

宣威烟区土壤肥力质量评价及其变异特征解析^①

陈彪¹, 刘力玮³, 沈毅², 邓涛¹, 王全贞¹, 蔡宪杰², 陈健^{2*}, 刘光亮³, 闫慧峰³, 董建新³

(1 云南省烟草公司曲靖市公司, 云南曲靖 655000; 2 上海烟草集团有限责任公司, 上海 200082; 3 中国农业科学院烟草研究所/农业农村部烟草生物学与加工重点实验室, 山东青岛 266101)

摘要: 本文选取宣威 21 个乡镇的典型烟区 734 个代表性烟田作为研究对象, 将土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾作为衡量植烟土壤肥力质量的评价指标, 运用模糊隶属度函数模型计算土壤肥力综合指数 (IFI), 以此定量评价宣威烟区土壤肥力质量。同时, 进一步分析各土壤肥力指标的变异系数 (CV) 与 IFI 的变异系数之间的相关性, 旨在为宣威烟区烟叶均质化生产及土壤培肥提供科学依据。结果表明, 宣威烟区整体土壤质量处于较优水平, 但不同乡镇之间存在显著差异。各肥力指标的变异系数差异明显, 其中有效磷的变异系数最大, 速效钾次之, pH 最小。不同肥力指标的变异系数与 IFI 的变异系数存在一定关联, 其中, pH、碱解氮和速效钾的变异系数与 IFI 的变异系数呈正相关, 且速效钾的相关性达显著水平 ($P < 0.05$); 而有机质和有效磷的变异系数则与 IFI 的变异系数呈负相关, 但相关性不显著。土壤肥力指标的变异系数与 IFI 的变异系数之间拟合方程为: $CV_{IFI} = 0.606 \times CV_{pH} + 0.06 \times CV_{OM} - 0.109 \times CV_{AN} - 0.079 \times CV_{AP} + 0.178 \times CV_{AK} + 9.884$, 方程决定系数 $R^2 = 0.478$; 且拟合的 IFI 变异系数与实际 IFI 变异系数呈线性相关 ($y = 0.48x + 11.49$), 拟合系数 $R^2 = 0.48$, 均方根误差 (RMSE) = 2.73, 标准化均方根误差 (n-RMSE) = 12.37%, 稳定度高; 表明可借助该函数对土壤肥力质量的变异性进行有效预测。

关键词: 土壤综合肥力; 烟叶生产; 变异系数; 评价

中图分类号: S158 **文献标志码:** A

Evaluation of Soil Fertility Quality and Analysis of Its Variation Characteristics in Xuanwei Tobacco Area

CHEN Biao¹, LIU Liwei³, SHEN Yi², DENG Tao¹, WANG Quanzhen¹, CAI Xianjie², CHEN Jian^{2*}, LIU Guangliang³, YAN Huifeng³, DONG Jianxin³

(1 *Qujing Branch of Yunan Tobacco Company, Qujing, Yunnan 655000, China*; 2 *Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Shanghai 200082, China*; 3 *Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao, Shandong 266101, China*)

Abstract: In order to provide a scientific basis for homogenized tobacco leaf production and soil fertility improvement for Xuanwei tobacco-growing area, 734 representative tobacco fields from 21 townships of Xuanwei tobacco-growing area were selected as research objects. Soil pH, organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium contents were used as evaluation indices for soil fertility quality. A fuzzy membership function model was applied to construct a comprehensive soil fertility index (IFI) for quantitative assessment of soil fertility quality in the study area. Additionally, the correlation between the coefficient of variation (CV) of each soil fertility index and CV of IFI was analyzed. The results showed that, the overall soil fertility quality in Xuanwei tobacco-growing area was at a relatively optimal level, but significant differences existed among different townships. Regarding individual fertility indices, CV values varied notably: available phosphorus had the highest CV, followed by available potassium, while soil pH had the lowest CV. Correlations were observed between the CV values of different fertility indices and CV of IFI: CV values of pH, alkali-hydrolyzable nitrogen, and available potassium were positively correlated with CV of IFI, with the correlation for available potassium reaching a significant level ($P < 0.05$); while CV

①基金项目: 上海烟草集团有限责任公司科技项目(K2023-1-018Z)资助。

* 通信作者(chenj@sh.tobacco.com.cn)

作者简介: 陈彪(1992—), 男, 河南郑县人, 硕士, 农艺师, 研究方向为烟草栽培技术研究与应用。E-mail: chenbiao19920627@163.com

values of organic matter and available phosphorus were negatively correlated with CV of IFI. although these correlations were not significant. A fitting equation was established to predict the variation in soil fertility based on the variation of soil fertility indicators: $CV_{IFI} = 0.606 \times CV_{pH} + 0.06 \times CV_{OM} - 0.109 \times CV_{AN} - 0.079 \times CV_{AP} + 0.178 \times CV_{AK} + 9.884$, with an R^2 of 0.478. Furthermore, the fitted CV of the IFI was linearly correlated with the actual CV of the IFI ($y = 0.48x + 11.49$), with an R^2 of 0.48, a root mean square error (RMSE) of 2.73, and a normalized root mean square error (n-RMSE) of 12.37%, indicating high stability. This relationship can be used to approximately predict the variability of soil fertility based on the variation of soil fertility indicators.

