

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.24529

定向调控烟叶糖碱比的植烟土壤评价方法研究

杨 荣¹, 朱经伟^{2#}, 李彩斌³, 艾永峰⁴, 刘青丽¹, 刘艳霞², 李志宏¹,
李 寒², 陈 曦¹, 王新修¹, 李琮香¹, 张云贵^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 贵州省烟草科学研究所, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州省烟草公司毕节市公司, 贵州 毕节 551700;
4. 贵州省烟草公司铜仁市公司, 贵州 铜仁 554300)

摘 要: 为了促进烟叶高质量生产, 在贵州省采集同田土壤和烤后 C3F 等级烟叶进行土壤养分和烟叶糖碱比测定, 使用随机森林模型预测糖碱比, 通过布尔塔 (Boruta) 算法评估变量重要性并构建最小数据集进行基于烟叶糖碱比的植烟土壤质量评价, 同时明确贵州烟区烟叶糖碱比的主要限制因子。结果表明: ①根据 Boruta 分析结果, 明确了有效铜、有效硼、碱解氮、速效钾和有效铁为烟叶糖碱比的重要影响因子, 并组成植烟土壤质量评价指标的最小数据集; ②基于全量数据集的植烟土壤质量评价结果表明: 植烟土壤质量指数为 38.30 ~ 78.07, 均值为 60.20, 整体土壤质量状况较好。基于最小数据集的植烟土壤质量指数与全量数据集土壤质量指数 (SQI_{TDS}) 之间的决定系数为 0.66 ($P<0.001$), 最小数据集对 SQI_{TDS} 等级预测准确率达 88.17%, 受试者工作特征曲线下的面积达 0.90 ~ 0.97, 表明最小数据集能够有效代替全量数据集对植烟土壤质量状况进行评价; ③根据土壤质量指数低分因子分析结果, 明确了贵州省烟叶糖碱比的主要土壤限制因子为有效铜、有效锰和有效铁, 主要表现为含量偏低, 因此, 在生产中通过合理提高土壤中的有效铜、有效锰和有效铁含量, 有望改善烟叶糖碱比, 提升烟叶品质。

关键词: 糖碱比; 随机森林; 土壤质量; 最小数据集

糖碱比作为衡量烟叶化学成分协调性的关键指标, 在烤烟品质评价体系中占据最大权重 (25%)^[1], 全国主产区平均水平为 10.45, 但受地域性土壤与气候差异的影响, 其分布不均^[2]。土壤是烤烟生长的物质基础, 也是影响烟叶产量和品质的重要生态因子^[3], 然而, 土壤退化问题因过度开发与不合理利用而日益严峻, 威胁烤烟生产及农业的可持续性^[4-5]。土壤质量评价通过评估土壤质量现状和监测土壤质量动态变化指导农业生产, 目前已有广泛应用^[6], 传统评价多聚焦于土壤环境因子对作物生长的适宜性, 采用主成分分析与隶属度函数结合的方法进行评价^[7]。尽管评价指标越多越能反映

土壤真实状况, 但成本也随之增加^[8], 因此, 最小数据集法因其高效性而备受青睐, 该方法通过统计分析从全量数据集 (TDS) 中筛选出核心指标构建最小数据集 (MDS) 代替 TDS 进行土壤质量评价^[8-9]。当前植烟土壤评价多沿用传统方法, 侧重于保障产量^[10], 而忽视烤烟品质这一关键要素, 且以烤烟品质为出发点的土壤质量评价研究鲜有报道。为此, 本研究聚焦于贵州省植烟土壤及烟叶糖碱比, 利用随机森林与布尔塔 (Boruta) 算法确定土壤因子对糖碱比的影响权重, 并筛选关键因子构建 MDS, 通过土壤质量指数法与随机森林多分类算法验证其有效性。同时, 分析贵州各烟区烟叶糖碱比的主要限制因子, 旨在为贵州烟区的高质量烟叶生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与测定

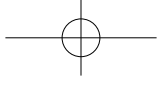
于 2022 年 8—9 月的烤烟成熟晚期, 在贵州省主要生产区采集 93 组土壤和 C3F 等级烟叶样品。其中, 毕节 24 组、遵义 18 组、黔西南 13 组、铜仁 10 组、黔东南 8 组、黔南 6 组、安顺 6 组、六

收稿日期: 2024-09-23; 录用日期: 2024-11-24

基金项目: 中国烟草总公司重点研发项目 (110202102037); 中国烟草总公司贵州省公司科技项目 (2022XM13); 贵州省烟草公司毕节市公司科技项目 (2022520500240186)。

作者简介: 杨荣 (2000-), 在读硕士研究生, 研究方向为土壤学。E-mail: 82101225263@caas.cn。朱经伟 (1988-), 硕士, 助理研究员, 主要从事作物养分管理与新型肥料产品研发。E-mail: hiz_jw@163.cn。杨荣和朱经伟为共同第一作者。

通讯作者: 张云贵, E-mail: zhangyungui@caas.cn。



盘水 6 组和贵阳 2 组, 样本量依据各市(州)烤烟种植面积进行分配, 采样地点选择具有典型性和代表性的连片种植区, 土壤样品采用多点取样法, 均匀分布于整块烟田, 取样深度为 0 ~ 20 cm 土层。多点样品混合后, 按照四分法保留 2.0 kg 样品, 并带回实验室进行预处理, 土壤指标及测定方法见表 1。烟叶样品为烤后依据 GB 2635—1992 分级的 C3F 烟叶, 总糖和烟碱按照 YC/T 159—2002 和 YC/T 383—2010 测定。

