

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.07.005

重庆花椒主产区土壤养分分布特征及 综合肥力评价

魏勇¹, 王帅², 赵敬坤², 彭清³, 王洋³,
李志琦³, 蔡国学³, 杨林生¹, 徐文静¹, 张建伟¹,
王洁^{1,4,5}, 张跃强^{1,4,5}, 石孝均^{1,4,5}

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401122;
3. 重庆市江津区农业技术推广中心, 重庆 江津 402260; 4. 国家紫色土肥力与肥料效益监测基地, 重庆 400715;
5. 西南大学 农业科学研究院, 重庆 400715

摘要: 通过分析重庆市江津花椒主产区 2013 年土壤养分质量分数分布特征, 并对 126 个定点监测椒园(2006—2013 年)的土壤肥力变化特征和肥力水平进行研究和评价, 以期为重庆市花椒园土壤综合肥力调控提供理论依据。结果表明: 2013 年全区椒园土壤 pH 均值为 6.0, 呈南高北低的空间分布; 土壤有机质质量分数为 14.2 g/kg, 在空间上分布较均匀, 但处于缺乏水平; 土壤碱解氮和速效钾平均质量分数分别为 85.8 mg/kg, 119.1 mg/kg, 中等及以上样点占比分别为 35.4% 和 55.3%, 但南北差异较大; 土壤速效磷平均质量分数为 7.6 mg/kg, 处于缺乏水平, 极缺乏的样点占比 22.0%, 且集中在西南片区; 土壤有效微量元素平均质量分数为 1.9~107.7 mg/kg, 均达到很丰富的水平, 除有效锌、有效锰在空间上为均匀分布外, 其余呈斑块状分布。此外, 126 个定点监测椒园的土壤肥力变化特征研究结果表明: 2006—2013 年土壤 pH 值平均下降 0.5 个单位, 土壤酸化严重; 较 2006 年, 除有机质和有效钾基本不变外, 2013 年土壤碱解氮提高了 34.2%, 而速效磷降低了 21.9%; 有效铜、有效锌、有效铁、有效锰平均质量分数分别是 2006 年的 2.2~3.6 倍, 2013 年各指标变异系数较 2006 年平均下降了 16.8%。最后利用因子分析法和内梅罗指数法评价定点监测椒园土壤综合肥力水平, 表明重庆花椒主产区土壤综合肥力在 7 年间分别提升了 13.3% 和 18.2%, 但仍处于较低水平(Ⅲ级), 其中土壤有机质、速效磷和碱解氮为主要限制因子。建议在椒园进行枝条还田、种植绿肥或施用有机肥来提高土壤有机质、调节土壤 pH, 并结合土壤养分空间分布特征, 合理施肥以保障花椒绿色可持续生产。

关键词: 九叶青花椒; 土壤养分; 土壤综合肥力; 养分分布特征

中图分类号: S573.9; S158

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2022)07-0048-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characteristics of Nutrient Distribution and Comprehensive Evaluation of Fertility of *Zanthoxylum bungeanum* Orchards Soil in Chongqing

收稿日期: 2021-03-17

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD0200104); 云南科技人才与平台计划项目(2019IC026)。

作者简介: 魏勇, 硕士研究生, 主要从事养分资源管理的研究。

通信作者: 石孝均, 研究员, 博士研究生导师。

WEI Yong¹, WANG Shuai², ZHAO Jingkun²,
PENG Qing³, WANG Yang³, LI Zhiqi³, CAI Guoxue³,
YANG Linsheng¹, XU Wenjing¹, ZHANG Jianwei¹, WANG Jie^{1,4,5},
ZHANG Yueqiang^{1,4,5}, SHI Xiaojun^{1,4,5}

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Agricultural Technology Extension Center, Chongqing 401122, China;

