

张明哲,张友杰,王以慧,等. 雪茄烟叶矿质元素与碳氮代谢物的差异及相关性研究[J]. 江苏农业科学,2026,54(9):117-123.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.09.014

雪茄烟叶矿质元素与碳氮代谢物的差异及相关性研究

张明哲¹,张友杰²,王以慧²,侯冰清²,徐继磊²,仇京范²,刘鹏飞¹,时向东¹,云菲¹

(1. 河南农业大学烟草学院/国家烟草栽培生理生化研究基地/烟草行业烟草栽培重点实验室,河南郑州 450002;

2. 山东中烟工业有限责任公司,山东济南 250013)

摘要:为探究多米尼加、印尼、巴西和中国 4 个产地雪茄烟叶的矿质元素与主要碳、氮代谢物之间的关系,选取 4 个产地的 146 份雪茄烟叶作为试验材料,通过正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA),筛选出不同产地雪茄烟叶的矿质元素和碳氮代谢物的差异指标,并基于因子分析和典型相关分析探讨两者之间的关系。结果表明,雪茄烟叶矿质元素和碳氮代谢物在不同产地间均展现出中等变异,变异系数范围分别为 10.84%~58.86%、7.47%~43.00%。OPLS-DA 分析结果表明,不同产地之间的差异矿质元素为钠、镁和硼,碳氮代谢物为烟碱、总糖和总氮。其中,中国烟叶的总糖、烟碱、硼含量相对较高,而钠和镁含量显著低于其他产地;多米尼加和印尼烟叶总氮含量较接近,均显著高于巴西和中国烟叶。因子分析和典型相关分析结果显示,随着硼、锌、铜含量的增加,烟叶的总糖含量呈现上升趋势,总氮含量则呈现下降趋势,而镁和钠的含量则与总糖和总氮含量之间呈现出相反的趋势。综上,合理调控矿质元素的含量能够对烟叶的品质产生显著影响。

关键词:雪茄;矿质元素;碳氮代谢物;典型相关分析

中图分类号:S572.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)09-0117-07

雪茄是一种独特的烟草制品,以其制作工艺和口感而闻名^[1-2]。雪茄烟叶的质量受到气候、土壤、地形和种植经验等多种因素的影响,使得仅有少数国家能够生产出高品质的雪茄烟叶^[3-4]。全球优质雪茄烟叶产区集中于古巴、多米尼加、尼加拉瓜等中美洲国家^[5]。由于雪茄市场前景广阔,近年来中国也在积极发展雪茄种植和生产,目前云南省已逐渐成为中国最大的雪茄产区,但其烟叶品质与国际优质产区相比仍存在化学成分的协调性和生产工艺精细化不足的问题^[6-7]。矿质元素是维持烟草正常生理代谢及生长发育不可或缺的营养物质,其含量过高或过低均会打破烟株内部生理调节机制,导致烟叶碳氮代谢紊乱、化学成分失衡,进而影响烟叶内在品质^[8]。雪茄烟叶主要通过根系从土壤中吸收矿质养分,然而不同产区的成土母质、风化程度及耕作方式存在差异,土壤矿质元素的组成表现

出明显的地域分异性^[9]。这种矿质元素组成的差异不仅会直接影响烟株对养分的吸收利用,还会通过元素间的协同作用或拮抗作用改变烟叶内碳氮代谢物的形成路径^[10]。碳氮代谢的强度与协调性通过影响化学成分决定烟叶品质。钾能显著提高烟叶总糖和还原糖含量,并降低总氮和氯含量,改善糖碱比和钾氯比,从而提升化学成分协调性^[11]。镁、硫、锌、锰、硼等元素的合理配施可促进碳代谢和糖类物质的合成与转化,同时降低硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)活性,抑制氮代谢,减少烟碱合成^[12]。硼锌协同作用通过调控氮代谢酶活性与钾离子通道基因表达,抑制烟碱合成及氯离子吸收,同时促进钾素积累^[13]。目前,研究矿质元素含量与碳氮代谢物含量之间的关系主要集中在烤烟领域,而针对雪茄烟叶的相关研究相对较匮乏。因此,本研究收集不同产地的 146 份雪茄烟叶样本,采用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)法,结合因子分析与典型相关分析等方法,对矿质元素含量与碳氮代谢物含量之间的差异和相关性进行系统解析,以期为进一步探讨不同产地矿质养分对雪茄内在品质的影响提供重要参考。

收稿日期:2025-04-11

基金项目:山东中烟工业有限责任公司项目(编号:2022370000340624)。

作者简介:张明哲(1998—),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事烟草栽培生理研究。E-mail:1969742240@qq.com。

通信作者:时向东,教授,博士生导师,主要从事雪茄烟栽培与调制研究,E-mail:sxd@henau.edu.cn;云菲,副教授,硕士生导师,主要从事烟草栽培生理生化研究,E-mail:yunfeifei55@126.com。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

