DOI: 10.3969/j.issn.0488-5368.2025.10.013

云南临沧热区植烟土壤养分丰缺状况及肥力质量评价

侍浩良[1], 林登智[1],田明慧[2],张清云[2],周红霞[2],陶鹏文[2],
和 敏[3],付丽美[2], 郑元仙[2],周厚发[2],黄飞燕[1]
(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 双江分公司,云南 临沧 677300;3 滇西科技师范学院,云南 临沧 677000)

摘 要:根据海拔、土壤类型、地形地貌、生产水平等因素采集双江县5个植烟乡镇共24份土壤样品,分析土壤常规8项及中微量元素等指标,以变异系数法确定权重,利用模糊数学隶属度模型计算土壤肥力综合指数;结合相关性分析,对双江县5个乡镇的植烟土壤养分及肥力质量进行综合性评价。结果表明:临沧热区植烟土壤平均pH值为5.29、平均HN为96.17 mg/kg,略低于优质烤烟生产适宜水平;OM、TN、TP和TK的含量在适宜范围,均值分别为29.68 g/kg、1.36 g/kg、0.82 g/kg和18.22 g/kg;AP平均含量59.14 mg/kg、AK平均含量365.08 mg/kg,均达到很高水平。从土壤中微量元素含量看,ECa、AMo均处于较低水平;EMg、ASi均在适宜范围内;AMn、ACu均处于高水平;AZn、AB和AFe均处于较高水平;相关性分析的结果表明,土壤养分之间存在复杂的相互作用,其中OM与TN、TP、HN、AP、AFe、AZn和AB呈极显著正相关,与AMo呈极显著负相关,与EMg和AMn呈显著负相关,与ECa和ASi呈负相关;5个乡镇中邦丙乡综合土壤肥力最高,*IFI*值为0.72(Ⅲ级),其次是勐勐镇、大文乡、沙河乡和忙糯乡,均是Ⅱ级。因此,双江县整体适宜烤烟种植,但各乡镇肥力差异较大,在烤烟生长过程中需要因地制宜,科学施肥,科学管理,稳步提升土壤质量,从而推动双江县烟叶质量的提升和烟草产业的可持续发展。

关键词:双江县;植烟土壤;土壤养分;丰缺状况;肥力质量
中图分类号:S511 **文献标识码**:A **文章编号**:0488-5368(2025)10-0064-13

Evaluation of Nutrient Abundance, Deficiency and Fertility Quality of Tobacco-Growing Areas of Tropical Lincang

SHI Haoliang[1], LIN Dengzhi[1], TIAN Minghui[2], ZHANG Qingyun[2], ZHOU Hongxia[2], TAO Pengwen[2], HE Min[3], FU Limei[2], ZHEN Yuanxian[2], ZHOU Houfa[2], HUANG Feiyan[1]
(1. *Yunnan Urban Agricultural Engineering and Technological Research Center/College of Agronomy, Kunming University, Kunming, Yunnan* 650214, *China*; 2 *Shuangjiang Branch of Yunnan Tobacco Company, Lincang, Yunnan* 677300, *China*; 3 *West Yunnan University, Lincang, Yunnan* 677000, *China*)

Abstract: To provide a scientific basis for soil nutrient management in tobacco cultivation in Shuangjiang County, this study comprehensively evaluated the nutrient abundance, deficiency status, and fertility quality of tobacco-planting soils. A total of 24 soil samples were collected from five tobacco-growing towns in Shuangjiang

收稿日期:2024-12-06 **修回日期**:2025-01-25
基金项目:云南省烟草公司科技计划项目(2024530900242001);云南省科技厅基础研究专项(202401AT070034)。
第一作者简介:侍浩良(2000-),在读硕士,研究方向为烟草栽培生产。
通信作者:周厚发,黄飞燕。

County, based on factors such as altitude, soil type, topography, and production level. Eight conventional soil parameters, along with medium and trace elements, were analyzed. The weights of each parameter were determined using the coefficient of variation method, and the comprehensive soil fertility index (IFI) was calculated using a fuzzy membership function model. Combined with correlation analysis, the soil nutrient levels and fertility status in the five towns were systematically assessed. The results showed that the mean soil pH and hydrolyzed nitrogen (HN) content were 5.29 and 96.17 mg/kg, respectively, both slightly below optimal levels for high-quality flue-cured tobacco production. The mean values of organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK) were 29.68 g/kg, 1.36 g/kg, 0.82 g/kg, and 18.22 g/kg, respectively. The average available phosphorus (AP) and available potassium (AK) contents were 59.14 mg/kg and 365.08 mg/kg, respectively. Exchangeable calcium (ECa) and available molybdenum (AMo) were found to be at low levels, while exchangeable magnesium (EMg) and available silicon (ASi) were within appropriate ranges. Available manganese (AMn), available copper (ACu), available zinc (AZn), available boron (AB), and available iron (AFe) were present at high levels. Correlation analysis revealed complex interactions among soil nutrients. OM was highly significantly positively correlated with TN, TP, HN, AP, AFe, AZn, and AB; highly significantly negatively correlated with AMo; significantly negatively correlated with EMg and AMn; and negatively correlated with ECa and ASi. Among the five towns in Shuangjiang County, Bangbing Township had the highest soil fertility index (*IFI* = 0.72, Grade III), followed by Mengmeng, Dawen, Shahe, and Mangnuo Townships, all of which were classified as Grade II. In conclusion, Shuangjiang County is generally suitable for tobacco cultivation. However, fertility levels vary considerably among towns. Therefore, region-specific and scientifically based fertilization strategies should be adopted to gradually improve soil quality, thereby enhancing tobacco leaf quality and promoting the sustainable development of the local tobacco industry.

Key words: Shuangjiang County; Tobacco-growing soils; Soil nutrients; Nutrient abundance and deficiency status; Fertility quality

土壤养分管理是烟叶种植生产的关键环节,土壤养分的丰缺状况直接影响烤烟的生长发育,进而影响到烟叶的产量、品质和风味。掌握土壤养分丰缺状况和肥力质量对于植烟土壤养分合理分区管理、科学施肥以及优质烟叶生产与土壤可持续利用具有重要意义。

烤烟是双江县农业产业发展的重要支柱之一,常年烟叶种植面积 2 000 hm^2 左右,年收购烟叶 3 500 t 左右。但是在调查过程中发现双江县部分烟区烤烟植株较矮、节距较短、上部烟叶开片不佳、不易成熟落黄,初烤上部烟叶甜香感不够、生青杂气较为明显。此前双江烟区开展的测土配方施肥主要集中在大量元素肥料的使用,而对中微量元素缺乏关注。中微量元素同样也是烤烟生长过程中不可或缺的,例如钙可维护烤烟细胞形态,稳定染色体,防止草酸毒性,但需适量,否则影响生长和养分吸收[1,2]。镁过量或不足都会影响叶绿素含量和光合作用,适量有利于植株根系活力和酶活性[2~4]。土壤中的铁、锰、锌、铜、硼、钼等微量元素对烤烟的生长至关重要,影响叶绿素合成、呼吸酶、生长、抗逆性、酶活性、光合效率和烟叶质量[5~11]。因此,本研究从双江烟区各乡镇植烟土壤营养元素(尤其是中微量元素)调查分析入手,采用统计学方法对各乡镇植烟区域营养元素含量进行丰缺评价,旨在为双江县各烟区制定平衡施肥、调控土壤微生物生态环境和提高烟叶品质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 取样点设置

