《森林土壤温度的测定》(LY/T 1274—1999)]等元素含量。

1.2.2 烟叶化学成分测定 初烤烟叶化学成分总糖、还原糖、总氮、总植物碱、氧化钾、氯、淀粉、蛋白质含量分别采用 YC/T 159—2002《烟草及烟草制品水溶性糖的测定 连续流动法》、YC/T 161—2002《烟草及烟草制品总氮的测定连续流动法》、YC/T 468—2013《烟草及烟草制品 总植物碱的测

定 连续流动(硫氰酸钾)法》、YC/T 173—2003《烟草及烟草制品 钾的测定 火焰光度法》、YC/T 162—2011《烟草及烟草制品氯的测定连续流动法》、YC/T249—2008《烟草及烟草制品 蛋白质的测定 连续流动法》、YC/T216—2013《烟草及烟草制品 淀粉的测定 连续流动法》的方法进行测定^[17]。

1.2.3 评价方法 参照国内外对烟叶中微量元素的研究结果及丰缺划分标准^[18-21],制定双江县烟叶中微量营养元素临界点的评价标准(表 1),用于判断烟叶中微量营养元素的丰缺状况。另外,烟叶硅元素诊断临界值按 0.26% (2 600 mg/kg) 的标准进行^[22],低于此临界值表明烟叶硅元素缺乏。参照王晓宾等的研究方法^[18]确定各项化学成分指标值的函数类型及临界值(表 2),并根据王晓宾等的研究结果^[23]可知,初烤烟叶总糖、还原糖、总氮、总植物碱、氯、淀粉、蛋白质含量的最优或最适区间分别为 20.0% ~ 28.0%、23.0% ~ 26.0%、2.0% ~ 2.3%、2.1 ~ 2.4%、0.3% ~ 0.8%、3.0% ~ 5.0%、7.0% ~ 10.0%,氧化钾含量 ≥ 2.5% 为最优,若烟叶的各项常规化学成分含量均处于最优区间,则说明该烟叶化学成分的协调性及可用性较好。根据熵值法确定各指标的权重(图 1)。常用于评价的隶属函数类型主要有抛物线型(公式 1)和 S 型(公式 2)2 种。

抛物线型函数:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 - \frac{0.9(x - x_b)}{x_{\max} - x_b} & x_b < x < x_{\max} \\ 1.0 & x_a \leq x \leq x_b \\ 0.9\left(\frac{x - x_{\min}}{x_a - x_{\min}}\right) + 0.1 & x_{\min} < x < x_a \\ 0.1 & x \leq x_{\min} \text{ 或 } x \geq x_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

S 型函数:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq x_{\max} \\ \frac{0.9(x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} + 0.1 & x_{\min} < x < x_{\max} \\ 0.1 & x \leq x_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

化学成分可用性指数 (chemical components usability index, CCUI) 的计算公式为:

$$CCUI = \sum_{i=1}^n W_i \times N_i \quad (3)$$

式中: W_i 表示为化学成分各指标所占权重; N_i 表示

表 1 烟叶中微量元素丰缺分级标准

分级标准	钙含量 (g/kg)	镁含量 (g/kg)	铜含量 (mg/kg)	锌含量 (mg/kg)	铁含量 (mg/kg)	锰含量 (mg/kg)	硼含量 (mg/kg)	钼含量 (mg/kg)
很低	≤12.0	≤2.0	≤4.0	≤7.0	≤55.0	≤20.0	≤10.0	≤0.1
低	12.0 ~ ≤15.0	2.0 ~ ≤5.0	4.0 ~ ≤6.0	7.0 ~ ≤20.0	55.0 ~ ≤90.0	20.0 ~ ≤50.0	10.0 ~ ≤20.0	0.1 ~ ≤0.5
适宜	15.0 ~ 25.0)	5.0 ~ 9.0	6.0 ~ ≤15	20.0 ~ ≤50.0	90.0 ~ ≤120.0	50.0 ~ ≤200.0	20.0 ~ ≤30.0	0.5 ~ 1.0
高	≥25.0	≥9.0	15 ~ 25	50.0 ~ 70.0	120.0 ~ 200.0	200.0 ~ 500.0	30.0 ~ 40.0	≥1.0
很高	—	—	≥25.0	≥70.0	≥200.0	≥500.0	≥40.0	—

表 2 初烤烟叶隶属度函数曲线转折点的取值

项目	抛物线型函数						S 型函数	
	总糖含量 (%)	还原糖含量 (%)	总氮含量 (%)	总植物碱含量 (%)	氯含量 (%)	淀粉含量 (%)	氯化钾含量 (%)	蛋白质含量 (%)
$x_{\min}$ (下临界值)	10	12	1.5	1.5	0.2	2	1.5	7
$x_{\max}$ (上临界值)	20	16	1.8	2.5	0.3	3		
x_a (下限最优值)	28	24	2.2	3.5	0.7	5		
x_b (上限最优值)	35	28	2.5	4.0	1.0	7	2.5	10