3. Chongqing Jiangjin District Agricultural Technology Extension Center, Jiangjin Chongqing 402260, China;

4. National Monitoring Station of Soil Fertility and Fertilizer Efficiency on Purple Soils, Chongqing 400715, China;

5. Academy of Agricultural Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: This study summarized and analyzed the soil fertility properties of *Zanthoxylum bungeanum* orchards (2013) in the main producing areas of Jiangjin District, Chongqing, China. In order to provide the theoretical basis for comprehensively regulating the soil fertility of *Zanthoxylum bungeanum* orchards in Chongqing, the change characteristics and level of soil fertility in the monitored *Zanthoxylum bungeanum* orchards (2006—2013) were studied and evaluated. The results showed that the average soil pH of the *Zanthoxylum bungeanum* orchards in 2013 was 6.0, showing a spatial distribution of high value in the south and low value in the north. Soil organic matter content was 14.2 g/kg. The spatial distribution was relatively uniform, but it was in the level of deficiency. The average content of available N and K was 85.8 mg/kg and 119.1 mg/kg, respectively. The proportions of the samples in the medium level and above were 35.4% and 55.3%, but there was a large difference between the north and south. The average content of available P was 7.6 mg/kg, which was in deficiency. The proportion of samples with extremely deficiency of available P accounted for 22.0% and concentrated in the southwest area. The soil was rich in available Cu, Zn, Fe and Mn at average contents of 1.9—107.7 mg/kg. The contents of available Zn and Mn had an even spatial distribution, while the contents of other available micro nutrients showed a pathed distribution. The changes on characteristics of soil fertility in monitored *Zanthoxylum bungeanum* orchards showed that from 2006 to 2013, the average soil pH decreased by 0.5 units, indicating the soil acidification was serious. Compared with 2006, soil available N in 2013 increased by 34.2%, while available P decreased by 21.9%. The average contents of available Cu, Zn, Fe and Mn were 2.2—3.6 times of 2006. Compared with 2006, the spatial variation coefficient of all indexes in 2013 decreased by 16.8%. In addition, factor analysis and Nemerow index method were used to analyze the comprehensive fertility level of the monitored *Zanthoxylum bungeanum* orchards. The results showed that the comprehensive soil fertility of the main production areas of *Zanthoxylum bungeanum* in Chongqing increased by 13.3% and 18.2% in 7 years, respectively, but it was still at a low level of grade III. The organic matter, available P and N contents were proved to be the limited factors. In conclusion, it is suggested to increase soil organic matter and adjust soil pH in *Zanthoxylum bungeanum* orchards by returning branches, plant green manure or applying organic fertilizer. Furthermore, rational application of fertilizer should be emphasized to ensure sustainable production of *Zanthoxylum bungeanum* in Chongqing, according to the spatial distribution characteristics of soil nutrients.

Key words: *Zanthoxylum armatum* var. *novemfolius*; soil nutrient; comprehensive soil fertility; nutrient distribution characteristics

土壤肥力水平与分级是评估土壤供给作物养分能力的重要标准,是土壤协调作物正常生长发育的综合能力,并直接影响作物的正常生长过程,同时对果实的产量和品质有显著的影响^[1].土壤综合肥力受土壤物理性质、土壤 pH、土壤有机质、大中量元素及微量元素质量分数等多方面的影响^[2].花椒是我国特有的香辛料^[3],随着我国农业产业的改革,青花椒作为一种优质品种在云、贵、川等西南地区推广迅速,种植面积大、产业链完善,已经成为当地农民的主要收入来源之一^[4].适宜的土壤肥力水平是花椒高产优产的首要条件.因此,开展花椒园土壤养分特征研究和土壤肥力水平评价对于摸清土壤本底、掌握土壤质量变化、指导科学施肥管理、实现花椒产业绿色可持续发展具有重要的意义^[5].郭文龙等^[6]对渭北旱塬花椒主产区和贵州省花椒主产区的土壤养分丰缺进行了评价,发现渭北旱塬花椒园土壤养分总体表现为有机质、氮、微量元素质量分数较低,磷、钾质量分数较高的特点,其中土壤氮素是椒园产量和品质的首要限制因素;此外,贵州省花椒主产区的土壤肥力由大到小呈现出洼地、溶沟、坡改梯的分布特征,主要因为洼地四周密闭,土壤岩体受到雨水冲刷导致养分聚集^[7].目前,针对花椒园的土壤养分状况主要集中在单一时空区间内土壤养分变化的研究上,对花椒园年际间土壤养分变化特征及土壤综合肥力评价的研究较少.土壤综合肥力评价方法包括内梅罗指数法、地统计学法、主成分分析法和聚类分析法等^[8-11],此类方法能通过对多因素的统计分析,得出该地土壤肥力水平的主要限制因子,为提升土壤肥力等级提供依据.赵瑞芬等^[12]基于主成分分析发现山西省核桃主产区土壤速效磷、有机质和全氮是其土壤肥力等级的主要限制因素;潘学军等^[13]研究表明贵州黔西北地区核桃主产区有效硼质量分数是其土壤肥力的限制因子;黄小辉等^[14]选取有机质、pH 等指标采用改进后的内梅罗综合指数法评价重庆市梁平柚主产区土壤的肥力情况,发现有机质、氮和钾是限制当地土壤肥力的主要因子.此外,将土壤综合肥力评价的传统数学统计方法与 GIS 技术相结合可以探究土壤养分在时空上的分布特征和演变规律^[15-16],为监测该地土壤肥力变化趋势及合理指导生产管理提供了一定的理论依据.廖桂堂等^[17]利用地统计学与 GIS 相结合的方法对四川蒙顶山茶园土壤综合肥力进行了评价,发现蒙顶山茶园整体土壤肥力水平不高,茶园土壤肥力水平沿海拔高度的升高而升高,茶园土壤肥力的变化沿坡面等高线呈水平带状分布,其中 pH、全氮、碱解氮、速效钾、速效磷是该地区的主要限制因子.该方法综合考虑了土壤肥力的空间变异性和各种养分的均一性,在保证评价精度的同时尽量避免传统方法主观性较强的缺点,更加直观地表明土壤肥力水平的空间分布特征,为统计学研究成果的实际运用提供了思路.