根据双江县的海拔、土壤类型、地形地貌、生产水平等因素,依据每个乡镇植烟面积来采集土壤样品数量,在 2024 年烤烟移栽前,每个样地依据 5 点采样方法采集 0~20 cm 耕层土壤样品混合成 1 个样品,在双江县的 5 个植烟乡镇采集 24 个土壤样品(勐勐 3、邦丙 3、忙糯 4、大文 4、沙河 8),制成每个土壤样品 1.5 kg 带回实验室进行相关指标检测。

表 1 土样分布

乡镇	样地编号	海拔/m	纬度	经度	土壤质地类型	前茬作物
勐勐镇	101	1 488	23.568N	99.967E	砂土	油菜
	102	1 651	23.546N	99.976E	黏壤土	豌豆
	103	1 773	23.535N	99.982E	壤土	豌豆
	104	1 672	23.512N	99.952E	黏壤土	玉米
	105	1 657	23.486N	99.943E	砂壤土	油菜
邦丙乡	201	1 646	23.231N	99.820E	壤土	苦荞
	202	1 388	23.236N	99.843E	砾石壤土	苦荞
	203	1 518	23.260N	99.710E	砾石壤土	苦荞
忙糯乡	301	2 000	23.510N	100.028E	沙壤	冬闲
	302	1 834	23.423N	100.039E	壤土	冬闲
	303	1 897	23.434N	100.005E	壤土	苦荞
	304	1 794	23.401N	100.043E	红壤土	玉米
大文乡	401	1 640	23.377N	100.011E	壤土	玉米
	402	1 699	23.370N	99.972E	壤土	玉米
	403	1 568	23.361N	99.985E	壤土	小麦
	404	1 693	23.312N	99.945E	黏壤土	小麦
沙河乡	501	1 682	23.472N	99.649E	黏壤土	玉米
	502	1 711	23.465N	99.631E	壤土	茶树
	503	1 741	23.493N	99.623E	壤土	苦荞
	504	1 636	23.447N	99.617E	红壤土	苦荞
	505	1 668	23.438N	99.607E	红壤土	苦荞
	506	1 610	23.476N	99.702E	红壤土	玉米
	507	1 497	23.483N	99.720E	红壤土	冬闲
	508	1 430	23.494N	99.733E	红壤土	苦荞

1.2 测定项目及方法

根据前人的土壤质量评价指标,结合双江县的实际情况,选取土壤 pH、有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、水解性氮(HN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、交换性钙(ECa)、交换性镁(EMg)、有效铁(AFe)、有效锰(AMn)、有效锌(AZn)、有效铜(ACu)、有效硼(AB)、有效钼(AMo)和有效硅(ASi)共计 17 个指标作为参考指标[12~14]。

土壤 pH 采用玻璃电极法测定,水土比为 1 ∶ 2.5;土壤有机质含量采用硫酸-重铬酸钾容量法测定;土壤氮采用连续流动法测定;土壤磷和硅采用分光光度法测定;土壤全钾、速效钾、交换性钙和镁采用原子吸收分光光度法测定;水解性氮采用碱解扩散法测定;土壤有效态锌、锰、铁、铜含量采用二乙三胺五乙酸(DTP)浸提法测定;土壤有效硼采用甲亚胺-H 酸分光光度法测定;土壤有效钼采用极谱法测定[15~17]。

1.3 土壤养分丰缺状况分级评价标准

参考陈江华[18]、罗建新等[19]和李忠环等[20]的分级方法,将植烟土壤分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ 5 个等级,分别对应极低、低、适宜、高和很高来对各项指标进行丰缺评价,详见表 2。

表 2 土壤养分分级标准

指标	等级				
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
pH 值	<5.0	5.0~5.5	5.5~7.0	7.0~7.5	>7.5
OM(g/kg)	<10	10~20	20~30	30~40	>40
TN(g/kg)	<0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0
TP(g/kg)	<0.2	0.2~0.6	0.6~1.0	1.0~1.5	>1.5
TK(g/kg)	<5	5~10	10~20	20~25	>25
HN(mg/kg)	<60	60~110	110~180	180~240	>240
AP(mg/kg)	<5	5~10	10~20	20~30	>30
AK(mg/kg)	<80	80~160	160~240	240~350	>350
ECa(mg/kg)	<400	400~800	800~1 200	1 200~2 000	>2 000
EMg(mg/kg)	<50	50~100	100~200	200~400	>400
AFe(mg/kg)	<2.5	2.5~4.5	4.5~10	10~ 60	>60
AMn(mg/kg)	<5	5~10	10~20	20~40	>40
AZn(mg/kg)	<0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~4.0	>4.0
ACu(mg/kg)	<0.2	0.2~0.5	0.5~1	1~3	>3
AB(mg/kg)	<0.15	0.15~0.30	0.30~0.60	0.60~1.00	>1.00
AMo(mg/kg)	<0.05	0.05~0.10	0.10~0.15	0.15~0.20	>0.20
ASi(mg/kg)	<25	25-70	70-115	115-230	>230

1.4 评价方法

1.4.1 土壤肥力质量单项指标隶属度的确定 本研究选取植烟土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、水解性氮、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁、有效铁、有效锰、有效锌、有效铜和有效硼土壤常规 8 项及中微量元素养分作为土壤综合肥力质量评价因子;基于模糊数学隶属函数模型,除 pH 指标采用抛物线型外(公式 1),其余 16 个指标均采用“S”型(公式 2)。

抛物线型函数:

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

S 型函数:

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

对于土壤养分指标的隶属度函数,其中 $f(x)$ 代表某一特定养分指标的优劣程度,其值域位于 0.1 到 1 之间。当 $f(x)$ 达到 1 时,表示土壤中该养分指标达到最佳状态;而当 $f(x)$ 为 0.1 时,则说明该养分指标处于最差状态。函数中的表示实际测定的养分指标值,x_{max} 和 x_{min} 分别代表分级标准的上限和下限,而 x_a 和 x_b 则是分级标准范围内的其他两个特定值(见表 3)。

1.4.2 土壤肥力质量单项指标权重系数的确定 权重系数代表着土壤养分某一指标对土壤肥力的影响程度,参照徐亚文等[21]的研究方法,采用变异

系数法(公式 3 和 4)确定某一养分指标的权重。

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i} \ (i = 1,2,3,\cdots,n) \quad (3)$$

$$W_i = \frac{V_i}{\Sigma V} \quad (4)$$

其中,V_i 是第 i 项指标的变异系数(标准差系数);σ_i 是第 i 项指标的标准差;$\bar{x}_i$ 是第 i 项指标的平均数;w_i 是第 i 项指标的权重系数;ΣV 是该指标的变异系数之和。