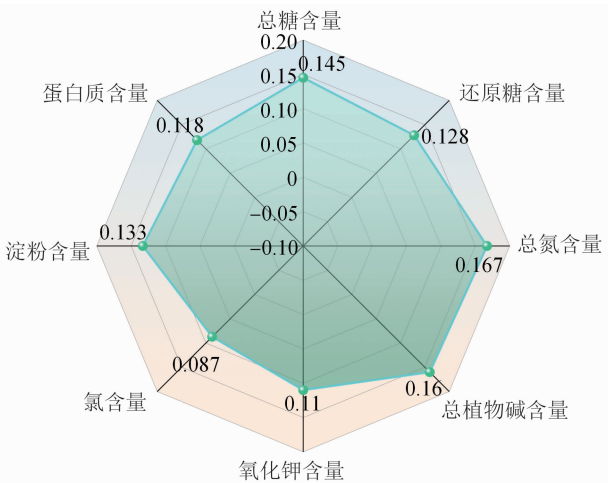


图1 双江县初烤烟叶化学成分各指标含量的权重值

各指标的隶属度函数值。

1.2.4 数据处理 采用 SPSS 22.0 软件对数据进行方差分析、主成分分析、相关性分析,利用 Origin 2021 进行线性回归分析,利用 SPSS pro 在线工具进行随机森林回归分析^[24],通过 Chiplot 在线工具和 Origin 2021 绘制热图、散点图、雷达图等。

2 结果与分析

2.1 初烤烟叶中微量元素综合分析

2.1.1 初烤烟叶中微量元素含量分析 由表 3 可知各元素含量范围:钙为 6.48 ~ 14.89 g/kg,镁为 1.13 ~ 4.62 g/kg,铜为 3.12 ~ 14.26 mg/kg,锌为 19.24 ~ 70.96 mg/kg,铁为 64.52 ~ 365.40 mg/kg,锰

为 104.74 ~ 709.80 mg/kg,硼为 18.61 ~ 60.44 mg/kg,钼为 0.01 ~ 0.17 mg/kg,硅为 1 223.33 ~ 2 568.58 mg/kg。8 种元素含量变异系数在 16.18% ~ 72.86% 之间,其中钼元素含量的变异系数最大,表明样本间差异较大,有必要进一步分析各乡(镇)烟叶中微量元素含量的差异。各元素含量偏度和峰度基本为正(除铜元素含量的峰度为 -1.22),表明数据多在均值左侧,数据较集中。

2.1.2 不同区域初烤烟叶中微量元素含量差异分析 由表 4 可知,5 个乡(镇)烟叶中钙元素含量均处于很低水平;勐勐镇烟叶镁元素含量最高,但仍处于适宜范围以内;除沙河乡外的 4 个乡(镇)铜元素含量均可以满足优质烟叶的标准;5 个乡(镇)烟叶铁元素含量均处于高水平;仅勐勐镇、忙糯乡和大文乡烟叶中锰元素含量处于适宜范围;邦丙乡、忙糯乡和大文乡烟叶中硼元素含量均处于适宜范围;5 个乡(镇)烟叶钼元素含量均处于低及以下水平;所有乡(镇)烟叶中硅元素含量均不满足适宜标准。

2.1.3 初烤烟叶中微量元素各指标相关性分析 使用 Pearson 相关系数分析法研究双江县初烤烟叶中微量元素含量 9 个指标之间的相关性,结果(图 2)显示,烟叶中硼含量与镁含量呈显著正相关;钼含量与锰含量呈显著负相关;硅含量与钼含量呈极显著正相关,硅含量与锰含量呈显著负相关;钙含量与锰含量和硅含量呈负相关但不显著;镁含量与