重庆市是全国第 4 大花椒生产区,目前江津区九叶青花花椒种植面积超过 3.3 万 hm^2 ,已经成为当地农村经济的重要支柱产业^[18],但目前关于重庆九叶青花花椒主产区土壤肥力时空变化特征的研究较少,同时缺乏花椒园土壤肥力综合评价的研究.本研究以 2006 年和 2013 年于重庆市江津花椒主产区调研的 1 418 份土壤样品为研究对象,测定土壤 pH、有机质及有效铜、锌、铁、锰等 9 个指标.采用统计学与 GIS 技术相结合的方法对该区花椒园养分状况的时空变化规律进行研究,利用改进的内梅罗指数法和因子分析法对重庆市江津区九叶青花花椒主产区土壤肥力进行综合评价,以期为九叶青花花椒重庆主产区土壤肥力管理和施肥提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

重庆市江津区位于长江中上游,地理坐标为东经 $105^{\circ}49' \sim 106^{\circ}38'$,北纬 $28^{\circ}28' \sim 29^{\circ}28'$,地处重庆西南部.该地区属北半球中亚热带湿润季风气候,年均日照时数 1 141.0 h,常年平均气温 18.4°C ,年平均降雨量为 1 001.2 mm.紫色土是该地区的主要土壤类型.本研究土壤采样点如图 1,以种植户数为单位,2006 年采样点为 229 个,2013 年为 1 189 个,其中有 126 个为 2006—2013 年的定点监测椒园,定点监测椒园包含所有主产街镇.

1.2 土壤样品采集

本研究样品于 2006 年和 2013 年重庆市江津区花椒园调研采集,基本覆盖所有种植花椒的乡镇,

分级标准》^[21](表 1)设置各属性分级标准值 X_a, X_c, X_p (表 2). 此外, 土壤 pH 分级标准值的确定参考前人研究, 当土壤 pH 值在花椒最适范围 $6.5 < \text{pH} \leq 7$ 时, $IFI_i = 3$; 较适范围 $7 < \text{pH} \leq 8.5$ 时, $IFI_i = 2$; 在不适用范围 $\text{pH} \leq 6.5$ 或 $\text{pH} > 8.5$ 时, $IFI_i = 1$. 土壤综合肥力分级标准见表 3^[15].

1) 分肥力系数 IFI_i 的计算:

$$IFI_i = \begin{cases} \frac{X}{X_a} & X \leq X_a \\ 1 + \frac{X - X_a}{X_c - X_a} & X_a < X \leq X_c \\ 2 + \frac{X - X_c}{X_p - X_c} & X_c < X \leq X_p \\ 3 & X \geq X_p \end{cases} \quad (2)$$

式中, X 表示测定值, X_a, X_c 和 X_p 为分级标准值.

2) 综合肥力指数 IFI 的计算:

$$IFI = \sqrt{\frac{IFI_{i\text{平均}}^2 + IFI_{i\text{最小}}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (3)$$

式中, $IFI_{i\text{平均}}$ 为各肥力系数均值, $IFI_{i\text{最小}}$ 为各肥力系数最小值, n 代表评价指标的个数. IFI 值介于 0~3 之间, IFI 值越大, 表示该土壤越肥沃.