表 3 隶属度函数曲线转折点的取值

指标	函数类型	分级转折点			
		x_{min}(下临界值)	x_a(下限最优值)	x_b(上限最优值)	x_{max}(上临界值)
pH 值	抛物线型	5	5.5	7	7.5
OM(g/kg)		15	25	30	35
TN(g/kg)		0.9	1.4	2.5	3.5
HN(mg/kg)		30	50	70	100
AP(mg/kg)		10	20	40	80
ECa(mg/kg)		400	800	1 200	2 000
EMg(mg/kg)		50	100	200	400
AFe(mg/kg)		2.5	4.5	10	60
ACu(mg/kg)		0.2	0.5	1	3
ASi(mg/kg)		25	75	115	230
AMn(mg/kg)	S 型	1	—	—	30
AZn(mg/kg)		0.3	—	—	3
AB(mg/kg)		0.5	—	—	1.5
TP(g/kg)		0.4	—	—	1
TK(g/kg)		10	—	—	25
AK(mg/kg)		120	—	—	220
AMo(mg/kg)		0.1	—	—	0.3

1.4.3 土壤肥力质量综合评价 土壤肥力综合指数(*IFI*)是一种直观、准确的方法来评估土壤的肥力状况。这个指数是通过将基于隶属度函数模型和植烟土壤养分分级标准的单项养分指标的分值和权重相乘后相加得到的(公式 5)。

$$IFI = \Sigma_{i=1}^{n} W_i N_i \quad (5)$$

其中,N_i 为对应评价指标的隶属度,即 $f(x)$ 值;n 为评价指标个数。*IFI* 数值越大,表明土壤肥力质量越高。根据实际计算的数值,再结合前人的研究结果,可将植烟土壤综合肥力指数分为 5 个等级(Ⅴ级≤0.20;0.20<Ⅳ≤0.40;0.40<Ⅲ≤0.60;0.60<Ⅱ≤0.80;0.80<Ⅰ≤1.00)[22]。

1.5 数据分析

以上所有土壤检测数据均采用 3 次平行测定结果的平均值,使用 Excel 2019 对数据进行整理、统计分析,SPSS 27.0 对数据进行描述性统计分析、相关性分析等,Origin 2021 绘制柱状堆积图和雷达图,AI 进行图片美化。

2 结果与分析

2.1 常规养分

从双江县各植烟乡镇常规养分统计分析结果看(表 4),双江县植烟土壤样品 pH 平均值为 5.29,说明全县植烟土壤整体属于微酸性至强酸性;OM 含量平均值为 29.68 g/kg、AP 含量平均值为 59.14 mg/kg,均处于Ⅳ级(高水平);TN、TK 和 TP 平均含量分别为 1.36、18.22 和 0.82 g/kg,均处于Ⅲ级(适宜水平);HN 含量平均值为 96.17 mg/kg,处于Ⅱ级(低水平);AK 平均含量为 365.08 mg/kg,处于Ⅴ级(很高水平)。

表 4 双江县植烟土壤常规 8 项养分统计

参数	pH 值(water-soil ratio=2.5:1)	OM (g/kg)	TN (g/kg)	TP (g/kg)	TK (g/kg)	HN (mg/kg)	AP (mg/kg)	AK (mg/kg)
均值	5.29	29.68	1.36	0.82	18.22	96.17	59.14	365.08
范围	4.51~6.51	10.08~59.12	0.45~2.84	0.31~1.63	7.84~33.81	39.44~192.69	2.35~152.64	119.21~762.07
标准差	0.49	14.50	0.60	0.36	7.74	40.60	37.48	156.45
变异系数/%	9.26	48.84	44.16	44.43	42.49	42.21	63.37	42.85

2.2 中微量元素

从双江县各植烟乡镇常规养分统计分析结果看(表 5),植烟土壤 ECa 和 AMo 平均含量分别为 600.55 和 0.07 mg/kg,均处于低水平;EMg 平均含量为 123.74 mg/kg,处于中等偏下水平;AFe、AZn 和 AB 平均含量分别为 92.97、5.50 和 1.08 mg/kg,其含量均处于很高水平;AMn 与 ACu 平均含量分别为 21.35 和 1.20 mg/kg,均处于高水平;ASi 平均含量为 98.00 mg/kg,处于适宜水平。

表 5 双江县植烟土壤中微量元素检测结果

参数	ECa (mg/kg)	Emg (mg/kg)	AFe (mg/kg)	AMn (mg/kg)	AZn (mg/kg)	ACu (mg/kg)	AB (mg/kg)	AMo (mg/kg)	ASi (mg/kg)
均值	600.55	123.74	92.97	21.35	5.50	1.20	1.08	0.07	98.00
范围	153.15~1011.8	38.20~299.40	7.40~236.68	5.56~78.2	0.46~16.06	0.27~3.32	0.19~3.31	0.02~0.19	30.04~224.1
标准差	254.32	64.92	69.00	19.60	4.65	0.97	0.67	0.05	49.99
变异系数/%	42.35	52.46	74.21	91.79	84.55	81.36	62.01	70.65	51.01

2.3 植烟土壤常规养分分析

2.3.1 土壤 pH 值与有机质含量 由图 1a 可知,各乡镇植烟土壤 pH 值在 4.94~5.95 之间,优质的植烟土壤 pH 值范围为 5.5~7.0(表 6),从其分布频率来看(图 1a),5 个乡镇达到Ⅲ级(适宜)土壤等级的样本分别占 0%、33%、25%、75% 和 38%。其中大文乡土壤 pH 最适宜烤烟生长,勐勐镇土壤 pH 情况稍次于其他乡镇,大部分为Ⅰ级(极低),达到Ⅲ级(适宜)的为 0%;各乡镇 OM 含量的平均值依次为忙糯乡(39.31 g/kg)>勐勐镇(35.25 g/kg)>邦丙乡(31.10 g/kg)>大文乡(25.42 g/kg)>沙河乡(22.98 g/kg),根据其分布频率(图 1b),5 个乡镇达到优质烤烟土壤肥力标准的植烟地块均小于等于 50%。

