

## 宜宾市烟区土壤肥力指标及综合肥力评价<sup>①</sup>

孙良虎<sup>1,5,6</sup>, 杨洋<sup>2</sup>, 梁辉<sup>3</sup>, 余佳敏<sup>4</sup>, 杨懿德<sup>2</sup>, 谢子煜<sup>1,5,6</sup>, 史子涵<sup>1</sup>, 李建刚<sup>1,5,6\*</sup>, 鄢敏<sup>2\*</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 2 四川省烟草公司宜宾公司, 四川宜宾 644600; 3 四川省烟草公司凉山州公司, 四川西昌 615000; 4 四川省烟草科学研究所, 成都 610041; 5 中国科学院大学, 北京 100049; 6 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

**摘要:** 为探明四川省宜宾市烟区土壤主要肥力指标和综合肥力状况, 在市辖 4 个烟区采集了 94 个表层(0~20 cm)土壤样品, 测定分析了土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾和有效硫 9 个指标, 并采用描述性统计法、主成分分析法和模糊综合评价法对烟区土壤肥力进行了评价。结果表明: 宜宾市烟区土壤 pH 平均为 6.29, 86.17% 的烟田处于最适宜范围; 有机质总体上较为丰富, 但仍有 10.64% 的烟田缺乏; 56.38% 的烟田全氮含量过高; 35.11% 的烟田碱解氮含量适宜; 31.91% 的烟田全磷含量适宜, 但仍有 10.64% 的烟田缺乏; 78.72% 的烟田有效磷含量适宜; 54.26% 的烟田全钾含量过高; 速效钾含量很丰富, 68.09% 的烟田过高; 有效硫含量也很丰富, 94.68% 的烟田过高。4 个烟区土壤综合肥力指数(IFI)存在差异, 表现为: 兴文县(0.62, II 级)>筠连县和珙县(0.59, III 级)>屏山县(0.56, III 级)。因此, 宜宾烟区施肥上应精准控氮, 合理调磷, 分类施用有机肥, 严控含硫肥料施用。

**关键词:** 宜宾; 烟草; 土壤肥力指标; 综合肥力指数

中图分类号: S158.5 文献标志码: A

## Evaluation of Soil Fertility Indexes and Comprehensive Fertility of Tobacco-planting Areas in Yibin City

SUN Lianghu<sup>1,5,6</sup>, YANG Yang<sup>2</sup>, LIANG Hui<sup>3</sup>, YU Jiamin<sup>4</sup>, YANG Yide<sup>2</sup>, XIE Ziyu<sup>1,5,6</sup>, SHI Zihan<sup>1</sup>, LI Jiangang<sup>1,5,6\*</sup>, YAN Min<sup>2\*</sup> (1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2 Sichuan Tobacco Company Yibin Company, Yibin, Sichuan 644600, China; 3 Sichuan Tobacco Company Liangshan Prefecture Company, Xichang, Sichuan 615000, China; 4 Sichuan Tobacco Research Institute, Chengdu 610041, China; 5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6 University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China)

**Abstract:** To investigate the main soil fertility indicators in the tobacco-growing areas of Yibin City, Sichuan Province, and provide a theoretical basis for scientific fertilization, in this study, 94 soil samples (0–20 cm) were collected from four major tobacco-growing areas in Yibin, soil fertility indicator including pH, organic matter (OM), total nitrogen (TN), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP), total potassium (TK), available potassium (AK), and available sulfur (AS) were determined and analyzed using descriptive statistics, principal component analysis, and fuzzy comprehensive evaluation methods. The results showed that average pH was 6.29, with 86.17% of the fields within the most suitable range. OM was generally rich, with 10.64% of the fields at the deficient level. TN was excessively high in 56.38% of the fields. AN was appropriate in 35.11% of the fields. TP was suitable in 31.91% of the fields, but deficient in 10.64%. AP was suitable in 78.72% of the fields. TK was excessively high in 54.26% of the fields. AK content was very rich, with 68.09% of the fields at the excessively high level. AS content was also very rich, with 94.68% of the fields at the excessively high level as well. There were differences in soil integrated fertility index (IFI) among the four main tobacco-growing counties, ranking as follows: Xingwen County (0.62, Grade II) > Junlian and Gong counties (0.59, Grade III) > Pingshan County (0.56, Grade III). The rational fertilization strategy should include “N precision control, P reasonable adjustment, categorized applying organic fertilizers, and

①基金项目: 中国烟草总公司四川省公司科技项目(SCYC202304)资助。

\* 通信作者(jgli@issas.ac.cn; 565125441@qq.com)

作者简介: 孙良虎(2000—), 男, 安徽霍邱人, 硕士研究生, 研究方向为土壤健康评价。E-mail: sunlianghu@issas.ac.cn

strict control of S-containing fertilizer based on different soil characteristics and crop requirements.”