表 1 土壤各指标丰缺分级标准

肥力指标	养分丰缺等级					
	I	II	III	IV	V	VI
pH	>8.5	7.5~8.5	6.5~7.5	5.5~6.5	4.5~5.5	≤4.5
SOM/(g·kg ⁻¹)	>40	30~40	20~30	10~20	6~10	≤6
AN/(mg·kg ⁻¹)	>150	120~150	90~120	60~90	30~60	≤30
AP/(mg·kg ⁻¹)	>40	20~40	10~20	5~10	3~5	≤3
AK/(mg·kg ⁻¹)	>200	150~200	100~150	50~100	30~50	≤30
ACu/(mg·kg ⁻¹)	>1.8	1~1.8	0.2~1	0.1~0.2	≤0.1	—
AZn/(mg·kg ⁻¹)	>3	1~3	0.5~1	0.3~0.5	≤0.3	—
AFe/(mg·kg ⁻¹)	>20	10~20	4.5~10	2.5~4.5	≤2.5	—
AMn/(mg·kg ⁻¹)	>30	15~30	5~15	1~5	≤1	—

注: SOM 表示土壤有机质, AN 表示碱解氮, AP 表示速效磷, AK 表示速效钾, ACu 表示有效铜, AZn 表示有效锌, AFe 表示有效铁, AMn 表示有效锰.

表 2 土壤各指标的分级标准值

肥力指标	X_a	X_c	X_p
SOM/(g·kg ⁻¹)	10	20	30
AN/(mg·kg ⁻¹)	60	120	150
AP/(mg·kg ⁻¹)	3	10	20
AK/(mg·kg ⁻¹)	40	100	150

注: SOM 表示土壤有机质, AN 表示碱解氮, AP 表示速效磷, AK 表示速效钾.

表 3 土壤综合肥力分级标准

肥力等级	I	II	III	IV
因子分析综合指数	>0.75	0.50~0.75	0.25~0.50	≤0.25
内梅罗指数综合指数	>2.7	1.8~2.7	0.9~1.8	≤0.9

1.5 数据处理

数据用 Office 2019 处理, SPSS 22.0 进行相关性分析, Origin 2018 和 Arcgis 10.2 作图。

2 结果与分析

2.1 江津花椒主产区土壤养分质量分数的空间分布特征

由图 2a 至图 2e 可知, 2013 年重庆市江津全区花椒园 1 189 个样点土壤 pH 值变幅为 3.8~7.9, 平均值为 6.0, 整体处于弱酸性, 空间上呈南高北低的分布趋势。根据分级标准, 弱酸性及以下 ($\text{pH} \leq 6.5$) 样点占比 62.1%, 适宜花椒生长的 pH ($6.5 < \text{pH} \leq 8.5$) 样点仅占 37.9%。土壤有机质质量分数范围为 1.2~50.2 g/kg, 平均值为 14.2 g/kg, 整体处于缺乏水平, 其中缺乏及以下 (≤ 20 g/kg) 占比高达 90.8%, 空间上呈均匀分布, 变化不明显。碱解氮质量分数范围为 19.0~284.1 mg/kg, 平均值为 85.8 mg/kg, 接近中等水平, 整体分布从北到南逐渐增加, 中等及以上 (> 90 mg/kg) 样点占比 35.4%。速效磷质量分数范围为 0.2~73.6 mg/kg, 平均值为 7.6 mg/kg, 处于缺乏水平, 呈现出中部丰富而四周缺乏的空间分布特征, 其中极缺乏 (≤ 3 mg/kg) 样点占比 22.0%。速效钾质量分数范围为 29.3~341.7 mg/kg, 平均值为 119.1 mg/kg, 处于中等水平, 整体呈中部偏高、四周较低的空间分布特征, 中等及以上 (> 100 mg/kg) 样点占比 55.3%。