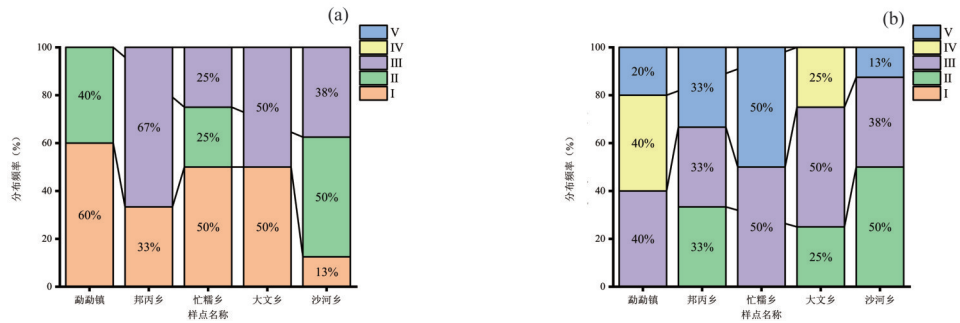


图 1 双江县 5 个乡镇植烟土壤 pH 值与有机质含量样本各级分布频率

注:图(a)为各乡镇土壤 pH 值含量样本各级分布频率;图(b)为各乡镇土壤 OM(有机质)含量样本各级分布频率。

2.3.2 土壤全量氮、磷、钾含量 不同乡镇间土壤全量氮、磷、钾含量存在较大差异。TN 含量范围为 1.12~1.81 g/kg(表 6),其中忙糯乡和勐勐镇含量较高,均值分别为 1.81 和 1.47 g/kg(表 6),其中勐勐镇、忙糯镇和大文乡达到Ⅲ级(适宜)的土壤样本占到 50% 及以上,而沙河乡有 63% 处于Ⅱ级(较低),属于供氮不足的状况(图 2a);TP 含量范围在 0.59~1.05 g/kg 之间(表 6),其中勐勐镇 80% 的土壤样本达到Ⅲ级(适宜),忙糯乡有 75% 为Ⅱ级(较低)、25% 为Ⅴ级(很高)(图 2b);TK 含量范

围为 13.23~26.54 g/kg(表 6),其中邦丙乡和沙河乡达到Ⅲ级(适宜)的均占到 65%以上(图 2c)。

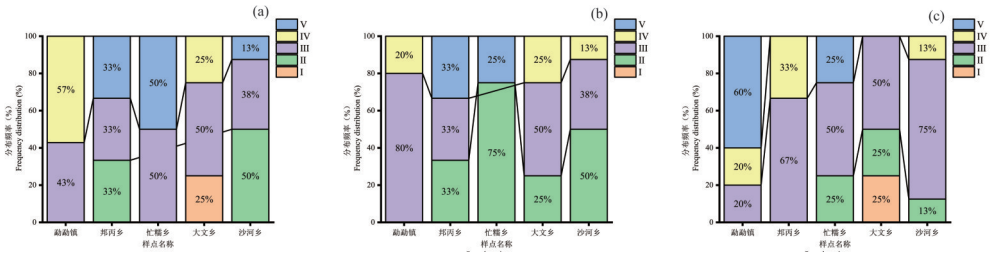


图 2 双江县 5 个乡镇植烟土壤全量养分含量样本各级分布频率

注:图(a)、图(b)和图(c)分别为各乡镇土壤 TN(全氮)、TP(全磷)和 TK(全钾)含量样本各级分布频率。

2.3.3 土壤水解性氮、有效磷、速效钾养分含量 总体上 HN 含量储备不足,含量范围在 78.04~122.30 mg/kg(表 6),尤其是沙河乡,仅 87%的地块未达到Ⅲ级(适宜)。从分布频率图来看(图 3a),AP 含量在 32.94~79.50 mg/kg 之间(表 6),勐勐镇和忙糯乡均达到Ⅴ级(较高),大文乡和沙河乡达到Ⅴ级(较高)的分别为 75%和 71%(图 3b);AK 的含量范围为 294.33~438.37 mg/kg 之间(表 6),5 个乡镇达到Ⅲ级(适宜)的分别为 0%、33%、25%、25%和 13%,但达到Ⅴ级的分别为 80%、33%、25%、25%和 50%(图 3c)。各乡镇应注意合理灌溉、科学施肥,勐勐镇、忙糯乡、大文乡和沙河乡这四个乡镇需要适当控制磷素的补充,且各个乡镇需要重点关注钾素平衡。综合来看,双江县 5 个乡镇植烟土壤偏酸性,其中勐勐镇、忙糯乡和沙河乡土壤 pH 均值均低于 5.5,为强酸性土壤。各乡镇土壤有机质、全氮含量处于中等至高水平,全 3 磷含量均处于中等至低水平,除勐勐镇外其他 4 个乡镇全钾含量处于低水平。忙糯乡水解性氮含量处于中等水平,另外 4 个乡镇处于低水平;各乡镇有效磷含量均处于中高水平,速效钾含量处于高至很高水平。

表 6 双江县各植烟乡镇土壤常规 8 项检测结果

指标	项目	勐勐镇	邦丙乡	忙糯乡	大文乡	沙河乡
pH (water-soil ratio=2.5:1)	平均值	4.94	5.50	5.35	5.59	5.26
	标准差	0.33	0.56	0.81	0.50	0.30
	变异系数/%	6.64	10.18	15.16	8.91	5.79
OM(g/kg)	平均值	35.25	31.10	39.31	25.42	22.98
	标准差	13.13	22.57	16.86	10.77	11.72
	变异系数/%	37.26	72.56	42.89	42.38	50.97
TN(g/kg)	平均值	1.47	1.35	1.81	1.28	1.12
	标准差	0.37	0.86	0.81	0.58	0.53
	变异系数/%	25.30	64.00	44.93	45.19	47.05
TP(g/kg)	平均值	0.83	0.90	1.05	0.99	0.59
	标准差	0.20	0.67	0.39	0.40	0.20
	变异系数/%	24.51	74.95	36.93	41.08	33.38
TK(g/kg)	平均值	26.54	17.71	18.12	18.31	13.23
	标准差	6.76	4.11	11.16	5.48	4.66
	变异系数/%	25.49	23.21	61.57	29.90	35.27
HN(mg/kg)	平均值	105.73	92.94	122.30	96.80	78.04
	标准差	36.17	55.40	47.76	41.95	34.98
	变异系数/%	34.21	59.61	39.05	43.33	44.83
AP(mg/kg)	平均值	79.22	32.94	67.66	79.50	41.98
	标准差	34.99	49.14	16.59	57.31	22.41
	变异系数/%	44.17	149.18	24.52	72.09	53.40
AK(mg/kg)	平均值	438.37	420.63	294.33	323.46	354.64
	标准差	197.17	298.93	89.43	136.37	110.19
	变异系数/%	44.98	71.07	30.38	42.16	31.07