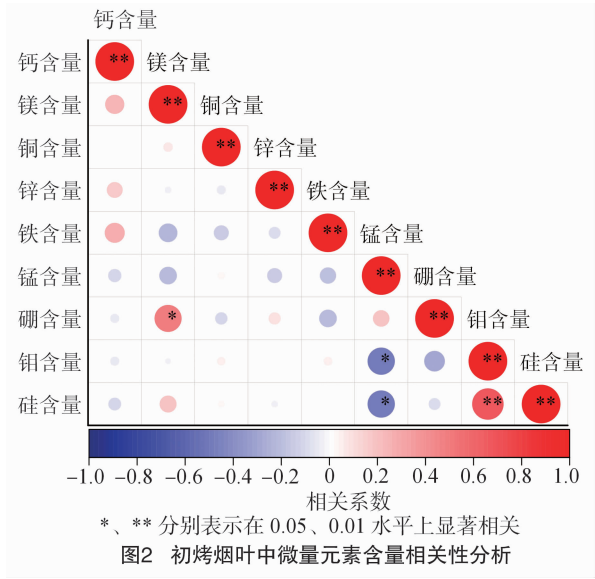
表 3 烟叶中 8 种中微量元素含量描述性统计

项目	钙含量 (g/kg)	镁含量 (g/kg)	铜含量 (mg/kg)	锌含量 (mg/kg)	铁含量 (mg/kg)	锰含量 (mg/kg)	硼含量 (mg/kg)	钼含量 (mg/kg)	硅含量 (mg/kg)
最小值	6.48	1.13	3.12	19.24	64.52	104.74	18.61	0.01	1 223.33
最大值	14.89	4.62	14.26	70.96	365.40	709.80	60.44	0.17	2 568.58
平均值	10.97	2.44	7.99	37.66	152.90	221.69	32.67	0.06	1 694.90
标准差	1.99	0.91	3.78	12.44	64.53	131.28	10.46	0.04	274.16
偏度	0.04	0.68	0.50	0.95	1.85	2.64	1.11	1.05	1.33
峰度	0.05	0.22	-1.22	1.10	4.60	8.51	1.12	0.78	3.81
变异系数(%)	18.17	37.56	47.29	33.02	42.2	59.22	32.01	72.86	16.18

表 4 双江县 5 个乡(镇)烟叶中微量元素含量差异

乡(镇)	钙含量 (g/kg)	镁含量 (g/kg)	铜含量 (mg/kg)	锌含量 (mg/kg)	铁含量 (mg/kg)	锰含量 (mg/kg)	硼含量 (mg/kg)	钼含量 (mg/kg)	硅含量 (mg/kg)
勐勐镇	10.99±3.13a	3.73±0.66a	8.64±3.33ab	33.80±12.81a	120.26±31.92a	157.20±59.89b	45.32±12.43a	0.07±0.04a	1 788.75±130.30a
邦丙乡	10.38±1.52a	2.64±0.45b	10.41±4.45ab	34.72±6.82a	126.40±8.60a	417.01±414.07a	28.27±12.89a	0.04±0.04a	1 507.10±401.30a
忙糯乡	11.35±1.54a	1.54±0.49c	12.39±1.70a	44.44±15.99a	140.03±29.62a	172.31±41.38b	26.92±7.03a	0.07±0.04a	1 596.43±131.96a
大文乡	11.29±1.82a	2.69±0.36b	8.24±4.15ab	42.57±19.94a	180.67±28.32a	160.25±28.19b	27.06±5.08a	0.07±0.03a	1 922.23±436.25a
沙河乡	10.75±1.95a	1.90±0.39bc	4.67±1.19b	34.96±6.65a	172.47±99.20a	268.57±81.33a	31.55±6.43a	0.05±0.05a	1 618.76±237.54a

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。



铁含量和锰含量呈负相关但不显著;铜含量和铁含量呈负相关但不显著;硼含量与钼含量呈负相关但不显著。

2.2 初烤烟叶化学成分综合分析

2.2.1 烟叶样品化学成分含量差异分析 由表 5 可知,双江县烤烟的还原糖、氧化钾和淀粉平均含量均处于最优区间,总植物碱平均含量略高于最优区间,总氮和蛋白质平均含量略低于最优区间。此外,烟叶的总糖、还原糖、总氮、总植物碱、氧化钾、氯、淀粉、蛋白质含量的变异系数分别为 9.56%、

11.23%、15.29%、22.27%、15.27%、79.02%、31.78%、12.24%。表明双江县烤烟 8 项化学成分含量的波动较大,尤其是氯离子。

2.2.2 烟叶样品化学成分主成分的特征向量与贡献率 在对双江县初烤烟叶化学成分综合评价时,不能仅考虑某一项指标的优劣,而应对所有指标含量进行全面、科学的综合分析。本研究以双江县 23 份烟叶原料的 8 个化学成分指标构成的矩阵进行主成分分析,结果见表 6。主成分 1 的贡献率为 50.062%,主要由总糖、总氮和总植物碱含量决定,且有较大的正向载荷值(0.913、0.881、0.933),而还原糖含量有较大的负向载荷值(-0.747);主成分 2 的贡献率为 22.546%,主要由淀粉含量(0.844)和氯含量(0.740)决定,其中氧化钾含量有较大的负向载荷值(-0.852);主成分 3 的贡献率为 12.219%,主要由蛋白质含量(0.810)决定;主成分 4 的贡献率为 6.648%,主要由氧化钾含量(0.458)决定,前 4 个主成分累计贡献率为 91.475%。

2.2.3 烟叶样品化学成分各指标间相关性分析 由图 3 可知,总糖含量与还原糖含量呈极显著正相关;总氮含量与总植物碱、蛋白质含量均呈极显著正相关;氮含量与淀粉含量呈显著正相关。总糖含量与总氮、总植物碱、蛋白质含量均呈极显著负相关,与氧化钾含量呈负相关;还原糖含量与总氮、总