由图 2f 至图 2i 可知, 2013 年重庆市江津区花椒园土壤有效铜空间上呈中部偏低、四周偏高的分布特点。有效铜质量分数范围为 0.1~8.5 mg/kg, 平均值为 1.9 mg/kg, 处于丰富水平, 丰富及以上 (> 1 mg/kg) 样点占比 67.1%。有效锌质量分数范围为 0.02~48.0 mg/kg, 平均值为 4.2 mg/kg, 处于很丰富水平, 空间分布较为均匀, 其中很丰富 (> 3 mg/kg) 样点占比 53.5%。有效铁质量分数范围为 0.06~448.2 mg/kg, 平均值为 27.8 mg/kg, 处于很丰富水平, 空间分布基本保持中高四周低的特点, 其中很丰富 (> 20 mg/kg) 样点占比 35.8%。有效锰质量分数范围为 0.04~448.2 mg/kg, 平均值为 107.7 mg/kg, 处于很丰富水平, 空间分布较为均匀, 其中很丰富 (> 30 mg/kg) 样点占比 78.2%。

2.2 江津花椒主产区土壤各养分间相关性分析

土壤微量元素、有机质及 pH 的相关性分析如表 4。土壤 pH 与碱解氮、速效磷、有效铜、有效锌、有效铁、有效锰呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.185, -0.278, -0.446, -0.364, -0.398, -0.415。有机质与碱解氮、速效磷、有效钾、有效铜、有效锌均呈显著正相关, 相关系数分别为 0.369, 0.093, 0.168, 0.055, 0.164。碱解氮和速效磷与微量元素呈显著正相关。碱解氮、速效磷、速效钾互相呈显著正相关, 微量元素之间同样呈显著正相关。

表 4 花椒园土壤有效养分、有机质及 pH 的相关性分析 ($n=1\ 418$)

	pH	SOM	AN	AP	AK	ACu	AZn	AFe	AMn
pH	1								
SOM	0.010	1							
AN	-0.185**	0.369**	1						
AP	-0.278**	0.093**	0.185**	1					
AK	0.003	0.168**	0.239**	0.135**	1				
ACu	-0.446**	0.055**	0.271**	0.145**	0.033	1			
AZn	-0.364**	0.164**	0.280**	0.221**	0.048	0.421**	1		
AFe	-0.398**	0.006	0.141**	0.120**	-0.027	0.459**	0.251**	1	
AMn	-0.415**	0.002	0.225**	0.156**	0.022	0.413**	0.434**	0.140**	1

注: SOM 表示土壤有机质, AN 表示碱解氮, AP 表示速效磷, AK 表示速效钾, ACu 表示有效铜, AZn 表示有效锌, AFe 表示有效铁, AMn 表示有效锰; * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义。