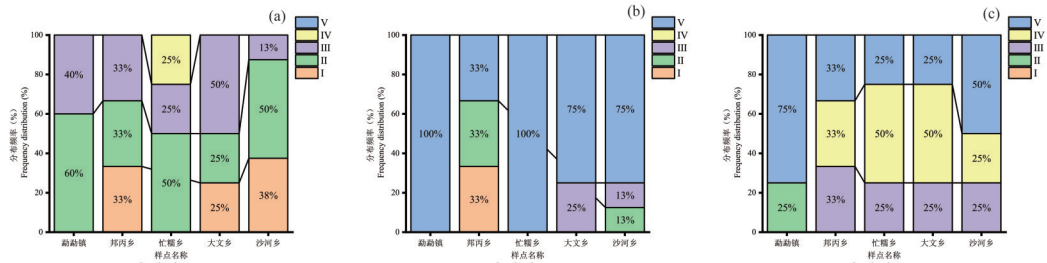


图 3　双江县 5 个乡镇植烟土壤速效养分含量样本各级分布频率

注:图(a)、图(b)和图(c)分别为各乡镇土壤 HN(水解性氮)、AP(有效磷)和 AK(速效钾)含量样本各级分布频率。

2.4　土壤中微量元素分析

2.4.1　交换性钙、镁和有效硅养分含量　如表 7 所示,ECa 含量均值以忙糯乡最低(467.66 mg/kg),处于Ⅱ级(低水平)。以大文乡最高(784.30 mg/kg),但仍处于Ⅱ级(低水平);其它 3 个乡镇 ECa 含量在 529.12~675.77 mg/kg 间。据分布频率图来看(图 4a),各乡镇植烟土壤 ECa 达到Ⅲ级(适宜)的均不大于 50%。说明双江县各植烟乡镇土壤 ECa 含量低;EMg 含量均值以勐勐镇最高(178.18 mg/kg),处于Ⅲ级(中等水平),忙糯乡(59.00 mg/kg)、沙河乡(93.97 mg/kg)土壤 EMg 含量处于Ⅱ级(低水平),且显著低于勐勐镇。而邦丙乡和大文乡交换性镁含量处于Ⅲ级(中等水平)。从各乡镇土壤 EMg 的分布频率来看(图 4b),各个乡镇(勐勐镇、邦丙乡、忙糯镇、大文乡和沙河乡)达到优质土壤等级的样本分别占 40%、33%、25%、75%和 38%,其中大文乡土壤 EMg 最适宜烤烟生长;ASi 含量均值以大文乡最高(132.94 mg/kg),邦丙乡(132.63 mg/kg)次之,均处于Ⅳ级(高水平);而勐勐镇(58.84 mg/kg)ASi 含量处于Ⅱ级(低水平)、沙河乡(88.75 mg/kg)和忙糯乡(104.51 mg/kg)ASi 含量均处于Ⅲ级(适宜水平)。其中邦丙乡的土壤样本均超过Ⅲ级(适宜),需要对土壤中硅元素进行控制,勐勐镇有 80%的样本处于Ⅱ级(较低),需要适当补充硅元素(图 4c)。由于 5 个乡镇的 ECa 含量均低于优质烤烟生产需求,双江县在后续烤烟生产中应注意钙肥的补充。

表 7　双江县各植烟乡镇土壤中微量元素检测结果

指标	项目	勐勐镇	邦丙乡	忙糯乡	大文乡	沙河乡
ECa(mg/kg)	平均值	629.03	675.77	467.66	784.30	529.12
	标准差	142.34	297.69	375.32	150.64	259.41
	变异系数/%	22.63	44.05	80.25	19.21	49.03
EMg(mg/kg)	平均值	178.18	161.12	59.00	151.95	93.97
	标准差	81.25	65.20	29.81	46.09	31.47
	变异系数/%	45.60	40.47	50.53	30.34	33.49
AFe(mg/kg)	平均值	161.79	56.60	122.86	101.86	44.22
	标准差	33.97	35.82	87.74	82.61	34.24
	变异系数/%	21.00	63.29	71.41	81.10	77.43
AMn(mg/kg)	平均值	32.21	48.93	7.38	11.31	16.23
	标准差	19.54	34.00	1.82	4.86	9.61
	变异系数/%	60.67	69.49	24.61	42.96	59.19
AZn(mg/kg)	平均值	9.16	3.91	7.04	7.32	2.12
	标准差	4.26	5.38	5.56	5.27	0.39
	变异系数/%	46.55	137.62	78.95	71.93	18.65
	平均值	1.06	1.96	1.28	1.61	0.75

续表 7 双江县各植烟乡镇土壤中微量元素检测结果

指标	项目	勐勐镇	邦丙乡	忙糯乡	大文乡	沙河乡
ACu(mg/kg)	标准差	0.61	1.26	0.76	1.24	0.98
	变异系数/%	57.17	64.29	59.14	76.68	130.97
	平均值	1.74	0.77	1.06	1.22	0.72
AB(mg/kg)	标准差	0.96	0.72	0.25	0.64	0.27
	变异系数/%	55.00	94.36	24.06	52.10	37.80
	平均值	0.04	0.13	0.06	0.07	0.07
AMo(mg/kg)	标准差	0.02	0.09	0.05	0.03	0.04
	变异系数/%	39.53	73.34	81.98	42.06	59.32
	平均值	58.84	132.63	104.51	132.94	88.75
ASi(mg/kg)	标准差	10.19	15.49	36.66	65.18	57.07
	变异系数/%	17.32	11.68	35.07	49.03	64.30

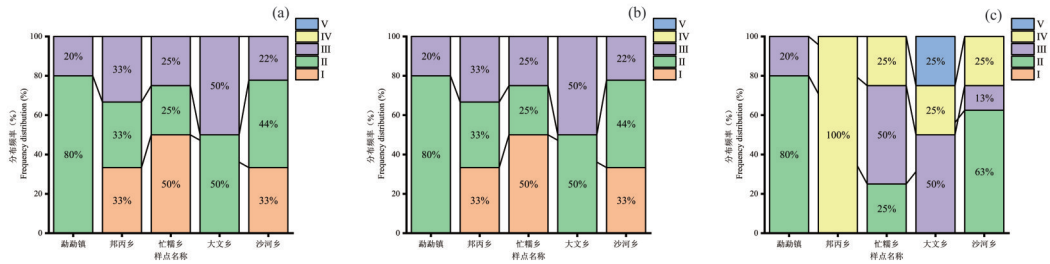
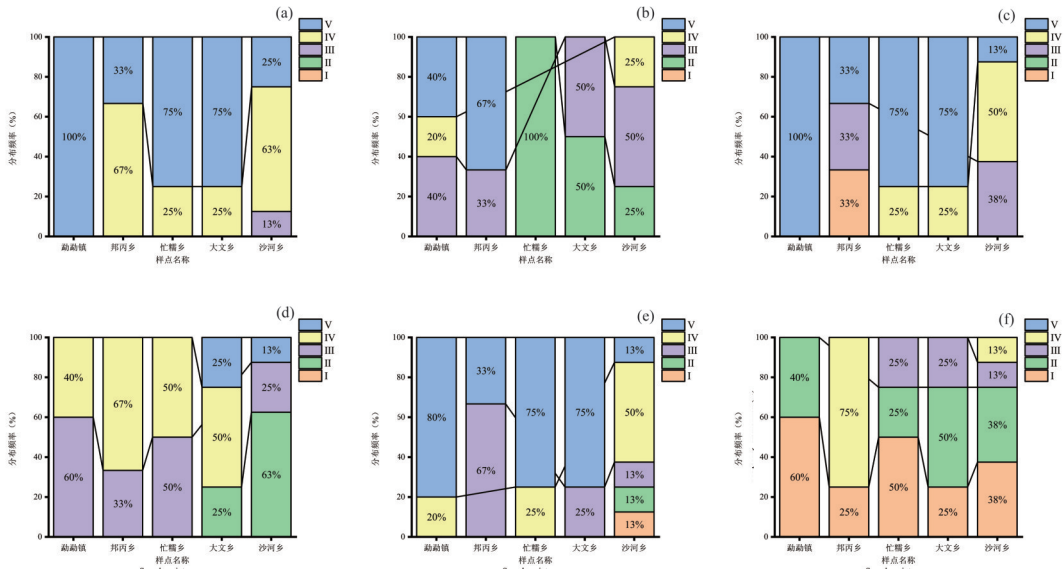