Key words: Comprehensive soil fertility; Tobacco production; Variation coefficient; Evaluation

土壤肥力是衡量土壤能够提供作物生长所需各种养分的能力, 其对作物的健康生长至关重要^[1-2]。全球对土壤质量问题一直高度关注, 人们越来越认识到土壤不仅是粮食生产的重要因素, 也是保护环境价值和生态平衡的重要因素^[3-4]。土壤肥力管理对于农业可持续发展至关重要, 而农田土壤管理的一个重要因素是对土壤质量进行系统评估^[5], 土壤肥力评价是有助于土壤管理实现可持续生产的重要内容^[6]。通过结合反映土壤条件变化的物理、化学和微生物特性, 可以有效评估土壤质量。土壤质量指数是土壤管理的重要指标, 该指标包括对一系列土壤特性的评估, 从土壤功能评估到一般土壤状况和可持续农业^[7-11]。已有的土壤肥力指标包括土壤肥力综合指数(IFI)、土壤评价因子(SEF)和土壤养分指数(NIV)等^[12], 其中最常用的指标之一是 IFI。IFI 有助于实现作物产量最大化, 同时最大限度地减少对环境的影响, 并管理农业用地的可变性^[5, 13], 已被用于多个地区土壤肥力的综合评估^[14-15], 评估对象涉及不同土地利用方式, 如森林、家庭花园、经济林田^[16]和农田^[14]。

云南省是我国重要的烤烟产区, 有关云南烟区土壤肥力质量的报道较多^[17-22]。以往研究表明, 云南省土壤类型多样, 其农田土壤肥力指标存在一定的变异程度, 包括土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾和缓效钾等关键指标^[21]。例如, 土壤全氮含量在不同区域和土壤类型间差异巨大, 而土壤有效磷含量在不同区域和土壤类型之间也表现出较大的差异^[22]。这些变异程度直接关系到土壤的供肥能力和作物的生长状况, 对云南省烤烟产业的可持续发展具有重要意义。宣威则是云南重要的烤烟产区, 其土壤状况对烟叶的质量和产量有着直接的影响, 因此亟需对烟田土壤质量进行科学、准确的综合评价, 为规模化种植条件下的烟田管理提供基础数据。为此, 本文采用目前烤烟生产中与烤烟品质及土壤可持续利用相关的指标, 对宣威烟叶生产典型样区的土壤肥力质量进行评价, 并对其变异特征进行解析, 旨在

为宣威烟区烤烟生产、土壤改良等提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

宣威烟区地处云南省东北部, 地理坐标为 $25^{\circ}53'N \sim 26^{\circ}44'N$ 、 $103^{\circ}35'E \sim 104^{\circ}40'E$, 属亚热带季风气候区, 多年平均气温 $13.4^{\circ}C$, 降水量 $850 \sim 1\ 600\ mm$, 平均日照时数 $2\ 000\ h$ 。基于烤烟种植面积、烤烟常年长势、地形地貌等因素, 在宣威区域内 21 个乡镇共确定 734 个代表性烟田。

1.2 土壤样品的采集和制备

2022 年烤烟移栽前采集土壤样品。采样时先除去土壤表层覆盖物后用不锈钢土钻随机多点(5~8 个点)采集耕层土壤(0~20 cm), 混合后采用“四分法”留取 2 kg 土壤作为分析测定土样, 在室内经过风干、去杂、研磨后, 分别过 0.147 和 0.25 mm 尼龙网筛备用。

1.3 土壤肥力指标及测定方法

土壤肥力指标测定参照《土壤农化分析》^[23]。pH 采用玻璃电极法测定; 有机质(OM)采用重铬酸钾容量法测定; 碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定; 有效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定; 速效钾(AK)采用中性乙酸铵溶液浸提-火焰光度计法测定。

1.4 土壤肥力指标隶属度函数类型及转折点

本研究采用模糊数学法评价土壤肥力质量。

根据不同土壤养分对烤烟生长、烟叶产量和品质的影响特点, 结合已有的相关研究结果^[24-26], 确定了 S 型和抛物线型两种函数为植烟土壤肥力质量指标的隶属度函数类型, 其隶属度值计算公式分别见式(1)和式(2):

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

$$f(x) = \begin{cases} 0.1, & x \leq x_1, x \geq x_4 \\ 0.9 \times (x - x_1) / (x_2 - x_1) + 0.1, & x_1 < x < x_2 \\ 1.0, & x_2 \leq x \leq x_3 \\ 1.0 - 0.9 \times (x - x_3) / (x_4 - x_3), & x_3 < x < x_4 \end{cases} \quad (2)$$

参考《中国植烟土壤及烟草养分综合管理》^[27], 结合植烟实际情况和烤烟养分需求特性及前人研究^[21, 28-30], 确定隶属度函数类型及土壤因子隶属度转折点(表 1)。

表 1 土壤肥力指标函数类型及函数转折点取值
Table 1 Function types and inflection points of soil fertility indicators

指标	函数类型	拐点值			
		x_1	x_2	x_3	x_4
pH	抛物线型	5.0	5.5	6.5	8.0
有机质(g/kg)	抛物线型	10	15	30	45
碱解氮(mg/kg)	S 型	30	120		
有效磷(mg/kg)	S 型	10	40		
速效钾(mg/kg)	S 型	80	220		