**Key words:** Yibin; Tobacco; Soil fertility indicators; Integrated fertility index (IFI)

土壤肥力是影响烤烟产量和品质的关键因素之一,对提升烟草产业的整体效益具有重要意义。随着现代农业技术的进步和环境保护意识的增强,传统的粗放施肥模式已不再适应对烟叶品质和产量日益增长的需求<sup>[1]</sup>。因此,科学合理的土壤管理和精准施肥技术已成为烤烟生产中亟待解决的重要议题<sup>[2]</sup>。精准施肥技术不仅能够提高烟叶的质量和产量<sup>[3]</sup>,而且是生产高品质烟叶原料的根本途径。

近年来,随着现代烟草农业的发展,合理的养分管理成为优质烟叶生产的重中之重,各烟区逐渐加强了对植烟土壤肥力的综合评价研究。李玉宝等<sup>[4]</sup>通过对贵州毕节主要烟区土壤样品的分析,提出“控氮、增磷、补钾、分类施有机肥”及“普遍控制含硫肥料,因地制宜地增施相应的微肥”等施肥建议。代先强等<sup>[5]</sup>于 2024 年通过对重庆市丰都县植烟区土壤样品进行分析研究,指出重庆市丰都县植烟土壤适宜烟草生长,土壤养分含量较高,但部分地块酸化,在实际生产中需要注意合理施用有机肥,提高肥料的利用率,因地制宜调节土壤 pH 等。李政昊等<sup>[6]</sup>通过对辽宁省铁岭植烟区土壤样品进行研究,指出该植烟区整体土壤物理性状不良,土壤酸化趋势明显,有机质含量低,中微量元素匮乏,养分不均衡,总体肥力水平较低。

四川宜宾作为我国西南地区著名的烤烟产区,拥有悠久的烟草种植历史和丰富的烤烟品种资源。近年来,针对宜宾烟区开展的土壤研究主要包括探讨土壤耕作方式对耕层土壤物理性状的影响、海拔对土壤主要养分分布的影响、土壤养分空间变异等<sup>[7-9]</sup>,对土壤肥力指标的大范围研究不足,导致烤烟的营养管理优化及生产配置的策略制定缺少连贯的理论基础。因此,本研究以宜宾市筠连县、珙县、兴文县、屏山县 4 个主要植烟区土壤作为研究对象,通过运用描述性统计、主成分分析以及模糊综合评价分析对土壤养分适宜性及综合肥力状况进行了全面的评价,以为不同植烟区科学施肥策略制定和优质烟叶生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

宜宾市位于金沙江、岷江、长江交汇处,是川滇黔接合部核心区域,地处  $27^{\circ}50'N \sim 29^{\circ}16'N$ ,

$103^{\circ}36'E \sim 105^{\circ}20'E$ 。该市年平均气温  $18.7^{\circ}C$ ,冬季平均气温  $8.2^{\circ}C$ ,夏季平均气温  $28.5^{\circ}C$ ,年均日照时数 1370 h,年均相对湿度 79%,年均降水量 980 mm。土壤类型主要有紫色土、水稻土、黄壤、石灰土、黄棕壤和新积土 6 个土类,其中以紫色土(43.58%)、水稻土(24.96%)和黄壤(22.25%)为主,共占宜宾市土壤总面积的 90.79%<sup>[7]</sup>。

### 1.2 土壤采样点的确定及样品采集

2023 年在宜宾市主要植烟区(筠连县、兴文县、珙县及屏山县),依据各区烤烟种植面积、密度及产量确定采样点并采用 GPS 定位,对目标区域的烟草种植农户开展精确调研,科学布设肥水管理水平基本一致的 94 个采样点。选择烤烟完全采收后采集土样,采样时避开雨季,以防有效养分的淋溶,并在烟农的引领下,采集具备典型特征的土壤样本。在地力均匀或方形地块采用 5 点取样法,在地力不均匀或长形地块采用“S”形取样法,取样深度为  $0 \sim 20 cm$  的耕作层<sup>[10]</sup>。每个采样点按照四分法留取不少于 1 kg 土样,经登记编号、自然风干、研磨、筛选、均匀混合,装袋备测。

### 1.3 测定项目及方法

pH, 电位法<sup>[11]</sup>; 有机质(OM), 重铬酸钾容量法<sup>[12]</sup>; 全氮(TN), 凯氏定氮法<sup>[13]</sup>; 碱解氮(AN), 滴定法<sup>[14]</sup>; 全磷(TP), 碱熔-钼锑抗分光光度法<sup>[15]</sup>; 有效磷(AP), 盐酸硫酸浸提-比色法<sup>[16]</sup>; 全钾(TK), 酸溶-火焰光度计法<sup>[17]</sup>; 速效钾(AK), 乙酸铵浸提-火焰光度计法<sup>[18]</sup>; 有效硫(AS), 比浊法<sup>[19]</sup>。

### 1.4 土壤肥力评价

1) 土壤肥力指标适宜性评价。为明确采样区土壤对烤烟种植的适宜性、适宜程度及其限制状况,本研究参考肖钰等<sup>[20]</sup>提出的四川植烟土壤肥力指标分级评价标准,并结合梁红<sup>[21]</sup>提出的重庆烟区植烟土壤肥力指标分级标准,综合构建了一套适用于宜宾市的植烟土壤肥力指标 5 级评价体系(表 1)。

