

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.027

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. 土壤, 2023, 55(6): 1380–1388.

云南省典型县域烟田土壤肥力演变及综合评价^①

苏欣悦^{1,2}, 王晋峰^{1,2*}, 程晓梅^{1,2}, 孙楠^{3*}, 蒯雁⁴, 范志勇⁴, 徐明岗^{1,2,3}

(1 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030800; 2 山西农业大学生态环境产业技术研究院/土壤环境与养分资源山西省重点实验室, 太原 030031; 3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室/农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 北京 100081; 4 云南省烟草公司大理州公司, 云南大理 671000)

摘要: 通过数据收集和野外采样, 分析了宾川县 1982 年、2012 年、2018 年、2022 年 4 个时期烟田耕层土壤 pH 和养分含量变化, 并运用土壤综合评价法和克里格插值定量评价了土壤综合肥力指数 (IFI) 及其时空变异特征。结果表明: 近 40 年 (1982—2022 年) 来, 宾川县烟田土壤 pH (7.13 ~ 6.23) 和有机质含量 (35.30 ~ 27.71 g/kg) 呈下降趋势, 有效磷 (12.11 ~ 50.71 mg/kg) 和速效钾含量 (158.66 ~ 321.03 mg/kg) 呈上升趋势, 碱解氮含量 (119.03 ~ 117.00 mg/kg) 无显著变化。IFI (0.49 ~ 0.62) 呈上升趋势, 均值由 1982 年的 0.49 (III) 增加至 2022 年的 0.62 (II), 其中平川镇、拉乌乡、州城镇及宾居镇 IFI 增加幅度最大, 当前高肥力区域主要分布于县东北部和南部, 低肥力区域分布于西北部。此外, 主成分分析表明影响烟田土壤肥力的主要内在因素由有机质变为速效钾。经过 40 年耕种管理, 宾川县烟田肥力自西向东、自北向南逐渐增加, 但养分指标非均衡性和肥力空间不均匀性增加, 应稳定氮肥钾肥, 减少磷肥施用。
关键词: 植烟土壤; 土壤养分; 土壤 pH; 土壤综合肥力指数; 时空变异

中图分类号: S158 文献标志码: A

Changes of Soil Fertility and Comprehensive Evaluation for Tobacco Fields in Typical Counties of Yunnan Province

SU Xinyue^{1,2}, WANG Jinfeng^{1,2*}, CHENG Xiaomei^{1,2}, SUN Nan^{3*}, KUAI Yan⁴, FAN Zhiyong⁴, XU Minggang^{1,2,3}

(1 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyu, Shanxi 030800, China; 2 Institute of Eco-Environment and Industrial Technology, Shanxi Agricultural University/Shanxi Province Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Taiyuan 030031, China; 3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China/Key Laboratory of Arable Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 4 Tobacco Company of Dali Prefecture, Yunnan Tobacco Company, Dali, Yunnan 671000, China)

Abstract: Through data collection and field sampling, the changes of topsoil nutrient contents in 1982, 2012, 2018 and 2022 in tobacco fields in Binchuan County of Yunnan Province were analyzed, and soil integrated fertility index (IFI) and its spatial and temporal variation were quantitatively evaluated by using soil comprehensive evaluation method and Kriging interpolation. The results showed that in the past 40 years, soil pH (7.13–6.23) and organic matter content (35.30–27.71 g/kg) showed a decreasing trend, while the contents of Olsen-P (12.11–50.71 mg/kg) and available K (158.66–321.03 mg/kg) showed an increasing trend. No significant changes were found in alkali-hydrolyzable N content (119.03–117.00 mg/kg). Soil IFI (0.49–0.62) showed an increasing trend, with the average value increasing from 0.49 (III level) in 1982 to 0.62 (II level) in 2022, with the largest increase appeared in Pingchuan, Lawu, Zhoucheng and Binju towns. Current high fertility areas were mainly distributed in the north-east and south, while low fertility areas in the north-west. In addition, principal component analysis showed that the main internal factors affecting soil fertility changed from organic matter to available K. After 40 years of cultivation and management, soil fertility gradually increased from west to east and from north to south, but the non-equilibrium of nutrient indicators and spatial heterogeneity of soil fertility increased, and nitrogen and potassium fertilizers should be stabilized while phosphorus fertilizers should be reduced.

Key words: Tobacco planting soil; Soil nutrients; Soil pH; Soil integrated fertility index; Spatial and temporal variation

①基金项目: 云南烟草公司科技计划项目(2021530000241026)资助。

* 通讯作者(wjf202107@163.com; sunnan@caas.cn)

作者简介: 苏欣悦(2000—), 女, 山西晋中人, 硕士研究生, 研究方向为土壤肥力演变。E-mail: sxy1803713102@163.com

我国是世界烟叶生产第一大国,云南作为我国最大的烟叶生产省域,烟草种植成为其农业生产的重要组成部分,在经济发展中有着举足轻重的地位。烤烟的种植与生长离不开优质的土壤,适宜的烟田是优质烟草生产的基础,与烟草的产量品质密切相关^[1]。土壤养分是土壤肥力的核心部分,土壤 pH、有机质、氮、磷、钾含量是决定土壤肥力、农产品产量品质的重要因素^[2]。在第二次土壤普查之后,我国大部分区域土壤肥力呈上升趋势,但仍存在养分非均衡化、空间变异大等特点^[3],影响着烟叶品质的提升和区域烟田的可持续利用。基于地理信息系统探究植烟土壤养分时空变异具有管理空间资源不均匀分布的功能,可直接反映区域烟田施肥策略及耕作方式等农业制度的合理性,为不同区域烟草种植及施肥管理策略的选择提供依据。