雪茄烟叶样品均由山东中烟工业有限责任公司提供,保证了样品的真实性。供试雪茄样品共 146 份,分别来自多米尼加烟叶 38 份、印尼烟叶 30 份、巴西烟叶 32 份和中国烟叶 46 份。于 2023—2024 年在国家烟草栽培生理生化研究基地进行不同产地雪茄烟叶的矿质元素和碳氮代谢物含量的测定。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 样品制备 雪茄样品在 45 ℃ 下干燥 2 h,在测试前经过粉碎、过筛(0.25 mm 的 60 目筛网)及密封低温保存。

1.2.2 矿质元素含量 10 种矿质元素(磷、钙、钾、镁、硼、铜、铁、锰、钠、锌)的含量采用干灰化法^[14]测定,其中消解过程在马弗炉中进行,消解完成冷却后用 5% 硝酸溶解,用胶头滴管洗涤,过滤至 50 mL 容量瓶中待测,最后用电感耦合等离子体发射仪(VISTA-MPX,美国)测定矿质元素含量。

1.2.3 碳氮代谢物含量 碳代谢物中总糖和还原糖含量采用连续流动分析仪(AAⅢ,德国布朗卢比公司),按照《烟草及烟草制品 水溶性糖的测定 连续流动法》(YC/T 159—2019)的方法测定,淀粉含量按照《烟草及烟草制品 淀粉的测定 连续流动法》(YC/T 216—2013)的方法测定。氮代谢物中总氮含量采用连续流动分析仪(AAⅢ,德国布朗卢比公司),按照《烟草及烟草制品 总氮的测定 连续流动法》(YC/T 161—2002)的方法测定,烟碱含量按照《烟草及烟草制品 总植物碱的测定 连续流动法》(YC/T 160—2002)的方法测定。

1.3 数据处理

碳氮代谢物和矿质元素含量以“均值 ± 标准差”表示。利用 Excel 2018、SPSS 27.0 和 Origin 2021 软件进行数据的计算、差异显著性分析、因子分析、典型相关性分析。正交偏最小二乘法判别(OPLS-DA)分析采用 SIMCA 14.1 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同产地雪茄烟叶矿质元素含量分析

变异系数是衡量数据离散程度的指标,其值越大,说明数据相对于均值的波动越显著。由表 1 可知,4 个产地雪茄烟叶的矿质元素含量均呈现中等

变异。除多米尼加雪茄烟叶的钙、镁、铜、铁、锰含量,印尼雪茄烟叶的钠、磷、锌含量以及中国雪茄烟叶的钙、锰、钠含量的偏度绝对值较大,其余各产地矿质元素含量的偏度绝对值均小于 1.0,基本符合正态分布的特征。

2.2 不同产地雪茄烟叶碳氮代谢物含量分析

由表 2 可知,除巴西雪茄烟叶的总氮含量呈现弱变异外,其余各产地雪茄烟叶中碳氮代谢物含量均呈现中等变异。多米尼加雪茄烟叶中的淀粉含量,印尼雪茄烟叶中的总糖含量和巴西雪茄烟叶中的还原糖含量显示出较大的偏度,其余各产地的碳氮代谢物含量的偏度绝对值均小于 1.0,基本符合正态分布的特征。

2.3 不同产地雪茄烟叶矿质元素与碳氮代谢物的 OPLS-DA 判别分析

OPLS-DA 是一种监督学习方法,通过预设的样本分类变量,并结合正交信号矫正技术,将数据矩阵分解为预测成分和正交成分 2 个部分。这种方法能够有效过滤无关信号的干扰,进一步挖掘数据信息,增强处理间的差异性^[15]。将不同产地雪茄烟叶碳氮代谢物和矿质元素含量进行 OPLS-DA 分析,模型的解释率参数分别为 $R_x^2 = 0.652$ 、 $R_y^2 = 0.598$,模型的预测参数(Q^2) = 0.564。由图 1-A 可知,该模型能够有效区分多米尼加、印尼和中国产地的雪茄烟叶,但巴西与多米尼加及印尼之间存在一定的重叠。从 5 个碳氮代谢物含量和 10 个矿质元素含量指标中筛选出 6 个具有显著差异的指标[变量重要性指标(VIP) > 1.0],分别为烟碱、钠、总糖、镁、硼、总氮含量。同时,对雪茄烟叶中碳氮代谢物含量和矿质元素含量进行 OPLS-DA 模型的置换检验($n = 200$),结果发现, Q^2 回归直线与 y 轴的负半轴相交(图 1-C),依据文献[16]的标准,说明该模型不存在过拟合现象,具有统计学意义。

为进一步分析 6 个差异指标在不同产地间的分布规律,对其进行差异统计分析(表 3),可见中国产地雪茄烟叶的总糖、烟碱、硼含量处于相对较高的水平,而钠和镁的含量显著低于其余产地。印尼产地雪茄烟叶中总氮、钠、镁含量较高,而烟碱、硼含量显著低于其他产地。