2) 基于模糊数学的土壤肥力综合评价。模糊数学评价是基于模糊数学理论的评价方法,对多指标进行综合处理,建立指标分级体系,以确保评价模型的科学性和可行性。本研究利用模糊数学综合评价法的基本原理,首先,根据烟草生长的效应曲线和实际栽培经验,确定各土壤属性指标的隶属度函数类型(公

表1 宜宾植烟土壤肥力丰缺标准

Table 1 Classification standards of soil fertility indexes in Yibin City

指标	极低	低	适宜	高	过高
pH	≤5.0	5.0~5.5	5.5~7.0	7.0~7.5	≥7.5
有机质(OM, g/kg)	≤15	15~25	25~35	35~45	≥45
全氮(TN, g/kg)	≤0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	≥2.0
全磷(TP, g/kg)	≤0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	≥1.5	—
全钾(TK, g/kg)	≤10	10~15	15~20	≥20	—
碱解氮(AN, mg/kg)	≤65	65~100	100~150	150~200	≥200
有效磷(AP, mg/kg)	≤10	10~20	20~40	40~80	≥80
速效钾(AK, mg/kg)	≤80	80~150	150~220	220~350	≥350
有效硫(AS, mg/kg)	≤10	10~16	16~30	30~50	≥50

式(1)~(2)), 计算每个土壤样本在不同肥力指标下的隶属度; 然后, 采用主成分分析法, 以得到的公因子方差大小反映变量对土壤肥力的影响力或重要性, 并将共同度归一化之后的结果作为权重值; 最后, 利用公式(3)计算每个土壤样本的综合肥力指数(Integrated fertility index, IFI)<sup>[22]</sup>。

使用隶属度函数方法将土壤肥力指标转换为0~1之间的标准化无量纲数值。通常使用的隶属度函数主要有两种形式, 即抛物线型(公式(1))和S型(公式(2)):

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & (x \leq x_1, x > x_2) \\ 0.9 \times (x - x_1) / (x_3 - x_1) + 0.1 & (x_1 \leq x < x_3) \\ 1.0 & (x_3 \leq x \leq x_4) \\ 1.0 - 0.9 \times (x - x_4) / (x_2 - x_4) & (x_4 < x \leq x_2) \end{cases} \quad (1)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & (x < x_1) \\ 0.9 \times (x - x_1) / (x_2 - x_1) + 0.1 & (x_1 \leq x < x_2) \\ 1.0 & (x \geq x_2) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{IFI}_i = \sum_{j=1}^m W_{ij} N_{ij} \quad (i=1,2,\dots; j=1,2,\dots) \quad (3)$$

式中:  $x$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_4$  分别代表土壤样品指标实际值、土壤养分指标的下限、最优下限、最优上限和上限;  $N_{ij}$  和  $W_{ij}$  分别代表第  $i$  个土壤样本的第  $j$  个土壤肥力指标的隶属度值及其对应的权重因子。

## 1.5 数据处理与分析

使用 Excel 2019 和 SPSS 22.0 对数据进行统计分析及表格绘制, 采用 Origin 2018 绘制土壤综合肥力指数累积频率分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 宜宾烟区主要土壤肥力指标描述性统计特征及适宜性评价

由表2可知, 筠连县、珙县、兴文县和屏山县烟

田 pH 分别介于 5.22~7.23、4.67~7.13、5.47~7.37 和 4.39~7.10, 4 县均不存在 pH 过高的烟田, 但珙县和屏山县分别有 9.52% 和 5.56% 的烟田 pH 极低。同时, 4 县的 pH 标准差和变异系数均较小, 表明 pH 空间变异较小。对于 OM, 筠连县最丰, 兴文县和珙县次之, 屏山县最低, 筠连县 OM 介于 12.8~67.1 g/kg, 珙县介于 14.3~49.5 g/kg, 兴文县介于 9.2~56.5 g/kg, 屏山县介于 2.6~29.3 g/kg, 筠连县、兴文县和珙县总体上 OM 较丰富, 屏山县处于适宜水平以下比例较高, 为 88.89%。筠连县、珙县、兴文县和屏山县 TN 含量分别在 0.97~4.01、0.78~2.95、0.78~3.63 和 0.61~2.43 g/kg, 屏山县 TN 含量有 1/3 处于中下水平, 筠连县、珙县和兴文县基本处于适宜水平。筠连县、珙县、兴文县和屏山县烟田 AN 含量分别介于 52.0~290.0、83.0~214.0、43.0~249.0 和 13.0~299.0 mg/kg, 屏山县处于极低和低水平分别占 27.78% 和 22.22%, 其他 3 县 AN 处于高与过高水平的占比较大, 且 4 县的 AN 标准差和变异系数较大, 说明 AN 空间差异较大。筠连县 TP 在 0.83~2.21 g/kg, 珙县在 0.45~1.56 g/kg, 兴文县为 0.29~2.39 g/kg, 屏山县为 0.15~1.45 g/kg, 兴文县整体上高于其余 3 县, 珙县、屏山县以及兴文县的部分烟田 TP 处于极低水平, 尤其是屏山县最为显著, 88.88% 处于适宜水平以下, 4 县的 TP 变异系数均较大, 表明 TP 空间差异较大。筠连县 AP 在 10.9~142.3 mg/kg, 珙县在 3.8~169.7 mg/kg, 兴文县在 0.8~173.7 mg/kg, 屏山县在 1.4~301.5 mg/kg, 其中, 屏山县 AP 较丰富且变化范围广, 其余 3 县 AP 适宜及以上水平烟田占比高, 但存在部分极低或低水平, 且 4 县 AP 变异系数均较大, 说明 AP 空间差异较大。除筠连县外, 其余 3 县 TK 大部分处于适宜以上水平, 以珙县最为显著, 90.48% 烟田处于高水平, 而筠连县仅烟田 10.71% 烟田处于适宜水平, 处于高和低水平的分别占