1.2 构建最小数据集与植烟土壤质量评价

使用随机森林模型预测糖碱比, 并通过 Boruta 算法进行多次随机迭代为土壤变量分配重要性得

分, 最终根据平均值评估各变量的重要性。重要性得分大于 shadowMax 的视为显著重要变量, 在 shadowMean 与 shadowMax 之间的视为较重要变量, 小于 shadowMin 的视为不重要变量, 重要性得分标准化处理后用于表示土壤变量对糖碱比的影响权重。根据 Boruta 分析对变量筛选的结果, 由显著重要的变量组成土壤质量评价的 MDS, 参照模糊数学的方法进行土壤质量评价^[11], 使用 TDS 和 MDS 分别计算得到的土壤质量指数为全量数据集土壤质量指数 (SQL_{TDS}) 和最小数据集土壤质量指数 (SQL_{MDS}), 土壤指标隶属度函数类型及阈值 (表 1) 参考已公开发表的专著^[1]和文献资料^[12-15]。

表 1 土壤指标测定参考标准及隶属度函数类型

指标类型	指标	指标测定参考标准	隶属度函数类型	隶属度函数阈值			
				a	b	c	d
大量元素	全氮 (g/kg)	NY/T 1121.24—2012	抛物线形	0.5	1	2	2.5
	全磷 (g/kg)	LY/T 1232—2015	“S”形	0.5	1.5	—	—
	全钾 (g/kg)	LY/T 1234—2015	“S”形	10	25	—	—
	碱解氮 (mg/kg)	LY/T 1228—2015	抛物线形	65	120	180	240
	无机氮 (mg/kg)	LY/T 1228—2015	抛物线形	10	20	40	60
	有效磷 (mg/kg)	NY/T 1121.7—2014	“S”形	10	45	—	—
	速效钾 (mg/kg)	NY/T 889—2004	“S”形	80	350	—	—
中量元素	交换性钙 (mg/kg)	NY/T 1615—2008	“S”形	300	2000	—	—
	交换性镁 (mg/kg)	NY/T 1615—2008	“S”形	60	200	—	—
	有效硫 (mg/kg)	NY/T 1121.14—2023	“S”形	5	40	—	—
微量元素	有效铁 (mg/kg)	NY/T 890—2004	“S”形	2.5	60	—	—
	有效锰 (mg/kg)	NY/T 890—2004	“S”形	5	40	—	—
	有效铜 (mg/kg)	NY/T 890—2004	“S”形	0.2	3	—	—
	有效锌 (mg/kg)	NY/T 890—2004	“S”形	1.5	3	—	—
	有效钼 (mg/kg)	NY/T 1121.9—2023	“S”形	0.15	1	—	—
	有效硼 (mg/kg)	NY/T 1121.8—2006	“S”形	0.15	1	—	—
	水溶性氯 (mg/kg)	NY/T 1378—2007	抛物线形	4	10	30	60
生物指标	有机质 (g/kg)	NY/T 1121.6—2006	抛物线形	15	25	35	45
	微生物量碳 (mg/kg)	GB/T 39228—2020	抛物线形	15	25	35	45
	微生物量氮 (mg/kg)	GB/T 39228—2020	抛物线形	5	10	20	25
其他	pH	NY/T 1121.6—2006	抛物线形	5	5.5	6.5	7.5
	碳氮比	LY-T 1237—1999	抛物线形	5	10	15	20

1.3 数据处理与统计分析

使用 Excel 2016 整理数据, 并采用 R 4.2.1 进行数据分析与图形绘制。构建随机森林预测模型使用 “randomForest” 和 “ranger” 包; “Caret” 包用于模型训练和超参数调整; “Boruta” 包用于变量重要性测度; “multiROC” 包绘制多分类接受者操作

特征曲线 (ROC)。

2 结果与分析

2.1 土壤养分特征及烟叶糖碱比的描述统计

依据表 2 可知, 烟叶总糖范围为 20.41% ~ 39.28%, 均值 (31.79%) 略高, 变异系数小

(12.30%)；烟碱范围为1.02% ~ 4.30%，均值(2.76%)适中，中等变异(24.96%)；糖碱比范围为4.80 ~ 30.03，均值(12.53)略高，变异较大(35.36%)；根据烟叶品质评价方法^[1]，烟碱和糖碱比均有70.97%评分在60分以上，表明烟叶糖碱品质特征较好。土壤pH和碳氮比平均分别为6.44和10.23，均处于适中水平且变异较小(变异系数分别为17.54%和18.80%)；土壤养分大量元素除速效钾略高(386.60 mg/kg)外均处于适中水平，但变异较大，尤其是有效磷在全省的空间分布极为不均(114.49%)；中量元素交换性钙、交换性镁和有效硫含量较为丰富，平均水平分别为1745.90、2827.33和63.88 mg/kg；微量元素有效

铁和有效锌平均分别为36.50和2.15 mg/kg，处于适中水平，有效锰、有效硼和水溶性氯含量较丰富，处于较高水平，有效铜和有效钼平均分别为1.55和0.29 mg/kg，处于较低水平，微量元素受地形和气候等因素影响较大，均为高度变异(63.34% ~ 119.70%)；有机质平均含量为31.55 g/kg，处于适中水平但变异略高(35.34%)；土壤微生物量碳和微生物量氮平均分别为159.93和34.59 mg/kg，均处于较高水平，表明土壤微生物活性好。

总体而言，贵州植烟土壤养分及烟叶糖碱基本特征为土壤养分大量元素适中，中量元素丰富，微量元素区域性缺乏；有机质含量丰富，微生物活性好；烟叶烟碱适中，总糖和糖碱比略高。