2.4 雪茄烟叶矿质元素与碳氮代谢物的因子分析

2.4.1 雪茄烟叶矿质元素含量的因子分析 对不同产地雪茄烟叶矿质元素 10 个指标[钾含量(x_1)、钙含量(x_2)、镁含量(x_3)、硼含量(x_4)、铜含量(x_5)、

表 1 不同产地雪茄烟叶矿质元素含量的基本统计特征

矿质元素	雪茄产地	最大值	最小值	平均值	中位数	偏度	峰度	标准差	变异系数 (%)
钾含量 (%)	多米尼加	8.16	2.95	4.90	4.74	0.74	0.04	1.32	26.94
	印尼	5.56	2.61	3.84	3.90	0.23	0.07	0.70	18.23
	巴西	5.77	2.96	4.54	4.61	-0.29	-0.37	0.76	16.74
	中国	6.50	2.43	4.27	3.95	0.48	-0.66	0.94	22.01
钙含量 (mg/kg)	多米尼加	58 571.24	23 296.85	37 227.91	35 673.08	1.05	1.02	7 765.58	20.86
	印尼	37 667.15	21 084.71	30 718.33	30 765.95	-0.51	-0.07	4 018.25	13.08
	巴西	38 005.09	26 327.21	31 966.76	31 608.67	0.03	-1.13	3 464.26	10.84
	中国	61 201.00	21 908.57	36 673.10	35 585.36	1.03	1.35	8 684.76	23.68
镁含量 (mg/kg)	多米尼加	24 755.54	4 725.54	11 310.10	11 114.12	1.68	5.18	3 535.97	31.26
	印尼	20 424.33	7 261.40	12 241.34	12 098.70	0.82	1.85	2 662.81	21.75
	巴西	16 480.35	10 068.89	12 480.34	12 676.44	0.36	-0.73	1 766.15	14.15
	中国	8 947.63	2 813.70	6 666.94	7 065.88	-0.82	0.02	1 553.51	23.30
硼含量 (mg/kg)	多米尼加	62.87	21.15	41.93	41.67	0.18	-0.89	11.44	27.28
	印尼	54.24	10.75	28.10	27.33	0.48	0.87	9.37	33.35
	巴西	47.97	22.38	34.82	35.27	0.08	-0.92	6.86	19.70
	中国	62.35	23.87	43.41	42.47	0.11	-0.64	9.36	21.56
铜含量 (mg/kg)	多米尼加	86.00	15.25	33.12	28.31	1.86	4.22	16.00	48.31
	印尼	85.08	25.16	49.14	48.02	0.56	-0.08	14.13	28.75
	巴西	65.67	19.28	37.64	39.02	0.48	0.34	11.64	30.92
	中国	66.77	18.96	37.39	36.97	0.36	-0.67	11.70	31.29
铁含量 (mg/kg)	多米尼加	1 238.49	380.66	634.32	596.48	1.79	4.38	170.74	26.92
	印尼	636.31	189.06	486.59	508.54	-0.96	1.02	106.55	21.90
	巴西	805.17	313.58	594.21	612.14	-0.58	1.25	109.69	18.46
	中国	760.23	237.49	478.97	490.33	0.01	-0.79	140.58	29.35
锰含量 (mg/kg)	多米尼加	725.37	133.38	298.90	258.54	1.17	0.77	152.25	50.94
	印尼	524.86	27.91	265.68	238.45	0.35	-0.06	112.62	42.39
	巴西	460.94	153.34	287.34	287.27	0.61	2.01	65.43	22.77
	中国	940.31	196.81	428.52	390.76	1.16	0.82	187.62	43.78
钠含量 (mg/kg)	多米尼加	732.92	24.07	311.72	287.88	0.92	1.24	148.29	47.57
	印尼	1 501.63	54.07	475.26	437.27	2.79	11.71	239.42	50.38
	巴西	808.26	315.14	511.33	511.57	0.60	-0.02	136.82	26.76
	中国	493.95	26.04	156.39	140.87	1.88	4.71	92.05	58.86
磷含量 (mg/kg)	多米尼加	4 877.66	1 239.53	3 356.99	3 428.13	-0.16	-0.27	869.19	25.89
	印尼	4 183.99	574.23	3 122.25	3 247.91	-1.05	1.84	811.04	25.98
	巴西	4 143.23	2 309.34	3 282.32	3 276.07	0.04	-1.02	543.30	16.55
	中国	4 567.94	2 202.20	3 159.86	3 071.47	0.52	0.51	477.46	15.11
锌含量 (mg/kg)	多米尼加	113.17	34.57	68.45	63.48	0.38	-0.59	19.23	28.09
	印尼	98.78	9.56	65.00	67.75	-1.08	2.65	17.31	26.63
	巴西	80.95	40.41	63.39	64.98	-0.29	-1.16	12.63	19.92
	中国	135.02	43.23	84.36	83.04	0.34	2.36	15.07	17.86

