

基于模糊数学法的山东省蔬菜优势产区 土壤肥力综合评价

高璐阳¹, 马志明^{1,2}, 沈彦辉³, 刘中良⁴

(1. 农业农村部作物专用肥料重点实验室·新洋丰农业科技股份有限公司 湖北荆门 448000;
2. 山东新洋丰肥业有限公司 山东菏泽 274000; 3. 浙江大学山东(临沂)现代农业研究院 山东临沂 276000;
4. 泰安市农业科学院 山东泰安 271000)

摘要: 为了解山东省蔬菜优势产区土壤养分状况和肥力特征,以 2018—2019 年在枣庄市、临沂市、潍坊市和聊城市采集的 392 份露地蔬菜土壤样本为研究对象,选取 pH 值、有机质含量、碱解氮含量等 9 个土壤肥力因子作为评价指标,采用模糊数学法对蔬菜优势产区土壤肥力进行综合评价。结果表明,山东省蔬菜优势产区土壤 pH 介于 3.98~8.90,约 58.67% 的土壤呈酸性;有效钾较缺乏;有机质养分严重缺乏,处于缺乏水平的土壤达 50.51%;碱解氮和有效磷养分总体充足;少数蔬菜产区土壤微量元素养分缺乏。根据土壤综合肥力指数(SFI)值可将蔬菜优势产区土壤肥力划分为 5 个等级,处于中等偏上肥力水平($SFI \geq 0.4$)的土壤数量达 77.04%,整体适宜蔬菜生长。不同蔬菜优势产区土壤肥力水平表现为临沂市>潍坊市>枣庄市>聊城市。针对蔬菜区土壤养分状况,应注重增施有机肥,合理施用钾肥,提升土壤有机质含量,调节土壤 pH 值,并注重补充微量元素养分。

关键词: 蔬菜土壤;主成分分析;模糊数学法;养分综合评价;山东省

中图分类号: S625.5⁴+S63

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2022)11-027-07

Comprehensive evaluation of soil fertility in dominant vegetable producing areas of Shandong Province by fuzzy number method

GAO Luyang¹, MA Zhiming^{1,2}, SHEN Yanhui³, LIU Zhongliang⁴

(1. Key Laboratory of Special Fertilizers for Crops of Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Xinyangfeng Agricultural Technology Co., Ltd., Jingmen 448000, Hubei, China; 2. Shandong Xinyangfeng Fertilizer Co., Ltd., Heze 274000, Shandong, China; 3. Shandong (Linyi) Institute of Modern Agriculture, Zhejiang University, Linyi 276000, Shandong, China; 4. Tai'an Academy of Agricultural Sciences, Tai'an 271000, Shandong, China)

Abstract: In order to study the soil nutrient status and fertility characteristics of dominant vegetable producing areas in Shandong Province, during 2018 to 2019, 392 vegetable soil samples collected in open fields in Zaozhuang, Linyi, Weifang and Liaocheng were taken as the research object. Nine soil fertility factors such as pH, organic matter and alkali-hydrolyzable nitrogen were selected as evaluation indexes to evaluate the soil nutrient status in the dominant vegetable producing areas by the fuzzy mathematics method. The results showed that the soil pH of the dominant vegetable producing areas in Shandong Province was between 3.98 and 8.90, and about 58.67% of the soils were acidic. The content of available potassium was deficient, the content of organic matter nutrients was serious deficient, and the soil at the deficiency level reached 50.51%. The nutrients of alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus were generally sufficient, and a few vegetable producing areas were lack of microelements. According to the SFI value, the soil fertility in the dominant vegetable producing areas can be divided into five grades, and the amount of soil in the middle and upper fertility level ($SFI \geq 0.4$) is 77.04%, which is suitable for vegetable growth as a whole. The soil fertility level of different vegetable producing areas is Linyi>Weifang>Zaozhuang>Liaocheng. According to the soil nutrient conditions in the vegetable area, the application of organic fertilizer, rational application of potassium fertilizer, increase of soil organic matter content, improvement of soil pH and supplement of microelements are suggested.