表 2 土壤养分特征与烟叶糖碱比统计分析 (n=93)

指标类型	指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数 (%)
烟叶	总糖 (%)	20.41	39.28	31.79	3.91	12.30
	烟碱 (%)	1.02	4.30	2.76	0.69	24.96
	糖碱比	4.80	30.03	12.53	4.43	35.36
土壤	全氮 (g/kg)	0.47	3.08	1.77	0.50	28.20
	全磷 (g/kg)	0.35	2.27	0.85	0.34	39.94
	全钾 (g/kg)	3.20	44.60	15.98	9.13	57.14
	碱解氮 (mg/kg)	63.12	356.24	154.82	58.97	38.09
	无机氮 (mg/kg)	5.21	130.55	34.91	29.92	85.70
	有效磷 (mg/kg)	0.80	173.00	28.41	32.53	114.49
	速效钾 (mg/kg)	70.00	1298.00	386.60	210.11	54.35
	交换性钙 (mg/kg)	140.30	4669.10	1745.90	1035.31	59.30
	交换性镁 (mg/kg)	24.31	17306.38	2827.33	5033.15	178.02
	有效硫 (mg/kg)	4.59	421.40	63.88	66.58	104.22
	有效铁 (mg/kg)	5.97	152.00	36.50	28.61	78.38
	有效锰 (mg/kg)	4.65	290.00	50.01	43.72	87.43
	有效铜 (mg/kg)	0.17	6.50	1.55	1.07	69.19
	有效锌 (mg/kg)	0.27	9.03	2.15	1.36	63.34
	有效硼 (mg/kg)	0.19	5.84	1.02	0.91	89.27
	有效钼 (mg/kg)	0.04	2.55	0.29	0.34	115.49
	水溶性氯 (mg/kg)	3.56	371.95	37.86	45.32	119.70
	有机质 (g/kg)	11.50	77.10	31.55	11.15	35.34
	微生物量碳 (mg/kg)	16.24	603.71	159.93	108.43	67.80
	微生物量氮 (mg/kg)	2.76	102.92	34.59	20.85	60.27
	pH	4.42	8.15	6.44	1.13	17.54
	碳氮比	6.96	18.31	10.23	1.85	18.08

2.2 随机森林预测模型的构建与变量筛选

使用随机森林算法结合土壤养分特征对烟叶的糖碱比进行预测,并通过网格搜索法和十折交叉验证确定最佳超参数,包括随机选定的预测变量个数和最小节点大小。结果如图 1 a 所示,当 2 个超参数均为 2 时,预测模型的均方根误差 (RMSE) 值

最小为 4.47,因此,使用网格搜索法筛选的参数构建随机森林模型对糖碱比进行预测。随机森林模型预测烟叶糖碱比的准确性高,如图 1b 所示,其预测值与实际值间 $R\text{-squared}=0.96$ ($P<0.001$), $RMSE=2.15$, 平均绝对误差 (MAE)=1.53。因此,采用此模型进行 Boruta 分析评估变量重要性是合理的。

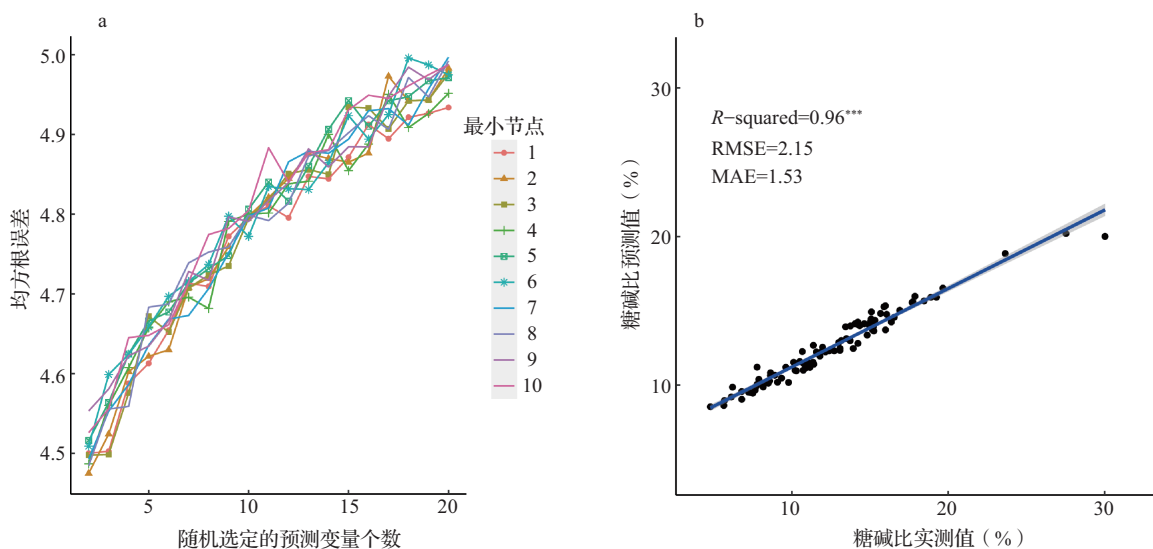


图 1 模型超参数选择与建模模型预测

注: a 为十折交叉验证-网格搜索法寻找模型最佳超参数; b 为烟叶糖碱比实测值与预测值线性拟合, $R\text{-squared}$ 为决定系数; *** 表示 $P<0.001$; RMSE 为均方根误差; MAE 为平均绝对误差。

