

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.019

代先强, 周嵘, 周鑫斌, 等. 重庆市植烟土壤质量评价指标体系的构建与应用. 土壤, 2024, 56(2): 388–397.

重庆市植烟土壤质量评价指标体系的构建与应用^①

代先强¹, 周嵘², 周鑫斌², 冉茂^{1*}

(1 中国烟草总公司重庆市公司烟叶分公司, 重庆 400023; 2 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 为准确评价重庆市烟区土壤质量, 以重庆 2 513 个代表性植烟单元(每个单元面积约 6.7 hm²)的典型烟田土壤理化指标数据为基础, 采用聚类分析法和主成分分析法建立了土壤质量评价最小数据集, 构建了植烟土壤质量评价指标体系。结果表明: ①基于主成分分析法建立的土壤质量评价体系更适合重庆烟区土壤质量评价, 评价指标从原来的 16 个减为 7 个, 具体为: pH、有机质、有效磷、有效铁、有效锌、有效硫和水稳性大团聚体。②烟区土壤酸化较为严重, 有 35.1% 的烟田土壤偏酸; 土壤氮素较为适宜, 而有效磷和速效钾偏高的烟田占比分别为 62.9% 和 75.8%, 其他元素缺乏和过量并存, 水稳性大团聚体偏低的烟田占比 47.2%。③对基于最小数据集构建模型进行的合理性验证发现, 基于主成分分析法确定的最小数据集(MDS-PCA)模型的 R^2 比基于聚类分析法确定的最小数据集模型的 R^2 高, 前者的 MAE、RMSE 相比后者更小, 说明 MDS-PCA 能够替代全量数据集对烟田土壤质量进行评价; 基于 MDS-PCA 得到的土壤质量指数平均值为 0.61, 表明烟区土壤质量总体处于中等偏低水平, 45.04% 的烟田土壤质量急需提升。④土壤质量评价指标隶属度值雷达图表明, pH、有效磷、有效铁、有效硫和水稳性大团聚体的隶属度比较小, 为烟区土壤质量限制性因子。

关键词: 植烟土壤; 质量评价; 聚类分析; 主成分分析; 最小数据集

中图分类号: S158.5 **文献标志码:** A

Construction and Application of Soil Quality Evaluation Index System for Tobacco Planting in Chongqing

DAI Xianqiang¹, ZHOU Rong², ZHOU Xinbin², RAN Mao^{1*}

(1 Tobacco Branch Company, Chongqing Tobacco Company of China National Tobacco Corporation, Chongqing 400023, China; 2 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: In order to accurately assess soil quality in tobacco-growing areas of Chongqing, the data on soil physicochemical indicators from 2 513 representative tobacco-growing units (with an average area of approximately 6.7 hm²) in Chongqing were used and analyzed with cluster analysis(CA) and principal component analysis(PCA), a minimum data set(MDS) for soil quality evaluation was established, and an evaluation index system was constructed for tobacco-growing soil quality. The results showed that: 1) The evaluation system based on principal component analysis was more suitable for assessing soil quality in Chongqing's tobacco-growing areas, which reduced the evaluation indicators from the original 16 to 7, including pH, organic matter, available phosphorus, available iron, available zinc, available sulfur, and water-stable macroaggregates. 2) Significant soil acidification was observed in the tobacco-growing areas (35.1% of tobacco-planting fields exhibited acidification); Soil nitrogen were adequate, whereas 62.9% and 75.8% of tobacco-planting fields were excess in available phosphorus and potassium, respectively; Deficiencies and excesses were coexisted in other elements, and 47.2% of tobacco-planting fields was at low level of water-stable macroaggregates. 3) Reasonableness validation found that R^2 of the model based on MDS-PCA was higher than that of the model based on MDS-CA, MAE and RMSE of the former were smaller than those of the latter, which indicate that MDS-PCA could replace total data set in the evaluation of tobacco-planting soils. Based on the MDS-PCA, the mean value of soil quality index was calculated to be 0.61, indicating soil quality in the tobacco area was at a moderately low level in general, with 45.04% of tobacco-planting fields in urgent need of quality improvement. 4) The radar chart of membership values for soil quality evaluation indicators showed that pH, available phosphorus, available iron, available sulfur, and water-stable macroaggregates exhibited

①基金项目: 中国烟草总公司重庆市公司科技项目(B20221NY1314)资助。

* 通讯作者(zxbissas@swu.edu.cn)

作者简介: 代先强(1969—), 男, 重庆涪陵人, 硕士, 高级农艺师, 主要研究方向为土壤改良。E-mail:15923269351@163.com

relatively low membership values and were considered limiting factors for tobacco-growing soil.

Key words: Tobacco-planted soil; Quality assessment; Cluster analysis; Principal component analysis; Minimum data set