1.5 土壤肥力指标权重确定

运用主成分分析法确定土壤肥力指标的权重, 计算土壤各项养分指标的公共因子方差, 将公共因子方差进行归一化, 结果作为各项肥力指标的权重。

1.6 土壤肥力质量定量评价及分级

各指标隶属度值与权重相乘后, 再加权求和, 即为土壤肥力综合指数(IFI)。

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

式中: n 表示参与评价因子总数; M_i 和 N_i 分别表示该因子的隶属度值和权重。根据土壤肥力综合评价公式计算其 IFI, IFI 越高, 土壤肥力质量越高。IFI 分为 5 级: I 级, ≥ 0.7 ; II 级, $0.6 \sim 0.7$; III 级, $0.5 \sim 0.6$; IV 级, $0.4 \sim 0.5$; V 级, < 0.4 。

1.7 数据处理与统计分析

采用 Excel 2016 和 DPS 软件, 对数据进行整理、检验及差异显著性分析、相关性分析和隶属度计算等统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力指标统计分析

图 1 为土壤肥力指标频率分布图。由图 1 可知, 宣威烟区土壤 pH 均值为 6.07, 中位数为 6.00; pH>7.5 的碱性土壤占比较小, 仅为 7%; pH<5.5 的酸性土壤约占 32%, 其中 pH 5.0~5.5 占 19%; pH 在适宜范围内(5.5~7.0)的土壤占比约为 46%。有机质

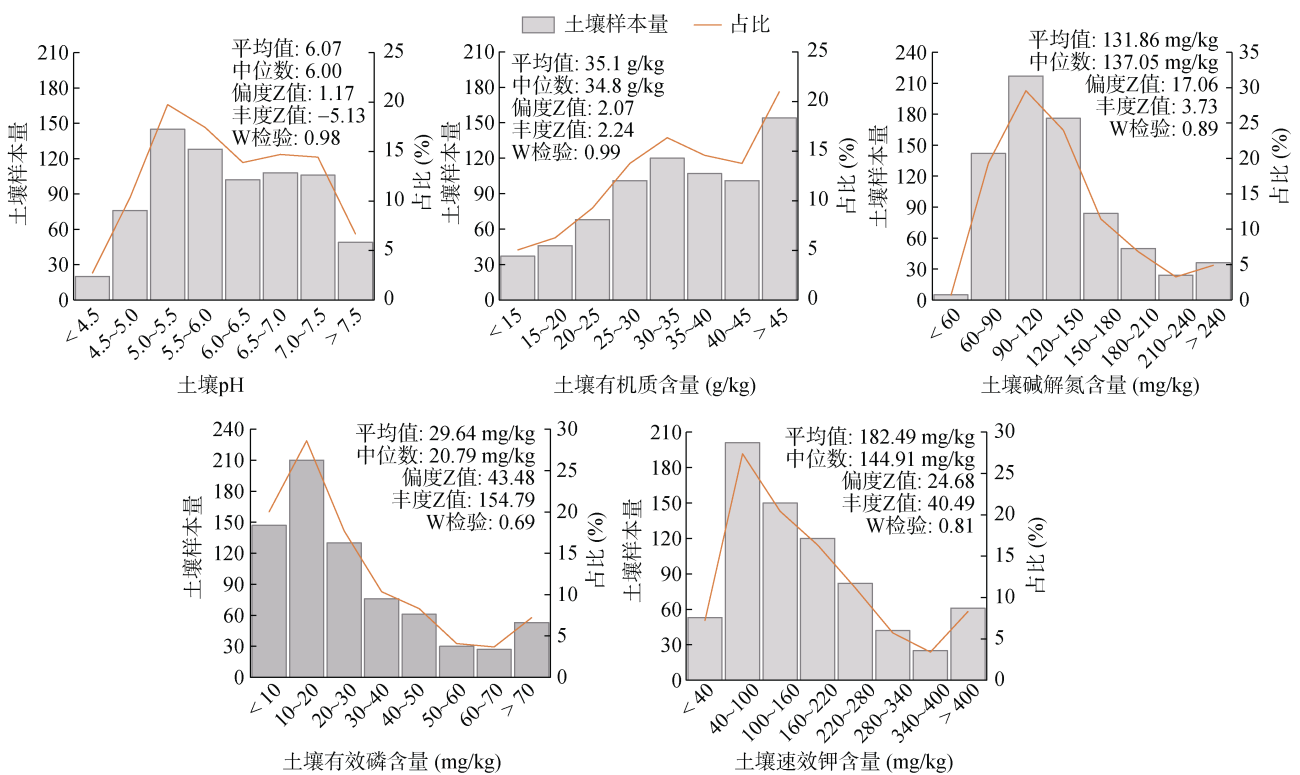


图 1 主要土壤肥力评价指标频率分布

Fig. 1 Frequency distributions of soil fertility indicators

含量均值为 35.1 g/kg, 中位数为 34.8 g/kg, 总体上较高; 有机质含量大于 30 g/kg 的土壤样品约占 66%, 仅少部分样品(约占 11%)有机质含量低于 20 g/kg, 在适宜范围内(20~30 g/kg)的土壤样品占比约为 23%。碱解氮含量整体偏高, 均值为 131.86 mg/kg, 中位数为 137.05 mg/kg; 碱解氮含量大于 120 mg/kg 的土壤样品约占 50%, 低于 60 mg/kg 的占比较小, 不到 1%。有效磷含量整体也偏高, 但数据分布不对称, 其均值和中位数分别为 29.64 和 20.79 mg/kg;