Boruta 分析结果如图 2 所示, shadowMax、shadowMean 和 shadowMin 分别为 2.86、-0.05 和 -2.54, 有效铜、有效硼、碱解氮、速效钾和有效铁的重要性得分 (Z-score) 分别为 5.78、4.55、3.95、3.72 和 3.14, 均高于 shadowMax, 表明其对糖碱比具有显著的影响; 有机质、水溶性氯、全氮、交换性钙、有效磷、有效硫、有效锌、全磷、碳氮比和无机氮重要性得分在 shadowMean 和 shadowMax 之间, 表明其对糖碱比具有较重要的影响作用, 但影响并不显著; 微生物量氮、交换性镁、pH、微生物量碳、有效铜和全钾的重要性得分在 shadowMin 与 shadowMean 之间, 表明其对烟叶糖碱比的影响较小且不显著; 有效锰的重要性得分低于 shadowMin, 表明其对糖碱比的影响非常小且不显著。由此可构建 MDS 进行植烟土壤质量评价, 指标包含有效铜、有效硼、碱解氮、速效钾和有效铁。

2.3 以烟叶糖碱比目标的植烟土壤质量评价

对 TDS 指标重要性得分进行标准化处理得到有效铜权重最大, 为 0.098, 全钾最小, 为 0.019, 有效锰对烟叶糖碱比影响极小且不显著, 因此权重

为 0, 不参与评价; MDS 指标有效铜、有效硼、碱解氮、速效钾和有效铁权重分别为 0.239、0.208、0.193、0.187 和 0.173 (表 3)。

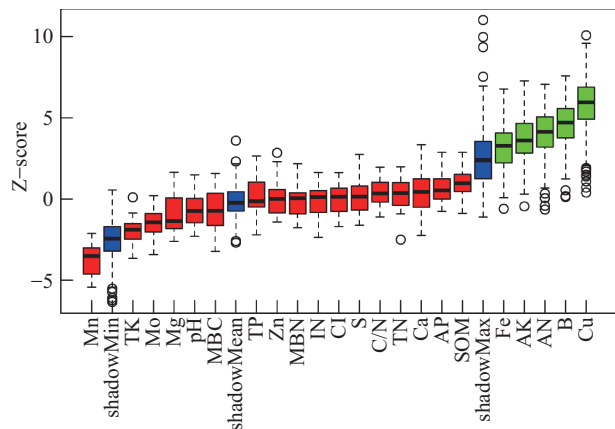


图 2 Boruta 算法变量重要性分析

注: Mn 为有效锰, TK 为全钾, Mo 为有效钼, Mg 为交换性镁, MBC 为微生物量碳, TP 为全磷, Zn 为有效锌, MBN 为微生物量氮, IN 为无机氮, Cl 为水溶性氯, S 为有效硫, C/N 为碳氮比, TN 为全氮, Ca 为交换性钙, AP 为全磷, SOM 为有机质, Fe 为有效铁, AK 为速效钾, AN 为碱解氮, B 为有效硼, Cu 为有效铜。

表 3 植烟土壤质量评价指标权重

变量	全量数据集 集权重	最小数据集 权重	变量	全量数据集 权重	最小数据集 集权重
Cu	0.098	0.239	S	0.040	—
B	0.085	0.208	Zn	0.040	—
AN	0.079	0.193	Cl	0.038	—
AK	0.077	0.187	MBN	0.038	—
Fe	0.071	0.173	IN	0.037	—
SOM	0.049	—	pH	0.032	—
AP	0.046	—	MBC	0.032	—
Ca	0.043	—	Mg	0.030	—
C/N	0.042	—	Mo	0.023	—
TN	0.041	—	TK	0.019	—
TP	0.041	—	Mn	0.000	—

注: Cu 为有效铜, B 为有效硼, AN 为碱解氮, AK 为速效钾, Fe 为有效铁, SOM 为有机质, AP 为全磷, Ca 为交换性钙, C/N 为碳氮比, TN 为全氮, TP 为全磷, S 为有效硫, Zn 为有效锌, Cl 为水溶性氯, MBN 为微生物量氮, IN 为无机氮, MBC 为微生物量碳, Mg 为交换性镁, Mo 为有效钼, TK 为全钾, Mn 为有效锰。

如图 3a 所示, SQI_{TDS} 范围为 38.30 ~ 78.07, 均值为 60.20, 变异小 (13.56%), 其中 91.40% 大于 50.00, 表明整体土壤质量状况较好; SQI_{MDS} 范围为 19.30 ~ 98.64, 均值为 65.92, 为中等变异 (21.44%)。 SQI_{TDS} 与 SQI_{MDS} 之间为极显著正相关 ($P<0.001$), 决定系数为 0.66, 表明 MDS 能够代替 TDS 进行植烟土壤质量评价, 且使用 MDS 扩大了评估范围, 更能体现样本间的差异。

将 SQI_{TDS} 等距离划分为高质量烟田 ($SQI_{TDS}>64.82$)、中等质量烟田 ($64.82>SQI_{TDS}>51.56$) 和低质量烟田 ($SQI_{TDS}<51.56$), 使用随机森林多分类算法对 MDS 进行验证, 多分类混淆矩阵显示 MDS 对高、中等和低质量烟田的分类预测准确率分别为 88.50%、86.20% 和 100.00% (图 3b), 整体准确率为 88.17% (95%CI: 79.82% ~ 93.95%), Kappa 系数为 0.78; ROC 曲线分析显示高、中等和低质量烟田 ROC 曲线下面积 (AUC) 分别为 0.94、0.90 和 0.97, 宏平均和微平均的 AUC 分别为 0.93 和 0.95 (图 3c), 均表明 MDS 能够有效地区分不同质量等级的烟田, 进一步说明 MDS 能够代替 TDS 进行植烟土壤质量评价。