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,是影响作物产量的重要因素^[4]。土壤肥力评价是烟田培肥管理的基础,可通过科学方法和技术手段对土壤自然环境等方面进行分析归纳,做出科学的综合评价。土壤综合肥力指数(IFI)是在对各土壤肥力指标评价后,将单因素评价结果转换为由各指标所构成的综合土壤肥力评价结果,能更好地反映植烟土壤肥力的高低^[5]。李颖慧和姜小三^[6]运用综合评价法探究山东博兴县 14 年来土壤肥力的时空变化特征,为指导土壤养分管理提供了建议。倪明等^[7]研究保山市烟田土壤养分时空变异特征,并根据土壤综合肥力指数进行综合评价,为烟区土壤养分管理提供了依据。王远鹏等^[8]运用模糊数学法对东北典型县域稻田土壤进行综合肥力评价,为合理利用土壤资源提供了依据。尽管已有众多研究运用土壤综合肥力指数全面评价了农田土壤肥力水平,但不同地区的环境条件与田间管理制度不同,导致土壤综合肥力的时空变异规律不同。目前烟田土壤肥力评价仅停留在经典数理统计层面且大多集中在短期内或一个时间段内,缺乏长期多时间段植烟土壤养分和综合肥力时空演变特征的定量评价。因此,本研究突破以往烟田土壤肥力指标的基础统计与时间尺度层面,对县域植烟土壤主要肥力指标的长期演变特征进行综合评价,为更加精准指导典型县域植烟区合理施肥策略提供理论基础。

云南省是中国重要的烤烟产区,大理州宾川县为烟草种植最适宜区之一,植烟面积较大,具有典型性。目前对宾川县植烟土壤 pH 和养分时空变化的研究较少,仅考虑了影响烤烟种植分布的关键因素^[9],未对土壤肥力指标进行定量定性分析,更缺乏对长期植烟

土壤主要肥力指标的综合评价。因此,本研究对近 40 年来宾川县植烟土壤 pH 和主要养分指标,运用主成分分析、模糊评价及地统计学方法定量分析烟田土壤主要肥力指标及综合肥力的时空演变特征,为宾川县烟田养分管理及平衡施肥提供科学依据,进而为宾川县烟田精准科学施肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宾川县位于我国云南省大理白族自治州,地处云贵高原西南部、金沙江干热河谷南岸(25°23' N ~ 26°12' N, 100°16' E ~ 100°59' E)。县域地势东西高、中部低,地形起伏大,山高坡陡,海拔在 1 104 ~ 3 320 m,属中亚热带冬干夏湿低纬高原季风气候区,年均气温 17.9 °C,年均降水量 559.4 mm,光热充足,干旱少雨。烟区土壤类型主要为黄棕壤和红壤。全县总面积 253 300 hm²,年均烤烟种植面积约 4 000 hm²,分布于 10 个乡镇,居大理州第二位^[9]。

1.2 样品采集与分析

2012 年、2018 年和 2022 年选取宾川县具有代表性的连片烟田,采用五点采样法分别采集 115、202 和 373 个烟田耕层(0 ~ 20 cm)土壤样品(图 1)。不同年份土壤样品采集虽不是原位采样,但均具有较强的代表性。样品采集综合考虑地形地貌等因素,每个取样单元采用对角线法,每条对角线均匀分布 10 个点,20 个点土样混合为 1 个土壤样品,除去杂物并充分混匀,按四分法留取土样,同时利用 GPS 记录采样点经纬度和海拔等信息。采集的土样经室内风干,磨细,过筛后保存,用于土壤理化性质的测定。土壤 pH 测定采用玻璃电极法,有机质测定采用重铬酸钾氧化-外加热法,碱解氮的测定采用碱解扩散法,有效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,土壤速效钾测定采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法^[10]。1982 年的数据来源为大理州第二次土壤普查资料,其中宾川县共计 13 个烟田耕层(0 ~ 20 cm)土壤样品。

1.3 研究方法

根据《大理州植烟土壤分析评价及应用》^[10]以及徐建明等^[11]《土壤质量指标与评价》,植烟土壤肥力指标分为 I(低)、II(较低)、III(中)、IV(较高)、V(高)5 个等级(表 1),其中 III 级为烟叶生长适宜等级^[10-11],宾川县位于大理州内,亦参考此评价体系。

为全面评价土壤养分肥力状况,引入烟田土壤综合肥力指数(Integrated fertility index, IFI)的概念,按照该值给土壤综合肥力划分等级。其中隶属度函数采