土壤是烟叶生产的基础,优良的土壤质量和适宜的生态环境等是生产优质绿色烟叶的基础^[1]。重庆是我国的优质烟叶产区,属于我国武陵秦巴生态区,烤烟种植面积 2.7 万 hm^2 , 并以其独特的醇甜香气^[2]深受各大卷烟厂的青睐。但重庆烟田多处于山区,由于耕地资源匮乏,多数烟田被迫轮作数十年以上,加之烟田长期过量施用化肥等不合理农事活动,导致烟田土壤质量呈降低趋势,一定程度上制约了优质烟叶的生产和重庆烟草的可持续发展^[3],提高土壤质量成为提升烟草产质量的关键。土壤质量指土壤在生态系统中维持或改善植物生产力、水和空气质量并支持人类健康和生活的能力^[4]。烟田土壤质量的好坏可通过土壤质量评价得知,如何准确评价烟田土壤质量,关系到烟叶质量进一步提高和可持续生产。植烟土壤质量评价一直是国内烟草行业的关注点之一,在这方面已开展了很多的研究,如中国知网 CNKI(<https://www.cnki.net/>)上检索出的时间跨度为 1997—2023 年的相关文献可达 270 余篇。近两年来的报道主要包括邹天祥等^[5]对广西富川县植烟土壤综合肥力的评价,张建东等^[6]对陕西旬阳市植烟土壤主要肥力指标特征及适宜性的评价,周旭东等^[7]对丽江金沙江流域植烟土壤肥力适宜性评价及养分时空变异的评价,罗辉等^[8]对四川古蔺烟区土壤肥力的评价,李倩等^[9]对河南南阳植烟土壤的肥力评价,郭迎新等^[10]对云南洱海植烟土壤肥力的定量评价,李政昊等^[11]对辽宁省铁岭植烟土壤质量的评价等。但当前植烟土壤质量涉及的大尺度研究较少,同时评价指标相对缺乏,不能很好地指导烤烟实际生产。为此,本研究以 2021 年重庆烟区 2 513 个代表性植烟单元为研究对象,通过建立土壤质量最小数据集综合评价体系,结合地统计学及 GIS 技术,对大尺度条件下土壤质量的时空变异特征和区域分布格局进行了探究,同时对烟区土壤质量进行了定量评价,旨在为重庆烟区土壤改良和促进烟草产业的可持续发展提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆烟区地处我国内陆西南部、长江上游地区,地跨 $105^{\circ}11'E \sim 110^{\circ}11'E$ 、 $28^{\circ}10'N \sim 32^{\circ}13'N$ 的青藏高原与长江中下游平原的过渡地带,属于我国长江

中上游烟草种植区。该区气候属亚热带季风性湿润气候,冬暖夏热、无霜期长、雨量充沛、湿润多阴、雨热同季,常年降水量 1 000~1 400 mm,是我国中间香型烟叶的主产地,植烟土壤类型主要有黄壤、黄棕壤、石灰土、紫色土等。图 1 为重庆烟区典型烟田位置。

1.2 土壤样品采集

2021 年 11 月—2022 年 1 月在重庆烟区东南部和东北部两个烤烟种植区,包括彭水、黔江、丰都、石柱、酉阳、奉节、涪陵、万州、巫山、巫溪和武隆 11 个县(区),依据气候、成土母质、地形、土壤类型、轮作制度和烟田常年产质量等因素,划定 2 513 个典型植烟单元,每个单元面积约 6.7 hm^2 ,在每个单元内确定了 1 个典型烟田,随机 8 点采集耕层(0~20 cm)土样,充分混匀后留取 1.5 kg 装入样品盒中带回实验室,并在阴凉处自然风干,研磨过筛后备测土壤基本理化性质。

1.3 土壤理化性质测定

16 项土壤理化指标测定的方法分别为:有机质,重铬酸钾容量法-外加热法; pH, 土水质量比为 1:2.5 浸提-电位法; 全氮,半微量凯氏定氮法; 水解性氮,碱解扩散法; 有效磷,碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法; 速效钾, $1 \text{ mol/L NH}_4\text{Ac}$ 提取-火焰光度法; 水稳性大团聚体,湿筛法; 有效钼,催化极谱法; 有效硼,姜黄素比色法; 阳离子交换量,乙酸铵交换法; 有效铁、锰、铜和锌, HCl 浸提-原子吸收分光光度法; 水溶性氯,硝酸银滴定法; 有效硫,磷酸盐浸提-硫酸钡比浊法^[12]。

1.4 土壤质量评价方法

1.4.1 全量数据集(TDS)与最小数据集(MDS)的构建 将 16 个土壤评价指标标准化处理后采用皮尔逊法进行聚类分析(CA),选出具有代表性的指标,并参考金慧芳等^[13]和田英等^[14]的方法,将相关性较低的指标也纳入最小数据集中,得到聚类分析最小数据集(MDS-CA)。在本研究中,因为重庆地区区域跨度较大,导致部分土壤指标具有较大的变异性,因此在确定最小数据集时,相关系数 $r > 0.3$ 即认为高度相关^[15]。

数据标准化公式为:

$$X_{cd} = \frac{Y_{cd} - Y_d}{S_d} \quad (1)$$

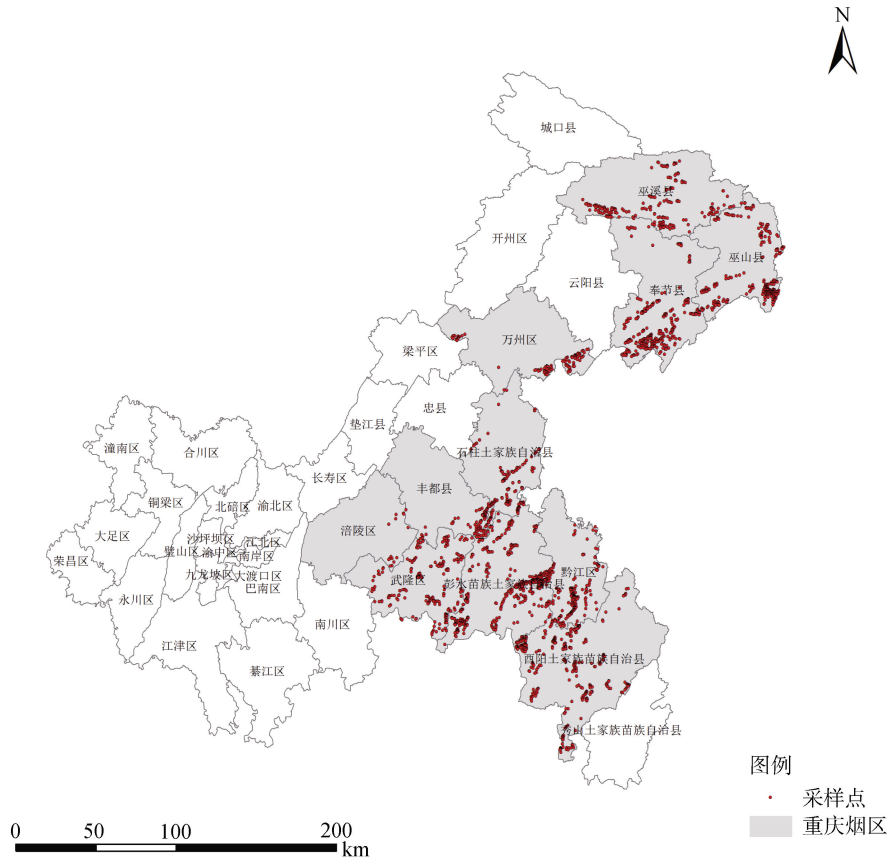


图 1 重庆烟区典型烟田位置

Fig. 1 Sites of typical tobacco-planting fields in Chongqing

式中： X_{cd} 为各评价指标标准化值； Y_{cd} 为初始评价指标； Y_d 为第 d 评价指标数据的平均值； S_d 为第 d 评价指标数据的标准差。

将 16 个土壤评价指标标准化处理后进行主成分分析(PCA)，选取特征值 ≥ 1 的主成分，并将载荷 ≥ 0.5 的指标划分为一组。载荷在不同主成分中均 ≥ 0.5 的指标需进行相关性分析，并并入与其他指标相关度较低的一组；若评价指标在各主成分上的载荷均小于 0.5，则将其划分到载荷最高的一组。计算各组指标的 Norm 值，从每组中选取 Norm 值在该组最大值的 10% 范围内的指标，并比较相关系数和 Norm 值，选择 Norm 值最高的指标进入最小数据集^[16]。这样主成分分析最小数据集(MDS-PCA)便构建完成。

Norm 值计算公式如下：

$$N_{nm} = \sqrt{\sum_{n=1}^m (u_{nm}^2 \cdot \lambda_m)} \quad (2)$$

式中： N_{nm} 为第 n 个指标在特征值 ≥ 1 的前 m 个主成分上的综合载荷； u_{nm} 为第 n 个指标在第 m 个主成分上的载荷； λ_m 为第 m 个主成分的特征值。

1.4.2 土壤质量评分方程的构建 当土壤质量评价指标确定后,使用 S 型和抛物线型隶属函数将各个评价指标转换为 0 ~ 1 之间的值。根据前人烟田土壤质量评价相关文献^[9-11,17-18]，明确重庆烟区土壤质量评价指标的隶属函数、上下限和最优上下限，详见表 1。

1.4.3 土壤评价指标权重的确定 土壤评价指标权重可反映不同评价指标在土壤肥力状况评价中的相对重要性,合理的指标权重将直接影响土壤质量评价结果的准确性。目前,确定权重的方法主要包括主观方法和客观方法。本研究采用主成分分析法作为客观方法之一来确定权重,以避免主观因素的影响。不同指标权重主要通过主成分分析获得,首先提取评价指标的公因子方差,然后将各个指标的公因子方差与所有指标公因子方差之和的比值作为各个数据集的权重。计算公式如下：

$$W_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

式中： W_i 为第 i 个评价指标的权重； C_i 为第 i 个评价指标的公因子方差； n 为评价指标个数。

表 1 土壤评价指标隶属函数类型及阈值
Table 1 Membership function types and thresholds of soil evaluation indexes

评价指标	隶属函数类型	隶属函数	下限 a	最优值 b	最优值 c	上限 d
pH	抛物线型	$f(x) = \begin{cases} 1.0, b \leq x \leq c \\ \frac{x-a}{b-a} \times 0.9 + 0.1, a < x < b \\ \frac{d-x}{d-c} \times 0.9 + 0.1, c < x < d \\ 0.1, x \leq a, x \geq d \end{cases}$	5	5.5	7	7.5
有机质(g/kg)	抛物线型		10	20	30	40
全氮(g/kg)	抛物线型		0.5	1	2	2.5
水解性氮(mg/kg)	抛物线型		65	100	180	240
阳离子交换量(cmol/kg)	抛物线型	$f(x) = \begin{cases} 1.0, x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a} \times 0.9 + 0.1, a < x < d \\ 0.1, x \leq a \end{cases}$	5	10	20	30
水溶性氯(mg/kg)	抛物线型		5	10	30	40
有效硫(mg/kg)	抛物线型		10	15	30	50
有效磷(mg/kg)	S 型		15			40
速效钾(mg/kg)	S 型		150			350
有效铁(mg/kg)	S 型		7			15
有效锰(mg/kg)	S 型		7			15
有效铜(mg/kg)	S 型		0.5			2
有效锌(mg/kg)	S 型		1			3
有效硼(mg/kg)	S 型		0.3			1
有效钼(mg/kg)	S 型		0.1			0.3
水稳性大团聚体(%)	S 型		40			60

注：表中公式中 $f(x)$ 为评价指标隶属度值； x 为评价指标实际检测值； a 为隶属函数下限值； b 、 c 为隶属函数最优值； d 为隶属函数上限值。

1.4.4 土壤质量指数的计算 分别对 TDS、MDS-CA 和 MDS-PCA 中的指标做主成分分析,得到各个指标的权重,然后将其与隶属度相结合,从而得到不同数据集的土壤质量指数(SQI),计算方程^[19]如下:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot N_i \quad (4)$$

式中: W_i 为第 i 个评价指标权重; N_i 为第 i 个评价指标隶属度值; n 为评价指标个数。

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 进行数据处理、聚类分析、相关性分析与主成分分析,使用 ArcGIS 9.5 进行普通克里格空间插值绘制土壤质量分级空间分布图^[20],通过交叉验证法(Cross Validate)进行插值结果检验,并以此评价普通克里格法对土壤质量分级空间解析力的差异和适用性,随机选取 80% 的质量指数作为训练集,剩余作为验证集,根据模型预测结果,计算验证点处数值与预测值之间的平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)及预测拟合优度(R^2)^[21]。其余图表均采用 Origin 2022 和 Excel 2019 完成。