有效磷含量较低(<10 mg/kg)的土壤样品约占 20%, 高于 40 mg/kg 的约占 23%, 在适宜范围(10~20 mg/kg)的土壤样品约占 29%。速效钾含量均值为 182.49 mg/kg, 中位数为 144.91 mg/kg, 在适宜范围(160~220 mg/kg)的土壤样品约占 16%。

土壤肥力各指标相关性如图 2 所示, 除 pH 与碱解氮之间呈负相关外, 其余各指标之间均呈正相关。其中, 有效磷与速效钾之间相关系数最高(0.35); 其次为有机质与碱解氮, 相关系数为 0.31。

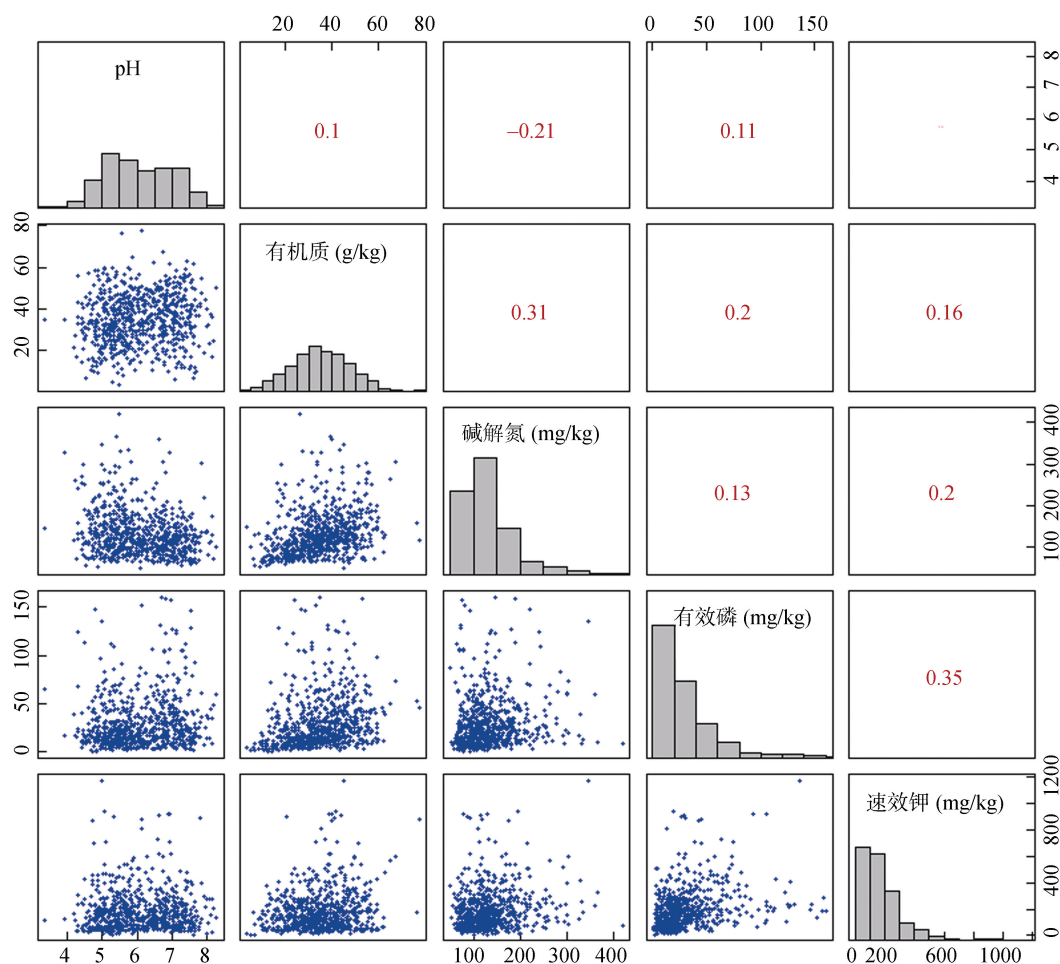


图 2 主要土壤肥力评价指标间的相关性

Fig. 2 Correlations between soil fertility indicators

不同乡镇各土壤肥力指标的变异系数(CV)如表 2 所示。变异系数通常划分为弱变异(CV<10%)、中度变异(10%~100%)和高度变异(CV≥100%)。由表 2 可知, 各乡镇土壤 pH 为弱-中度变异, 有机质、碱解氮和速效钾均为中度变异, 有效磷为中度和高度变异。有效磷的变异系数最高(平均 75.34%), 速效钾次之(平均 65.36%), pH 的变异系数最小(平均 14.25%), 有机质、碱解氮的平均变异系数分别为 31.70% 和 37.03%。

2.2 宣威烟区土壤肥力综合评价

权重是评价指标对整体的相对重要程度, 通过主成分分析法确定的土壤肥力指标权重如表 3 所示。pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾的权重分别为 11.2%、22.3%、24.0%、23.1% 和 19.4%, 其高低顺序与各指标的变异系数顺序一致。