铁含量(x_6)、锰含量(x_7)、钠含量(x_8)、磷含量(x_9)和锌含量(x_{10})]进行皮尔逊相关性分析发现,所有指标均适合作为变量用于后续分析。以特征值 > 1 作为提取特征因子的依据,提取的 3 个特征因子的

特征值分别为 2.272、1.836、1.035,贡献率分别为 51.42%、18.72%、15.28%,累计贡献率达 85.42%,说明所提取的 3 个因子包含 10 个矿质元素含量指标的绝大部分信息。

表 2 不同产地雪茄烟叶碳氮代谢物含量的基本统计特征

碳氮代谢物	雪茄产地	最大值	最小值	平均值	中位数	偏度	峰度	标准差	变异系数 (%)
总糖含量 (%)	多米尼加	0.56	0.22	0.40	0.40	0.09	-0.88	0.09	22.50
	印尼	0.63	0.27	0.37	0.35	1.05	0.41	0.09	24.32
	巴西	0.50	0.27	0.38	0.37	0.38	-0.67	0.06	15.79
	中国	0.75	0.32	0.57	0.56	0.03	-0.56	0.11	19.30
还原糖含量 (%)	多米尼加	0.34	0.09	0.23	0.24	-0.63	-0.42	0.07	30.43
	印尼	0.44	0.12	0.23	0.23	0.60	-0.32	0.08	34.78
	巴西	0.39	0.15	0.23	0.23	1.21	2.42	0.05	21.74
	中国	0.38	0.16	0.27	0.27	-0.05	-0.67	0.05	18.50
总氮含量 (%)	多米尼加	5.57	2.23	3.88	3.72	0.51	0.19	0.75	19.33
	印尼	5.21	3.11	3.90	3.85	0.67	-0.16	0.59	15.13
	巴西	4.03	2.96	3.60	3.64	-0.49	0.11	0.27	7.50
	中国	4.24	2.65	3.51	3.47	0.11	-0.58	0.37	10.54
烟碱含量 (%)	多米尼加	4.27	1.56	2.76	2.62	0.38	-0.75	0.75	27.17
	印尼	2.86	0.73	1.51	1.32	0.91	-0.25	0.61	40.40
	巴西	4.07	1.38	2.30	2.18	0.82	-0.12	0.77	33.48
	中国	4.56	2.62	3.78	3.74	-0.40	-0.27	0.48	12.70
淀粉含量 (%)	多米尼加	2.79	0.71	1.38	1.20	1.35	1.21	0.55	39.86
	印尼	2.00	0.79	1.31	1.32	0.23	-1.13	0.38	29.01
	巴西	2.03	0.78	1.22	1.24	0.79	0.43	0.32	26.23
	中国	3.66	0.82	1.84	1.60	0.59	-0.78	0.79	42.93

由表 4 可知,第 1 因子中 x_8 (-0.827)、 x_3 (-0.655) 和 x_{10} (0.654) 特征因子载荷绝对值较大,表达式为 $G_1 = -0.013x_1 + 0.283x_2 - 0.435x_3 + 0.320x_4 - 0.098x_5 - 0.098x_6 + 0.325x_7 - 0.549x_8 - 0.118x_9 + 0.434x_{10}$;第 2 因子中 x_9 (0.701)、 x_1 (0.677) 和 x_4 (0.557) 特征因子载荷绝对值较大,表达式为 $G_2 = 0.500x_1 + 0.298x_2 + 0.124x_3 + 0.411x_4 - 0.259x_5 + 0.292x_6 - 0.234x_7 + 0.047x_8 + 0.517x_9 + 0.024x_{10}$;第 3 因子中 x_5 (0.586) 和 x_6 (0.535) 特征因子载荷绝对值较大,表达式为 $G_3 = -0.023x_1 - 0.295x_2 - 0.365x_3 + 0.220x_4 + 0.576x_5 + 0.526x_6 - 0.320x_7 - 0.140x_8 - 0.034x_9 - 0.033x_{10}$ 。

2.4.2 雪茄烟叶碳氮代谢物含量的因子分析 对不同产地雪茄烟叶碳氮代谢物 5 个指标[总糖含量 (y_1)、还原糖含量 (y_2)、总氮含量 (y_3)、烟碱含量 (y_4) 和淀粉含量 (y_5)]进行皮尔逊相关性分析。以特征值 > 1 作为提取特征因子的依据,提取的 2 个特征因子的特征值分别为 2.345、1.004,贡献率分别 46.90%、36.50%,累计贡献率达 83.40%,说明所提取的 2 个因子包含 5 个碳氮代谢物含量指标的绝大部分信息。