Key words: Vegetable soil; Principal component analysis; Fuzzy mathematics method; Comprehensive evaluation of nutrients; Shandong province

收稿日期: 2022-05-07; 修回日期: 2022-06-17

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2016YFD0200401); 山东省蔬菜产业技术体系(SDAIT-05-09)

作者简介: 高璐阳, 男, 农艺师, 主要从事新型肥料研发及养分资源高效利用研究。E-mail: gaoluyang81@126.com

蔬菜是我国重要的经济作物,对土壤利用频度高,需肥量较一般粮食作物高,具有生长快、产量高、复种指数高等特点^[1]。土壤肥力是土壤的本质属性,良好的土壤环境是作物正常生长的前提,土壤养分丰缺状况直接影响蔬菜的生长发育^[2]。当前,在蔬菜土壤养分管理过程中多存在盲目施肥、过量施肥现象,造成土壤酸化、有机质含量匮乏等问题,限制了蔬菜的可持续生产^[3]。土壤养分过度累积,易导致土壤养分结构失衡、蔬菜产品质量下降和生态环境被破坏等问题,例如,氮、磷养分过度累积,会造成河流及地下水污染,出现水体富营养化;偏施某种化肥,易导致蔬菜营养结构失调,内部物质转化受阻,进而影响蔬菜产品质量提升^[4]。为响应国家“菜篮子工程”的号召,保证菜篮子产品供应,在精准测定蔬菜土壤养分状况的基础上,综合评价蔬菜土壤肥力水平,实施精准施肥技术,可保障土壤养分的有效供给,促进蔬菜产业的健康发展。

土壤养分综合评价是促进农业向精细化、生态化、可持续化方向发展的前提,客观、准确的综合评价可为作物精准施肥提供参考依据^[5]。张楚楚等^[6]通过建立土壤质量评价层次模型研究合肥市肥东县蔬菜土壤质量空间变异,发现肥东县蔬菜土壤质量由中南部向东北部地区逐渐变差。王秋君等^[7]综合运用主成分分析和模糊数学法分析苏北地区设施蔬菜土壤养分,发现苏北地区土壤综合肥力平均指数为0.5,速效钾含量为该地区土壤肥力的主要决定因子。王晶等^[8]利用云模型对西安市蔬菜区土壤肥力进行综合评价,发现西安市蔬菜区土壤肥力总体属中上等水平,有机质含量是该地区土壤肥力的主要决定因素。韩春建等^[9]选取有机质含量、土壤质地、CEC(土壤阳离子交换量)等作为评价因子,采用GIS(地理信息系统)和灰色关联模型对郑州市蔬菜土壤进行综合评价,发现郑州市西北部、东南和西南部地区土壤肥力较好。

山东省蔬菜产业具有良好的发展条件、经济效益,在实行“菜篮子工程”以来,蔬菜种植面积不断扩大,主要集中在枣庄市、临沂市、潍坊市、聊城市等优势产区,2020年山东省蔬菜种植面积达148.7万 hm^2 ,产量为8434.7万t,经济效益达1796.2亿元^[10]。目前,针对山东省蔬菜土壤的研究多侧重于重金属污染和土壤修复等方面,对蔬菜土壤肥力综合评价的研究相对较少^[11-16]。笔者以枣庄市、临沂市、潍坊市和聊城市采集的蔬菜土壤样本为研究对象,采用模糊数学法对

蔬菜土壤肥力进行综合评价,以期对山东省蔬菜优势产区土壤养分的管理和肥料的科学施用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山东省为沿海地区,位于温带季风气候区,春秋较短,冬夏较长,四季分明,雨量集中,年降水量在550~950 mm,平均降水量为680 mm,年均气温在11~14 $^{\circ}\text{C}$ ^[17]。

1.2 样本采集与分析

1.2.1 土壤样品的采集 2018—2019年在山东省枣庄市、临沂市、潍坊市和聊城市4个蔬菜优势产区采集露地蔬菜土壤样品392份,其中枣庄市46份,临沂市206份,潍坊市78份,聊城市62份,采样时期集中于当季蔬菜采收后。按照S形随机采集5点土壤样本,采样深度为0~20 cm,剔除作物残体和杂物后混合为一个样本,采用四分法留存1 kg左右土壤,装入自封袋中,记录采样日期、地点等信息。土壤样本经风干、研磨、过筛后备用。

1.2.2 土壤养分的测定 土壤养分测定项目包括pH、有机质、碱解氮、有效磷、有效钾及微量元素有效铁、有效锰、有效铜、有效锌等的含量。采用pH计进行($V_{\text{水}}:V_{\text{土}}=2.5:1$)土壤pH测定;采用重铬酸钾容量法-外加热法^[18]测定有机质含量;采用碱解扩散法^[19]测定碱解氮含量;采用碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法^[19]测定有效磷含量;采用乙酸铵浸提,火焰光度计法^[19]测定有效钾含量;采用DTPA浸提,原子吸收分光光度法^[20]测定微量元素有效铁、有效锰、有效铜、有效锌等的含量。