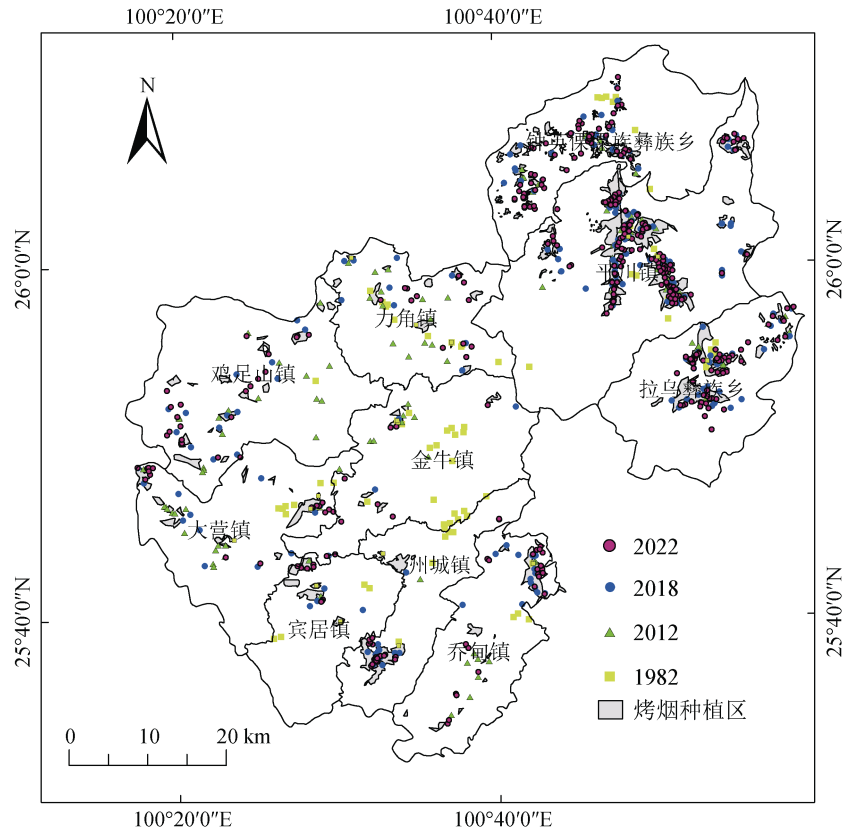


图 1 1982 年、2012 年、2018 年和 2022 年宾川县植烟土壤采样点

表 1 植烟土壤指标等级划分标准

指标	I	II	III	IV	V
pH	≤5.0	5.0 ~ 5.5	5.5 ~ 7.0	7.0 ~ 7.5	≥7.5
有机质(g/kg)	≤10	10 ~ 15	15 ~ 25	25 ~ 35	≥35
有效磷(mg/kg)	≤10	10 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 80	≥80
速效钾(mg/kg)	≤80	80 ~ 150	150 ~ 220	220 ~ 350	≥350
碱解氮(mg/kg)	≤65	65 ~ 100	100 ~ 150	150 ~ 200	≥200

用模糊评价,表示评价指标与作物效应之间的关系曲线^[12],达到原始数据标准化的作用。根据烤烟研究资料^[12]和云南省宾川县烟田实际情况,pH、有机质及碱解氮采用抛物线型隶属度函数(公式(1)),有效磷和速效钾采用 S 型隶属度函数(公式(2)),并按《大理州植烟土壤分析与评价》^[10]中隶属度函数的阈值计算,最后根据模糊数学中的加乘原则,利用各指标的权重值和隶属度值计算土壤 IFI^[12-14](公式(3))。

抛物线型隶属度函数表达式:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & b \leq x \leq c \\ 0.9(x-a)/(b-a)+0.1 & a < x < b \\ 0.9(d-x)/(d-c)+0.1 & c < x < d \\ 0.1 & x \leq a; x \geq d \end{cases} \quad (1)$$

S 型隶属度函数表达式:

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

公式(1)和(2)中阈值的相应取值如下,pH: a=5.0, b=5.5, c=6.5, d=7.0; 有机质: a=15 g/kg, b=25 g/kg, c=35 g/kg, d=65 g/kg; 碱解氮: a=65 mg/kg, b=100 mg/kg, c=150 mg/kg, d=18 mg/kg; 有效磷: a=20 mg/kg, b=50 mg/kg; 速效钾: a=50 mg/kg, d=300 mg/kg。

土壤 IFI 计算如公式:

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

式中: n 表示每个样品中土壤肥力指标的个数; N_i 和 W_i 分别为第 i 项评价指标的权重和隶属度。IFI 取

值范围为0~1,越接近于1,土壤肥力越高。根据相关文献资料分类标准,将宾川县植烟土壤肥力分为5个等级:Ⅰ级($IFI \geq 0.80$)为高,Ⅱ级($0.60 \leq IFI < 0.80$)为较高,Ⅲ级($0.40 \leq IFI < 0.60$)为中等,Ⅳ级($0.20 \leq IFI < 0.40$)为较低,Ⅴ级($IFI < 0.20$)为低^[14]。

1.4 数据处理

利用 Excel 2019 整理数据,变异系数分为弱变异(0.0%~15.0%)、中等变异(15.0%~35.0%)、强变异(>35.0%)三类^[15]。异常值剔除、描述性统计、正态性检验、单因素方差分析(one-way ANOVA)、主成分分析(PCA)均由 SPSS 26.0 软件完成。在 Minitab 19.2 中对数据进行对数或者 Box-Cox 变换,使其服从正态分布。土壤 IFI 空间分布图在 ArcGIS 10.6 的地统计分析模块(Geostatistical Analyst)中采用普通克里格插值法完成,最后运用重分类(Reclassify)计算每个等

级面积占比。

2 结果与分析

2.1 宾川县植烟土壤肥力指标的时间变化

近40年来,随烟草种植年限的增加,土壤 pH 和有机质含量呈下降趋势,有效磷和速效钾含量呈上升趋势,碱解氮含量变化不显著。从表2可以看出,除2022年 pH 外,1982—2022年的土壤 pH、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮含量均服从正态分布(K-S 检验, $P < 0.05$)。1982—2022年土壤 pH 年均下降速率为0.02个单位,其中2012—2018年下降速率最大(0.09个单位)。1982年和2012年土壤 pH 的变异系数为弱变异,2018年和2022年的变异系数为中等变异。1982—2022年土壤有机质含量年均下降速率为0.19 g/(kg·a),其中2012—2018年下降速率最大