表 5 双江县初烤烟叶化学成分差异

项目	总糖含量 (%)	还原糖含量 (%)	总氮含量 (%)	总植物碱含量 (%)	氧化钾含量 (%)	氯含量 (%)	淀粉含量 (%)	蛋白质含量 (%)
最小值	29.04	17.62	1.42	1.66	1.95	0.04	2.38	5.08
最大值	41.63	27.47	2.40	4.35	3.64	0.50	7.55	7.81
平均值	36.156 1	23.290 4	1.744 3	2.592 2	2.710 9	0.169 1	4.280 4	6.01
标准差	3.456 46	2.616 14	0.266 76	0.577 23	0.413 95	0.133 62	1.360 36	0.735 66
偏度	-0.503	-0.152	1.127	1.141	0.106	1.296	0.535	0.746
峰度	-0.499	-0.499	1.085	2.730	-0.144	0.845	0.066	-0.137
变异系数 (%)	9.56	11.23	15.29	22.27	15.27	79.02	31.78	12.24

表 6 双江县初烤烟叶化学成分的特征根、贡献率和累计贡献率

指标	载荷值			
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
总糖含量	0.913	0.178	-0.174	-0.062
还原糖含量	-0.747	0.272	-0.271	-0.254
总氮含量	0.881	-0.066	0.376	-0.113
总植物碱含量	0.933	0.002	-0.113	-0.212
氧化钾含量	0.117	-0.852	0.075	0.458
氯含量	0.101	0.740	-0.509	0.388
淀粉含量	-0.306	0.844	0.320	0.208
蛋白质含量	0.505	0.020	0.810	0.044
特征值	4.005	1.804	0.978	0.532
贡献率 (%)	50.062	22.546	12.219	6.648
累计贡献率 (%)	50.062	72.608	84.827	91.475

植物碱含量呈极显著负相关,与蛋白质含量呈显著负相关,与氧化钾含量呈负相关;总氮含量与氯、蛋白质含量均呈负相关但不显著;氧化钾含量与淀粉含量呈极显著负相关,与氯含量呈显著负相关。

2.2.4 烟叶样品化学成分可用性分析 由图 4 可知,双江县初烤烟叶化学成分可用性指数 CCUI 值的变幅为 0.22 ~0.83,均值为 0.62,按照该值由高至低的次序排列为勐勐镇(0.73) > 忙糯乡(0.70) > 沙河乡(0.60) > 大文乡(0.56) > 邦丙乡(0.35)。

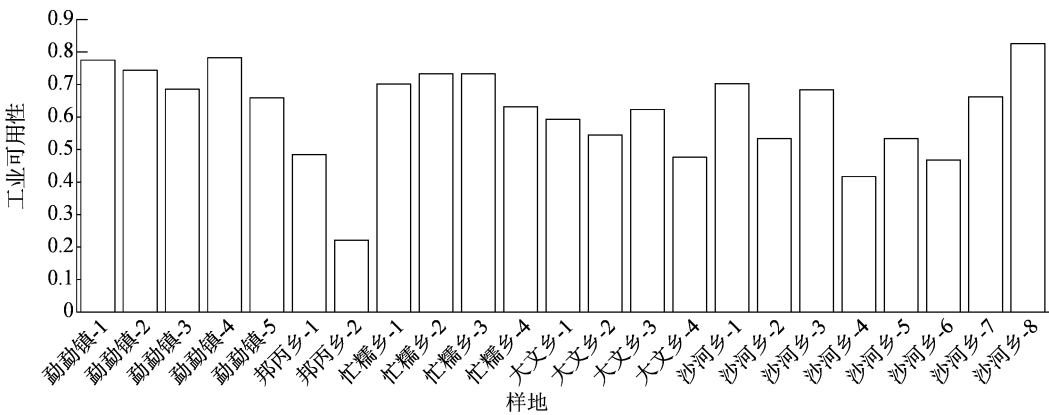


图4 双江县 5 个乡(镇)初烤烟叶化学成分可用性指数值

将 CCUI 值与各化学成分指标进行线性相关性分析,可见 8 个化学指标均与 CCUI 呈正相关。其中,相关系数最大的 3 个化学成分指标分别为总植物碱、总氮和还原糖含量,相关系数最小的 3 个化学成分指标分别为氯、蛋白质和淀粉含量(图 5)。