由表 5 可知,第 1 因子中总糖含量 (y_1) (0.870)、烟碱含量 (y_4) (0.764) 和还原糖含量 (y_2) (0.739) 特征因子载荷绝对值较大,表达式为 $F_1 = 0.568y_1 + 0.483y_2 - 0.304y_3 + 0.499y_4 + 0.321y_5$;第 2 因子中总氮含量 (y_3) (0.584) 和淀粉含量 (y_5) (-0.663) 特征因子载荷绝对值较大,表达式为 $F_2 = 0.223y_1 + 0.386y_2 + 0.583y_3 + 0.154y_4 - 0.662y_5$ 。

2.5 雪茄烟叶矿质元素与碳氮代谢物的典型相关分析

对不同产地雪茄烟叶矿质元素与碳氮代谢物进行典型相关分析。分别以矿质元素和碳氮代谢物因子分析中荷载较大的指标为第 1 组变量和第 2 组变量,第 1 组变量为钾含量 (A_1)、镁含量 (A_2)、硼含量 (A_3)、铜含量 (A_4)、铁含量 (A_5)、钠含量 (A_6)、磷含量 (A_7) 和锌含量 (A_8),第 2 组变量为总糖含量 (B_1)、还原糖含量 (B_2)、烟碱含量 (B_3)、总氮含量 (B_4) 和淀粉含量 (B_5)。对雪茄烟叶矿质元素含量与碳氮代谢物含量进行典型相关分析,共提取 5 组变量,第 1 组变量相关系数为 0.766,达到极显著水平 ($P < 0.01$);第 2 组变量相关系数为 0.419,达到显著水平 ($P < 0.05$),说明不同产地雪茄烟叶矿质

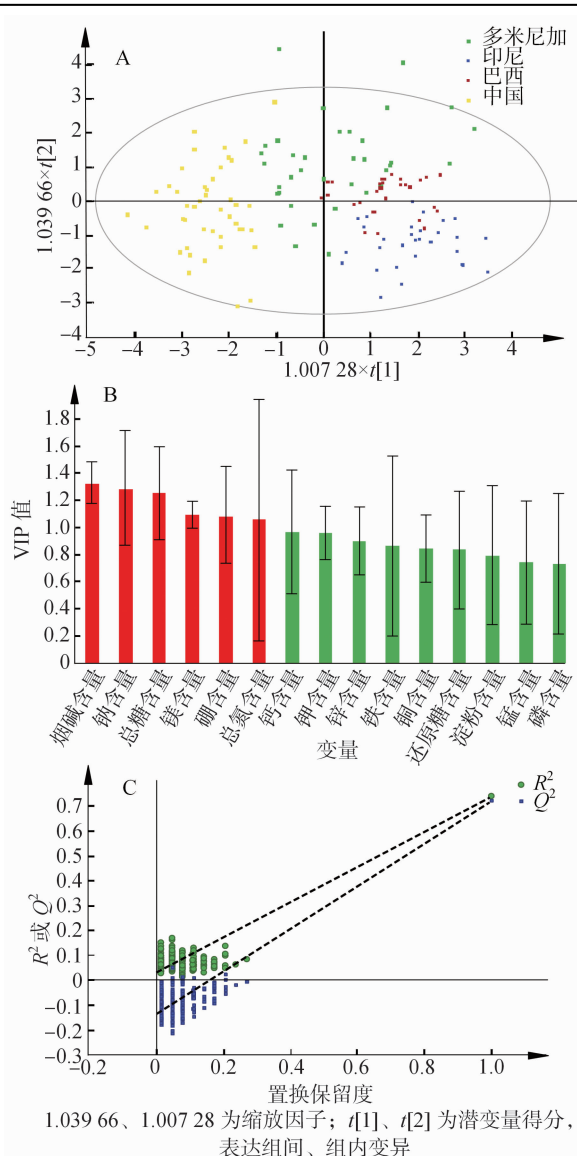


图1 不同产地雪茄烟叶矿质元素与碳氮代谢物的 OPLS-DA 得分、VIP 值和模型置换检验

元素含量与碳氮代谢物含量之间存在复合影响(表6)。

表3 不同产地雪茄烟叶的差异指标统计分析

雪茄产地	总糖含量 (%)	总氮含量 (%)	烟碱含量 (%)	钠含量 (mg/kg)	镁含量 (mg/kg)	硼含量 (mg/kg)
多米尼加	0.40 ± 0.09b	3.88 ± 0.75a	2.76 ± 0.75b	311.72 ± 148.29b	11 310.10 ± 3 535.97b	41.93 ± 11.44a
印尼	0.37 ± 0.09b	3.90 ± 0.59a	1.51 ± 0.61d	475.26 ± 239.42a	12 241.34 ± 2 662.81ab	28.10 ± 9.37c
巴西	0.38 ± 0.06b	3.60 ± 0.27b	2.30 ± 0.77c	511.33 ± 136.82a	12 480.34 ± 1 766.15a	34.82 ± 6.86b
中国	0.57 ± 0.11a	3.51 ± 0.37b	3.78 ± 0.48a	156.39 ± 92.05c	6 666.94 ± 1 553.51c	43.41 ± 9.36a