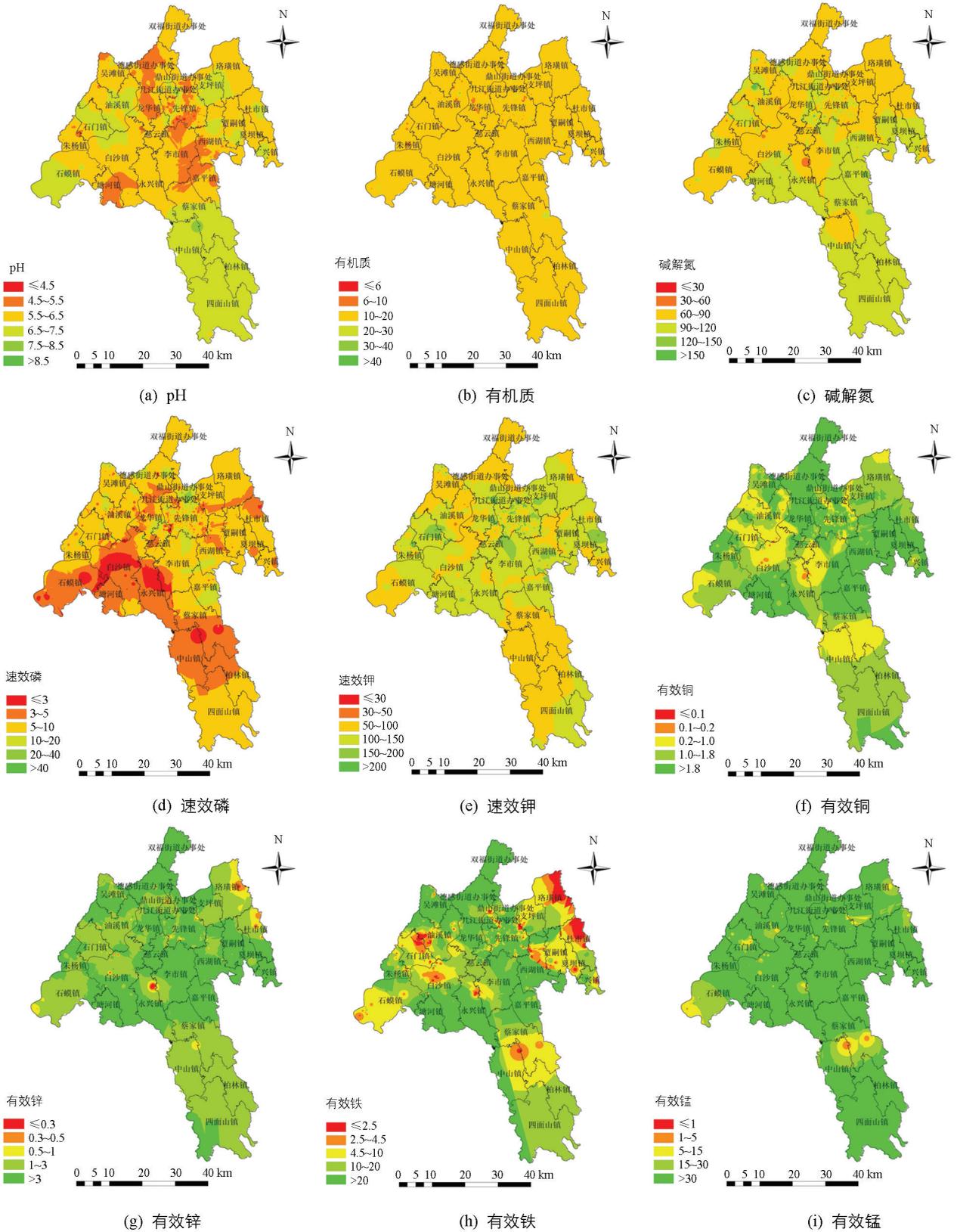


图 2 2013 年江津区花椒园土壤养分质量分数 GIS 空间分布 ($n=1\ 189$)

2.3 江津花椒主产区土壤养分变化特征及肥力综合评价

2006—2013 年 126 个定点椒园土壤各养分指标均发生了不同程度的演变(表 5)。土壤 pH 均值从 6.7 降至 6.2, 降 0.5 个单位, 整体处于弱酸性状态; 有机质均值从 13.3 g/kg 增加到 14.0 g/kg, 增幅较小, 整

体仍处于缺乏状态; 碱解氮均值从 63.7 mg/kg 增加到 85.5 mg/kg, 提高了 34.2%, 整体质量分数接近中等水平; 速效磷均值从 7.9 mg/kg 降至 6.2 mg/kg, 降低了 21.9%, 整体质量分数仍处于缺乏状态; 速效钾均值从 105.4 mg/kg 增加到 109.0 mg/kg, 整体质量分数处于中等水平; 有效铜、有效锌、有效铁、有效锰均值分别从 0.5 mg/kg, 1.9 mg/kg, 8.8 mg/kg, 32.3 mg/kg 增加到 1.8 mg/kg, 4.2 mg/kg, 26.2 mg/kg, 96.2 mg/kg, 提高了 2.2~3.6 倍. 整体质量分数保持很丰富状态. 从 2006—2013 年, 除碱解氮、有效铜和有效锌外, 其余指标的变异系数均有所下降, 2013 年较 2006 年各指标变异系数平均下降了 16.8%. 其中, 有效铁空间变异系数降幅最大, 由 199.3% 降为 137.2%, 但仍处于强变异; 速效磷、有效锰则由 147.6% 和 112.1% 的强变异变化为 94.4% 和 79.3% 的中等变异; 其余指标均保持中等变异不变, 各指标变异系数范围为 12.8%~199.3%.

表 5 土壤各属性的变化特征

肥力指标	2006 年($n=126$)			2013 年($n=126$)		
	均值	范围	变异系数/%	均值	范围	变异系数/%
pH	6.7	4.2~8.3	17.3	6.2	4.2~7.4	12.8
SOM/(g·kg ⁻¹)	13.3	4.3~36.3	32.7	14.0	6.4~38.4	30.5
AN/(mg·kg ⁻¹)	63.7	7.5~158.4	36.5	85.5	19.0~284.1	39.5
AP/(mg·kg ⁻¹)	7.9	0.5~116.2	147.6	6.2	0.3~36.5	94.4
AK/(mg·kg ⁻¹)	105.4	12.1~286.3	49.8	109.0	29.3~341.7	47.8
ACu/(mg·kg ⁻¹)	0.5	0.01~1.8	60.6	1.8	0.06~6.7	88.9
AZn/(mg·kg ⁻¹)	1.9	0.2~6.2	59.2	4.2	0.1~29.6	103.4
AF _{Fe} /(mg·kg ⁻¹)	8.8	0.1~129.1	199.3	26.2	0.28~396.76	137.2
AMn/(mg·kg ⁻¹)	32.3	0.7~200.3	112.1	96.2	1.3~355.0	79.3