2.4 各植烟区土壤质量指数主要低分因子分析

对贵州省 9 个市 (州) 植烟区的 SQI_{MDS} 和 MDS 指标评分进行统计分析, 结果 (图 4) 表明, 毕节烟区植烟土壤有效铜、有效硼和有效铁平均得分分别为 0.52、0.50 和 0.55, 得分相对较低; 遵义、黔西南和黔东南地区的有效铜和有效铁平均得分均不超过 0.60, 得分相对较低; 铜仁地区有效铜平均得分较低, 为 0.55; 贵阳地区有效铜、有效硼和有效铁平均得分较低, 尤其是有效铜和有效铁平均得分仅分别为 0.21 和 0.22, 其原因为含量严重偏低。安顺、六盘水和黔南地区土壤有效铜、有效硼、碱解氮、速效钾和有效铁平均得分较高, 均在 0.70 以上。整体上, 贵州烟叶糖碱比的主要土壤限制因子为有效铜和有效铁, 其地区间的平均得分仅分别为 0.54 和 0.65, 均表现为含量偏低, 尤其是贵阳和黔东南地区最为突出。同时, 贵阳和毕节地区土壤有效硼含量较低, 导致得分偏低。

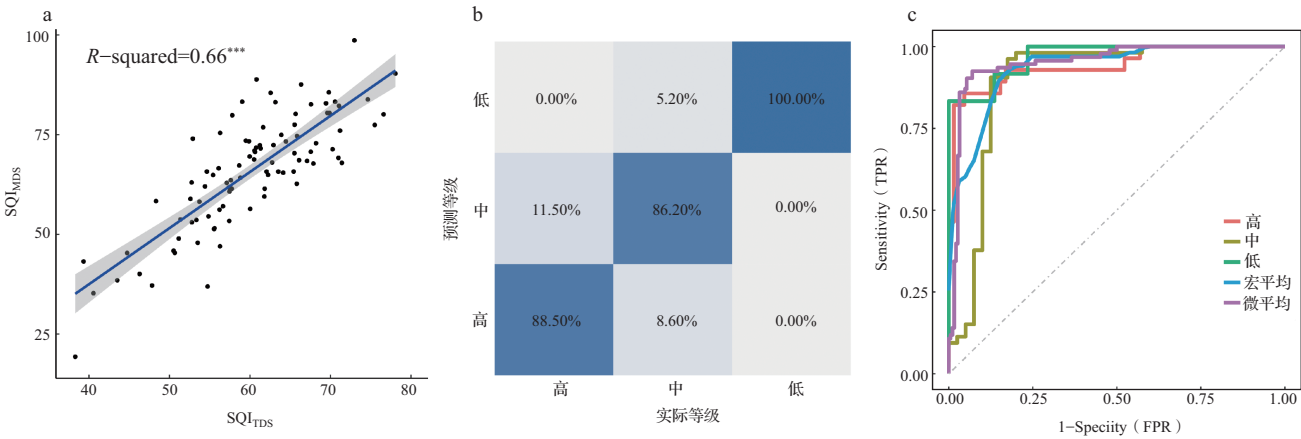


图 3 土壤质量指数分布及最小数据集验证分析

注: a 为 SQI_{TDS} 与 SQI_{MDS} 线性拟合, $R-squared$ 为决定系数, *** 表示 $P<0.001$; b 为随机森林多分类混淆矩阵; c 为随机森林多分类 ROC 曲线, 横轴为假阳率 (FPR), 纵轴为真阳率 (TPR)。