注:同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

矿质元素是雪茄的生理调节物质,碳氮化合物是雪茄中重要的化学成分,两者对烟叶的综合品质

由表7可知,第1组典型变量模型为: $U_1 = -0.042A_1 - 0.485A_2 + 0.366A_3 - 0.182A_4 - 0.144A_5 - 0.302A_6 - 0.047A_7 + 0.178A_8$, $V_1 = 0.459B_1 - 0.319B_2 + 0.010B_3 - 0.756B_4 + 0.102B_5$ 。

第2组典型变量为: $U_2 = -0.140A_1 - 0.510A_2 - 0.685A_3 + 0.560A_4 - 0.001A_5 + 0.173A_6 + 0.349A_7 + 0.511A_8$, $V_2 = 1.277B_1 - 0.157B_2 - 0.068B_3 - 0.969B_4 - 0.026B_5$ 。

在第1组典型变量中,矿质元素含量 U_1 中 A_2 (-0.802)、 A_6 (-0.746)、 A_3 (0.582) 和 A_8 (0.541) 的典型载荷绝对值相对较大。其中, A_2 和 A_6 与该组变量呈负相关,而 A_3 和 A_8 呈正相关。主要碳氮代谢物含量 V_1 中 B_1 (0.740) 和 B_4 (-0.933) 的典型载荷绝对值相对较大。因此,随着 U_1 中 A_2 、 A_6 含量的增加, V_1 中 B_4 呈上升趋势,而 B_1 呈下降趋势。同时,随着 U_1 中 A_3 、 A_8 的增加, V_1 中 B_1 呈上升趋势,而 B_4 表现出下降趋势。典型荷载结果表明,矿质元素含量对 U_1 的相对作用大小依次表现为 $A_2 > A_6 > A_3 > A_8 > A_4 > A_5 > A_7 > A_1$,说明 A_2 、 A_6 、 A_3 和 A_8 对该组变量的贡献较大,而其他元素含量的贡献相对较小;主要碳氮代谢物含量对 V_1 的相对作用大小依次表现为 $B_4 > B_1 > B_5 > B_2 > B_3$,说明 B_4 、 B_1 在碳氮代谢物中占据更重要的地位。

在第2组典型变量中,矿质元素含量 U_2 中 A_4 (0.535) 的典型载荷相对较大,主要碳氮代谢物含量 V_2 中 B_1 (0.608) 典型载荷相对较大。因此,第2组典型变量 A_4 与 B_1 呈正相关。典型荷载结果表明,各矿质元素含量对 U_2 的相对作用大小依次表现为 $A_4 > A_3 > A_8 > A_2 > A_1 > A_5 > A_6 > A_7$;主要碳氮代谢物含量对 V_2 的相对作用大小依次表现为 $B_1 > B_2 > B_4 > B_3 > B_5$ 。

具有十分重要的意义^[17-18]。本研究结果表明,矿质元素中钠、镁、硼是各雪茄产地的差异元素,其中钠、镁含量在中国产区最低,而硼含量最高。除自身遗传因素外,这些差异可能是因为不同产地的地

表 4 雪茄烟叶矿质元素含量载荷矩阵和得分系数矩阵

指标	载荷值			得分系数		
	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3
x_1	-0.019	0.677	-0.023	-0.013	0.500	-0.023
x_2	0.427	0.404	-0.300	0.283	0.298	-0.295
x_3	-0.655	0.168	-0.371	-0.435	0.124	-0.365
x_4	0.482	0.557	0.224	0.320	0.411	0.220
x_5	-0.148	-0.351	0.586	-0.098	-0.259	0.576
x_6	-0.147	0.395	0.535	-0.098	0.292	0.526
x_7	0.49	-0.317	-0.325	0.325	-0.234	-0.320
x_8	-0.827	0.064	-0.142	-0.549	0.047	-0.140
x_9	-0.178	0.701	-0.035	-0.118	0.517	-0.034
x_{10}	0.654	0.032	-0.034	0.434	0.024	-0.033

质条件对土壤中元素的组成产生影响,从而形成明显的土壤元素特征差异,同时雪茄中的元素组成及

表 5 雪茄烟叶碳氮代谢物含量载荷矩阵和得分系数矩阵

指标	载荷值		得分系数	
	F_1	F_2	F_1	F_2
y_1	0.870	0.223	0.568	0.223
y_2	0.739	0.387	0.483	0.386
y_3	-0.465	0.584	-0.304	0.583
y_4	0.764	0.154	0.499	0.154
y_5	0.491	-0.663	0.321	-0.662

含量受到所在产区气候条件和栽培措施的直接影
响^[19]。本研究不同产地雪茄烟叶的主要碳氮代谢
物差异指标以总糖、总氮和烟碱含量的 VIP 值较大,
同时结合差异统计分析发现,中国雪茄的总糖和烟
碱含量显著高于其他产地,而总氮含量则相反,这
与耿召良等的研究结果^[20]相似。