表2 1982年、2012年、2018年和2022年宾川县植烟土壤肥力指标的描述性统计

指标	年份	样本数	均值	变异系数(%)	偏度	峰度	最小值	最大值	分布
pH	1982	13	7.13 a	12.5	-0.04	-1.45	5.93	8.50	正态
	2012	115	6.77 a	10.9	-0.39	-0.35	4.89	8.46	正态
	2018	160	6.22 b	16.1	0.14	-1.11	4.30	8.17	Box-Cox
	2022	372	6.23 b	16.9	0.00	-1.25	4.05	8.08	偏态
有机质 (g/kg)	1982	13	35.30 a	70.5	1.37	3.12	4.60	100.00	正态
	2012	115	31.33 a	44.0	0.20	-0.70	3.95	61.96	正态
	2018	192	27.00 b	48.4	0.74	0.08	3.38	64.81	对数
	2022	372	27.71 b	46.5	0.58	0.02	4.23	74.53	SQRT
有效磷 (mg/kg)	1982	11	12.11 c	132.6	2.89	8.88	1.81	58.70	对数
	2012	115	35.69 b	61.2	0.98	0.48	1.74	103.24	SQRT
	2018	201	38.82 b	81.3	1.09	0.81	0.98	141.70	SQRT
	2022	372	50.71 a	83.7	1.34	1.32	0.48	193.54	Box-Cox
速效钾 (mg/kg)	1982	13	158.66 c	61.8	0.70	-0.85	37.50	330.20	对数
	2012	115	182.60 c	41.0	0.29	-0.75	51.78	348.56	SQRT
	2018	202	236.80 b	66.1	1.78	5.29	29.38	1090.93	对数
	2022	372	321.03 a	55.0	1.20	1.87	23.75	1088.00	SQRT
碱解氮 (mg/kg)	1982	13	119.03 a	60.5	0.48	-0.25	19.28	255.10	正态
	2012	114	128.99 a	36.0	0.25	-0.69	40.27	237.14	正态
	2018	202	116.28 a	42.3	0.70	-0.07	27.35	269.68	对数
	2022	372	117.00 a	45.9	0.73	0.09	21.60	279.00	SQRT

注:同列不同小写字母表示同一指标不同年份间差异显著($P < 0.05$);下同。

(0.72 g/(kg·a))。1982—2022 年土壤有效磷含量呈上升趋势, 年均增加速率为 0.97 mg/(kg·a), 4 个年份变异系数均属强变异, 其中 1982 年变异性最强 (132.6%)。1982—2022 年土壤速效钾含量年均增加速率为 4.1 mg/(kg·a), 其中 2018—2022 年土壤速效钾含量年均增加速率最大 (21 mg/(kg·a))。土壤碱解氮含量在 4 个年份间均无显著差异。

由不同时期各土壤肥力指标等级分布(图 2)可以看出, 土壤 pH 在 4 个时期 III 级占比均最高, 整体适合烟草生长。1982 年和 2012 年土壤有机质

V 级占比最大, 分别为 38.5% 和 40.0%; 2018 年和 2022 年 V 级占比分别下降至 21.9% 和 26.3%, III 级占比分别增加至 32.3% 和 30.7%。1982 年有效磷 I 级占比高达 63.6%, 2012 年 III 级占比最高 (39.1%), 2018 年和 2022 年 IV 级占比均为最高 (27.4%、32.3%)。速效钾含量等级整体呈上升趋势, 1982 年占比最高为 II 级 (46.2%), 2012 年、2018 年、2022 年占比最高为 IV 级或 V 级。1982—2022 年碱解氮含量等级占比分布变化不大, III 级占比均最高。