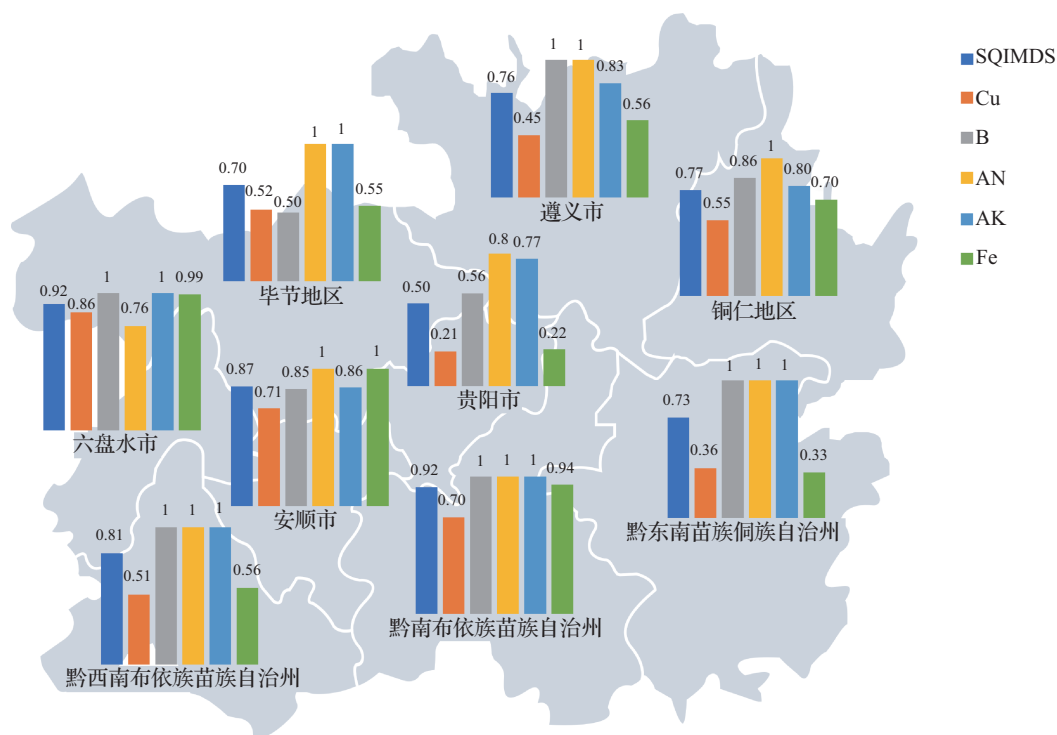


图4 贵州省各植烟区最小数据集土壤质量指数及最小数据集指标平均得分

3 讨论

贵州省烤烟糖碱比平均为 12.53 ± 4.43 ，高于全国的平均水平^[2]，变异较大，可能是由于气候条件及栽培措施的差异所致。本研究区别于传统的土壤质量评价，以烟叶糖碱比为目标，运用随机森林算法进行预测，并通过 Boruta 分析明确了有效铜、有效硼、碱解氮、速效钾和有效铁是对烟叶糖碱比具有显著影响作用的土壤因子。有效铜是叶绿素的重要组分，直接影响植物的呼吸和光合作用，通过催化植物的氧化还原反应促进碳水化合物和蛋白质的代谢与合成，有效铜还作为植物氮同化关键酶硝酸醇还原酶和亚硝酸醇还原酶的活化因子，增强氮代谢^[16]；研究表明，喷施 0.1% 的 CuSO_4 可增加烤后烟叶的糖类和烟碱含量，但对糖碱比有一定负效应^[17]；吕亚琼等^[18]的研究结果也表明，喷施铜肥有利于烟叶糖类的积累；王伟燕等^[19]通过对黔西南烤烟总糖和土壤养分特征进行逐步回归分析的结果也表明，有效铜是烟叶总糖的重要影响因子。有效硼参与烟叶蛋白质代谢和烟碱合成，并影响叶绿素合成，进而影响碳水化合物的代谢^[20]。聂新柏等^[21]发现，增施硼肥可增加烟叶还原糖含量并降低烟碱含量，从而减小糖碱比；晋艳等^[22]发

现，一定 B 浓度范围内烟碱含量随 B 浓度增加而增加，但超过 200 mg/L 后则降低；冯圭如等^[23]通过试验也证明施用硼肥能促进烟叶糖类物质的积累。N 是烟碱的主要组成成分，烟碱积累与烤烟生长在很大程度上受到施氮量的影响^[24]。研究表明，碱解氮对烟碱含量具有显著的正向效应，并且被确认为是最关键的土壤养分因子之一^[25]；此外，肖艳霞等^[26]对豫中烟区 407 份数据进行分析，也发现碱解氮是烟叶糖碱比的重要影响因子。K 是烟叶品质的关键影响因素，能够促进叶绿素的合成与稳定，进而提升烟叶的光合作用效率^[27]。黎妍妍等^[28]发现，烟叶糖含量随 K 含量的增加呈上升趋势，王伟燕等^[19]在贵州黔西南的研究发现，速效钾是影响烟叶总糖和还原糖的重要因子，但二者与速效钾之间均呈负相关关系；王勇^[29]在重庆酉阳的研究发现，速效钾有利于烟叶还原糖的积累；刘泓等^[30]在福建龙岩、三明和南平的研究也表明，速效钾是影响烟叶总糖和烟碱含量的主要肥力因子。有效铁广泛参与植物叶绿素合成、光合作用和电子传递等关键代谢过程^[31-32]，王佩云等^[33]发现，缺有效铁时烤烟根系生长受到显著抑制，李洪勋等^[34]的研究表明，在不同类型的土种中有效铁对烟叶糖碱比的影响存在差异。

使用 Boruta 分析筛选的土壤因子有效铜、有效硼、碱解氮、速效钾和有效铁构成 MDS 进行土壤质量评价, 贵州省 SQI_{TDS} 分布范围为 38.30 ~ 78.07, 平均值为 60.20, 与四川省植烟土壤质量状况相近^[13]。为验证 MDS 的有效性, 使用 TDS 进行对比分析, 结果显示, SQI_{TDS} 与 SQI_{MDS} 线性拟合决定系数为 0.66 ($P < 0.001$), 表明 Boruta 分析构建 MDS 可代替 TDS 进行土壤质量的评价; 同时, 随机森林多分类混淆矩阵结果 (正确率为 86.2% ~ 100.0%) 和 ROC 曲线分析结果 (AUC 为 0.90 ~ 0.97) 也表明 MDS 能够代替 TDS 对植烟土壤质量等级进行有效的区分, 验证结果与张恒等^[35]的研究结果相近。 SQI_{MDS} 低分因子分析结果表明, 贵州烟区烟叶糖碱比主要限制因子为有效铜、有效硼和有效铁, 鉴于烤烟专用水溶肥中含有有效铜、有效硼等微量元素^[36], 且夏昊等^[37]的研究已证实, 施用此类水溶肥能显著提高烟叶品质并增强烟叶的可用性, 因此, 对于贵州烟区而言, 采用此类烤烟专用水溶肥作为改善植烟土壤质量、推动烟叶高质量生产的措施具有一定的合理性和可行性。