39.29% 和 46.43%，且 4 县的 TK 变异系数较大，表明 TK 空间差异较大。筠连县、珙县、兴文县和屏山县 AK 含量分别处于  $129 \sim 1194$ 、 $119 \sim 962$ 、 $244 \sim 2861$  和  $63 \sim 1199 \text{ mg/kg}$ ，兴文县最为丰富，其烟田均处于高和过高水平，分别占比 22.22% 和 77.78%，

但屏山县有近 1/3 的烟田处于低和极低水平，同时，4 县的 AK 标准差和标准系数较大，烟田 AK 空间差异显著。4 县 AS 均较为丰富，尤其是兴文县，筠连县、珙县、兴文县和屏山县处于过高水平的烟田分别占 82.86%、100.00%、96.30% 和 88.89%。

表 2 宜宾 4 个烟区土壤肥力指标描述性统计  
Table 2 Descriptive statistics of soil fertility indexes in four tobacco-growing areas

指标	烟区	均值 $\pm$ 标准差	变异系数 (%)	变幅	各等级土壤占比(%)				
					极低	低	适宜	高	过高
pH	筠连县	$6.42 \pm 0.48$	7.00	$5.22 \sim 7.23$	0.00	7.14	89.29	3.57	0.00
	珙县	$6.31 \pm 0.66$	10.42	$4.67 \sim 7.13$	9.52	0.00	80.95	9.52	0.00
	兴文县	$6.34 \pm 0.48$	7.56	$5.47 \sim 7.37$	0.00	3.70	88.89	7.41	0.00
	屏山县	$5.98 \pm 0.58$	9.76	$4.39 \sim 7.10$	5.56	5.56	83.33	5.56	0.00
OM (g/kg)	筠连县	$39.70 \pm 12.82$	32.29	$12.8 \sim 67.1$	3.57	10.71	25.00	28.57	32.14
	珙县	$30.60 \pm 9.88$	32.31	$14.3 \sim 49.5$	4.76	28.57	38.10	14.29	14.29
	兴文县	$34.21 \pm 10.14$	29.65	$9.2 \sim 56.5$	3.70	11.11	51.85	11.11	22.22
	屏山县	$16.36 \pm 7.26$	44.39	$2.6 \sim 29.3$	38.89	50.00	11.11	0.00	0.00
TN (g/kg)	筠连县	$2.46 \pm 0.66$	27.05	$0.97 \sim 4.01$	0.00	3.57	3.57	10.71	82.14
	珙县	$2.00 \pm 0.52$	26.12	$1.04 \sim 2.95$	0.00	0.00	14.29	42.86	42.86
	兴文县	$2.23 \pm 0.61$	27.13	$0.78 \sim 3.63$	0.00	3.70	3.70	33.33	59.26
	屏山县	$1.50 \pm 0.54$	35.73	$0.61 \sim 2.43$	0.00	27.78	33.33	11.11	27.78
AN (mg/kg)	筠连县	$161.82 \pm 53.33$	32.96	$52.0 \sim 290.0$	3.57	3.57	35.71	42.86	14.29
	珙县	$140.19 \pm 40.64$	28.99	$83.0 \sim 214.0$	0.00	23.81	38.10	23.81	14.29
	兴文县	$148.96 \pm 43.72$	29.35	$43.0 \sim 249.0$	3.70	11.11	33.33	37.04	14.81
	屏山县	$102.56 \pm 66.37$	64.72	$13.0 \sim 299.0$	27.78	22.22	33.33	11.11	5.56
TP (g/kg)	筠连县	$1.42 \pm 0.36$	25.07	$0.83 \sim 2.21$	0.00	14.29	46.43	39.29	—
	珙县	$1.05 \pm 0.29$	27.84	$0.45 \sim 1.56$	4.76	42.86	47.62	4.76	—
	兴文县	$1.32 \pm 0.57$	43.35	$0.29 \sim 2.39$	3.70	40.74	18.52	37.04	—
	屏山县	$0.62 \pm 0.33$	52.62	$0.15 \sim 1.45$	44.44	44.44	11.11	0.00	—
AP (mg/kg)	筠连县	$45.45 \pm 28.17$	61.99	$10.9 \sim 142.3$	0.00	14.29	42.86	32.14	10.71
	珙县	$40.63 \pm 42.09$	103.61	$3.8 \sim 169.7$	9.52	33.33	28.57	14.29	14.29
	兴文县	$53.79 \pm 42.17$	78.39	$0.8 \sim 173.7$	7.41	11.11	29.63	29.63	22.22
	屏山县	$102.97 \pm 95.03$	92.29	$1.4 \sim 301.5$	11.11	0.00	16.67	27.78	44.44
TK (mg/kg)	筠连县	$18.78 \pm 8.28$	44.07	$9.7 \sim 40.4$	3.57	46.43	10.71	39.29	—
	珙县	$28.43 \pm 9.08$	31.92	$10.2 \sim 44.3$	0.00	9.52	0.00	90.48	—
	兴文县	$24.72 \pm 11.03$	44.64	$10.2 \sim 49.3$	0.00	18.52	29.63	51.85	—
	屏山县	$19.59 \pm 5.00$	25.52	$12 \sim 28.1$	0.00	22.22	38.89	38.89	—
AK (mg/kg)	筠连县	$486.75 \pm 232.59$	47.79	$129 \sim 1194$	0.00	7.14	3.57	17.86	71.43
	珙县	$432.48 \pm 200.12$	46.27	$119 \sim 962$	0.00	4.76	9.52	19.05	66.67
	兴文县	$850.44 \pm 456.79$	53.71	$244 \sim 2861$	0.00	0.00	0.00	22.22	77.78
	屏山县	$397.78 \pm 290.81$	73.11	$63 \sim 1199$	11.11	16.67	0.00	22.22	50.00
AS (mg/kg)	筠连县	$128.25 \pm 113.18$	88.26	$18.9 \sim 397.9$	0.00	0.00	7.14	0.00	82.86
	珙县	$136.81 \pm 100.70$	73.61	$34.1 \sim 400.3$	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	兴文县	$270.91 \pm 193.83$	71.55	$29.4 \sim 822.8$	0.00	0.00	3.70	0.00	96.30
	屏山县	$172.18 \pm 155.20$	90.14	$21.7 \sim 572.7$	0.00	0.00	11.11	0.00	88.89