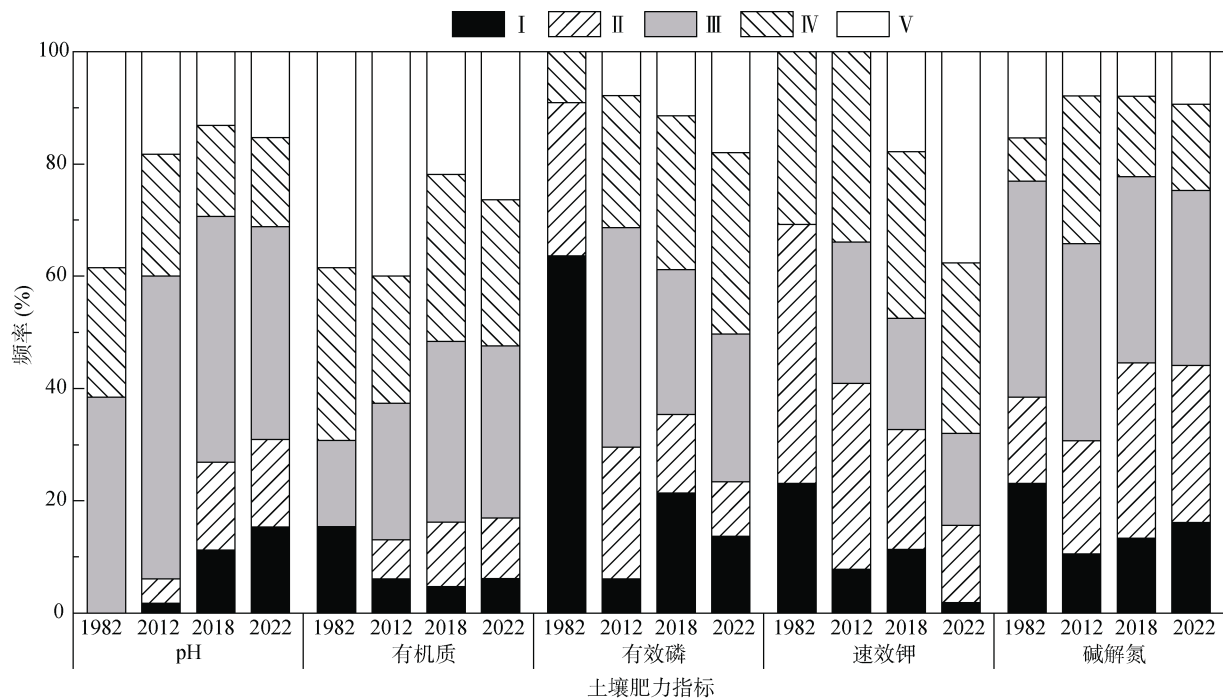


图 2 1982 年、2012 年、2018 年和 2022 年 4 个采样时期宾川县植烟土壤肥力指标等级频率分布

2.2 不同时期烟田土壤综合肥力评价

运用主成分分析法探究宾川县 1982 年、2012 年、2018 年和 2022 年 4 个时期土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾 5 个肥力指标对土壤综合肥力的影响(表 3), 并对 IFI 进行描述性统计分析(表 4)。1982 年有机质和碱解氮所占权重较大; 2012 年有效磷和速效钾所占权重较大; 2018 年和 2022 年 pH、有效磷、速效钾所占权重较大, 分别为 0.220、0.236、0.244 和 0.226、0.220、0.245, 说明 1982—2022 年影响宾川县烟田土壤肥力空间分布特征的关键因素发生变化, 由有机质、碱解氮变为有效磷和速效钾, 随后转变为 pH、有效磷和速效钾。同时 1982—2022 年近 40 年来, IFI 由 III 级 (0.49) 显著增加为 II 级 (0.62), 年均增加速率为 0.003, 土壤综合肥力指数升高。

表 3 1982 年、2012 年、2018 年和 2022 年 4 个时期宾川县植烟土壤肥力指标权重

指标	1982 年	2012 年	2018 年	2022 年
pH	0.005	0.072	0.220	0.226
有机质	0.352	0.156	0.145	0.160
碱解氮	0.350	0.181	0.155	0.149
有效磷	0.183	0.298	0.236	0.220
速效钾	0.109	0.294	0.244	0.245

2.3 植烟土壤综合肥力时空演变特征

通过 ArcGIS 地统计分析模块中的普通克里格插值法绘制土壤 IFI 分布图(图 3), 并计算各等级面积占比(表 5)。4 个时期研究区土壤综合肥力指数 IFI 普通克里格插值的模型均为指数型, 标准均方根误差

表 4 1982 年、2012 年、2018 年和 2022 年 4 个时期宾川县植烟土壤综合肥力指数描述性统计

年份	IFI	标准差	最小值	最大值	变异系数(%)
1982	0.49 b	0.25	0.11	0.83	52.0
2012	0.55 b	0.19	0.14	0.94	35.0
2018	0.54 b	0.22	0.09	1.00	39.7
2022	0.62 a	0.22	0.10	1.00	35.3

分别为 0.97、0.95、1.04、1.07，该值越接近于 1，表明普通克里格插值结果的精度越高，对于各指标的空间预测效果越好。1982 年宾川县植烟土壤 IFI 为 0.49，III 级面积占比最大(59.4%)，IV 级次之(40.6%)，且 IV 级主要分布在拉乌彝族乡、州城镇、钟英傣傣族彝族乡西部以及宾居镇北部。2012 年 IFI 为 0.55，II 级面积占比为 39.8%，主要分布在平川镇中部、拉乌彝族乡中部以及鸡足山镇东北部，处于 III 级和 IV

级的面积占比分别为 49.6% 和 10.4%，仅有 0.2% 面积的烟田 IFI 处于 V 级，且集中分布在钟英傣傣族彝族乡。2018 年 IFI 为 0.54，III 级面积占比最大(64.8%)，其次为 II 级(25.6%)，且 II 级主要分布在平川镇中部和东北部、宾居镇中部以及州城镇西南部。2022 年 IFI 为 0.62，II 级面积占比最大(60.0%)，III 级次之(33.9%)，且 III 级集中分布在鸡足山镇西南部、大营镇、力角镇、乔甸镇中部及拉乌彝族乡中部；I 级面积占比增加为 1.3%，集中在州城镇西南部和平川镇东北部。1982—2022 年近 40 年来，宾川县植烟土壤肥力不断提高，平川镇、拉乌彝族乡、州城镇以及宾居镇植烟土壤 IFI 增加幅度最大，提高了两个肥力等级。到 2022 年，植烟土壤肥力处于 II 级以上的面积占比由 1982 年的 0% 提高到 61.3%，说明高肥力土壤占比增大，有利于烟草高产以及优质烟草的生产。因此，应合理调整施肥结构，进一步提高当前烟田肥力水平。