2 结果与分析

2.1 土壤质量评价指标特征

由表 2 可知,重庆烟区土壤酸化较为严重,有

35.1% 的烟田土壤偏酸;氮素适宜的烟田占比较高,而有效磷和速效钾偏高的烟田分别为 62.9% 和 75.8%,其他元素缺乏和过量并存;水稳性大团聚体偏低的烟田占比 47.2%,说明有将近一半的土壤保水保肥性弱,需改良。

2.2 土壤质量评价指标最小数据集的建立

2.2.1 MDS-CA 的构建 基于聚类分析将全量数据集(TDS)中的 16 个土壤评价指标进行分类,分类结果如图 2 所示。当聚类距离为 0.77 时,将 TDS 分为 7 组,并进行各组指标的相关性分析,最终确定 pH、有机质、阳离子交换量、有效铁、有效硼、有效钼、水溶性氯和水稳性大团聚体共 8 个指标进入最小数据集。基于主成分分析法得到指标权重如表 3 所示。

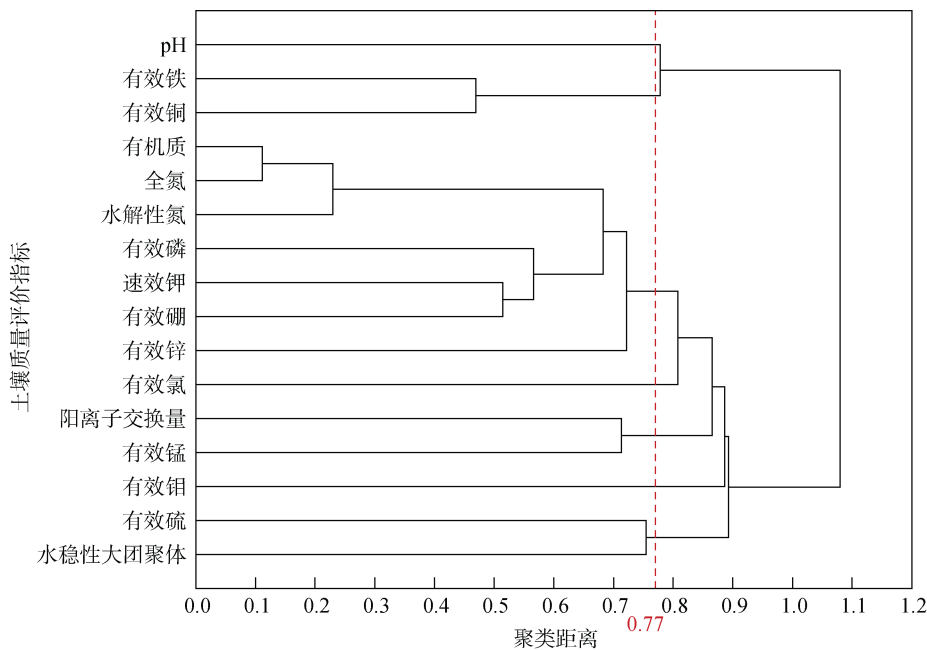
2.2.2 MDS-PCA 的构建 根据指标间的相关性和 Norm 值(表 4),最终确定 pH、有机质、有效磷、有效铁、有效锌、有效硫和水稳性大团聚体共 7 个指标进入最小数据集,最小数据集指标权重如表 5 所示。

2.3 最小数据集的合理性验证

验证最小数据集评价指标体系的合理性是耕层土壤质量评价中的重要步骤。将 16 个土壤质量评价指标数据标准化后进行聚类分析和主成分分析,分别计算全量数据集(TDS)、聚类分析最小数据集(MDS-

表 2 基于土壤质量评价指标分级的烟田占比
Table 2 Percentages of tobacco-planting fields based on soil quality assessment index grades

评价指标	养分适宜 范围	各指标分级占比(%)				
		极低	较低	适宜	较高	极高
pH	5.5 ~ 6.5	13.1	22.0	31.3	21.7	11.9
有机质(g/kg)	20 ~ 30	0.6	23.6	59.5	14.6	1.7
全氮(g/kg)	1 ~ 2	0.0	6.8	84.2	7.4	1.6
水解性氮(mg/kg)	100 ~ 180	1.9	14.7	71.5	10.7	1.2
有效磷(mg/kg)	15 ~ 30	5.2	6.9	25.0	14.4	48.5
速效钾(mg/kg)	150 ~ 220	1.3	8.2	14.7	28.0	47.8
阳离子交换量(cmol/kg)	10 ~ 20	0.0	1.6	74.5	22.8	1.1
有效铁(mg/kg)	4.5 ~ 10	15.6	15.3	23.6	39.4	6.1
有效锰(mg/kg)	10 ~ 20	2.2	4.8	15.1	17.4	60.5
有效铜(mg/kg)	0.5 ~ 1.0	3.1	24.4	40.4	30.2	1.9
有效锌(mg/kg)	1 ~ 2	1.7	6.4	19.7	33.9	38.3
有效硼(mg/kg)	0.3 ~ 0.6	2.1	13.0	39.0	34.0	11.9
有效钼(mg/kg)	0.15 ~ 0.2	4.9	5.5	12.7	30.6	46.3
水溶性氯(mg/kg)	10 ~ 30	12.1	25.7	57.6	3.3	1.3
有效硫(mg/kg)	16 ~ 30	4.9	7.4	18.1	31.9	37.7
水稳性大团聚体(%)	50 ~ 60	15.7	31.5	41.7	8.9	2.2



(图中虚线表示聚类分析时的聚类距离 0.77)

图 2 烟田土壤质量评价指标聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of soil quality assessment indexes in tobacco-planting fields

CA)和主成分分析最小数据集(MDS-PCA)的土壤质量指数(SQI)。通过计算不同数据集土壤质量指数发现, MDS-PCA 的 SQI 较 MDS-CA 变化幅度、均值和变异系数更接近 TDS。将 TDS 的 SQI 分别与 MDS-CA、MDS-PCA 的 SQI 作散点图(图 3), 进行回