注: SOM 表示土壤有机质, AN 表示碱解氮, AP 表示速效磷, AK 表示速效钾, ACu 表示有效铜, AZn 表示有效锌, AF_{Fe} 表示有效铁, AMn 表示有效锰.

基于土壤各肥力指标变化, 选取土壤 pH、有机质及速效氮、速效磷、速效钾 5 个养分指标对江津区花椒主产镇 126 个定点监测椒园土壤肥力进行定量化综合评价(图 3 和图 4). 改进的因子分析法和内梅罗指数法表明, 2006—2013 年主产镇椒园土壤综合肥力平均值分别提升了 13.3% 和 18.2%, 且都处于Ⅲ级肥力水平, 其中, 有机质、速效磷和碱解氮的分肥力系数较低, 为主要限制因子. 改进的内梅罗指数法表明, 2006 年主产镇的肥力综合值范围为 0.6~1.4, 至 2013 年变化为 0.9~1.5; 因子分析法表明, 2006 年主产镇的肥力综合值范围为 0.3~0.5, 至 2013 年变化为 0.2~0.6. 内梅罗指数分析表明, 嘉平镇肥力综合值提升高达 92.5%, 石蟆镇降低最多, 为 24.5%; 而因子分析表明吴滩镇土壤综合肥力指数提升幅度最大达 49.7%, 而龙华镇降低最多, 为 33.2%.