1.3 土壤养分丰缺评价指标体系构建

根据全国第二次土壤普查养分分级标准及以往研究结果^[21-22],结合山东省蔬菜田土壤肥力总体情况,确定山东省蔬菜田土壤pH和养分评价指标分级标准,如表1~2所示。

1.4 土壤养分指标权重、隶属度值和综合肥力指数计算

1.4.1 指标权重的确定 采用主成分分析方法^[23]确定蔬菜优势产区土壤各肥力因子的权重(W_i)。

1.4.2 隶属度函数建立及隶属度值的计算 采用隶属度函数计算蔬菜优势产区土壤肥力因子的隶属度值(N_i)。隶属度函数是评价相关指标与作物生长曲线之间关系的数学表达式,将不同量纲的指标转化为数值在0~1之间的无量纲值,单一指标隶属

表 1 蔬菜土壤 pH 分级标准

指标	酸性	弱酸性	中性	弱碱性	碱性
pH 值	<5.5	5.5~6.5	6.5~7.5	7.5~8.0	>8.0

表 2 蔬菜土壤养分评价指标分级标准

指标	缺乏	较缺乏	中等	较丰富	丰富
w(有机质)/(g·kg ⁻¹)	<10	10~20	20~30	30~40	>40
w(碱解氮)/(mg·kg ⁻¹)	<50	50~80	80~120	120~150	>150
w(有效磷)/(mg·kg ⁻¹)	<25	25~50	50~100	100~150	>150
w(有效钾)/(mg·kg ⁻¹)	<100	100~150	150~200	200~300	>300
w(有效铁)/(mg·kg ⁻¹)	<5	5~10	10~15	15~25	>25
w(有效锰)/(mg·kg ⁻¹)	<2.5	2.5~5.0	5~10	10~20	>20
w(有效铜)/(mg·kg ⁻¹)	<0.5	0.5~1.0	1~2	2~4	>4
w(有效锌)/(mg·kg ⁻¹)	<1	1~2	2~3	3~5	>5

度值越大,该指标的含量水平越高^[24]。根据相关研究可将隶属度函数分为 S 型和抛物线型,pH 值属于抛物线型隶属度函数,有机质、碱解氮、有效磷、有效钾和微量元素有效铁、有效锰、有效铜、有效锌含量等属于 S 型隶属度函数^[25]。

(1)抛物线型隶属度函数表达式:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1, & x < x_1 \text{ 或 } x > x_4 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{(x_2-x_1)} + 0.1, & x_1 \leq x < x_2 \\ 1.0, & x_2 \leq x \leq x_3 \\ 1.0 - \frac{0.9(x-x_3)}{(x_4-x_3)}, & x_3 < x \leq x_4 \end{cases}$$

(2)S 型隶属度函数表达式:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1, & x < x_1 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{(x_2-x_1)} + 0.1, & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1.0, & x > x_2 \end{cases}$$

式中,x 为土壤养分指标的实际含量,x₁、x₂、x₃、x₄为隶属度函数曲线拐点值。依据蔬菜土壤肥力特征及相关研究,各土壤肥力指标的拐点值如表 3 所示。

1.4.3 土壤综合肥力指数计算与分级 采用模糊

表 3 各土壤肥力指标隶属度函数转折点取值

指标	隶属度函数类型	转折点			
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄
pH 值	抛物线型	5.5	6.5	7.5	8.0
w(有机质)/(g·kg ⁻¹)	S 型	20	40	-	-
w(碱解氮)/(mg·kg ⁻¹)	S 型	80	150	-	-
w(有效磷)/(mg·kg ⁻¹)	S 型	50	150	-	-
w(有效钾)/(mg·kg ⁻¹)	S 型	150	300	-	-
w(有效铁)/(mg·kg ⁻¹)	S 型	10	25	-	-
w(有效锰)/(mg·kg ⁻¹)	S 型	5	20	-	-
w(有效铜)/(mg·kg ⁻¹)	S 型	1	4	-	-
w(有效锌)/(mg·kg ⁻¹)	S 型	2	5	-	-

数学法^[26]加权求和,计算蔬菜优势产区土壤综合肥力指数(SFI)。依据 SFI 值大小将山东省蔬菜优势产区土壤综合肥力水平划分为优(0.8<SFI≤1.0)、良(0.6<SFI≤0.8)、中等(0.4<SFI≤0.6)、差(0.2<SFI≤0.4)和很差(0<SFI≤0.2)5 个等级^[7,27]。

土壤综合肥力指数(SFI)计算公式为:

$$SFI = \sum_{i=1}^n W_i \times N_i$$

式中:n 为参评因子个数,W_i为第 i 个因子的权重,N_i为第 i 个因子的隶属度值。

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 进行数据处理和统计分析。采用邓肯式新复极差法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 蔬菜优势产区土壤养分丰缺状况