表 6 雪茄烟叶矿质元素与碳、氮代谢物的典型相关系数检验

典型变量组	相关系数	特征值	威尔克统计值	F 值	分子自由度	P 值
第 1 组	0.766	1.422	0.298	4.660	40.000	0.000
第 2 组	0.419	0.213	0.722	1.635	28.000	0.023
第 3 组	0.308	0.105	0.876	1.017	18.000	0.439
第 4 组	0.163	0.027	0.968	0.451	10.000	0.920
第 5 组	0.077	0.006	0.994	0.207	4.000	0.934

表 7 雪茄烟叶矿质元素与碳、氮代谢物的典型相关分析

典型变量	第 1 组典型变量		第 2 组典型变量	
	标准化典型 相关系数	典型 载荷值	标准化典型 相关系数	典型 载荷值
A_1	-0.042	-0.046	-0.140	-0.244
A_2	-0.485	-0.802	-0.510	-0.334
A_3	0.366	0.582	-0.685	-0.472
A_4	-0.182	-0.243	0.560	0.535
A_5	-0.144	-0.186	-0.001	-0.138
A_6	-0.302	-0.746	0.173	-0.044
A_7	-0.047	-0.082	0.349	-0.012
A_8	0.178	0.541	0.511	0.362
B_1	0.459	0.740	1.277	0.608
B_2	-0.319	0.271	-0.157	0.268
B_3	0.010	-0.175	-0.068	-0.181
B_4	-0.756	-0.933	-0.969	-0.263
B_5	0.102	0.419	-0.026	0.062

本研究通过因子分析提取 2 组变量群中共性因
子,找出具有代表性的因子,并通过典型相关分析
探究 2 组变量中的关系发现,矿质元素中镁、钠、硼、
锌和铜含量对主要碳氮代谢物中总糖、总氮含量的
影响较大^[21]。镁是叶绿素中重要的组成部分,叶绿

素是植物进行光合作用的关键色素,适量的镁含量
能够促进叶绿素的形成和维持,从而加速碳氮代谢
进程,提高烟叶的产量和品质^[22-23]。周世民等认
为,施用镁肥可以增加烟叶中的糖含量,同时降低
总氮含量^[24]。而本研究中矿质元素镁含量与总糖
含量存在负效应,故镁的施用量需严格控制,过高
或过低都会对雪茄烟叶品质产生不利影响^[25]。硼
和锌含量对总糖含量具有正向关系,与总氮含量成
负向关系。硼和锌均能够增强光合作用,促进碳水
化合物的转变,从而提高糖类物质的含量;此外,硼
可以促进烤烟的氮素代谢和相关酶活性,增强氮的
吸收与转化,减少氮在烟叶中的积累,进而导致总
氮含量的降低^[12]。姚倩等认为,过量施用锌肥会降
低烟叶中硝酸还原酶的活性,从而影响氮素的转化
和积累^[26],本研究结论与之相似。钠在雪茄烟叶中
参与细胞渗透调节,并维持细胞内离子的稳定。本
研究结果表明,钠对碳氮代谢物具有一定的抑制作
用。可能是因为高浓度的 Na 通过阳离子的竞争和
拮抗作用抑制钙的吸收,从而导致糖类的合成与运
输受到阻碍^[27]。王伟燕等对土壤养分与烤烟糖含
量进行分析发现,铜含量对总糖和还原糖含量具有

促进作用^[28],本研究结论与之相似。雪茄烟叶的矿质元素与主要碳氮代谢物之间的作用不仅体现在单个指标之间的影响,更体现在多组指标之间的复杂交互作用。本研究探讨 4 个产地雪茄烟叶的矿质元素含量与碳氮代谢物含量之间的关系,后续应考虑增加其他矿质元素的分析,从而提高研究的准确性和完整性。通过全面分析能够更好地揭示矿质营养对烟叶质量的影响机制,进而为雪茄生产领域的研究提供参考。

4 结论

通过正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA),筛选出不同产地雪茄烟叶中的差异指标(镁、硼、钠、总糖、烟碱和总氮含量)。基于因子分析和典型相关分析,探究雪茄烟叶中矿质元素含量和碳氮代谢物含量的关系,结果显示,随着硼、锌和铜含量的增加,烟叶中总糖含量呈现上升趋势,总氮含量呈现下降趋势。而镁和钠的含量与总糖和总氮的含量趋势正好相反。各元素含量之间的关系说明不同矿质元素含量对烟叶的碳氮代谢具有不同的影响机制。因此,在雪茄烟叶的栽培和管理中,合理调控矿质元素的含量能够对烟叶的品质产生显著影响。

参考文献:

- [1] 陈一鑫,肖志鹏,丁松爽,等. 衡阳烟区茄衣烟叶综合评价模型构建及栽培品种评价[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2024, 45(2): 118-127.
- [2] 钟仙韵,叶为民,陈群明,等. 雪茄烟叶发酵及其与风味形成关系研究进展[J]. 中国酿造, 2024, 43(6): 27-31.
- [3] 刘晶,张文军,白晓莉,等. 国内外不同雪茄烟综合品质对比分析[J]. 西南农业学报, 2022, 35(1): 81-89.
- [4] 向小华,刘国祥,张兴伟,等. 92 份雪茄烟原料种质资源遗传多样性研究[J]. 中国烟草科学, 2021, 42(4): 9-16.
- [5] 孙永波,和旺伟,吴贵成,等. 德宏州雪茄烟叶产业发展现状及对策[J]. 农业工程技术, 2024, 44(3): 22-24.
- [6] 闫新甫,王欣,孔劲松,等. 全国近十年晾烟生产及市场变化分析[J]. 中国烟草科学, 2021, 42(2): 98-104.
- [7] 宋贝贝,何声宝,安泓沟,等. 国内外几种知名品牌雪茄化学及风格特征比较[J]. 中国烟草学报, 2023, 29(3): 115-124.
- [8] 徐雪芹,陈志燕,王维刚,等. 广西主烟区土壤和初烤烟中微量元素含量分析[J]. 广东农业科学, 2010, 37(4): 106-108.
- [9] 孙九喆,童治军,李萌,等. 基于矿质元素指纹分析技术的烟叶产区判别[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 23-28.
- [10] 李欣燕,张明月,王方玲,等. 不同保水剂对雪茄烟叶生长发育过程中矿质元素动态变化的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(5): 55-65.
- [11] 李丽,兰春茶,董树超,等. 降低基肥施用比例及增施腐殖酸钾对烤烟品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(10): 2380-2384.
- [12] 管庆林,朴晟源,张思唯,等. 中微量元素配施对雪茄烟叶光合特性、碳氮代谢及产量和质量的影响[J]. 作物杂志, 2023(5): 187-196.
- [13] 任志广,张勇刚,项波卡,等. 植烟土壤有效硼、锌及其交互作用对烟叶硼、锌及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(7): 197-205.
- [14] 穆童,卢秀萍,许自成,等. 罗平烟区土壤有效硼、铜含量与烟叶硼、铜含量的关系分析[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6): 44-50.
- [15] Chung I M, Kim J K, Han J G, et al. Potential geo-discriminative tools to trace the origins of the dried slices of shiitake (*Lentinula edodes*) using stable isotope ratios and OPLS-DA[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 505-513.
- [16] 王硕立,丁松爽,王荣浩,等. 我国云南和尼加拉瓜雪茄烟叶矿质元素含量和感官质量差异及其相关分析[J]. 作物杂志, 2023(3): 139-147.
- [17] 杜倩,王昌全,冯广林,等. 攀枝花烟区烤烟品种红花大金元烟叶主要化学成分特征分析[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(3): 90-94.
- [18] 李艳平,任天宝,李建华,等. 烟秆有机肥对烤烟根系发育和矿质元素含量的影响[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(6): 21-26.
- [19] Bugge B, Glaser B, Zöller L, et al. Geochemical characterization and origin of Southeastern and Eastern European Loesses (Serbia, Romania, Ukraine)[J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27(9/10): 1058-1075.
- [20] 耿召良,高华军,李方友,等. 国内外部分雪茄烟叶主要化学成分比较及聚类分析[J]. 热带作物学报, 2023, 44(9): 1840-1853.
- [21] 程海涛,马兆惠,刘桂林,等. 北方梗稻品种(系)资源淀粉 RVA 谱特征与品质性状典型相关分析[J]. 作物杂志, 2017(2): 59-66.
- [22] 谢榕榕,柯玉琴,李文卿,等. 钾镁肥优化施用对烤烟后期光合荧光特性和碳氮代谢酶活性的影响[J]. 江西农业学报, 2022, 34(3): 119-126.
- [23] 贺远,陈国瑀,耿召良,等. 不同钾镁肥处理对海南雪茄烟生理及烟叶产质量的影响[J]. 南方农业学报, 2025, 56(12): 3742-3750.
- [24] 周世民,符云鹏,周建军,等. 镁肥用量及施用方法对烤烟产量和品质的影响[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(5): 637-639.
- [25] 刘茜茜,黄莺,王小利,等. 贵州省遵义市烟区施用钙、镁肥对烤烟 K326 产量和品质的影响[J]. 山地农业生物学报, 2022, 41(2): 59-65.
- [26] 姚倩,范艺宽,许自成,等. 施锌对烟草含氮化合物积累的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(6): 1023-1029.
- [27] 周洪华,李卫红. 胡杨木质部水分传导对盐胁迫的响应与适应[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 81-91.
- [28] 王伟燕,常乃杰,胡向丹,等. 黔西南土壤养分与烤烟糖含量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(11): 2010-2018.