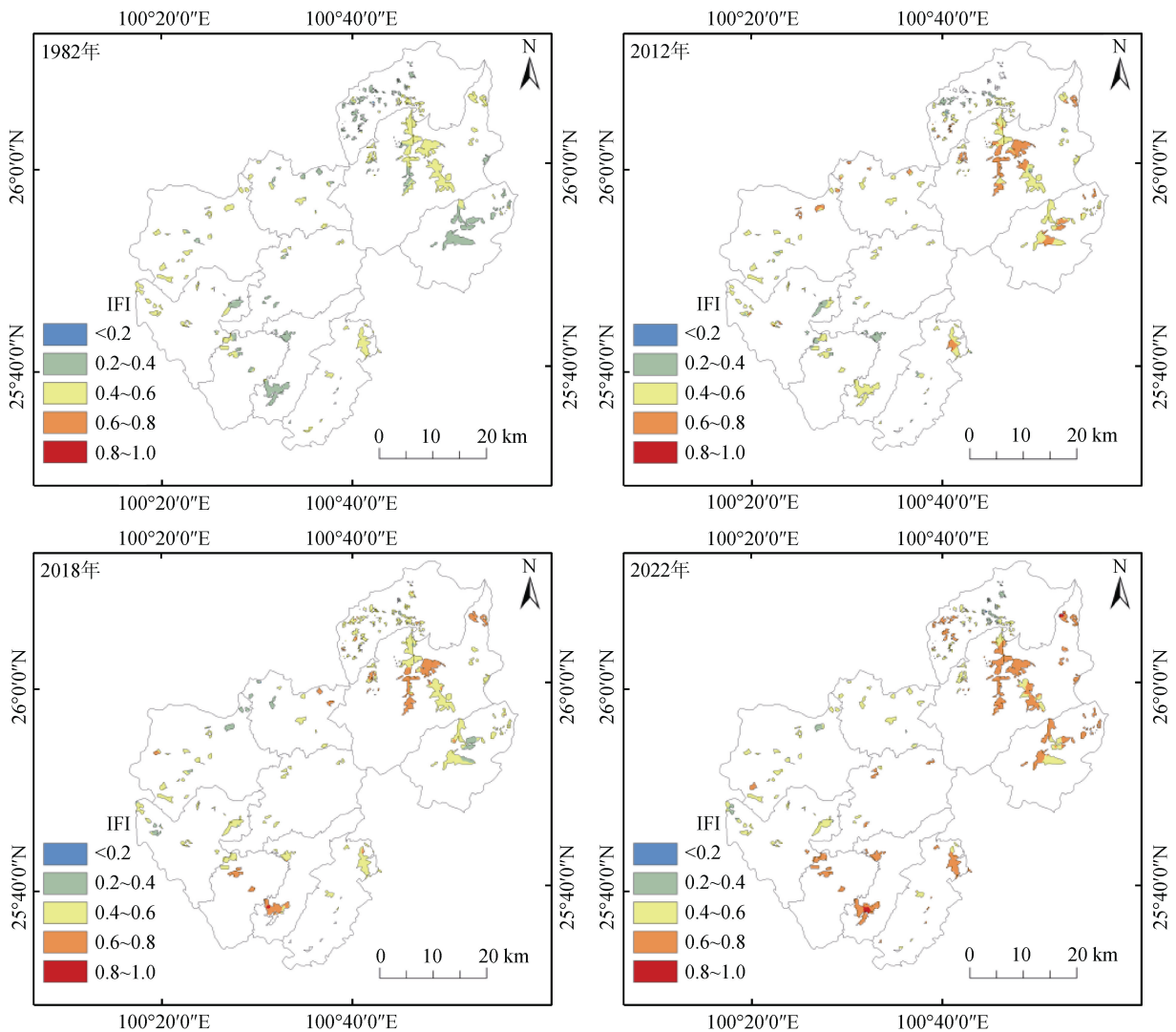


图 3 1982 年、2012 年、2018 年和 2022 年宾川县植烟土壤综合肥力指数空间分布图

表 5 1982 年、2012 年、2018 年和 2022 年 4 个时期宾川县植烟土壤综合肥力等级面积占比(%)

土壤综合肥力等级	1982 年	2012 年	2018 年	2022 年
I	0.0	0.0	0.2	1.3
II	0.0	39.8	25.6	60.0
III	59.4	49.6	64.8	33.9
IV	40.6	10.4	9.3	4.8
V	0.1	0.2	0.0	0.0

3 讨论

土壤肥力是衡量土壤提供作物生长所需各种养分的能力、影响烟叶产量的重要因素。土壤肥力评价是根据土壤各肥力指标的数量和特点对土壤肥力综合水平的评定,每种元素的丰缺程度都将影响土壤肥力水平。当前研究区植烟土壤 pH 和碱解氮含量在适宜范围,有机质、有效磷和速效钾含量处于较高水平,土壤综合肥力指数(IFI)为 II 级,表明当前植烟土壤状况总体可满足生产优质烟叶的需要。1982—2022 年土壤 pH 均值下降 0.9 个单位,但仍处于 III 级,适宜烟叶生长。张福锁团队成员在 *Science* 上报导了我国主要农田出现显著酸化现象,农田耕作 20 年, pH 平均下降了约 0.5 个单位,这可能与过度施用氮肥有关^[16],一些研究也证实了这一结果^[17]。本研究中,2022 年宾川县植烟土壤 pH 等级中 III 级占比最大(37.9%),整体适合烟叶生长,其次为 I 级和 II 级,共计 31.2%。王新中等^[18]研究也发现,2012 年前大理州植烟土壤酸碱度适中,表现偏酸性。同时,研究区土壤 pH 的变异系数相较其他指标最小,表明宾川县植烟土壤 pH 呈弱空间变异性。因此,针对土壤偏酸性地区,如平川镇、钟英傣族彝族乡及拉乌彝族乡可施用适量石灰,但要注意配合农家肥施用,这样既能提高土壤 pH,还能保持土壤肥力,而对于酸化并不严重区域,可适量施用碱性肥料。