对山东省蔬菜优势产区土壤养分状况进行描述性统计分析,依据养分分级标准对土壤养分丰缺

表 4 蔬菜种植区 pH 值含量及其分布状况

指标	极小	极大	平均	变异系	分布频率/%				
	值	值	值	数/%	酸性	弱酸性	中性	弱碱性	碱性
pH 值	3.98	8.90	6.30	18.71	27.04	31.63	23.47	9.18	8.67

表 5 蔬菜种植区土壤养分含量及其分布状况

指标	极小值	极大值	平均值	变异系数/%	养分分布频率/%				
					缺乏	较缺乏	中等	较丰富	丰富
w(有机质)/(g·kg ⁻¹)	6.27	56.05	22.67	42.71	3.06	47.45	29.08	12.76	7.65
w(碱解氮)/(mg·kg ⁻¹)	47.93	320.38	123.27	42.58	1.02	18.88	36.22	16.84	27.04
w(有效磷)/(mg·kg ⁻¹)	8.57	345.54	148.68	56.11	5.10	9.18	22.96	13.27	49.49
w(有效钾)/(mg·kg ⁻¹)	18.50	574.88	219.47	59.23	19.39	19.39	12.24	20.41	28.57
w(有效铁)/(mg·kg ⁻¹)	2.12	72.15	29.90	51.61	5.61	8.16	4.59	16.33	65.31
w(有效锰)/(mg·kg ⁻¹)	0.63	76.71	23.63	81.77	3.06	7.14	16.33	29.59	43.88
w(有效铜)/(mg·kg ⁻¹)	0.37	18.93	3.66	92.16	1.53	14.29	31.63	18.37	34.18
w(有效锌)/(mg·kg ⁻¹)	0.25	18.97	5.45	76.46	6.12	18.37	12.76	19.39	43.37

状况进行判断。由表 4~5 可知,山东省蔬菜主产区土壤 pH 值介于 3.98~8.90 之间,平均值为 6.30,变异系数为 18.71%,约 58.67%的土壤样本呈酸性,pH 值适宜的土壤数量占比仅为 23.47%,蔬菜土壤整体偏酸性。有机质含量(w,后同)在 6.27~56.05 g·kg⁻¹,平均为 22.67 g·kg⁻¹,约 50.51%土壤有机质含量处于偏低水平,蔬菜主产区土壤有机质含量较匮乏。碱解氮含量在 47.93~320.38 mg·kg⁻¹,约 43.88%蔬菜土壤碱解氮含量充足,36.22%土壤碱解氮含量处于中等水平。有效磷含量极小值为 8.57 mg·kg⁻¹,极大值为 345.54 mg·kg⁻¹,不同土壤中有效磷含量变化幅度较大,但整体磷含量充足,仅有 14.28%土壤有效磷含量缺乏。有效钾含量范围在 18.50~574.88 mg·kg⁻¹,变异系数为 59.23%,约 38.78%蔬菜土壤有效钾含量缺乏。微量元素有效铁、有效锰、有效铜、有效锌的平均含量分别为 29.90、23.63、3.66、5.45 mg·kg⁻¹,变异系数分别为 51.61%、81.77%、92.16%、76.46%。蔬菜主产区土壤微量元素含量整体充足,仅少数蔬菜地微量元素含量缺乏,有效铁、有效锰、有效铜、有效锌含量处于中等及以上的土壤数量占比分别为 86.23%、89.80%、84.18%和 75.52%。

2.2 蔬菜优势产区土壤养分因子权重系数

对蔬菜土壤各项养分指标进行主成分分析,得出抽样适度测定值(KMO 值)为 0.701,Bartlett 球形度检验呈极显著性,说明采用主成分分析可行。笔者对山东省蔬菜优势产区土壤 pH 值、有机质含量、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量以及微量元素有效铁、有效锰、有效铜、有效锌含量等 9 项肥力指标进行主成分分析并计算权重,结果如表 6 所示。根据特征值 λ>1 的原则,提取 3 个主成分,其方差累积贡献率为 70.195%,总体上可反映蔬菜优