归分析, 从拟合效果来看, TDS 的 SQI 与 MDS-CA、MDS-PCA 的 SQI 均呈显著正相关, 但 R^2 分别为 0.62 和 0.72, 后者拟合效果更优。

交叉验证结果(表 6)表明, MDS-PCA 模型 SQI 拟合度 R^2 比 MDS-CA 模型高, 可解释土壤质量的

72% 以上；MDS-PCA 模型的 MAE、RMSE 相比 MDS-CA 模型更小，说明 MDS-PCA 模型拟合度比 MDS-CA 模型拟合度好。综合考虑当地土壤质量情况，选择 MDS-PCA 替代 TDS 对烟田土壤质量进行评价。

2.4 基于最小数据集的重庆市植烟土壤质量评价

基于主成分分析最小数据集(MDS-PCA)和全量数据集(TDS)计算得到的 SQI 值范围分别为 0.17 ~ 0.96 和 0.24 ~ 0.97，平均值为 0.61 与 0.69，二者差值较小。参考李晓宁等^[22]等级划分方法，将基于最小数据集计算出的 SQI 划分为 5 个等级(表 7)：I 级(SQI ≥ 0.8)、II 级($0.7 \leq \text{SQI} < 0.8$)、III 级($0.6 \leq \text{SQI} < 0.7$)、IV 级($0.5 \leq \text{SQI} < 0.6$)和 V 级($\text{SQI} \leq 0.5$)。为深入研究土壤质量空间分布的差异性，再使用克里格插值技术绘制了土壤分级空间分布图(图 4)。由表 7 可知，SQI 变异系数范围处于 16.18% ~ 24.49%，属中度变异(一般 CV < 10% 为低度变异，10% ~ 100% 为中度变异， $\geq 100\%$ 为高度变异)。在 11 个区县中，石柱烟区土壤质量较好等级(I 级和 II 级)占比较高，为 44.62%；

涪陵烟区土壤质量较差等级(IV 级和 V 级)占比较高，为 93.33%。由图 4 可知，III 级土壤分布连续性较好，主要分布在渝东南地区的黔江区、彭水县和丰都县；I 级和 II 级主要以斑块状分布在渝东南烟区，其中 I 级占比最低。重庆烟区土壤质量较差等级占比为 45.04%，主要呈块状分布在渝东北地区及渝东南的涪陵区和武隆县，急需改良。

表 3 聚类分析最小数据集评价指标权重值
Table 3 Weight values of soil quality assessment indexes in minimum data set based on cluster analysis

评价指标	初始	公因子方差	权重
pH	1	0.64	0.15
有机质	1	0.66	0.16
阳离子交换量	1	0.68	0.16
有效铁	1	0.34	0.08
有效硼	1	0.47	0.11
有效铝	1	0.24	0.06
水溶性氯	1	0.70	0.17
水稳性大团聚体	1	0.48	0.11

表 4 烟田土壤质量评价指标载荷矩阵和 Norm 值
Table 4 Load matrix and Norm values of soil quality assessment indexes for tobacco-planting fields

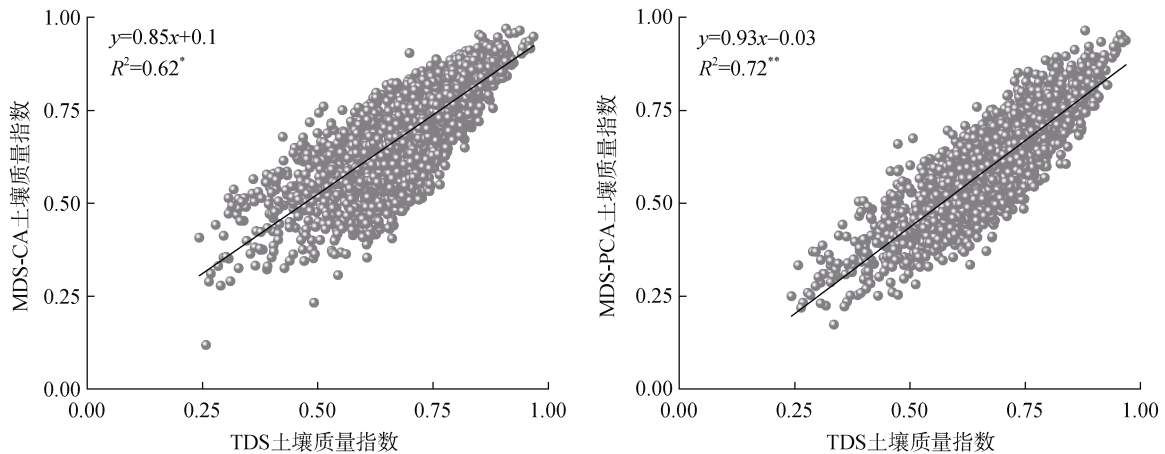
评价指标	分组	主成分					Norm 值
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	
有机质	1	0.93	0.18	-0.06	-0.04	0.03	1.66
全氮	1	0.93	0.20	0.01	-0.01	0.09	1.71
水解性氮	1	0.85	0.21	0.20	0.06	0.10	1.67
阳离子交换量	1	0.25	0.08	0.38	-0.48	-0.31	1.14
有效铝	1	0.07	0.23	0.16	0.08	0.16	0.59
水溶性氯	1	0.15	0.16	0.45	0.34	0.26	0.96
有效磷	2	0.29	0.64	0.28	0.05	-0.01	1.41
速效钾	2	0.15	0.80	-0.05	-0.14	0.03	1.33
有效硼	2	0.11	0.79	-0.02	-0.02	0.11	1.30
pH	3	-0.01	-0.05	-0.80	0.28	0.08	1.29
有效锰	3	-0.03	0.09	0.82	-0.19	0.08	1.28
有效铁	4	-0.06	0.02	-0.12	0.79	-0.11	1.13
有效铜	4	0.10	-0.01	-0.09	0.78	0.00	1.11
有效锌	5	0.15	0.48	0.38	0.14	-0.03	1.11
有效硫	5	0.01	0.32	0.03	-0.31	0.58	1.00
水稳性大团聚体	5	0.14	-0.04	0.02	0.08	0.85	1.03
主成分特征值		3.93	2.24	1.45	1.28	1.16	-
主成分方差贡献率(%)		24.55	14.02	9.07	8.01	7.22	-
主成分累积贡献率(%)		24.55	38.57	47.64	55.65	62.87	-