图 4 双江县 5 个乡镇植烟土壤中量元素养分含量样本各级分布频率

注:图(a)、图(b)和图(c)分别为各乡镇土壤 ECa(交换性钙)、EMg(有交换性镁)和 ASi(有效硅)含量样本各级分布频率。

2.4.2 有效铁、锰、锌、铜、硼、钼养分含量 AFe 含量均值以勐勐镇最高(161.79 mg/kg),处于Ⅴ级(很高水平),以沙河乡最低(44.22 mg/kg),但仍处于Ⅴ级(很高水平),从分布频率图(图 5a)来看,除沙河乡以外 4 个乡镇的土壤样本超过Ⅲ级(适宜)均达到 100%,说明双江县各植烟乡镇土壤有效铁含量极其丰富。AMn 含量均值以邦丙乡最高(48.93 mg/kg),处于Ⅴ级(很高水平),以忙糯乡最低(7.38 mg/kg),处于Ⅱ级(低水平),其它 3 个乡镇有效锰含量在 11.31~32.21 mg/kg 间,处于Ⅲ级(适宜)至Ⅳ级(高水平)。根据其分布频率(图 5b),忙糯乡的所有样本均达不到Ⅲ级(适宜),需要适当注意土壤中锰元素的补充。AZn 含量均值以勐勐镇最高(9.16 mg/kg),处于Ⅴ级(很高水平),以沙河乡最低(2.12 mg/kg),处于Ⅳ级(高水平),其它 3 个乡镇有效锌含量在 3.91~7.32 mg/kg 间,处于Ⅴ级(很高水平)。其中忙糯乡 33%的样本达到Ⅰ级、33%的样本达到Ⅲ级、33%的样本达到Ⅴ级,土壤 AZn 含量分布极不平衡(图 5c);ACu 含量均值以邦丙乡最高(1.96 mg/kg),处于Ⅳ级(高水平),以沙河乡最低(0.75 mg/kg),处于Ⅱ级(低水平),其它 3 个乡镇有效铜含量在 1.06~1.61 mg/kg 间,处于Ⅲ级(适宜水平)。其中勐勐镇和忙糯乡达到Ⅲ级(适宜)的土壤样本达到 50%及以上(图 5d),较为适宜优质烤烟的生长;AB 含量均值以勐勐镇最高(1.74 mg/kg),处于Ⅴ级(很高水平);沙河乡(0.72 mg/kg)、邦丙乡(0.77 mg/kg)有效硼含量显著低于勐勐镇,处于Ⅲ级(中等水平),其它 2 个乡镇有效硼含量处于Ⅳ级(高水平)。由图 5e 可见,邦丙乡土壤 AB 含量达到Ⅲ级(适宜)占据 67%为最高;AMo 含量均值以邦丙乡最高(0.13 mg/kg),处于Ⅲ级(适宜水平);其它 4 个乡镇 AMo 含量处于 0.04~0.07 mg/kg 之间,处于Ⅰ级(极低)至Ⅱ级(低水平),其中勐勐镇 AMo 含量最低。从分布频率图(图 5f)来看,勐勐镇和忙糯乡处于Ⅰ级(很低)的样本分别达到 60%和 50%,需要在土壤中适当补充钼元素。



注:图(a)、图(b)、图(c)、图(d)、图(e)和图(f)分别为各乡镇土壤 AFe(有效铁)、AMe(有效锰)、AZn(有效锌)、ACu(铜)、AB(硼)和 AMo(有效钼)含量样本各级分布频率。

图 5 双江县 5 个乡镇植烟土壤微量元素含量样本各级分布频率

综合来看,在双江植烟区 5 个乡镇土壤交换性钙处于低水平,交换性镁、有效硅含量处于中等至低水平,其中忙糯乡、沙河乡植烟土壤中交换性钙和交换性镁含量低,除邦丙乡乡外其余四个乡镇的有效钼含量均处于低水平及以下,勐勐镇、沙河乡植烟土壤中有效硅含量低。因此,生产中 5 个乡镇除要补充钙肥和钼肥外,忙糯乡、沙河乡还需补充镁肥,勐勐镇、沙河乡还需补充硅肥。

2.5 土壤肥力综合评价

2.5.1 *单项肥力质量指标隶属度和权重* 根据模糊数学和变异系数法,根据公式计算出土壤肥力质量单项指标隶属度和权重系数,结果如图 6、表 7 和表 8 所示。根据雷达图显示,邦丙乡的各土壤肥力质量单项指标隶属度在“1.0”附近的点相对集中,而其余 4 个乡镇的点分布较为分散,由此可见,邦丙乡的各单项肥力指标分布均衡,肥力质量较为稳定。

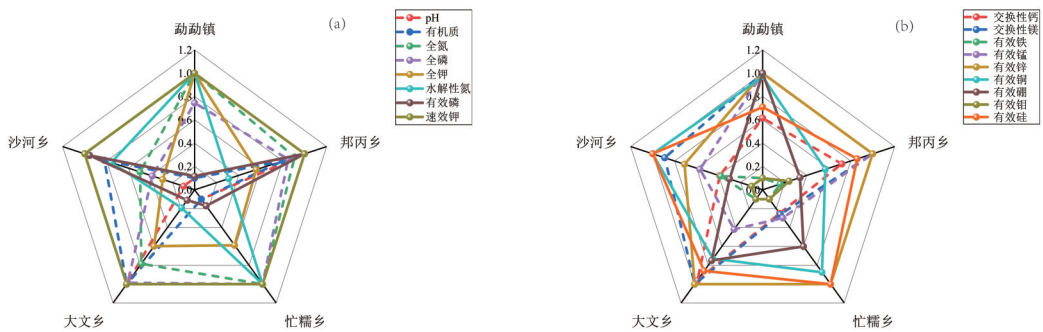


图 6 双江县 5 个乡镇植烟土壤肥力单项指标隶属度雷达图

注:图(a)为植烟土壤肥力单项指标隶属度(常规 8 项)雷达图;图(b)为植烟土壤肥力单项指标隶属度(中微量元素)雷达图。

双江县土壤各项养分指标的权重系数差异较大(表 7),其中权重系数前 3 的分别是 AMn(0.10)、AZn(0.09)和 ACu(0.09),pH 的权重系数(0.01)最小;OM、TN、TP、AP、ECa、EMg 和 ASi 的权重系数相差不大,均在 0.05~0.06 之间;表明双江县土壤肥力保持主要是依靠土壤中的锰、锌和铜元素,而 pH 对土壤肥力影响不大。