## 2.2 宜宾烟区植烟土壤综合肥力评价

**2.2.1 各肥力指标隶属度函数类型及其曲线拐点取值** 结合前人的研究及烟草生产实践经验和专家建议<sup>[21,23-26]</sup>, 本研究确定了各肥力指标适宜的隶属度函数类型及其曲线转折点取值(表3)。其中, pH、OM、TN、AN 和 AS 的隶属度函数为抛物线型, 而 TP、TK、AP 和 AK 的隶属度函数为 S型。将各指标的实测值代入各自的隶属度函数公式, 计算相应的隶属度, 隶属度值反映了土壤肥力的情况。

表3 土壤养分指标的隶属度函数类型及其曲线转折点取值  
Table 3 Types of membership function and their inflection point values for soil fertility indicators

隶属函数类型	指标	下限( $x_1$ )	最优下限( $x_3$ )	最优上限( $x_4$ )	上限( $x_2$ )
抛物线型	pH	5	5.5	7	7.5
	OM (g/kg)	15	25	35	45
	TN (g/kg)	0.5	1	1.5	2
	AN (mg/kg)	65	100	150	200
	AS (mg/kg)	8	16	30	50
S型	TP (g/kg)	0.5			1.5
	AP (mg/kg)	10			80
	TK (mg/kg)	10			20
	AK (mg/kg)	80			350

表4 各项肥力指标公因子方差和权重

Table 4 Communal factor variances and weights of various soil fertility indicators

指标	公因子方差	权重值
pH	0.781	0.113
OM	0.954	0.138
TN	0.938	0.136
AN	0.835	0.121
TP	0.759	0.110
AP	0.740	0.107
TK	0.298	0.043
AK	0.759	0.110
AS	0.831	0.121

**2.2.3 不同烟区土壤综合肥力评价** 为全面评价各烟区土壤肥力水平, 本研究按照等间距分级法将综合肥力指数从高到低分为5个等级(表5)。由各评项指标隶属度值和与之对应的权重值, 根据公式(3)计算土壤样品的IFI值, 结果如表6所示。宜宾4县植烟土壤肥力存在显著差异, 其中, 兴文县土壤肥力最优, IFI平均值达到0.62, 变动区间为0.33~0.85, 变异系数为16.69%, 平均肥力等级为II级, 而其余3县的平均肥力等级则均为III级, 筠连县与珙县的IFI平均值均为0.59, 变异系数分别为13.83%和18.09%, 而屏山县的IFI平均值略显偏低, 为0.56,

**2.2.2 各项肥力指标公因子方差和权重** 指标权重是指各指标对土壤肥力的影响程度或贡献率, 反映各指标在土壤肥力评价中的重要性, 本研究通过对不同肥力指标赋予不同的权重来评价其对土壤肥力的影响程度或贡献率。从表4结果中可知, OM和TN的权重值最为显著, 分别达到了0.138和0.136, 表明二者在肥力评价中占有较大的比重。相对而言, TK的权重值最低, 仅为0.043, 说明其在整体评估中的重要性相对较小。