宣威烟区植烟土壤 IFI 评价结果见表 4。各乡镇土壤肥力质量普遍等级在 II 级以上, 占比为 86%; 仅少部分为 III 级和 IV 级, 占比分别为 9% 和 5%。

表 2 土壤肥力指标的变异系数(%)

Table 2 Coefficients of variation (CVs) of soil fertility indicators

乡镇和样本量	pH	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾
倘塘镇(n=44)	18.14	43.82	44.58	69.69	79.48
田坝镇(n=11)	20.47	12.18	35.05	58.64	42.73
羊场镇(n=61)	17.86	30.35	42.53	71.50	50.54
格宜镇(n=25)	15.06	26.64	37.30	78.80	76.49
龙场镇(n=13)	13.49	23.86	24.35	83.54	75.64
海岱镇(n=22)	19.45	30.90	45.69	100.2	86.76
落水镇(n=80)	10.97	28.85	30.37	109.67	68.14
务德镇(n=66)	14.45	34.95	39.56	90.91	80.08
龙潭镇(n=41)	11.80	36.15	53.85	50.76	68.40
宝山镇(n=25)	15.90	26.64	50.86	68.30	69.58
东山镇(n=13)	12.78	28.78	21.49	72.38	57.66
热水镇(n=134)	13.44	34.67	33.12	66.92	77.78
得禄乡(n=39)	13.56	46.91	41.37	68.50	47.52
普立乡(n=2)	14.89	41.18	37.40	122.82	54.19
西泽乡(n=41)	12.07	27.01	33.58	58.36	66.74
杨柳镇(n=10)	5.40	42.97	41.73	48.39	61.37
双河乡(n=6)	11.81	26.34	31.31	64.04	55.93
乐丰乡(n=15)	17.41	40.45	38.42	110.41	59.91
阿都乡(n=5)	17.58	23.81	26.56	50.53	31.56
板桥街道(n=63)	12.21	32.34	42.32	77.48	73.02
来宾街道(n=17)	10.55	26.04	26.24	60.40	88.96

注: 括号内为样本量。

表 3 土壤肥力指标权重值

Table 3 Weight values of soil fertility indicators

指标	pH	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾
权重(%)	11.2	22.3	24.0	23.1	19.4

其中阿都乡土壤肥力质量等级最低, 为 IV 级, IFI 介于 0.34~0.58。务德镇和热水镇土壤肥力质量等级为 III 级, IFI 均值分别为 0.55 和 0.56。得禄乡、普立乡、杨柳镇、双河乡、板桥街道土壤肥力综合评价等级为 I 级, 其中得禄乡 IFI 均值最高, 为 0.78; 得禄乡 I 级、II 级和 III 级占比分别为 71.79%、25.64% 和 2.56%, 无 IV 级、V 级。其余地点土壤肥力综合评价等级为 II 级, 平均占比为 24.68%。

宣威烟区各乡镇土壤肥力综合指数 IFI 的变异系数存在较大差异, 得禄乡最低, 为 14.03%; 倘塘镇最高, 为 27.76%, 比得禄乡高 98%。各乡镇 IFI 的平均变异系数为 21.83%, 其中低于 20% 的占比约为 29%。

2.3 土壤肥力质量变异因素分析

土壤肥力质量作为土壤管理的重要指标, 受土壤肥力指标的影响。对土壤肥力评价指标的变异系数值与 IFI 的变异系数进行相关性分析。由表 5 可知, 不同土壤肥力指标的变异系数与 IFI 的变异系数相关性存

表 4 宣威烟区植烟土壤 IFI 评价结果
Table 4 IFI of tobacco-planting soils in Xuanwei

乡镇	范围	均值	变异系数 CV(%)	占比(%)				
				I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
倘塘镇	0.22~0.99	0.66	27.76	47.73	20.45	4.55	18.18	9.09
田坝镇	0.40~0.81	0.69	20.87	72.73	9.09	0.00	9.09	9.09
羊场镇	0.18~0.87	0.60	21.81	22.95	22.95	40.98	6.56	6.56
格宜镇	0.41~0.92	0.69	21.06	52.00	24.00	8.00	16.00	0.00
龙场镇	0.37~0.84	0.62	21.74	38.46	15.38	30.77	7.69	7.69
海岱镇	0.29~0.86	0.60	26.79	27.27	40.91	4.55	9.09	18.18
落水镇	0.33~0.93	0.66	19.29	40.00	31.25	17.50	10.00	1.25
务德镇	0.29~0.94	0.55	27.30	21.21	12.12	25.76	28.79	12.12
龙潭镇	0.32~0.88	0.62	23.82	29.27	26.83	24.39	12.2	7.32
宝山镇	0.33~0.91	0.67	23.59	44.00	28.00	8.00	16.00	4.00
东山镇	0.35~0.95	0.64	26.25	30.77	38.46	7.69	15.38	7.69
热水镇	0.21~1.00	0.56	25.93	17.91	23.88	25.37	17.16	15.67
得禄乡	0.60~0.99	0.78	14.03	71.79	25.64	2.56	0.00	0.00
普立乡	0.62~0.77	0.70	14.72	50.00	50.00	0.00	0.00	0.00
西泽乡	0.38~0.93	0.69	16.21	48.78	31.71	14.63	2.44	2.44
杨柳镇	0.51~0.94	0.75	19.92	60.00	20.00	20.00	0.00	0.00
双河乡	0.52~0.97	0.77	23.00	66.67	16.67	16.67	0.00	0.00
乐丰乡	0.39~0.92	0.61	22.67	26.67	20.00	40.00	6.67	6.67
阿都乡	0.34~0.58	0.45	22.50	0.00	0.00	20.00	40.00	40.00
板桥街道	0.33~0.98	0.71	19.93	55.56	22.22	12.70	7.94	1.59
来宾街道	0.35~0.87	0.61	24.61	35.29	11.76	23.53	23.53	5.88