为进一步探究双江县植烟土壤各养分指标间的关系,对各土壤养分指标进行 Pearson 相关性热图分析(图 7)。在所测植烟土壤中,不同元素之间

均具有相关性。其中，土壤 pH 与 ECa 和 ASi 呈极显著正相关，与 AP 和 AB 呈极显著负相关，与 OM、TK、HN 和 AZn 呈显著负相关，与 EMg、ACu 呈负相关；OM 与 TN、TP、HN、AP、AFe、AZn 和 AB 呈极显著正相关，与 AMo 呈极显著负相关，与 EMg 和 AMn 呈显著负相关，与 ECa 和 ASi 呈负相关；TN 与 TP、HN、AP、AFe、AK、AZn、ACu 和 AB 呈极显著正相关，与 AMo 和 AMn 呈极显著负相关，与 EMg 呈显著负相关，与 ECa 和 ASi 呈负相关；TP 与 HN、AP、AZn、AK、AFe 和 AB 呈极显著正相关，与 AMo、AMn 呈极显著负相关，与 EMg 呈显著负相关，与 ECa 和 ASi 呈负相关；TK 与 AFe 呈极显著正相关，与 ASi 呈极显著负相关，与 AMo 呈显著负相关，与 ECa、AMn 和 ACu 呈负相关；HN 与 AP、AK、AFe、AZn、ACu 和 AB 呈极显著正相关，与 AMo 和 AMn 呈极显著负相关，与 ECa 和 ASi 呈负相关；AP 与 AFe、AZn、AB 和 AK 呈极显著正相关，与 AMo 和 ASi 呈极显著负相关，与 ECa 和 EMg 呈负相关；AK 与 AZn 和 AB 呈极显著正相关，与 AMo 呈极显著负相关，与 ECa、EMg、AMn 和 ASi 呈负相关；ECa 与 EMg 呈极显著正相关，与 AFe、AMn、AZn 和 AB 呈负相关；EMg 与 AFe、AZn 和 AB 呈负相关；AFe 与 AZn 和 AB 呈极显著正相关，与 AMo 和 ASi 呈极显著负相关，与 AMn 呈负相关；AMn 与 AMo 呈极显著正相关，与 ACu 呈显著负相关，与 AZn、AB 和 ASi 呈负相关；AZn 与 AB 呈极显著正相关，与 AMo 呈极显著负相关，与 ASi 呈显著负相关；ACu 与 AMo 呈负相关；AB 与 AMo 呈极显著负相关，与 ASi 呈显著负相关。

表 7 各单项养分(常规)指标权重系数的取值

pH 值	OM	TN	TP	TK	HN	AP	AK
0.01	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.07	0.05

表 8 各单项养分(中微量元素)指标权重系数的取值

ECa	EMg	AFe	AMn	AZn	ACu	AB	AMo	ASi
0.04	0.06	0.08	0.10	0.09	0.09	0.07	0.07	0.05

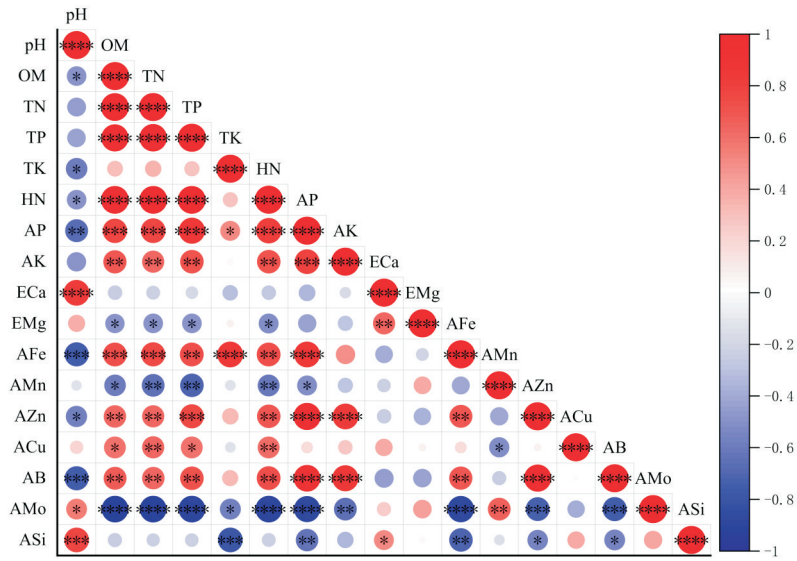


图 7 双江县 5 个乡镇植烟土壤肥力指标的相关性热图

注：* 为显著性相关(P<0.05)；* * 、* * * 、* * * * 分别为 P<0.01、P<0.001、P<0.0001 水平极显著性相关。

2.5.2 土壤肥力质量综合评价 由隶属度(图3)和权重系数(表7)计算出土壤肥力指标(表9)。从表9可以看出,双江县土壤样本IFI加权平均值为0.65(Ⅱ级),范围为0.56~0.72。植烟土壤肥力状况良好。但忙糯乡综合土壤肥力为Ⅲ级,*IFI*仅为0.56,其余各乡镇均为Ⅱ级。

表9 植烟土壤肥力综合评价结果

乡镇	*IFI*	肥力等级
勐勐镇	0.71	Ⅱ级
邦丙乡	0.72	Ⅱ级
忙糯乡	0.56	Ⅲ级
大文乡	0.64	Ⅱ级
沙河乡	0.63	Ⅱ级
加权平均值	0.65	Ⅱ级

3 讨论与结论

通过对烟区土壤养分丰缺情况进行全面评估,可以为烤烟的精准施肥和烟草品种引种等工作奠定理论基础[23],也可以为烟草行业可持续发展提供可靠的实践依据[24]。如在土壤养分较高的地区,针对性的减少肥料;在土壤养分不足地区,增施有机肥培土,适当加大肥料用量从而改善土壤养分状况,引进及推广肥料吸收率高的烟草品种。针对临沧双江烟区土壤肥力的相关研究较少,已有文献仅研究双江植烟土壤大量元素状况而忽略了中微量元素肥料的研究。

一般认为烤烟适宜pH范围在5.5~7.0之间[25],而双江县平均土壤pH值为5.29,低于适宜水平,不利于烤烟生长,可能是因为双江县黏土、壤土及红壤土占比较大导致该烟区土壤偏酸[26]。双江县烟区OM、AP、AK、TN、TK、TP、AFe、AZn、AB、AMn、ACu和ASi较为丰富,应注意适当控制。尤其是减少磷肥的施用量,防治出现粗筋暴叶,影响烟叶品质。然而全县HN、ECa、EMg和AMo含量普遍较低,要重视氮、钙、镁和钼肥的科学施用。