表 6 土壤各肥力指标主成分分析结果与指标权重系数

指标	主成分			得分系数	权重系数
	PC1	PC2	PC3		
pH 值	-0.063	0.808	-0.312	0.12	0.06
有机质含量	0.727	-0.146	0.366	0.23	0.13
碱解氮含量	0.797	-0.017	-0.270	0.18	0.10
有效磷含量	0.739	0.268	-0.443	0.20	0.11
有效钾含量	0.758	-0.235	-0.369	0.10	0.06
有效铁含量	0.210	0.728	0.371	0.28	0.16
有效锰含量	0.026	0.845	0.085	0.21	0.12
有效铜含量	0.632	-0.117	0.299	0.20	0.11
有效锌含量	0.711	0.070	0.377	0.28	0.15
特征值	3.240	2.064	1.014		
累积贡献率/%	35.999	22.934	11.262		

势产区土壤肥力基本信息。第一主成分包括有机质含量、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量、有效锌含量和有效铜含量。9 项土壤肥力指标权重占比不同,其中有效铁含量权重占比最大,为 0.16;pH 值和有效钾含量权重占比最小,均为 0.06。蔬菜优势产区土壤养分指标权重由大到小为有效铁含量、有效锌含量、有机质含量、有效锰含量、有效磷含量、有效铜含量、碱解氮含量、pH 值和有效钾含量。

2.3 蔬菜优势产区土壤肥力指标隶属度

由图 1 可知,枣庄市蔬菜土壤肥力水平的主要决定因子为有机质含量、pH 值、有效铜含量和有效锌含量,其隶属度平均值分别为 0.15、0.26、0.33 和 0.37,有机质含量、有效铜含量和有效锌含量水平较低。临沂市蔬菜土壤有机质含量、有效钾含量和 pH 值的隶属度平均值较低,分别为 0.34、0.45 和 0.48,其他土壤养分含量较充足,有机质含量、有效钾含量和 pH 值是该地区土壤肥力水平的主要决定因子。潍坊市蔬菜土壤有机质含量和有效锰含量的隶属度平均值分别为 0.35 和 0.45,是该地区土壤肥力水平的主要决定因子,潍坊市蔬菜产区土壤 pH 值整体水平较适宜,有效磷、钾和微量元素有效铁、有效铜、有效锌含量整体充足。有机质含量是聊城市蔬菜土壤肥力水平的主要决定因子,其隶属度平均值仅为 0.26。山东省蔬菜优势产区土壤养分状况整体表现为有机质较匮乏,土壤多偏酸性或偏碱性,部分地区蔬菜土壤有效钾、有效锰、有效铜、有效锌含量较低。在蔬菜种植生产过程中应注

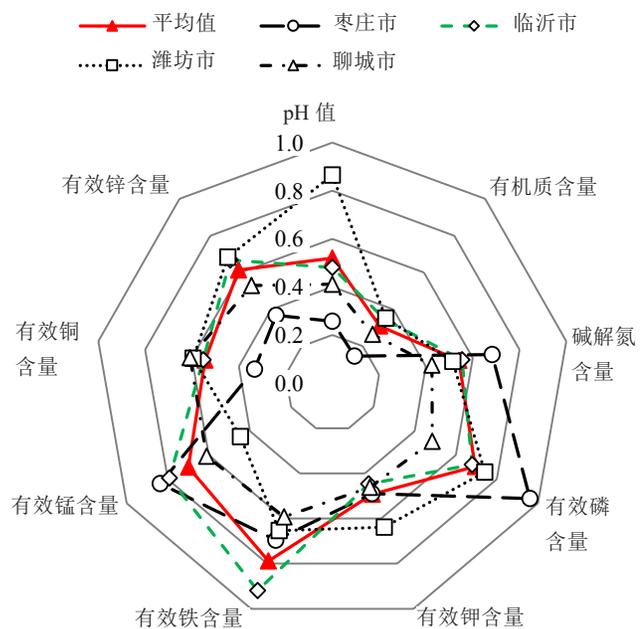


图 1 蔬菜优势产区土壤肥力因子隶属度

重增施有机肥,提升土壤有机质含量,调节土壤 pH 值,并合理施用钾肥,适量配施微肥,以满足蔬菜的正常生长需求。

2.4 不同蔬菜优势产区土壤肥力综合状况

由表 7 可知,山东省蔬菜优势产区土壤平均 *SFI* 值为 0.59,枣庄市、临沂市、潍坊市、聊城市蔬菜土壤平均 *SFI* 值分别为 0.54、0.63、0.60、0.50。*SFI* 分级结果表明,山东省蔬菜优势产区土壤肥力整体较好,约有 77.04% 土壤养分状况处于中等偏上水平 ($SFI \geq 0.4$)。就不同蔬菜产区而言,临沂市蔬菜土壤综合肥力最好,约有 84.47% 土壤养分状况处于中等偏上水平 ($SFI \geq 0.4$);聊城市蔬菜土壤综合肥力最差,仅有 58.06% 土壤养分状况处于中等偏上水平 ($SFI \geq 0.4$)。不同蔬菜优势产区土壤综合肥力水平整体表现为临沂市 > 潍坊市 > 枣庄市 > 聊城市。