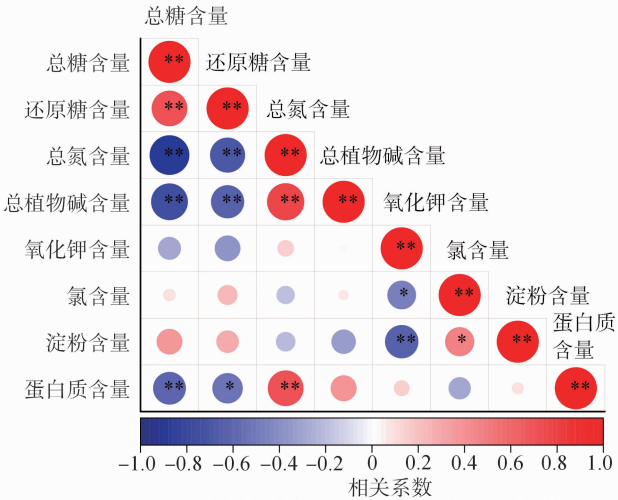


图3 双江县初烤烟叶化学成分各项指标间的相关性分析

2.3 双江县烟叶中微量元素与化学成分相关性分析 通过初烤烟叶中微量元素含量与化学成分含量间相关性分析来揭示双江县中微量元素与烟叶

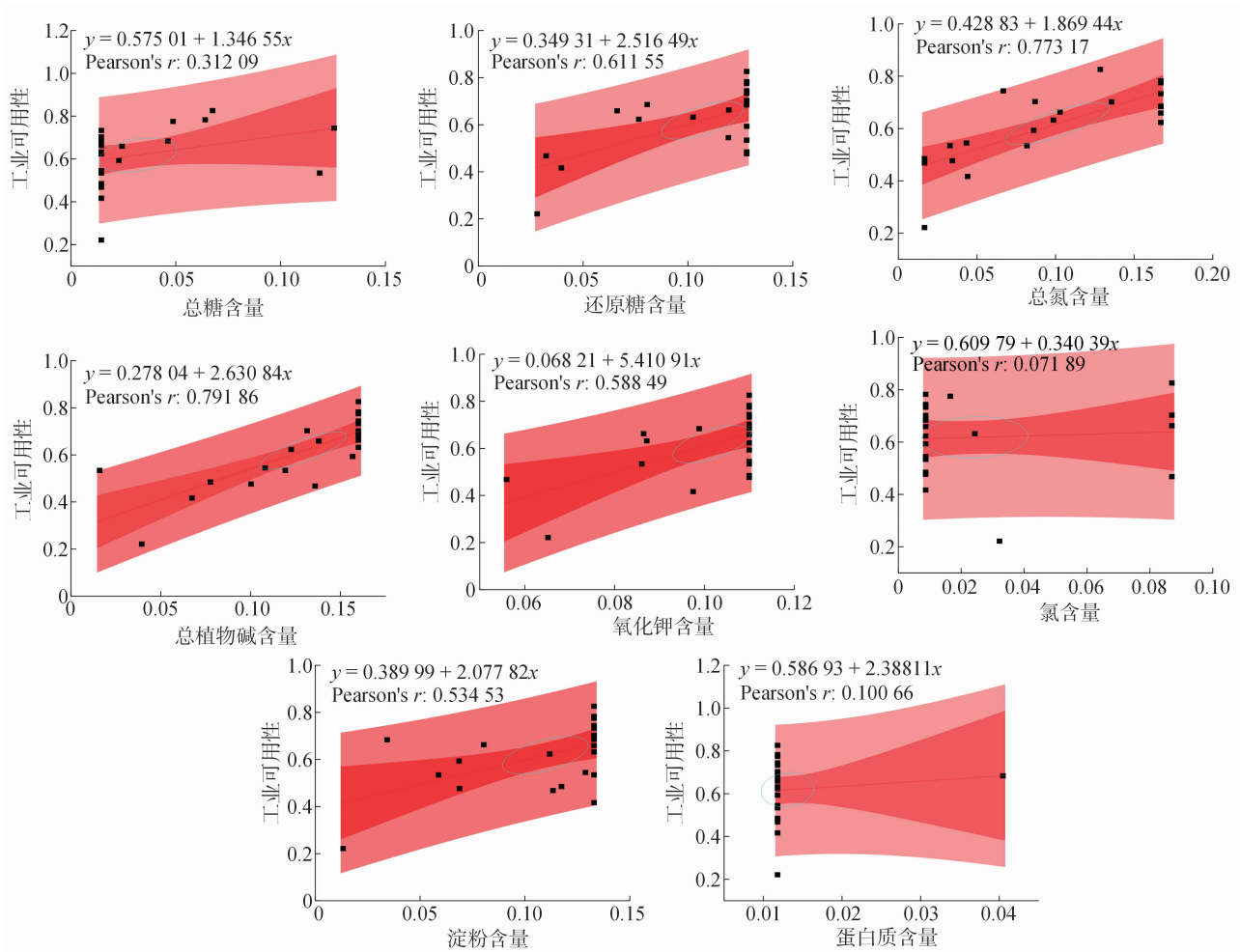


图5 初烤烟叶化学成分可用性指数与各指标的线性分析

关键化学指标的关联规律,并为双江县烤烟生产精准施肥提供策略。由图 6 可知,烟叶中钙含量与总植物碱含量呈显著正相关,与还原糖含量呈显著负相关;烟叶中铁含量与总植物碱含量呈显著正相关,与还原糖含量呈显著负相关;烟叶中锰含量与还原糖含量和淀粉含量呈显著正相关,与氧化钾含量呈显著负相关;烟叶中硼含量与总氮含量和蛋白质含量呈显著正相关,与总糖含量呈极显著负相关;烟叶中钼含量和氧化钾含量呈显著正相关;烟叶中硅含量与氧化钾含量呈显著正相关。