表 5 主成分分析最小数据集评价指标权重值
Table 5 Weight values of soil quality assessment indexes in minimum data set based on principal component analysis

评价指标	初始	公因子方差	权重
pH	1	0.65	0.15
有机质	1	0.53	0.13
有效磷	1	0.65	0.15
有效铁	1	0.56	0.13
有效锌	1	0.53	0.14
有效硫	1	0.61	0.14
水稳性大团聚体	1	0.68	0.16

3 讨论

作为西南地区重要植烟区之一,重庆烟区烟草产质量的优劣关乎着整个西南烟区烟草业的发展。然而,由于山地地貌,地形复杂,耕地匮乏,烟田超 30 年连作现象普遍,加上种养结合不够,近年来烟田土壤退化严重、土传病害频发和土壤多种障碍并发^[22],导致烟叶产质量下降,严重影响重庆市优质烟叶可持续发展。因此,定时监测和评价土壤质量尤为重要,其可及时了解土壤质量的现状和变化情况,为烟田土壤改良和精准施肥提供恰当的指导^[23]。



(*表示相关性在 $P<0.05$ 水平显著, **表示相关性在 $P<0.01$ 水平显著)

图 3 MDS 与 TDS 土壤质量指数间的相关性

Fig. 3 Correlation between MDS and TDS soil quality index

表 6 土壤质量指数的交叉验证结果
Table 6 Cross validation results of soil quality index prediction

模型种类	R^2	MAE	RMSE
MDS-CA	0.62	0.068	0.068
MDS-PCA	0.72	0.062	0.038

基于国内外通过建立最小数据集(MDS)对土壤质量评价的研究成果^[10,17,19],本研究通过对比基于 MDS 和 TDS(全量数据集)计算得到的土壤质量指数,发现基于主成分分析最小数据集(MDS-PCA)得到的土壤质量指数更接近于基于 TDS 得到的土壤质量指

表 7 烟田土壤质量指数统计结果

Table 7 Statistical description of soil quality index of tobacco-planting fields

区(县)	SQI		占比(%)				
	平均值	变异系数(%)	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
奉节	0.55	21.82	0.33	9.03	30.43	26.43	33.78
巫山	0.58	18.97	1.65	14.29	29.40	31.04	23.62
巫溪	0.60	16.67	0.99	18.32	27.23	37.12	16.34
万州	0.49	24.49	0	3.57	16.08	25.89	54.46
彭水	0.66	16.67	10.21	26.04	36.25	19.37	8.13
黔江	0.63	17.46	5.71	26.67	24.76	32.38	10.48
酉阳	0.64	20.31	9.16	22.37	29.92	25.61	12.94
武隆	0.59	23.73	5.65	14.78	28.70	23.48	27.39
石柱	0.68	16.18	13.85	30.77	35.38	17.69	2.31
丰都	0.64	17.19	6.00	25.00	36.00	25.00	8.00
涪陵	0.49	16.33	0	0	6.67	20.00	73.33
重庆市	0.61	21.31	5.61	19.22	30.13	26.14	18.90