值得注意的是, 糖碱比作为由总糖和烟碱计算得出的复合指标, 在本研究中通过随机森林算法直接进行了分析。这种方法虽然有效, 但可能在一定程度上掩盖了土壤养分对总糖和烟碱这两个单一指标的独立影响。因此, 未来的研究可以进一步探索同时分析单一指标与复合指标, 以更全面地评估各因子对目标变量的具体贡献。本研究的核心目标是探索烟叶糖碱比的土壤定向调控策略, 故主要聚焦于糖碱比这一研究目标。然而, 烟叶品质的评价体系是多元化的, 包含多个关键指标。基于本研究的方法论, 未来可以拓展至对烟叶其他品质指标乃至综合品质的分析, 以期根据地域特点精准调控各地区烟叶品质的低分因子, 从而推动烟叶的高质量生产。此外, 本研究在贵州省各植烟区共采集了 93 组样品进行测试分析。鉴于贵州地形复杂且区域气候差异显著, 部分烟区的样品数量相对较少, 这可能不足以全面反映其整个烟区的真实土壤特征。同时, 本研究尚未涵盖土壤物理指标, 而土壤物理指标同样是土壤质量评价不可或缺的一部分^[8, 38]。因此, 为了增强数据的说服力并使理论研究更加贴近生产实际, 未来的研究应当增加样本数量, 并纳入土壤物理及更多生物学指标的测试, 以期为贵州乃至全国的烟叶高质量生产提供更加全

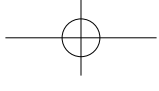
面和精准的指导。

4 结论

本研究通过随机森林模型对烟叶糖碱比进行预测, 并结合 Boruta 变量选择方法, 确定了土壤有效铜、有效硼、碱解氮、速效钾和有效铁是影响烟叶糖碱比的关键因素。并以此构建 MDS 进行基于烟叶糖碱比的植烟土壤质量评价, 结果表明, 贵州省 SQI_{MDS} 的范围为 19.30 ~ 98.64, 平均为 65.92, SQI_{TDS} 的范围为 38.30 ~ 78.07, 平均为 60.20。 SQI_{MDS} 与 SQI_{TDS} 之间呈极显著正相关关系 (相关系数 $r=0.66$, $P < 0.001$), MDS 对 TDS 的土壤质量等级预测准确率达 88.17%, 均证实了该 MDS 能够作为 TDS 的有效替代, 用于贵州省植烟土壤质量的评价。通过对基于烟叶糖碱比的土壤质量评价低分因子进行深入分析, 明确了有效铜、有效硼和有效铁是贵州省烟叶糖碱比的主要土壤限制因子。因此, 在烤烟生产过程中, 可以考虑通过合理调控土壤中的有效铜、有效硼和有效铁含量, 以优化烟叶的糖碱比, 从而促进烟叶的高质量生产。

参考文献:

- [1] 陈江华, 刘建利, 李志宏. 中国植烟土壤及烟草养分综合管理 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 陈胜利, 张玉林, 张占军, 等. 烤烟主产区烟叶糖碱比的变异分析 [J]. 烟草科技, 2012 (10): 73-76.
- [3] 刘国顺. 烟草栽培学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [4] 查宇璇, 冉茂, 周鑫斌. 烟田土壤酸化原因及调控技术研究进展 [J]. 土壤, 2022, 54 (2): 211-218.
- [5] 代先强, 杨盛刚, 肖鹏, 等. 渝东北烟区土壤退化现状剖析 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2023, 45 (12): 65-75.
- [6] Doran J W P T B. Defining and assessing soil quality: Defining soil quality for a sustainable environment [M] //Madison: Soil Science Society of America Publication Inc, 1994: 3-21.
- [7] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法 [J]. 土壤, 1997 (3): 113-120.
- [8] 张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展 [J]. 土壤学报, 2022, 59 (3): 603-616.
- [9] 王亲, 董伟华, 李晓强, 等. 土壤健康评价的研究进展 [J]. 现代农业研究, 2022, 28 (7): 10-12.
- [10] Teng L, Jiang G, Ding Z, et al. Evaluation of tobacco-planting soil quality using multiple distinct scoring methods and soil quality indices [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 441: 140883.
- [11] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应