表 7 不同蔬菜主产区土壤肥力综合状况

区域	平均值	变异系数/%	等级分布频率/%				
			优	良	中等	差	很差
枣庄市	0.54	33.72	4.35	39.13	30.43	21.74	4.35
临沂市	0.63	33.63	30.10	21.36	33.01	12.62	2.91
潍坊市	0.60	36.82	20.51	35.90	17.95	23.08	2.56
聊城市	0.50	46.72	6.45	32.26	19.35	32.26	9.68
平均值	0.59	36.85	21.43	28.06	27.55	18.88	4.08

3 讨论

土壤 pH 值、有机质含量、碱解氮含量、有效磷含量和有效钾含量是土壤肥力评价中最具代表性的因子^[28]。pH 值是土壤肥力的重要指标之一,唐高霞等^[29]研究表明,土壤偏酸会使磷酸与铁、铝离子发生反应,生成不溶物;土壤偏碱会促使水溶性磷酸根与钙离子结合生成难溶性的磷酸钙,同时容易固定铁、锌等微量元素,使蔬菜发生缺素症。李涛等^[30]通过研究近 30 年山东省耕地土壤 pH 值时空变化发现,山东省耕地土壤整体表现为酸性土壤面积增加,局部耕地酸化,耕地土壤整体偏酸性。笔者的研究中,山东省蔬菜主产区约 58.67% 的土壤样本呈酸性,17.85% 的土壤偏碱性,蔬菜主产区土壤整体偏酸,与山东省耕地土壤 pH 状况整体一致。有机质含量是土壤中各种营养元素的重要来源,直接影响腐殖质和土壤团粒的形成,进而影响土壤保水保肥性、透气性和缓冲性等^[31]。陈伦寿等^[32]提出,理想菜田的土壤有机质含量应该在 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。张焕菊等^[33]研究表明,山东省除枣庄市、淄博市和日照市外,潍坊市、临沂市、聊城市等地蔬菜土壤有机质含量整体上比较缺乏。笔者的研究结果表

明,山东省蔬菜优势产区土壤有机质平均含量为 $22.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,79.59% 土壤有机质含量低于 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,50.51% 土壤有机质含量处于偏低水平 ($< 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),蔬菜土壤有机质养分较缺乏,与前人研究结果基本一致^[33]。氮、磷、钾是植物生长发育所必需的大量元素,在植物生长发育过程中发挥着不可替代的作用^[34]。氮元素是植物体内氨基酸、蛋白质等含氮化合物的重要构成元素,对植物茎叶生长和果实的发育具有重要作用,直接影响作物产量^[35]。碱解氮含量直接反映土壤对当季作物的氮素供应能力。有效磷含量是衡量土壤养分状况不可或缺的指标,磷元素通过多种途径参与植物体内的代谢过程^[36],施用磷肥可促进作物根系生长,提高作物根系活力^[37]。笔者的研究中,蔬菜优势产区土壤碱解氮和有效磷的平均含量分别为 123.27 、 $148.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,养分含量处于中等及以上水平的土壤数量占比分别为 80.10% 和 85.72%,整体上养分含量较充足。钾元素对蔬菜生长发育和质量提升有重要作用,能够延长蔬菜的贮藏期、使蔬菜有更好的外观、丰富蔬菜的营养^[38]。笔者的研究中,约 38.78% 土壤有效钾养分缺乏,蔬菜优势产区土壤有效钾养分丰缺并存。针对山东省蔬菜主产区土壤大量元素养分状况,在生产过程中可增施有机肥、提高土壤有机质含量、调节土壤酸碱度、注重补施钾肥,以满足蔬菜对土壤钾元素的需求。

微量元素有效铁、有效锰、有效铜、有效锌是土壤肥力的重要组成要素,直接或间接参与植物体内酶类、多糖、核酸、维生素等分子的合成,对植物的各种生理代谢过程起到重要的调控作用,能够改善作物品质,提高作物抗逆性^[39-40]。铁是合成叶绿素所必需的,植物缺铁会导致叶绿素结构被破坏;锰参与植物光合过程中水的光解,有利于氨基酸合成肽,促进蛋白质的合成^[41]。王影影等^[42]和李珊等^[43]的研究表明,土壤中铁、锰有效性与 pH 值呈负相关,土壤酸性强是铁、锰含量高的主要原因。笔者的研究中,山东省蔬菜优势产区土壤酸性较强,有效铁、有效锰含量充足,铁、锰缺乏的土壤数量占比分别为 13.77% 和 10.20%,与前人研究结果基本一致^[42-43]。铜是植物体内多种氧化酶的成分,参与植物体内氧化还原反应^[44]。笔者的研究中,约有 15.82% 的土壤有效铜缺乏。土壤锌含量对蔬菜生长具有一定影响,茄果类蔬菜缺锌,会造成叶片失绿、皱缩,植株矮小、落花落果等问题^[44]。笔者的研究中,蔬菜主产区有效锌丰缺并存,处于较丰富和