宾川县植烟土壤有机质含量丰富,总体呈下降趋势。40 年间有机质平均含量下降了 7.59 g/kg,年均变化速率先增加后降低,1982 年等级占比最大的为 V 级(38.5%),2022 年占比最大的为 III 级(30.7%),且 IV、V 级占比降为 26.1% 和 26.3%。有研究表明,外源碳投入直接决定土壤有机碳水平,影响有机质含量^[19],进而影响土壤供肥能力。20 世纪 90 年代,随着该县化肥大面积使用,烟农重视无机肥施用^[20],有机肥逐渐被忽视,导致一些环境问题发生。此外,

烟田外源碳投入量减少,土壤中有机物来源也会减少,导致有机质含量降低^[21]。Wu 等^[22]研究表明,连续酸雨可减缓有机物分解,因此酸雨减少也是近些年有机质含量下降的原因。土壤有机质是土壤稳定的关键因素,其耗损会加速土壤退化过程。因此,需重视有机肥的施用,但需关注农业废弃物带来的环境风险。

土壤碱解氮含量能反映土壤氮素供应状况和释放速率^[23]。1982—2022 年宾川县碱解氮含量无显著变化。有研究表明,烟株生长前期需吸收大量氮素^[24],但烟叶中可累积氮素较少,单季施入土壤中的氮肥淋失较快,难以被土壤吸附与保存,因此土壤碱解氮含量变化不大。40 年来,研究区植烟土壤有效磷和速效钾含量呈显著上升趋势,其中速效钾增加幅度最大(162.37 mg/kg),年均增加速率为 4.1 mg/(kg·a),等级占比最高由 1982 年 II 级(46.2%)变为 2022 年 V 级(37.6%)。肥料钾素易被土壤固定,固定率随施钾量增加而增加^[25]。烟叶是喜钾作物,钾素为烟叶品质元素,烟株对钾吸收量大,有效且充足的钾可提高烟叶品质。根据 2003 年提出的“稳糖、控氮降碱、减农药残留、增钾、留香”技术路线,烟草公司制定“控氮、稳磷、增钾”原则,在复合肥基础上增施钾肥,烟农也为提高烟叶品质,加大钾肥投入量,从而提高了土壤速效钾含量。当前土壤速效钾含量丰富,基本可以满足烤烟正常生长需要,可稳定土壤钾肥供应,调整施肥水平。增加幅度其次的为有效磷,等级占比最高由 1982 年 I 级(63.6%)变为 2022 年 IV 级(32.3%),变异系数由 1982 年的强变异(132.6%)降为中等变异,年均增加速率较快(约 1.0 mg/(kg·a)),这可能与过量施用磷肥有关。有研究表明,在一定范围内,土壤有效磷的含量随施磷量的增加而上升,烤烟磷肥当季利用率仅为约 10%^[26],化学磷肥长期投入以及种植制度差异会导致有效磷积累。同时,磷素在土壤中易发生吸附、沉积和转化作用,大部分以难溶性的化合物形式被土壤固定,较差的移动性加剧了其空间分布的差异性^[27]。过高的磷素不利于高质烟叶形成,同时会造成土壤质量下降、淋失导致水体富营养化等问题,对生态环境造成潜在威胁。因此,针对宾川县烟田氮磷钾养分资源现状和烤烟养分吸收特征,应稳氮、稳钾、减磷,维持植烟土壤氮磷钾养分协调,生产优质烟叶。这也与郭迎新等^[28]在洱海植烟土壤提出的“控氮、减磷、稳钾”总体施肥方案相似。

植烟土壤综合肥力评价可为烤烟精准施肥和提升烟叶产质量提供依据。土壤综合肥力指数 IFI 与烤烟产质量呈正相关,可代表区域内烤烟实际生

产状况^[29]。因此,IFI 较高地区可针对性降低肥料用量,引种耐肥性好的烟草品种;而 IFI 较低地区可增施有机肥改善土壤养分状况,引进肥料吸收能力好的品种。从时间尺度看,研究区 1982—2022 年 IFI 提高了 0.13,等级由 III 级(0.49)增加至 II 级(0.62),年均增加速率为 0.003。1982 年烟田分散,管理方式还未完善,经过 40 年来烟农加大对植烟土壤的养分投入以及烟田管理模式不断优化,宾川县烟田土壤肥力水平总体得到提高。当前宾川县烟田土壤肥力水平整体处于 II 级水平。大部分烟田土壤有机质、有效磷和速效钾含量达到较高水平,但土壤养分失衡问题突出。4 个时期植烟土壤肥力指标权重系数最高分别为有机质(1982 年)、有效磷(2012 年)、速效钾(2018 年)、速效钾(2022 年),表明不同时期影响土壤肥力的关键因素不同,贡献率存在较大差异,其土壤综合肥力指数 IFI 有所变化,这也与当地施肥习惯不断变化有关。从空间分布格局看,高肥力区域主要分布在县东北部和南部,也是烟草种植面积较大的区域,表明烟田质量整体较优,土壤肥力较高,可为烟株提供良好的生长发育条件,可引种耐肥性较高的烟草品种。然而高肥力土壤往往存在较大养分淋失风险,流失的营养元素会导致周边区域生态系统遭受破坏,所以如何高效利用土壤养分资源成为提升县烟田经济效益和环境效益的关键。低肥力区域集中分布在鸡足山镇北部和钟英傣族彝寨乡中部,可适时适量增加肥料用量。综合而言,宾川县植烟土壤有机质、有效磷和速效钾含量丰富,IFI 较高,因此针对县域内烟田养分分布不均衡等问题,应减少磷肥施用,提高肥料利用效率,减少养分流失的环境风险;应加强土壤改良、增施有机肥等措施,提高土壤 pH,进而提高烟叶产量和质量。