- 用研究[J]. 土壤学报, 2001 (2): 176-183.
- [12] 李强, 周冀衡, 杨荣生, 等. 曲靖植烟土壤养分空间变异及土壤肥力适宜性评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22 (4): 950-956.
- [13] 肖钰. 四川植烟土壤特征分析及健康评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [14] 张明发, 田峰, 李孝刚, 等. 基于烤烟生产的湘西植烟土壤质量综合评价[J]. 中国烟草学报, 2017, 23 (3): 87-97.
- [15] 段淑辉, 刘天波, 李建勇, 等. 湖南浏阳植烟土壤肥力评价及土壤养分变化[J]. 中国烟草科学, 2017, 38 (2): 33-38.
- [16] Hänsch R, Mendel R R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl) [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12 (3): 259-266.
- [17] 陈佳威. 铜肥施用方式对凉烟2号生长发育及产量品质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
- [18] 吕亚琼, 郭常德, 刘冬梅, 等. 叶面喷施中微量元素对麒麟区烤烟产量质量的影响[J]. 云南农业, 2009 (1): 32-35.
- [19] 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]. 植物营养与肥科学报, 2021, 27 (11): 2010-2018.
- [20] 罗鹏涛, 邵岩. 硼在植物生活中的作用及在烟草生产上的应用[J]. 云南农业大学学报, 1990 (4): 237-241.
- [21] 聂新柏, 靳志丽. 烤烟中微量元素对烤烟生长及产质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2003 (4): 30-34.
- [22] 晋艳, 雷永和, 邵岩. 烟草需硼临界值及田间叶面施硼肥效研究[J]. 烟草科技, 1996 (2): 32-34.
- [23] 冯圭如, 季泽顺, 张转勇, 等. 不同中微量元素配施对烤烟农艺性状、两糖积累及品质的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51 (2): 81-86.
- [24] 李春俭, 张福锁, 李文卿, 等. 我国烤烟生产中的氮素管理及其与烟叶品质的关系[J]. 植物营养与肥科学报, 2007 (2): 331-337.
- [25] 陈伟, 唐远驹. 烤烟烟碱含量与土壤养分的关联分析[J]. 中国烟草科学, 2009, 30 (5): 1-5.
- [26] 肖艳霞, 黄海棠, 许自成, 等. 豫中烟区土壤因子分布状况及对烤烟糖碱比的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012 (3): 43-47.
- [27] 李佛琳, 彭桂芬, 萧凤回, 等. 我国烟草钾素研究的现状与展望[J]. 中国烟草科学, 1999 (1): 24-27.
- [28] 黎妍妍, 许自成, 王金平, 等. 湖南烤烟总糖、还原糖含量与几种土壤养分的关系分析[J]. 土壤通报, 2007 (5): 911-914.
- [29] 王勇. 重庆酉阳植烟土壤理化性状与烟叶化学成分的相关性分析[J]. 湖南农业科学, 2014 (1): 43-45.
- [30] 刘泓, 刘淑欣, 熊德中. 影响烟叶总糖和烟碱含量的土壤肥力因子评价[J]. 福建农业大学学报, 1997 (1): 83-87.
- [31] Balk J, Pilon M. Ancient and essential: the assembly of iron-sulfur clusters in plants [J]. Trends in Plant Science, 2010, 16 (4): 218-226.
- [32] 刘士平, 郑录庆, 田伟, 等. 高等植物中铁的代谢机制[J]. 植物生理学报, 2011, 47 (10): 967-975.
- [33] 王佩云, 李璐, 陈照峰, 等. 钙、镁、铁亏缺对烟草生长和生理指标的影响[J]. 湖南农业科学, 2022 (10): 21-24.
- [34] 李洪勋, 王龙昌, 罗焕平, 等. 不同土种土壤养分含量与烤烟质量的关系[J]. 河南农业科学, 2015, 44 (9): 32-35.
- [35] 张恒, 张艳玲, 许亚东, 等. 基于最小数据集的植烟土壤质量评价及障碍因子诊断[J]. 烟草科技, 2024, 57 (2): 45-53.
- [36] 贵州省烟草学会. 烤烟专用水溶根施肥技术介绍[J]. 中国烟草学报, 2017, 23 (1): 2, 130.
- [37] 夏昊, 刘青丽, 张云贵, 等. 水溶肥替代常规追肥对黔西南烤烟产量和质量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018 (1): 64-69.
- [38] 李鑫, 张文菊, 郭磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54 (14): 3043-3056.

Research on the evaluation method of tobacco-growing soil for targeted regulation of the sugar/nicotine ratio in tobacco leaves

YANG Rong¹, ZHU Jing-wei^{2#}, LI Cai-bin³, AI Yong-feng⁴, LIU Qing-li¹, LIU Yan-xia², LI Zhi-hong¹, LI Han², CHEN Xi¹, WANG Xin-xiu¹, LI Qiong-xiang¹, ZHANG Yun-gui^{1*} (1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Guizhou Tobacco Science Research Institute, Guiyang Guizhou 550081; 3. Bijie Branch of Guizhou Provincial Tobacco Company, Bijie Guizhou 551700; 4. Tongren Branch of Guizhou Provincial Tobacco Company, Tongren Guizhou 554300)

Abstract: In order to promote the high-quality production of tobacco leaves, 93 groups of same-field soil and cured C3F grade tobacco leaves were collected in Guizhou Province for the determination of soil nutrients and tobacco leaf sugar/nicotine ratio. The random forest model was used to predict the sugar/nicotine ratio. The importance of variables was evaluated by Boruta algorithm and the minimum data set was constructed to evaluate the quality of tobacco planting soil based on tobacco leaf sugar/nicotine ratio. At the same time, the main limiting factors of sugar/nicotine ratio of tobacco leaves in Guizhou tobacco-growing area were identified. The results showed as follows: (1) According to the Boruta analysis, Cu, B, alkaline hydrolyzed nitrogen (AN), available potassium (AK) and Fe were identified as important factors affecting the sugar/nicotine ratio of tobacco leaves, and constituted the minimum data set for evaluating the quality of tobacco planting soil.

(2) The results of tobacco soil quality evaluation based on the full data set showed that the soil quality index (SQI_{TDS}) ranged from 38.30 to 78.07, with an average value of 60.20, indicating a good overall soil quality. The coefficient of determination between SQI_{MDS} and SQI_{TDS} based on minimum data set was 0.66 ($P<0.001$). The SQI_{TDS} grade prediction accuracy of minimum data set was up to 88.17%, and the Area Under Curve (AUC) of Receiver Operating Characteristic Curve values ranged from 0.90 to 0.97, indicating that the minimum data set could effectively replace the full data set to evaluate the quality of tobacco growing soil. (3) Based on the analysis of low-scoring factors in soil quality indices, the main soil-limiting factors for sugar/nicotine ratio in tobacco leaves in Guizhou Province had been identified as Cu, B and Fe, primarily due to their low contents. Consequently, reasonable regulation of Cu, B and Fe contents in the soil during production could be expected to improve the sugar/nicotine ratio and enhance the quality of tobacco leaves.

Key words: sugar/nicotine ratio; random forest; soil quality; minimal data set