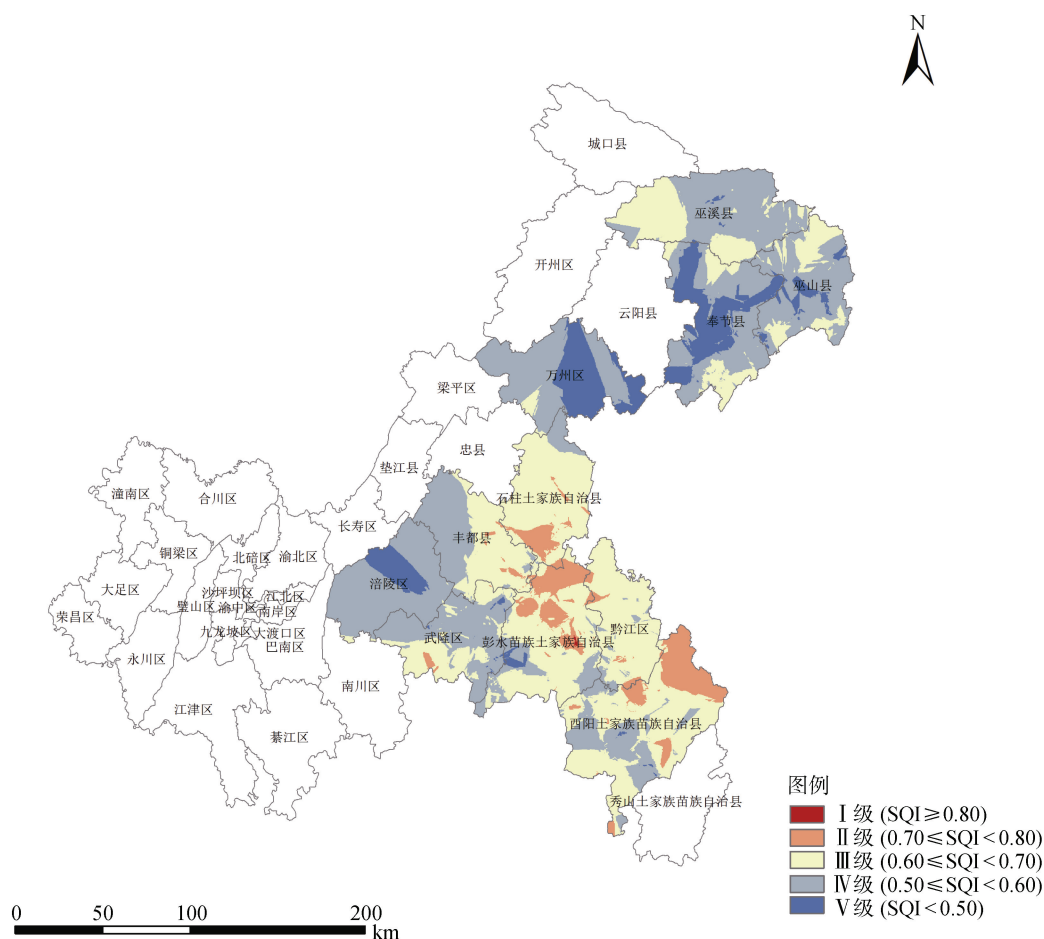


图 4 重庆烟区土壤质量指数分级空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil quality index grade in tobacco-planting areas in Chongqing

数,更能代表实地情况。以往烟田土壤质量评价往往采用单一的分析方法,缺乏对比性,本研究运用两种方法确定 MDS 及其土壤质量指数,并与基于 TDS 得到的土壤质量指数进行拟合分析,发现基于 MDS-PCA 的结果在精度和准确度方面都更接近基于 TDS 的结果,说明 MDS 指标能够很好地代替 TDS 指标。本研究得出大尺度下烟田土壤质量评价框架,即利用 PCA 构建 MDS,选取土壤质量指数量化土壤质量,有助于决策者更精确了解土壤质量的变化情况,为土壤质量提升奠定了理论基础。此外,本研究采用半方差函数模型并结合普通克里格插值法获得了重庆烟区土壤质量空间分布,预测值非常接近于原始数据,预测的结果较为准确,实现了土壤质量空间信息的可视化,更加直观。基于地理信息系统的土壤质量评价结合空间分析量化大尺度土壤质量,提高了土壤资源管理的效率和准确性,有利于烟田精准改良。

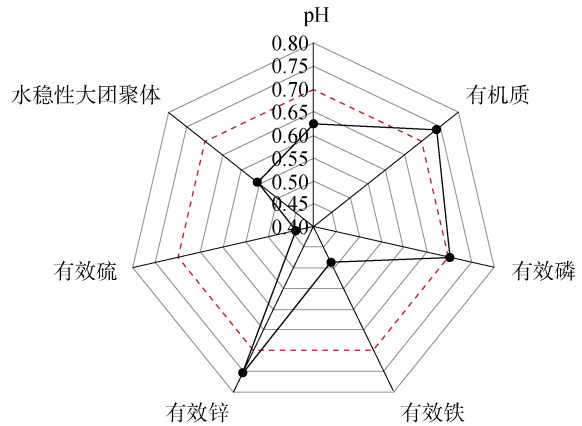
土壤质量指标的选取是土壤质量评价中的核心环节^[24],在进行大区域烟田土壤质量评价指标的选择时,应遵循对烟草生长和品质形成的重要性作为主

要选择依据,以确保影响烟草产质量的指标得到准确反映,并避免选择冗余指标,减少人力和物力,同时还能保证评价结果的真实性。另外,选择的指标能够实际操作应用也是必须考虑的。本研究中,依据烟草公司每 5 年进行的烟田土壤质量普查数据测试的 16 个理化指标为基础,通过研究筛选,最终选择 pH、有机质、有效磷、有效铁、有效锌、有效硫和水稳性大团聚体 7 个土壤质量评价指标,评价指标剔除率达到 56%。在本研究的 MDS 中,pH、有机质和有效磷 3 项指标使用频率最高且进入前 10 位。这一结果表明,在 TDS 和 MDS 评价指标体系中,本研究与前人的研究结果相似,并具有一定的代表性。近年来,国内外研究表明,土壤 pH 是评价土壤质量的重要参考指标,土壤 pH 可以影响土壤养分转化及其有效性,进而影响作物的产量和质量^[25]。土壤有机质对烟草生长起着重要作用,它能提供营养物质,保持土壤的湿度,并增强土壤结构。重庆烟区土壤有机质缺乏比例达到 24.2%,这部分土壤应增施有机肥。合理的施用磷肥可以提高烟叶的品质,提高烟叶的农艺性状,

如叶片颜色、叶片厚度和烟碱含量等。潘晓英等^[26]发现不合理施用磷肥均会抑制烟株生长,还会影响钾和镁的吸收和转运。微量元素有效铁、有效锌和有效硫变异程度均比较大,说明其空间分布极不均匀,需要根据实地情况确定微肥施用措施。水稳性大团聚体是衡量土壤抗退化、抵御外界破坏能力的重要指标,它与土壤渗水性、有机质储存等多种因素有关,对土壤健康及烟叶产质量有着重要影响。重庆烟田土壤水稳性大团聚体处于较低范围占 47.2%,说明有将近一半的土壤保水保肥性弱,需及时改良。

另外需要指出的是,本研究没有选择生物指标,其原因是,一方面重庆烟草公司每 5 年普查没有包含生物学指标;另一方面,土壤生物学评价指标繁多,土壤生物学指标的取样时间、取样方法、运输方式和测定都非常困难,加之测定成本偏高以及与烤烟产质量关系的不确定性,生物学指标的应用至今未能对这方面的研究达成共识。渝东南烟田土壤质量总体好于渝东北,但渝东南的烟草病害要高于渝东北,可见在今后研究中,土壤质量评价要尽可能过渡到土壤健康评价,在土壤健康评价中,应逐步纳入作物健康状况、病原菌数量、重金属含量、生物多样性、可移动污染物(如二噁英、多环芳烃和微塑料)等指标。