变异系数为20.55%, 波动幅度相对较大。

表5 土壤综合肥力指数(IFI)分级标准

Table 5 Grading standards for soil integrated fertility index (IFI)

等级	I	II	III	IV	V
IFI值	$\geq 0.8$	$0.6 \sim 0.8$	$0.4 \sim 0.6$	$0.2 \sim 0.4$	$< 0.2$

表6 各烟区综合肥力指数(IFI)描述性统计

Table 6 Descriptive statistics of soil IFI in various tobacco-growing areas

烟区	均值 $\pm$ 标准差	最小值	最大值	变异系数(%)	肥力等级
筠连县	$0.59 \pm 0.08$	0.42	0.76	13.83	III
珙县	$0.59 \pm 0.11$	0.31	0.80	18.09	III
兴文县	$0.62 \pm 0.10$	0.33	0.85	16.69	II
屏山县	$0.56 \pm 0.11$	0.34	0.75	20.55	III

由各烟区的IFI分布情况可知, 4个植烟区IFI主要分布在II级和III级。筠连县IFI处于II级和III级的烟田占比分别为46.43%和53.57%; 珙县IFI主要处于II级和III级的烟田占比分别为47.62%和42.86%, IFI处于I级和IV的烟田占比较少, 均为4.76%; 兴文县烟田IFI也主要处于II级和III级, 分别为51.85%和40.74%, 处于I级和II级的均为3.70%; 屏山县烟田IFI处于II级和III级的均为44.44%, 处于IV级所占比例为11.11%(图1)。

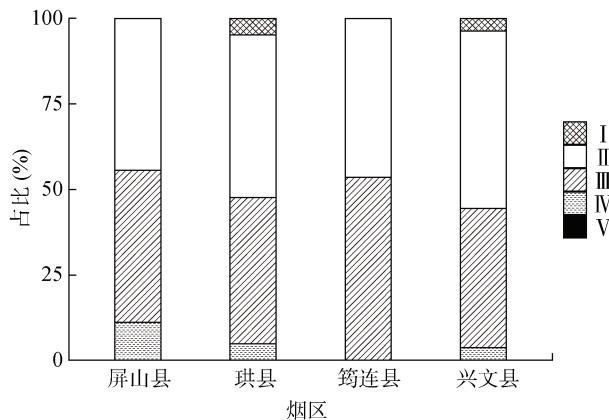


图 1 土壤综合肥力指数累积频率分布图  
Fig. 1 Cumulative frequency distribution of soil IFI

### 3 讨论

土壤肥力是土壤物理、化学和生物学性质的综合表现<sup>[27]</sup>。土壤肥力综合评价是烟区土壤改良和合理施肥的重要依据，在选取土壤肥力综合评价指标时，应遵循主导性原则，着重考虑对烟草生长具有显著影响的土壤要素。本研究以宜宾市主要烟区土壤为研究对象，依据土壤肥力指标分级标准建立模糊数学模型，通过主成分分析法对土壤 pH、OM、TN、AN、AP、TP、TK、AK 和 AS 进行评价，其结果能够客观真实地反映土壤综合肥力情况。

pH 对烤烟生长具有极大影响，pH 过低或过高，通常会改变土壤元素的有效性，从而导致烟株元素的失调<sup>[28]</sup>，适宜的土壤 pH 有利于改善烟株根系微环境，增强烟株抗逆能力，促进烟草生长发育，提高烟叶的产质量<sup>[29-30]</sup>。本研究显示，宜宾市主要烟区土壤 pH 均相对适宜烤烟的生长，筠连县、珙县、兴文县和屏山县分别有 89.29%、80.95%、88.89 和 83.33% 的烟田土壤 pH 在适宜 pH(5.5 ~ 7.0)范围内，且均不存在 pH 过高的情况。因此，烟区应维持土壤 pH 现状。

OM 对烤烟生长的影响非常重要，是评价土壤肥力的一项重要指标。当 OM 过高时，烟叶会出现贪青晚熟的现象，难以正常黄化，甚至可能出现黑暴现象，而烤制后的烟叶主脉会显得粗大，叶片过厚，烟碱和蛋白质含量偏高，色泽不佳，刺激性增强，整体品质下降。当 OM 过低时，则烤烟香气会显得不足<sup>[31-32]</sup>。筠连县、兴文县和珙县总体上烟区土壤 OM 较为丰富，其中筠连县 OM 处于高和过高水平的烟田占 28.57% 和 32.14%，珙县和兴文县烟田 OM 基本均处于 15 ~ 35 g/kg，而屏山县 OM 处于适宜水平的烟田仅占 11.11%，处于极低和低水平的烟田分

别占 38.89% 和 50.00%，整体上远低于其他 3 县，这可能是由于当地烟田土壤自身肥力比较贫瘠。与 OM 相似，除屏山县外，其余 3 县烟田 TN 和 AN 大多处于适宜以上水平，而屏山县 TN 低水平烟田占 27.78%，AN 处极低水平烟田占 27.78%，低水平占 22.22%。对于屏山县 OM、TN 和 AN 较低的情况，建议可以通过秸秆还田、翻压绿肥以及适当调整无机肥和有机肥的施用量提高土壤肥力。