2.4 双江县烟叶中微量元素与化学成分工业可用性随机森林回归分析

为确定双江县烟叶中对化学成分工业可用性(CCUI)的关键影响元素,将烟叶中钙、镁、铜、锌、铁、锰、硼、钼、硅元素含量设为变量 x ,CCUI 设为变量 y ,基于 MSE (均方误差)、 $RMSE$ (均方根误差)、 MAE (平均绝对误差)、 $MAPE$ (平均绝对百分比误差)、 R^2 (确定系数)指标对模型进行评价。结果表

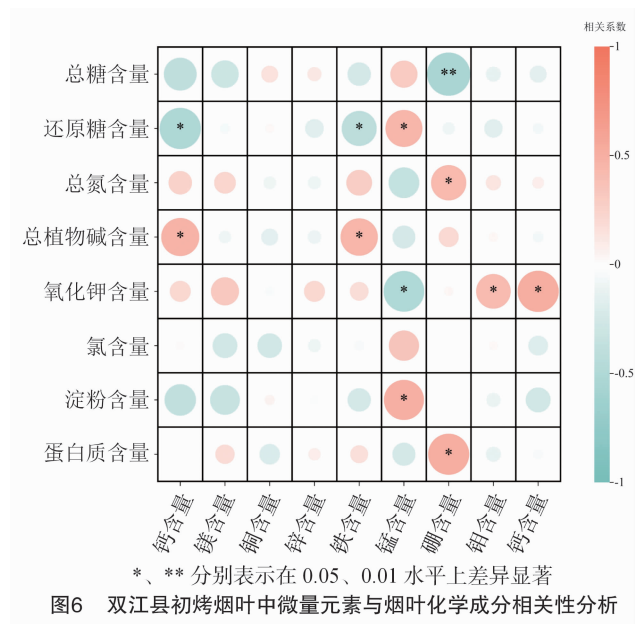


图6 双江县初烤烟叶中微量元素与烟叶化学成分相关性分析

明,排名前三的分别是锰、硅、硼含量,占比分别为 20.20%、19.40%、15.30%(表 7)。

表 7 烟叶中微量元素与化学成分工业
可用性随机森林回归分析

中微量元素指标	特征重要性(%)
锰含量	20.20
硅含量	19.40
铜含量	15.30
硼含量	12.60
钙含量	7.50
钼含量	7.20
锌含量	6.30
铁含量	5.80
镁含量	5.70

3 讨论

本研究系统分析了双江县烟区 5 个乡(镇)烟叶中微量元素和主要化学成分的差异,并利用主成分分析、相关性分析、线性回归、随机森林回归等方法对双江县烟叶中微量元素和化学成分各维度指标间的相互作用进行关联分析,部分结果与前人研究成果相契合。

本研究结果表明,双江县烟叶中钙、镁、硅等元素含量范围较广,而钼含量的变异系数最高,表明烟叶中钙、镁、硅和钼元素含量受产地影响较大,可能与土壤母质、施肥习惯或地形等因素相关^[25]。偏度与峰度分析结果显示,绝大多数元素的数据集中于均值左侧(正偏态、正峰度),提示低值样本较多,而铜含量的峰度为负,表明其分布相对分散,需关注极端值对整体评估的影响。

烟叶中微量元素含量相关性分析结果表明,双江县烟叶中钙元素含量与锰元素含量呈负相关,验证了钙与锰的拮抗作用。钙通过调解糖分运输抑制锰的积累,而锰过量会干扰钙的吸收^[26];铜元素含量与锌元素含量呈负相关,这与前人的研究结果“铜与锌是竞争性关系,锌通过竞争性吸收抑制烟草对铜的利用效率”^[26]一致;硼元素含量与锌元素含量呈正相关,符合硼与锌的协同作用。二者协同可改善烟叶的燃烧性和化学协调性^[27-28]。

主成分分析结果显示,前 4 个主成分累计贡献率达 91.475%,表明烟叶化学成分的变异主要受少数关键指标主导。氯离子含量变异系数高达 79.02%,远超其他成分,表明其含量易受土壤质地、降水、施肥方式等环境和管理因素影响^[29],需对氯元素进行针对性调控。根据前人的研究结果^[18-19]