双江县大部分以山地为主,乡镇间土壤肥力差异较大,针对有机质含量适宜的勐勐镇、忙糯乡和大文乡地区则可以适当减少有机肥的投入,但是邦丙乡和沙河乡土壤有机质含量较低,需要更多的有机肥和农家肥投入。双江县勐勐镇和忙糯乡氮素含量极为丰富,可以适当减少氮肥的施用,但水解性氮含量偏低,需要严格控制氮素投入。双江烟区磷、钾元素缺乏与磷、钾元素富集的土壤并存,忙糯乡和沙河乡的土壤全磷含量缺乏,但速效磷的含量较高,这可能与2个乡镇的土壤质地、施肥方式和土壤微生物有关。5个乡镇植烟地块中交换性钙、镁元素达到适宜水平的均不足50%,尤其是忙糯乡。可通过适量施用白云石粉、科学补充钙镁肥、采用轮作与间作来调节土壤中钙镁平衡。5个乡镇均需要控制植烟土壤中铁元素的投入,以减少铁离子累积导致的烟叶品质下降[1,5~6]。

彭丽丽等[27]研究表明双江县植烟区域土壤的有机质和速效氮偏高,速效磷、速效钾和有效锌丰富,有效硼和水溶性氯缺乏,pH值偏低;双江县土壤基础生态位适宜度和土壤肥力均属中等水平。杨美仙等[28]研究表明双江县植烟土壤有机质、速效磷含量丰富,土壤偏酸,速效氮、有效硼和水溶性氯离子含量偏低,速效钾、交换性钙和交换性镁含量较高,有效锌含量处于适宜水平。李财[29]等人对双江县采烤后植烟土壤分析显示,土壤总体上呈现出酸性到微酸性的性质,平均pH值为5.28。在该县的土壤中,酸性土壤占据了较大的比例,达到了77.55%。此外,土壤中的有机质和水解性氮的含量属于中等水平,而速效磷和速效钾的含量则相对较高。双江县植烟区土壤中的交换性镁和有效锌含量分布广泛,但总体上看,有效硼的含量处于中等偏低的状态。该地区土壤中的水溶性氯离子含量非常低。

双江烟区植烟土壤具有时空变异特征,本研究结果与前人研究结果对比显示植烟土壤有机质、速效钾的平均含量及土壤pH基本一致,有效氮、有效锌和有效硼的平均含量均有所提高,速效氮、交换性钙和交换性镁的平均含量小幅下降。研究中土壤养分含量存在差异,可能与生态环境因素、气候、降水、温湿度、农业耕作措施、前作等不同有关;同样各乡镇养分管理措施也有差异,施用肥料的种类、施用量不同,从而造成土壤养分指标乡镇之间存在差异。

基于模糊数学隶属度函数模型与土壤*IFI*的计算结果,邦丙乡植烟土壤肥力质量最稳定、最优。基于相关性分析所获取土壤各养分指标间相关性存在的规律,建议各植烟区域在烤烟生产过程中应

强调因地制宜确定明确的供肥方案,采用“大配方、小调整”的方法,即科学配置基肥,依据速效氮、磷、钾水平合理追肥,来调控土壤微生态环境,改善土壤的养分均衡供应能力,以促进烟叶质量的改善和烤烟生产的可持续发展。

参 考 文 献:

[1] 吕永华,詹碰寿,马武军,等. 石灰、钙镁磷肥对烤烟生产及土壤酸度调节的影响[J]. 生态环境,2004,13(3): 379-381.

[2] 刘茜茜. 钙、镁营养对烤烟产量和品质的影响[D]. 贵阳:贵州大学,2020.

[3] 林敏霞,张晓东,邱美欢,等. 植物镁素生理功能及镁素营养诊断和施用[J]. 热带农业科学,2016(3): 39-43.

[4] 孙爱华,李健,郭秦羽,等. 镁肥不同施用方法对福建烤烟生长和品质的影响[J]. 福建农业科技,2022,53(8):33-39.

[5] 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状的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(11):65-71.

[6] 李玥,赖勇林,王军,等. 不同养分缺乏对烤烟根系形态及营养生长的影响[J]. 中国烟草科学,2015,36(2):60-65.

[7] 孙彦敏,何元胜,亚平,等. 锰肥及锰、锌、硼肥配施对烤烟 K326 生长和产质量的影响[J]. 安徽农业科学,2014,42(23):7 855-7 856.

[8] 刘咏艳,宋正熊,金佳威,等. 钼锌营养对烤烟生理特性及品质的影响[J]. 中国农业科技导报,2023,25(6):216-224.

[9] 曾睿,何忠俊,程智敏,等. 铜对烤烟生长及产质量的影响研究[J]. 现代农业科技,2010(22):65-66.

[10] 李钊,鄢敏,张月华,等. 硼钼配施对烤烟生长及烤后烟化学品质的影响[J]. 山东农业科学,2023,55(5):134-140.

[11] 李章海,宋泽民,黄刚,等. 钼对烤烟烘烤过程中酶促棕色化和烟叶质量的影响[J]. 中国烟草科学,2011,32(3):46-50.

[12] 高旺盛,陈源泉,石彦琴,等. 中国集约高产农田生态健康评价方法及指标体系初探[J]. 中国农学通报,2007(10):131-137.

[13] 林卡,李德成,张甘霖. 土壤质量评价中文文献分析[J]. 土壤通报,2017,48(3):736-744.

[14] 李鑫,张文菊,邬磊,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): 3 043-3 056.

[15] Zhang G, i J, Xi M, *et al.* Soil qulity ssessment of ostl wetlnds in the Yellow River Delt of hin sed on the minimum dt set [J]. Eologil Inditors, 2016, 66: 458-466.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[17] 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,2000.

[18] 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.

[19] 罗建新,石丽红,龙世平. 湖南主产烟区土壤养分状况与评价[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2005(4):376-380.

[20] 李忠环,赵正雄,罗以贵,等. 昆明市植烟土壤养分状况分区评价[J]. 土壤通报,2010,41(1):87-92.

[21] 徐亚文,黄燕兰,刘娜,等. 双江县冰岛五寨古茶园土壤养分状况及肥力质量评价[J]. 中国土壤与肥料,2023(12):1-11.

[22] 李宏图,朱晓红,许晓娅,等. 南涧县烟区土壤肥力状况综合评价[J]. 安徽农业科学,2024,52(11): 139-143.

[23] 韦建玉,黄崇峻,金亚波,等. 重庆市主要烟区土壤肥力状况综合评价[J]. 西南大学学报(自然科学版),2019,41(11):30-36.

[24] 梁红. 重庆植烟土壤肥力特征及评价[D]. 重庆:西南大学,2014.

[25] 强继业,朱海平,周振春,等. 云南省部分地区烤烟适宜 pH 值范围的缓冲研究[J]. 中国生态农业学报,2005(2):149-151.

[26] 王东旭,武云杰,曾超,等. 土壤质地和氯含量对烤烟叶片区位化学成分的影响[J]. 河南农业科学,2022,51(9):35-45.

[27] 彭丽丽,王文学,冀浩,等. 临沧市双江县植烟土壤养分特征及生态位适宜度评价[J]. 西南农业学报,2018, 31(3):6.

[28] 杨美仙,亚平,何元胜,等. 临沧植烟土壤养分丰缺状况分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2014,29(2):269-277.

[29] 李财,黄晓杰,付丽美,等. 云南双江县植烟土壤养分丰缺评价[J]. 安徽农业科学,2024,52(12):148-152+157.