磷素是烤烟生长和发育过程中不可或缺的营养成分，它与有机物的转运、糖类合成以及光合作用等生物过程紧密相关。AP 是评价土壤肥力的重要指标<sup>[33]</sup>。适宜的磷素营养有助于烤烟形成优良的品质，并对提高产量和价值起到积极作用<sup>[34]</sup>。兴文县植烟土壤 TP 整体上高于其余 3 县，而屏山县的情况恰恰相反，显著低于其余 3 县。筠连县和兴文县植烟土壤 TP 处于高水平占比较高，分别占 39.29% 和 37.04%，这可能会对烟草生长产生不利影响，如导致营养生长过旺、成熟期推迟、烟叶品质下降等。而珙县、屏山县以及兴文县的部分地区土壤 TP 较低，尤其是屏山县最为显著，这也会对烤烟的生长产生不利影响，如生长受限、根系发育不良、光合作用降低、产量和品质下降，以及抗逆性减弱等<sup>[35]</sup>。因此，建议针对筠连县、珙县、兴文县和屏山县主要烟区的不同情况，及时调整磷肥施用量，保障烤烟的正常生长。

钾素是烤烟在生长发育过程中吸收和积累量最大的元素，供应充足是获得优质烟叶的重要条件<sup>[36]</sup>。在常规施肥的基础上，喷施高钙镁钾、高氮高钾肥料可以缩短下部烟叶成熟期，促进烟株生长发育，增强烟株长势及抗病性<sup>[37]</sup>。筠连县、珙县、兴文县和屏山县 AK 处于过高水平的烟田分别占比 71.43%、66.67%、77.78% 和 50.00%，但屏山县有近 1/3 的烟田 AK 处于低和极低水平，这可能是土壤钾素的空间变异、施肥不当、土壤理化性质以及农业生产管理不善等多种因素共同作用的结果。为保障烟叶的品质，屏山县应依据钾素分布不均的情况，采取差异性施肥策略，并在钾肥施用过程中，注意施肥位置和方法，以保证最佳的施用效果。缺硫会导致烤烟生育期推迟，甚至不能现蕾，株高、茎粗、叶片长和宽、干重、根系生物量均明显低于正常供硫植株<sup>[38]</sup>。筠连县、珙县、兴文县和屏山县 AS 处于过高水平的烟田分别占 82.86%、100.00%、96.30% 和 88.89%，而处于适宜水平的样本仅占 7.14%、0.00%、3.70% 和 11.11%，这是当地烟农对含硫肥料(硫酸钾、普钙)施用量过多所导致的，因此，建议 4 县在烤烟生产时合理控制含

硫肥料的施用量。

在综合肥力评估方面,本研究选取了pH、OM、AN、TP、TN、AP、AK和AS作为关键的肥力指标,并运用模糊数学综合评价方法对宜宾烟区4县的土壤综合肥力状况进行评价。结果表明,筠连县烟田肥力等级均在III级以上,且近一半的烟田肥力处于II级以上;珙县综合肥力指数(IFI)平均值为0.59,属III级肥力等级,且该区烟田土壤肥力基本均在III级及其以上水平;兴文县IFI平均值为0.62,属II级肥力水平,且该区烟田一半以上处II级肥力水平;屏山县IFI平均值为0.56,也属III级水平,该区烟田基本均处III级及其以上水平。4县土壤肥力属兴文县最佳。屏山县IFI平均值最小,这可能与屏山县烟草种植区土壤OM、TN、AN这3个权重较高的肥力指标含量水平偏低有关。因此,在土壤养分管理实践中,应当注重合理配施有机肥,确保烟叶在生长期间能够均衡地吸收所需营养。

另外,为了更全面地评价宜宾市主要烟草种植区的适宜种植条件,未来的研究工作需要整合地形、品种、海拔、栽培技术等多方面因素,以及其他土壤肥力指标如水溶性氯、中量元素(钙镁)、微量元素(硼、锌等),进行更为系统深入的分析和探究。

## 4 结论

在宜宾市4个典型烟区中,筠连县烟区土壤pH适宜,OM和AP处中上水平,TN及AS丰富,TK空间分布不均;珙县烟区土壤pH基本均处适宜水平,氮素整体上较为丰富,钾和AS过高,OM和磷含量处中下水平,且空间分布不均;兴文县土壤pH适中,OM和氮含量丰富,磷含量分布不均,钾和AS含量偏高;屏山县土壤pH适宜,OM和TP偏低,氮处于中下水平且分布不均,AP偏高,AK和AS较丰富。筠连县、珙县和屏山县土壤综合肥力指数(IFI)均为III级,兴文县为II级。4县均应对各元素精准调控,以避免过量施肥,并采取差异性施肥策略。总体上,综合施肥策略应基于土壤养分状况和烟草的营养需求,实现“精准控氮、合理调磷、适量减钾、分类施用有机肥”,并考虑大范围控制含硫肥料的使用。

## 参考文献:

- [1] 卫宣志. 水肥一体化条件下氮用量和施肥方式对烟草草品质及产量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017.
- [2] 黄松青. 施肥方式对烤烟生长发育及产、质量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2006.