4 结论

1982—2022 年 40 年间,云南省宾川县烟田土壤 pH 和有机质含量呈下降趋势,有效磷和速效钾含量呈显著上升趋势,碱解氮含量无显著变化,土壤肥力水平明显提高,IFI 等级提升至 II 级。随时间推移,影响宾川县植烟土壤综合肥力的主要内在因素由有机质变为速效钾。当前高肥力区域主要分布于县东北部和南部,低肥力区域分布于西北部,肥力自西向东、自北向南逐渐增加。全县养分非均衡化问题凸显,有效磷含量过高,应减少磷肥,稳定氮肥钾肥,维持植烟土壤营养平衡,进一步提高烟田肥力水平。

参考文献:

- [1] 李鹏,沈笑天,别毅兵. 土壤生态与烟叶质量的关系[J]. 作物研究, 2012, 26(S1): 127-129.
- [2] Minasy B, Hong S Y, Hartemink A E, et al. Soil pH increase under paddy in South Korea between 2000 and 2012[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 221: 205-213.
- [3] Tian K, Zhang B E, Zhang H D, et al. Evaluation of soil quality in major grain-producing region of the North China Plain: Integrating minimum data set and established critical limits[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106613.
- [4] 黄晶,韩天富,申哲,等. 基于模糊数学(Fuzzy)法的中国水稻土肥力质量近 30 年的时空变化特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 355-366.
- [5] 董佳琦,张勇,傅伟军,等. 香榧主产区林地土壤养分空间异质性及其肥力评价[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2292-2304.
- [6] 李颖慧,姜小三. 黄淮海平原农区农用地土壤肥力评价及时空变化特征——以山东省博兴县为例[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 602-612.
- [7] 倪明,濮永瑜,何翔,等. 保山市植烟土壤养分时空变异特征及土壤肥力适宜性评价[J]. 西南农业学报, 2020, 33(10): 2303-2309.
- [8] 王远鹏,黄晶,柳开楼,等. 东北典型县域稻田土壤肥力评价及其空间变异[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 256-266.
- [9] 张浩然,周冀衡,樊在斗,等. 基于主成分回归的烤烟种植分布影响因素分析——以云南大理宾川县为例[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2009, 10(3): 26-30, 58.
- [10] 大理州烟草专卖局(公司). 大理州植烟土壤分析与评价[M]. 昆明: 云南人民出版社, 2014.
- [11] 徐建明,张甘霖,谢正苗. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] 王远鹏,黄晶,孙钰翔,等. 近 35 年红壤稻区土壤肥力时空演变特征——以进贤县为例[J]. 中国农业科学, 2020, 53(16): 3294-3306.
- [13] 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.
- [14] 黄俊杰,李世琛,杨德海,等. 大理红塔植烟基地土壤肥力综合评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(1): 125-133.
- [15] 管孝艳,王少丽,高占义,等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 198-206.
- [16] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant Acidification in Major Chinese Croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [17] 胡敏,向永生,张智,等. 恩施州耕地土壤 pH 近 30 年变化特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1289-1297.
- [18] 王新中,樊在斗,李再光,等. 大理烟区不同类型植烟土壤养分状况分析[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(6): 54-58.

- [19] 张启明, 陈仁霄, 管成伟, 等. 不同有机物料对土壤改良和烤烟产质量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(5): 929-933.
- [20] 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.
- [21] 张恒, 黄莺, 刘明宏, 等. 基于空间插值法的遵义烟区植烟土壤养分时空变化[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(3): 36-43.
- [22] Wu J P, Liang G H, Hui D F, et al. Prolonged acid rain facilitates soil organic carbon accumulation in a mature forest in Southern China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 544: 94-102.
- [23] 邓小华, 张瑶, 田峰, 等. 湘西植烟土壤 pH 和主要养分特征及其相互关系[J]. 土壤, 2017, 49(1): 49-56.
- [24] 潘义宏, 王涛, 张晓龙, 等. 植烟土壤化学性状对烟草质量影响的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(19): 10105-10108.
- [25] 王治伟, 朱列书, 谭智勇, 等. 钾肥用量及施用方法对烟叶钾含量的影响[J]. 湖南农业科学, 2015(9): 48-50.
- [26] 李洪斌, 张杨珠, 胡日生, 等. 湘中南地区烟稻轮作条件下烟草作物的施肥效应与肥料效应函数研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(24): 74-84.
- [27] 黄鹤, 朱列书. 烟草磷素营养及提高磷素利用率研究进展[J]. 湖南农业科学, 2013(11): 54-57.
- [28] 郭迎新, 陈永亮, 苗琪, 等. 洱海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.
- [29] 吴杰, 李向鹏, 陈鑫, 等. 重庆市涪陵区植烟土壤养分的适宜性评价及变异分析[J]. 土壤, 2020, 52(1): 106-112.