表 5 土壤肥力评价指标的变异系数与 IFI 的变异系数相关性

指标	pH	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾
相关系数	0.241	-0.135	0.024	-0.119	0.467*

注: *表示相关性达 $P < 0.05$ 显著水平。

在差别, 其中 pH、碱解氮和速效钾的变异系数与 IFI 的变异系数呈正相关, 相关系数分别为 0.241、0.024 和 0.467, 且速效钾的相关性达显著水平 ($P < 0.05$); 而有机质和有效磷的变异系数则与 IFI 的变异系数呈负相关, 相关系数分别为 -0.135 和 -0.119, 相关性不显著。

进一步探究土壤肥力指标的变异系数与 IFI 的变异系数关系, 将两者进行线性拟合, 拟合方程为 $CV_{IFI} = 0.606 \times CV_{pH} + 0.06 \times CV_{OM} - 0.109 \times CV_{AN} - 0.079 \times CV_{AP} + 0.178 \times CV_{AK} + 9.884$, 方程决定系数 $R^2 = 0.478$ ($P < 0.05$)。利用 21 个乡镇的土壤肥力指标的变异系数, 通过上述方程的拟合效果见图 3。由图 3 可知, 拟合的 IFI 变异系数与实际的 IFI 变异系数呈线性相关 ($y = 0.48x + 11.49$), 方程决定系数 $R^2 = 0.48$, 均方根误差 $RMSE = 2.73$, 标准化均方根误差 $n-RMSE = 12.37\%$, 稳定度高。

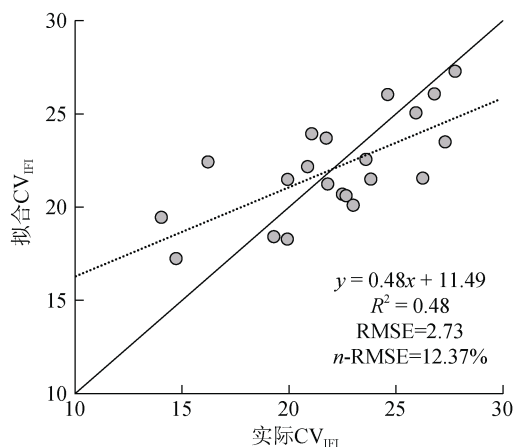


图 3 土壤肥力综合指数 (IFI) 的变异系数 (CV) 拟合

Fig. 3 Fitting of coefficient of variation of soil IFI

3 讨论

本研究基于宣威烟区 21 个乡镇取样土壤, 选取 pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾作为土壤肥力质量评价指标。pH 对烤烟烟叶的品质有明显的影 响, 通过影响土壤中矿物质的转化效率、养分吸收的有效性和烟株根系吸收活力等因素, 进而影响烟株养分的吸收和烟叶产质量^[31]。烟草适宜 pH 为 5.5~7.0,

pH 较低时, 可溶性磷易与铁、铝等结合而降低磷的有效性, pH 较高时又会导致营养元素吸收受阻, 阴离子吸收减少、养分活性降低^[32]。宣威烟区整体 pH 以弱酸性为主, pH > 7.5 (碱性土壤) 占比仅为 7%, pH < 7 (酸性土壤) 约占 78%, 其中 pH 在适宜范围内 (5.5~7.0) 占比约为 46%。有机质是土壤重要组成部分, 影响土壤结构形成、理化性质改善、保肥能力提高等, 合理控制其含量以维持土壤养分均衡, 对于提高烤烟品质和产量具有重要意义^[33]。近年来, 随着绿色农业的推广, 宣威烟区长期施用复合肥及有机肥 (如畜禽粪肥), 尤其在绿色种养循环项目中大量粪肥还田^[34], 这可能是宣威烟区土壤有机质含量较高的主要原因。本研究中宣威烟区土壤有机质含量 > 30 g/kg 的样品量约占 66%, 仅少部分土壤样品 (约 11%) 有机质含量低于 20 g/kg。氮作为植株生长不可或缺的必要元素, 参与植株体内各种生理生化活动, 从而直接影响着作物的生长发育状况^[35]。优质烟叶的生产需要合理调控氮肥施用量。碱解氮作为土壤中氮素的一种形态, 与有机质含量及熟化程度有关。本研究中, 宣威烟区土壤碱解氮含量较高, 均值为 131.86 mg/kg, 含量大于 120 mg/kg 的土壤样品约占 50%, 这可能与大量施用有机肥导致的土壤有机质积累有关。同时, 有机肥的施用也促进了土壤有效磷和速效钾的累积, 加之部分烟田采用烤烟-绿肥轮作, 进一步提升了土壤有机质与氮磷钾含量^[36], 因而宣威烟区有效磷和速效钾含量整体偏高, 均值分别为 29.64 mg/kg 和 182.49 mg/kg, 虽然数据分布不对称, 但多数地区有效磷和速效钾能满足优质烟草的生产需求。在今后的烤烟生产中, 要控制有机物料及氮素的投入或使用充分腐熟的有机肥等, 以维持适宜的有机质水平, 同时推广测土配方施肥技术, 根据不同地块土壤养分的差异, 制定个性化的施肥方案, 动态调整氮、磷、钾施用量和配比, 实现养分的均衡供应。