可知,初烤烟叶总糖、还原糖、总氮、总植物碱、氯、淀粉、蛋白质含量的最优区间或最适区间分别为 20.0%~28.0%、23.0%~26.0%、2.0%~2.3%、2.1~2.4%、0.3%~0.8%、3.0%~5.0%、7.0%~10.0%,氧化钾含量 $\geq 2.5\%$,为最优水平,若烟叶的各项常规化学成分含量均处于最优区间,则说明该烟叶化学成分的协调性及可用性较好。双江县烤烟的还原糖、氧化钾和淀粉含量处于较优水平,但总植物碱、总氮、蛋白质含量与标准水平存在一定的差距。这可能因为当前种植模式下氮、磷、钾配比失衡,尤其是总氮含量不足,可能导致烟株生长受限^[30],而总植物碱含量偏高可能影响烤烟的燃烧性和香气品质^[31]。总糖含量与还原糖含量极显著正相关,表明二者协同影响烟叶甜度和燃烧性;总氮含量与总植物碱、蛋白质含量呈正相关,反映氮素对烟株代谢活动具有促进作用。总糖、还原糖含量与总氮、总植物碱、氧化钾含量呈负相关,提示氮肥过量可能抑制糖分积累^[32-33],而高钾可能拮抗其他元素的吸收^[34]。氧化钾含量与淀粉含量呈显著负相关,说明土壤中钾素的有效性不足,可能导致淀粉积累,进而间接降低烟叶品质^[35]。

此外,钙、镁、铜、锌等中微量元素对烟叶化学成分的影响得到了进一步证实。钙含量与总植物碱含量呈显著正相关,与还原糖含量呈显著负相关,这与赵晓绕等的研究结果^[2]一致。钙含量与氧化钾含量呈正相关,验证了钙含量对烤烟钾吸收代谢有影响,有利于烟叶中钾含量的提高^[36],说明钙含量对烟叶化学成分的协调性有重要影响。前人还发现,镁含量与烟叶燃烧性密切相关,镁、铜含量与烟碱含量呈负相关^[37-38],本研究中镁含量较高的勐勐镇烟叶燃烧性良好,镁、铜含量均与烟叶总植物碱含量呈负相关,同时也证实了硼含量与总氮、蛋白质含量呈显著正相关^[39],进一步支持了中微量元素在烟草生理代谢中起关键作用的观点^[40]。本研究系统分析了双江县烟叶中微量元素含量与化学成分含量之间的相互作用机制,为烟叶精准施肥、初烤工艺优化及卷烟配方设计提供了理论依据。

4 结论

双江县 5 个乡(镇)初烤烟叶中微量元素含量存在显著差异。相关性分析结果表明,双江县烟叶中钙、硅、铁、锰、硼、钼元素含量与多个化学成分含量存在显著正相关关系。随机森林回归分析结果

表明, 锰元素含量与 CCUI 特征重要性达到 20.20%。因此, 双江县在未来烤烟生产中应重视钙镁硅锰肥的合理施用。同时, 氯离子含量的变异系数高, 受环境和管理因素影响大, 要严格控制氯肥施用, 避免抑制糖分积累。化学成分中还原糖、总氮和总植物碱含量对工业可用性具有较高的正向影响。主成分分析结果表明, 总糖、淀粉、蛋白质、氧化钾含量分别在主成分 1、2、3、4 上具有最高的贡献率。在烟叶生产和加工过程中, 应重点监控总糖、总氮、总植物碱、淀粉、蛋白质、氧化钾含量, 确保其处于合理范围, 保障烟叶化学成分工业可用性。

参考文献:

- [1] 尼金玉, 胡蓉花, 王 俊, 等. 增施中、微量元素对烤烟品质及主要经济性性状的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(11): 65-71.
- [2] 赵晓绕, 李 哲, 朱 江, 等. 罗平土壤及烟叶主要中、微量元素含量分析[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(3): 27-31.
- [3] 胡国松. 烤烟营养原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 艾亥麦提·艾麦尔江, 黄 佳, 成志军, 等. 不同轮作模式对植烟土壤团聚体稳定性及烟叶品质的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(1): 18-24, 34.
- [5] 王颢杰, 郑 潜, 苗 圃, 等. 烤烟育苗和移栽方式对鲜烟叶和烤后烟叶理化性质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2025, 59(5): 826-837.
- [6] 郝汉驰. 郴州烟稻轮作植烟土壤特征与健康评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- [7] 何超超, 蔡翼扬, 张洪霏, 等. 烘烤变黄湿度对高含水量上部烟叶组织结构及化学成分的影响[J]. 作物研究, 2025, 39(1): 50-57.
- [8] 于少藤. 烟叶有益微生物的筛选及其对烟叶品质改良的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [9] 沈 晗, 江佳楠, 汤朝起, 等. 烟叶主要含氮化合物含量与感官质量的关系[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2017(3): 558-563.
- [10] 李冠辉, 韦 斌, 陈丽萍, 等. 烟叶叶片结构与品质指标的关联性分析[J]. 山地农业生物学报, 2025, 44(2): 63-68, 92.
- [11] 严锦申, 杨天乐, 黄瑞寅, 等. 不同有机肥与化肥配施对烤烟产质量及香气代谢物的影响[J]. 作物研究, 2025, 39(1): 29-38.
- [12] 邹 爽, 武奥琳, 潘住财, 等. 不同施肥处理对柚园土壤化学及微生物特性的影响[J]. 核农学报, 2025, 39(4): 827-838.
- [13] 王亚宁, 张 翔, 范艺宽, 等. 烟草氯素营养研究进展与展望[J]. 中国农学通报, 2017, 33(27): 66-70.
- [14] 高庭猛, 黄婷君, 付丽美, 等. 土壤改良剂对云南双江烤烟 K326 生长发育和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(13): 108-116.
- [15] 吕中显. 临沧特色烤烟品质区划研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011.
- [16] 朱莹雪. 生物炭对植烟土壤性质及烤烟产量和品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- [17] 张 瑛, 吴树松, 郭学清, 等. 福建烟区清香型烤烟风格定位与化学成分的关系分析[J]. 南方农业学报, 2024, 55(10): 2938-2947.
- [18] 任胜超, 闫新甫, 陈越立, 等. 曲靖烤烟叶质重与主要化学成分及感官质量的关系分析[J]. 南方农业学报, 2014, 45(7): 1258-1263.
- [19] 袁有波, 陈 雪, 罗贞宝, 等. 毕节地区初烤烟叶中微量元素含量分布特征研究[J]. 中国烟草科学, 2007, 28(5): 45-48.
- [20] 黄浪平. 硅肥对丰都县植烟土壤微生物多样性和烤烟品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
- [21] 苏德成. 中国烟草栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005: 1-3.
- [22] 林 汲, 徐宋萍, 罗丽娟, 等. 硅对烟草生长的影响及诊断指标研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(1): 42-46.
- [23] 王晓宾, 王 军, 刘 兰, 等. 广东烟区烤烟主要化学成分可用性评价[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(2): 64-72.
- [24] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [25] 汪新宇, 刘 璇, 秦佳婷, 等. 中国土壤中钼的状况及钼肥施用技术[J]. 中国农学通报, 2025, 41(4): 94-101.
- [26] 戴 彬, 黄德文, 杨 苏, 等. 湖南烟区烟叶中微量元素含量与化学指标的相关及逐步回归分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(4): 360-364.
- [27] 王杏芳. 烟草中 17 种微量元素的因子分析[J]. 微量元素与健康研究, 2009, 26(2): 70.
- [28] 王 智, 杨胜刚, 范业晨, 等. 重庆市石柱县烟田土壤养分空间异质性分布及评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(11): 42-52.
- [29] 余雪洋, 左伟标, 李义强, 等. 大农业系统豫中烤烟氯离子调控研究[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(22): 8-19.
- [30] 周向平, 邓征宇, 赵阳阳, 等. 烤烟新品种湘烟 7 号高效制种技术研究[J]. 湖南农业科学, 2023(9): 14-18.
- [31] 王建伟, 张艳玲, 王桂瑶, 等. 不同香型产区烤烟高可用性上部烟叶质量特征分析[J]. 烟草科技, 2025, 58(1): 61-68.
- [32] 李云云, 李 强, 余宏军, 等. 花期短期低氮处理对黄瓜抗坏血酸及可溶性糖含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(5): 46-52.
- [33] 王 政, 韩家宝, 农尚健, 等. 施氮量对烤烟根际土壤理化性质及细菌群落的影响[J]. 南方农业学报, 2025, 56(4): 1089-1100.
- [34] 覃寒晗. 钾镁配施对苹果植株生长及碳氮代谢和产量品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- [35] 宋 毅, 陈航航, 崔 鑫, 等. 钾营养状况介导的油菜叶片生长及其对叶际微生物的影响[J]. 植物学报, 2024, 59(1): 54-65.
- [36] 韦 忠, 沈方科, 王 蕾, 等. 施用钙镁对烤烟钾吸收、循环和含量的影响[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(4): 66-70.
- [37] 余 鑫. 烟丝/卷烟纸参数对卷烟综合燃烧特性的影响研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2024.
- [38] 刘久羽, 辉树光, 邓 泳, 等. 保山基地植烟土壤养分与烟叶化学成分评价及其相关性分析[J]. 广西农学报, 2021, 36(3): 6-12.
- [39] 田雨农, 邱 敏, 刘丹阳, 等. 基于多元线性模型的烟叶质量指标筛选和评价方法[J]. 农产品加工, 2024(23): 52-56.
- [40] 刘 慧. 四川烟区主要生态因子与雪茄烟叶品质关系研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.