重庆烟田土壤 SQI 平均值为 0.61,总体上处于适中等级,高等级烟田较少。由于重庆烟区地处三峡库区和武陵山区,地形和土壤条件复杂,因此烟区土壤质量存在较高空间变异性。土壤质量评价指标隶属度值雷达图可以显示同一对象在不同变量上的表现情况,有助于识别对象在哪些方面表现出色或需要改进。从图 5 可知,经过筛选后的多个土壤评价指标隶属度值较小,pH、有效磷、有效铁、有效硫和水稳性大团聚体为重庆烟区的限制性因子。重庆烟区土壤 pH 总体上偏低,是因为:①重庆自身属于我国酸沉降严重区域;②降雨多,盐基离子淋洗程度高;③烟田长期过量施用化肥等。针对重庆烟区土壤酸化程度高的问题,可利用碱渣改良酸性烟田^[27],同时配施有机肥,此法可提高土壤 pH,促进烟草正常发育。有效磷、有效铁和有效硫总体上偏高,主要是因为烟农长期重视化肥而忽略有机肥的施用,需根据当地烟农施肥比例及施肥习惯进行及时调整,才能使烟草提高产质量。水稳性大团聚体总体上偏低,主要因为烟农采用长期的浅旋耕模式,土壤犁底层变浅,从而破坏了土壤团粒结构,使得水稳性大团聚体比例较低。只有采用深耕措施才能增加耕层厚度,改善土壤保水保肥能力和土壤结构,提高水稳性大团聚体含量。



(图中虚线框内土壤指标隶属度均小于 0.70,处于偏低水平)

图 5 重庆植烟土壤质量评价指标隶属度值雷达图

Fig. 5 Radar plot of affiliation values of soil quality evaluation indicators for tobacco-planting in Chongqing

4 结论

1) 重庆烟区土壤酸化较为严重,氮素含量较为适宜,而有效磷和速效钾含量偏高,其他元素缺乏和过量并存,水稳性大团聚体含量偏低。

2) 重庆烟田土壤质量评价最小数据集包括土壤 pH、有机质、有效磷、有效铁、有效锌、有效硫和水稳性大团聚体 7 个指标,选择主成分分析确定的最小数据集能够替代全量数据集对烟田土壤质量进行评价。

3) 重庆烟区的土壤限制性因子为 pH、有效磷、有效铁、有效硫和水稳性大团聚体,烟区土壤质量指数的平均值为 0.61,总体上处于中等偏低水平,近一半烟田急需改良。

参考文献:

- [1] 匡传富,周国生,邓正平,等. 湖南郴州烟区土壤养分状况分析[J]. 中国烟草科学, 2010, 31(3): 33-37.
- [2] 罗登山,王兵,乔学义. 《全国烤烟烟叶香型风格区划》解析[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(4): 1-9.
- [3] 李自林,陆亚春,赵磊峰,等. 百色市植烟土壤肥力适宜性评价[J]. 山西农业科学, 2022, 50(1): 89-95.
- [4] Kumar V, Kumar R, Singh V, et al. Soil management options for improving physical atmosphere for sustainable agriculture production: A review[J]. International Journal of Agriculture Sciences, 2016, 8(57): 3101-3105.
- [5] 邹天祥,梁志鹏,龚佳林,等. 基于 Stacking 模型的土壤综合肥力评价——以富川瑶族自治县植烟区为例[J]. 西南农业学报, 2023, 36(7): 1438-1446.
- [6] 张建东,郭全忠,周飞,等. 旬阳市植烟土壤主要肥力指标特征及适宜性评价[J]. 山西农业科学, 2023, 51(3): 293-298.

- [7] 周旭东, 韩天华, 施竹凤, 等. 金沙江流域植烟土壤肥力适宜性评价及养分时空变异特征[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(1): 158-165.
- [8] 罗辉, 张远盖, 王飞, 等. 泸州古蔺植烟区土壤肥力评价[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(4): 836-840.
- [9] 李倩, 索炎炎, 景延秋, 等. 南阳植烟土壤养分时空演变特征及肥力评价[J]. 中国烟草科学, 2022, 43(5): 22-30.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164.
- [14] 田英, 许喆, 王娅丽, 等. 宁夏银川平原沙化土地不同人工林土壤质量评价[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1515-1525.
- [15] 吴春生, 刘高焕, 黄翀, 等. 基于 MDS 和模糊逻辑的黄河三角洲土壤质量评估[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1275-1286.
- [16] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 265-273.
- [17] 李自林, 陆亚春, 赵磊峰, 等. 靖西市植烟土壤肥力适宜性综合评价[J]. 作物杂志, 2021(3): 155-160.
- [18] 褚旭, 王珂清, 魏建荣, 等. 云南植烟土壤肥力状况的组合评价法研究[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(2): 48-54.
- [19] Askari M S, Holden N M. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 150: 57-67.
- [20] Guo W W, Wu T, Jiang G J, et al. Spatial distribution, environmental risk and safe utilization zoning of soil heavy metals in farmland, subtropical China[J]. Land, 2021, 10(6): 569.
- [21] 杜龙全, 刘峰, 史舟, 等. 大面积高寒山区土壤养分空间预测与管理分区[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1273-1282.
- [22] 李晓宁, 高明, 王子芳. 重庆市植烟土壤肥力数值化综合评价[J]. 西南农业学报, 2007, 20(1): 67-71.
- [23] 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.
- [24] 李烜楨, 骆永明, 侯德义. 土壤健康评估指标、框架及程序研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 617-624.
- [25] Morgenstern P, Brüggemann L, Meissner R, et al. Capability of a XRF method for monitoring the content of the macronutrients Mg, P, S, K and Ca in agricultural crops[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2010, 209(1): 315-322.
- [26] 潘晓英, 陈俊标, 李集勤, 等. 烤烟植株磷对矿质养分转运基因表达的影响及调控途径[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(3): 482-495.
- [27] 闫静, 时仁勇, 王昌军, 等. 不同改良剂对酸性烟田的改良效果及其对烤烟生长的影响[J]. 土壤, 2023, 55(3): 612-618.