土壤肥力综合指数 (IFI) 作为一种评价土壤肥力的方法, 通过综合考虑多个土壤肥力指标, 能够对土壤肥力进行全面评估^[37]。本研究结果表明, 宣威烟区各乡镇土壤肥力质量普遍等级在 II 级以上, 占比为 86%; 变异系数介于 14.03%~27.76%, 平均为 21.83%, 其中变异系数低于 20% 的占比约为 29%。与之前研究^[38]相比, IFI 为 II 级以上的乡镇占比增加, 说明目前宣威烟区整体土壤质量较优, 可以为烟株生长提供良好的条件。但仍存在少数地区 IFI 在中等以下水平, 且由于宣威烟区土壤类型复杂, 涵盖 6

个土类、16 个亚类,不同乡镇的土壤速效氮磷钾含量差异显著。同时,地形与轮作制度不同导致不同乡镇之间土壤肥力质量仍存在较大差异,如阿都乡 IFI 均值仅为 0.45,而得禄乡则高达 0.78。在今后生产中,应进行分区土壤保育措施,建立乡镇级土壤监测网络,对不同土壤类型进行精准管理。

土壤肥力的变异性是评估土壤资源管理和农业生产潜力的重要方面,探讨土壤肥力变异性有助于识别土壤管理中的关键区域和潜在问题。本研究土壤肥力评价基于 5 个肥力指标,不同肥力指标的变异系数存在明显差异,不同乡镇间均表现为有效磷的变异系数最高,速效钾次之,pH 最低。土壤肥力质量作为土壤管理的重要指标,其变异性与土壤肥力指标变异性之间存在潜在关系^[39]。本研究中,不同土壤肥力指标的变异系数与 IFI 的变异系数的相关性存在差异。其中,pH、碱解氮和速效钾的变异系数与 IFI 的变异系数呈正相关,相关系数分别为 0.241、0.024 和 0.467,且速效钾的相关性达显著水平($P<0.05$);而有机质和有效磷的变异系数则与 IFI 的变异系数呈负相关,相关系数分别为 -0.135 和 -0.119,相关性不显著。土壤肥力指标的变异系数与 IFI 的变异系数函数拟合方程为 $CV_{IFI}=0.606\times CV_{pH}+0.06\times CV_{OM}-0.109\times CV_{AN}-0.079\times CV_{AP}+0.178\times CV_{AK}+9.884$ (方程决定系数 $R^2=0.478$)。拟合 IFI 的变异系数与实际 IFI 的变异系数之间呈线性相关,方程决定系数 $R^2=0.48$,均方根误差 $RMSE=2.73$,标准化均方根误差 $n-RMSE=12.37\%$,稳定度高。通过构建土壤肥力指标变异性与 IFI 变异性的关系函数,可以预测土壤肥力的变异性。该方法通过监测土壤肥力指标的变异特征来评估土壤肥力的整体变异性,从而为土壤管理和农业规划提供更精确的指导。

4 结论

1) 宣威烟区不同肥力指标的变异系数存在明显差异,有效磷的变异系数最高,速效钾次之,pH 最低;宣威烟区各乡镇土壤肥力质量等级普遍在 II 级以上。不同乡镇之间土壤肥力综合指数(IFI)存在较明显的空间差异。

2) pH、碱解氮和速效钾的变异系数与 IFI 的变异系数呈正相关,有机质和有效磷的变异系数则与 IFI 的变异系数呈负相关。通过构建土壤肥力指标的变异系数与土壤肥力质量变异系数的函数拟合方程,可实现通过土壤肥力指标的变异性评估土壤肥力质量的变异性。

参考文献:

- [1] Fitter A H, Gilligan C A, Hollingworth K, et al. Biodiversity and ecosystem function in soil[J]. *Functional Ecology*, 2005, 19(3): 369–377.
- [2] Bogunovic I, Trevisani S, Seput M, et al. Short-range and regional spatial variability of soil chemical properties in an agro-ecosystem in eastern Croatia[J]. *Catena*, 2017, 154: 50–62.
- [3] Zhao G, Mu X, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5): 499–510.
- [4] Thapa G B, Yila O M. Farmers' land management practices and status of agricultural land in the Jos Plateau, Nigeria[J]. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(3): 263–277.
- [5] Munaf M A, Mouazen A M. Development of a soil fertility index using on-line Vis-NIR spectroscopy[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 188: 106341.
- [6] Behera S K, Shukla A K. Spatial distribution of surface soil acidity, electrical conductivity, soil organic carbon content and exchangeable potassium, calcium and magnesium in some cropped acid soils of India[J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(1): 71–79.
- [7] Raiesi F, Kabiri V. Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 198–207.
- [8] Karaca S, Dengiz O, Demirağ Turan İ, et al. An assessment of pasture soils quality based on multi-indicator weighting approaches in semi-arid ecosystem[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107001.
- [9] Chaudhry H, Vasava H B, Chen S C, et al. Evaluating the soil quality index using three methods to assess soil fertility[J]. *Sensors*, 2024, 24(3): 864.
- [10] Gozukara G, Acar M, Ozlu E, et al. A soil quality index using Vis-NIR and pXRF spectra of a soil profile[J]. *Catena*, 2022, 211: 105954.
- [11] Zhang Y H, Wang L, Jiang J, et al. Application of soil quality index to determine the effects of different vegetation types on soil quality in the Yellow River Delta wetland[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 141: 109116.
- [12] 冯嘉仪, 储双双, 王婧, 等. 华南地区 5 种典型林分类型土壤肥力综合评价[J]. *华南农业大学学报*, 2018, 39(3): 73–81.
- [13] Abdelrahman MAE, Engel B, Eid MSM, et al. A new index to assess soil sustainability based on temporal changes of soil measurements using geomatics—an example from El-Sharkia, Egypt[J]. *All Earth*, 2022, 34(1): 147–166.
- [14] Khaki B D, Honarjoo N, Davatgar N, et al. Assessment of two soil fertility indexes to evaluate paddy fields for rice cultivation[J]. *Sustainability*, 2017, 9(8): 1299.
- [15] Nariyanti S, Herawati A, Herdiansyah G, et al. Soil fertility index based on altitude: A comprehensive assessment for

- the cassava development area in Indonesia[J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2022, 67(2): 158–165.
- [16] Panwar P, Pal S, Reza S K, et al. Soil fertility index, soil evaluation factor, and microbial indices under different land uses in acidic soil of humid subtropical India[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(22): 2724–2737.
- [17] 字春光, 钱颖颖, 倪明, 等. 云南南亚热带气候区植烟土壤养分空间分布特征及肥力评价[J]. *西南农业学报*, 2024, 37(10): 2252–2260.
- [18] 钱颖颖, 马翔, 夏建军, 等. 云南北中亚热带植烟区土壤养分的空间分布特征与肥力质量评价[J]. *西南农业学报*, 2024, 37(9): 2077–2085.
- [19] 黄士航, 田丰, 张莉, 等. 云南师宗烟区土壤养分与烟叶化学成分研究[J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(5): 173–180, 184.
- [20] 程晓梅, 王斐, 孙楠, 等. 云南大理烟区土壤有效磷时空变化及分区施磷策略[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(6): 1103–1111.
- [21] 杨树明, 余小芬, 邹炳礼, 等. 曲靖植烟土壤 pH 和主要养分空间变异特征及其影响因素[J]. *土壤*, 2021, 53(6): 1299–1308.
- [22] 苏欣悦, 王晋峰, 程晓梅, 等. 云南省典型县域烟田土壤肥力演变及综合评价[J]. *土壤*, 2023, 55(6): 1380–1388.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 苏德成, 中国农业科学院烟草研究所. 中国烟草栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.
- [25] 刘国顺, 腊贵晓, 李祖良, 等. 毕节地区植烟土壤有效态微量元素含量评价[J]. *中国烟草科学*, 2012, 33(3): 23–27.
- [26] 郭全忠, 党军政, 赵鹏, 等. 安康市植烟地土壤主要养分含量分布特征研究[J]. *陕西农业科学*, 2020, 66(8): 9–13, 31.
- [27] 陈江华, 刘建利, 李志宏, 等. 中国植烟土壤及烟草养分综合管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [28] 范茂攀, 周锋, 吴开贤, 等. 滇中东部典型岩溶区农田土壤肥力评价[J]. *土壤*, 2019, 51(6): 1093–1099.
- [29] 闫慧峰, 梁洪波, 许家来, 等. 山东烟叶生产典型样区土壤质量评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(6): 41–47.
- [30] 王新修, 苟剑渝, 刘京, 等. 遵义市植烟土壤肥力综合评价及空间分布[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(2): 1–9.
- [31] 李银科, 王菲, 羊波, 等. 土壤 pH 对烤烟 K326 化学成分和感官评吸质量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(6): 1334–1337.
- [32] 李念胜, 王树声. 土壤 pH 值与烤烟质量[J]. *中国烟草*, 1986, 7(2): 12–14.
- [33] 彭新辉. 土壤和气候及其互作对湖南优质烟区烤烟品质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- [34] 王瑞宝, 吴剑, 曹深岭, 等. 有机肥对云南曲靖烟区烤烟根黑腐病及产质量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(19): 141–144.
- [35] 张卫峰, 马林, 黄高强, 等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3161–3171.
- [36] 王阁, 赵园园, 韦建玉, 等. 有机肥种类及施用比例对云南洱海烟区植烟土壤氮淋失的影响[J]. *烟草科技*, 2024, 57(3): 56–64.
- [37] 郭迎新, 陈永亮, 苗琪, 等. 洱河流域植烟土壤养分时空变异特征及肥力评价[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(10): 1987–1999.
- [38] 杨森, 潘义宏, 刘云霄, 等. 宣威典型植烟区土壤养分综合评价[J]. *贵州农业科学*, 2019, 47(3): 39–44.
- [39] 葛畅, 刘慧琳, 聂超甲, 等. 土壤肥力及其影响因素的尺度效应——以北京市平谷区为例[J]. *资源科学*, 2019, 41(4): 753–765.

(责任编辑: 毛小芳)