丰富水平的土壤数量达 62.76%。针对山东省微量元素缺乏的蔬菜产区,在生产过程中可通过叶面喷施或施用微肥等方式,补充土壤微量元素养分。

目前土壤肥力综合评价方法主要有层次分析法^[6]、灰色聚类法^[9]、模糊数学法^[24]、指数和评价法^[45]和生态适宜度分析法^[46]等。笔者的研究利用主成分分析方法^[47]确定不同土壤评价指标权重,采用模糊数学法^[24]计算蔬菜优势产区土壤综合肥力指数,将蔬菜土壤划分为优(>0.8~1.0)、良(>0.6~0.8)、中等(>0.4~0.6)、差(>0.2~0.4)和很差(0~0.2)5个等级,处于中等偏上肥力水平($SFI \geq 0.4$)的土壤数量占比达 77.04%,能够较为全面地反映山东省蔬菜主产区土壤肥力水平。但由于笔者研究选定的评价指标未包含土壤全量养分、重金属养分、蔬菜产量和养分吸收量等指标,致使土壤肥力综合评价研究具有一定的局限性,需进一步综合考虑多种相关指标,构建更为全面的蔬菜土壤肥力评价体系。

4 结 论

山东省蔬菜优势产区土壤养分条件整体适宜蔬菜生长,处于中等偏上肥力水平的土壤占比达 77.04%,不同地区土壤肥力水平表现为临沂市>潍坊市>枣庄市>聊城市。针对山东省蔬菜优势产区土壤整体偏酸、有机质养分严重缺乏、部分地区有效钾及土壤微量元素养分缺乏等问题,枣庄市、临沂市、潍坊市和聊城市地区应采取增施有机肥、合理施用化肥并注重适施石灰等措施,提高土壤有机质含量,调节土壤酸碱度。临沂市应合理施用钾肥,提高菜田土壤速效钾的有效性,枣庄市和潍坊市可通过采用叶面喷施或施用微肥等方式,补充蔬菜生长所需的微量元素铜、锌、锰等养分,以提高蔬菜经济效益。