- [3] 张明发, 田峰, 邓小华, 等. 精准施肥对土壤性状和烟叶质量的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(S1): 186–190.
- [4] 李玉宝, 王鹏, 张永革, 等. 贵州毕节主要植烟区土壤肥力综合评价[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(24): 156–160.
- [5] 代先强, 张文平, 李沛, 等. 重庆市丰都县植烟区土壤肥力特征研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(17): 9316–9319, 9385.
- [6] 李政昊, 刘斯泓, 李嘉琦, 等. 辽宁省铁岭植烟区土壤肥力特征及综合评价[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 631–639.
- [7] 张浩, 彭月月, 李斌, 等. 宜宾地区土壤养分空间变异及其丰缺状况分析[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(4): 30–36.
- [8] 赵瑜, 杨懿德, 鄢敏, 等. 宜宾烟区不同海拔对土壤主要养分分布的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 115–122.
- [9] 袁奎, 杨洋, 杨懿德, 等. 宜宾烟区土壤耕作方式对耕层土壤物理性状的影响[J]. 现代农业科技, 2021(12): 15–18.
- [10] 胡海洲, 王浩军, 刘宝法, 等. 贵州盘县主要植烟区土壤肥力综合评价[J]. 中国农学通报, 2012, 28(19): 109–116.
- [11] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第2部分: 土壤pH的测定: NY/T 1121.2—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [12] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第6部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [13] 国家林业局. 森林土壤氮的测定: LY/T 1228—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [14] 国家林业局. 森林土壤水解性氮的测定: LY/T 1228—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [15] 中华人民共和国农业部. 土壤全磷测定法: GB/T 9837—1988 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [16] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第7部分: 土壤有效磷的测定: NY/T 1121.7—2014[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [17] 中华人民共和国农业部. 土壤全钾测定法: NY/T 87—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [18] 中华人民共和国农业部. 土壤速效钾和缓效钾含量的测定: NY/T 889—2004[S]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [19] 任文岩. 比浊法测定土壤中有效硫[J]. 山西建筑, 2012, 38(16): 51–52.
- [20] 肖钰, 高峻, 李斌, 等. 四川不同植烟区耕层土壤养分特征及其相关分析[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(6): 37–43.
- [21] 梁红. 重庆植烟土壤肥力特征及评价[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [22] 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, 31(4): 376–380.
- [23] 陈玉蓝, 王昌全, 刘朝科, 等. 会东烟区土壤养分状况综合评价[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1567–1571.
- [24] 王林. 湖南烟区土壤肥力状况评价和土壤养分与烤烟化学成分的关系[D]. 郑州: 河南农业大学, 2007.

- [25] 孙奕荷, 张凯, 鲁琪飞, 等. 三个典型植烟生态区土壤养分适宜性评价[J]. 作物杂志, 2023(1): 115–121.
- [26] 邵惠芳, 郑聪, 许自成, 等. 三门峡烟区土壤养分状况的综合评价[J]. 西南农业学报, 2009, 22(4): 1011–1015.
- [27] 王栋, 李辉信, 胡锋. 不同耕作方式下覆草旱作稻田土壤肥力特征[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1203–1209.
- [28] 张龙, 张忠启, 蔡何青, 等. 贵州毕节植烟区土壤 pH 空间分布特征及对施肥的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 85–93.
- [29] 袁玉波. 土壤酸度调节对烤烟生长发育和产质量的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [30] 李集勤, 黄振瑞, 杨少海, 等. 八种绿肥对土壤营养和烤烟产质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(6): 24–29.
- [31] 邹高寿. 不同有机肥用量对烤烟品质形成的影响研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- [32] 刘涛. 云南省昭通市土壤有机质对烟叶质量的影响研究 [J]. 轻工科技, 2013, 29(11): 49–50.
- [33] 高永祥, 李若尘, 张民, 等. 稼秆还田配施控释掺混尿素对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1507–1519.
- [34] 王勇乾, 胡瑞文, 周清明, 等. 解磷细菌肥对烤烟磷素吸收和磷肥利用率的影响[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(4): 7–12.
- [35] 王卫峰, 胡亚杰, 张丰收, 等. 不同移栽期对烟叶主要矿质营养元素的影响[J]. 天津农业科学, 2016, 22(6): 120–123, 127.
- [36] 金明清, 彭月月, 王佩, 等. 四川省盐源县植烟土壤氮磷钾空间变异特征及影响因素[J]. 土壤, 2016, 48(5): 984–991.
- [37] 徐兴阳, 李晓宁, 李文丹, 等. 叶面喷施钾、镁肥对烤烟生长及钾镁营养的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(3): 472–478, 546.
- [38] 刘勤, 赖辉比, 曹志洪. 不同供硫水平下烟草硫营养及对 N、P、Cl 等元素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 63–68.