参考文献

- [1] 王艳丽. 京郊设施菜地水肥一体化条件下土壤 N_2O 排放的研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2015.
- [2] 郑立臣, 宇万太, 马强, 等. 农田土壤肥力综合评价研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 156-161.
- [3] 文方芳. 种植年限对设施大棚土壤次生盐渍化与酸化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(4): 49-53.
- [4] 贾小红, 郭瑞英, 王秀群, 等. 菜田养分资源综合管理与可持续发展[J]. 生态环境, 2007(2): 714-718.
- [5] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
- [6] 张楚楚, 李子杰, 郭粹锦, 等. 蔬菜地土壤养分空间变异及其质量评价研究:以合肥市肥东县为例[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1033-1041.
- [7] 王秋君, 马艳, 郭德杰, 等. 设施蔬菜土壤养分状况分析及综合评价[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3): 624-630.
- [8] 王晶, 任丽, 杨联安, 等. 基于云模型的西安市蔬菜区土壤肥力综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(10): 183-189.
- [9] 韩春建, 梁朝信, 吴克宁, 等. 基于 GIS 技术的灰色关联度法土壤肥力综合评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(S1): 53-56.
- [10] 山东省统计局. 山东省统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2021.
- [11] 陈刚, 宋永芬, 成世才, 等. 山东寿光蔬菜对土壤中重金属富集的溯源规律及选择性种植[J]. 江西农业学报, 2013, 25(4): 118-119.
- [12] 张欣, 范仲学, 王丽香, 等. 济南城郊菜园土壤和蔬菜中重金属污染状况调查与评价[J]. 山东农业科学, 2011, 43(5): 68-70.
- [13] 刘苹, 赵海军, 刘兆辉, 等. 山东省露地蔬菜产地土壤重金属含量的环境质量分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1130-1136.
- [14] 黄霞, 李廷轩, 余海英. 典型设施栽培土壤重金属含量变化及其风险评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 833-839.
- [15] 杨漠然, 马兆红, 司智霞. 山东寿光设施蔬菜土壤修复对策与实例[J]. 中国蔬菜, 2016(6): 1-5.
- [16] 乐森, 刘悦上, 马金芝, 等. 山东省滨州市设施蔬菜土壤退化防治与修复对策[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(7): 141-142.
- [17] 王志刚, 张新民, 赵瑞雪, 等. 山东水果产业形势与对策[J]. 山东农业科学, 2018, 50(3): 158-162.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 1982: 195.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2013: 128-140.
- [20] 中华人民共和国农业部. 土壤中有效态锌、锰、铁、铜含量的测定 二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提法: NY/T 890-2004[S]. 北京:中国农业出版社, 2005.
- [21] 徐建明. 土壤质量指标与评价[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [22] 高峻岭, 宋朝玉, 黄绍文, 等. 青岛市设施蔬菜施肥现状与土壤养分状况[J]. 山东农业科学, 2011, 43(3): 68-72.
- [23] 张子龙, 王文全, 缪作清, 等. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用[J]. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1636-1644.
- [24] 杨旭初, 叶会财, 李大明, 等. 基于模糊数学和主成分分析的长期施肥红壤旱地土壤肥力评价[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 79-84.
- [25] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 176-183.
- [26] 刘金山, 胡承孝, 孙学成, 等. 基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1145-1150.
- [27] 王建宇, 王超, 王菲, 等. 基于田间尺度的压砂地土壤肥力评价[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 36-41.
- [28] 许仙菊, 张永春, 汪吉东, 等. 中国三大薯区土壤养分状况及土壤肥力质量评价[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 27-33.
- [29] 唐高霞, 金春花. 土壤酸碱度对蔬菜生长的影响[J]. 吉林农业, 2006(1): 27.
- [30] 李涛, 于蕾, 万广华, 等. 近 30 年山东省耕地土壤 pH 时空变化特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 180-190.

- [31] 孙燕,高焕梅,和林涛.土壤有机质及有机肥对烟草品质的影响[J].安徽农业科学,2007,35(20):6160-6161.
- [32] 陈伦寿,陆景陵.蔬菜营养与施肥技术[M].北京:中国农业出版社,2002.
- [33] 张焕菊,王贵嵩,高进华,等.山东省设施蔬菜土壤酸碱性、有机质及中微量元素含量调查与评价[J].江苏农业科学,2022,50(4):211-215.
- [34] 李德文,王少铭,罗莉斯,等.氮磷钾肥对脱毒生姜产量及农艺性状的影响[J].中国瓜菜,2022,35(4):63-69.
- [35] 陶爽,华晓雨,王英男,等.不同氮素形态对植物生长与生理影响的研究进展[J].贵州农业科学,2017,45(12):64-68.
- [36] 李新乐,侯向阳,穆怀彬,等.连续6年施磷肥对土壤磷素积累、形态转化及有效性的影响[J].草业学报,2015,24(8):218-224.
- [37] 陈珊珊,张恩让,刘春成.磷肥对辣椒生长和产量的影响[J].耕作与栽培,2009(3):39-40.
- [38] 张恩平,张淑红,李天来,等.蔬菜钾素营养的研究现状与展望[J].中国农学通报,2005,21(8):265-268.
- [39] 石如岳,王冲,杨俊雪,等.中微量元素对番茄产量和品质影响的整合分析[J].中国瓜菜,2021,34(3):66-71.
- [40] 代雪宾,李晓衡,田秀平,等.化肥减施对设施蔬菜土壤微量元素有效性的影响[J].天津农学院学报,2021,28(3):1-5.
- [41] 胡霁堂,陆景陵.植物营养学[M].2版.北京:中国农业大学出版社,2003.
- [42] 王影影,梁洪波,徐宜民,等.山东典型植烟土壤微量元素有效态含量研究[J].土壤,2014,46(1):172-177.
- [43] 李珊,李启权,张浩,等.泸州植烟土壤有效态微量元素含量空间变异及其影响因素[J].土壤,2016,48(6):1215-1222.
- [44] 李建茹.蔬菜微量元素缺乏症及其防治技术[J].河北农业,2018(6):23-25.
- [45] 王军艳,张凤荣,王茹,等.应用指数和法对潮土农田土壤肥力变化的评价研究[J].农村生态环境,2001,17(3):13-16.
- [46] 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):544-549.
- [47] 王丹丹,师建华,李燕,等.基于主成分与聚类分析的辣椒主要农艺性状评价[J].中国瓜菜,2021,34(2):47-53.