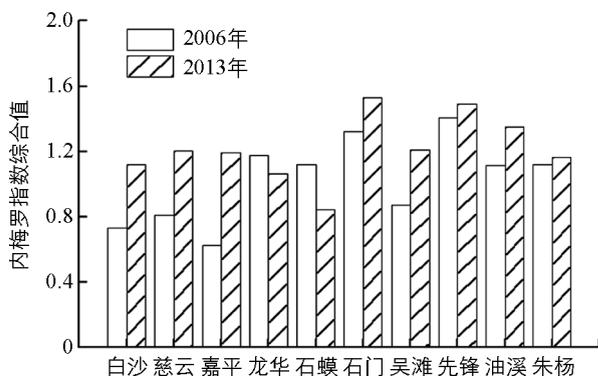


图 3 江津区花椒主产镇内梅罗指数综合值

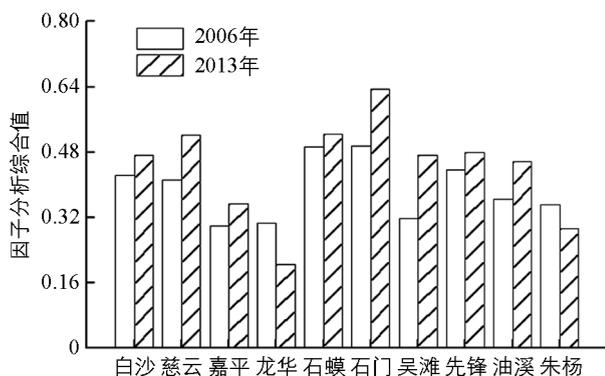


图 4 江津区花椒主产镇因子分析综合值

3 讨论

3.1 重庆花椒主产区土壤养分质量分数特征

适宜的土壤养分状况,是椒园可持续高产高效的前提.本研究结果表明,重庆花椒主产区土壤养分状况具有明显的空间异质性.土壤 pH、碱解氮、速效钾等在空间上呈现斑块状或者带状分布,而土壤有机质、有效锌和有效锰则呈均匀分布.前人研究表明,土壤养分的空间异质性可能与坡度、海拔和田间管理等因素有关^[22].江津椒园多建立在山坡丘陵地区,不同坡度、海拔的土壤质地有所不同,且不同农户管理水平参差不齐,均可能影响椒园土壤养分的空间分布^[23].本研究结果表明,2013 年江津花椒主产区 1 189 个样点土壤 pH 均值仅为 6.0.薛茹^[24]、龙成昌等^[25]、薛智德等^[26]测定了多地椒园土壤 pH 值,结果表明重庆、四川椒园土壤 pH 值较陕西和贵州椒园土壤 pH 值平均低 1.5~2.1 个单位.重庆、四川椒园土壤多为紫色土、黄棕壤^[4, 27],土壤 pH 值较陕西、贵州的石灰土、黄土等碱性土壤偏低^[25-29].而九叶青花椒生长适宜的 pH 值范围为 6.5~7.0^[4].因此,重庆椒园应当适当调节土壤 pH 以保证花椒可持续正常生长.重庆花椒主产区土壤有机质仅为 14.2 g/kg,处于缺乏水平,其质量分数仅为贵州椒园的 50%左右(30 g/kg)^[22].这可能与气候和成土母质有关,其中重庆地区空气湿度大,夏季高温多雨,土壤微生物活性强,加快了有机质的分解和矿化,不利于有机质的积累^[30].而贵州椒园石灰土中 Ca^{2+} 与胡敏酸形成难分解的化合物,能够稳定土壤中的有机质,降低其分解程度^[22].因此重庆椒园需注重有机肥施用、枝条还田、堆肥等合理措施来提高土壤有机质^[31].重庆花椒主产区土壤速效磷仅为 7.6 mg/kg,同陕西、四川等地椒园相比速效磷质量分数相近,均偏低.这可能是因为磷素施入土壤后,易被固定,大部分椒园建在山地丘陵地区,大量可溶性磷可能会随地表径流和壤中流损失^[32].因此重庆椒园可以通过绿肥覆盖来降低土壤磷素径流损失,并活化土壤中固定的磷素^[33].此外,重庆椒园与四川、贵州等地相比,土壤碱解氮和速效钾的平均质量分数差异无统计学意义^[23-25].2013 年重庆花椒主产区有效铜、有效锌、有效铁、有效锰平均质量分数分别为 1.9 mg/kg、4.2 mg/kg、27.8 mg/kg 和 107.7 mg/kg,按照土壤普查微量元素分级标准,均达到很丰富水平.有研究发现重庆、四川花椒园土壤微量元素非常丰富,而贵州、陕西等地则较低^[23-26].这可能是因为重庆、四川椒园土壤偏酸性,高浓度的 H^+ 使微量元素从无效态转化为离子态,从而增加了有效微量元素质量分数.而贵州、陕西花椒园土壤大部分为碱性,土壤微量元素易形成氢氧化物沉淀或被碳酸盐吸附,有效性降低^[34].综上所述,重庆花椒主产区的土壤偏酸性,有机质、速效磷较为缺乏,而碱解氮、速效钾处于中等水平,微量元素质量分数丰富.

3.2 重庆花椒主产区土壤肥力演变特征及综合评价

椒园土壤肥力演变特征和综合肥力是指导椒园土壤管理、维持椒园绿色可持续发展的重要指标.本研究通过 126 个定点监测椒园土壤养分并结合因子分析法和改进的内梅罗指数法对其土壤肥力进行综合评价.两种评价方法结果均表明,2006—2013 年江津区主产镇土壤肥力都有不同程度的升降,平均肥力略有提升但仍处于较低水平(Ⅲ级).其中椒园有机质、速效磷和碱解氮是主要限制因子,这与谢贤敏等^[35]对江津土壤耕地肥力的研究结果类似.杨仕曦等^[36]研究表明,重庆市九龙坡花椒高产区的有机质质量分数为 20.3 g/kg,且产量与有机质质量分数呈正相关关系.杨林生等^[37]研究表明重庆江津椒园施用有机肥后,产量从 9.5 t/hm² 增加到 11.2 t/hm²,增产率为 17.8%.本研究结果表明有机质与碱解氮、速效磷、速效钾、有效铜、有效锌均呈显著正相关,其质量分数的高低也会直接影响土壤有效养分的丰缺,从而影响土壤肥力等级.此外,李青等^[38]研究表明土壤速效磷缺乏会直接导致作物生长受抑制,根系发育差,易老化,因此,提高土壤有效磷质量分数在一定程度上可以提升椒园的土壤肥力水平,促进花椒生长发育且增产效果显著.前人研究表明土壤碱解氮偏低,除了会直接影响花椒的生长发育及产量外,花椒品质指标如麻味物质、乙醇提取物等含氮化合物质量分数也会降低^[4].因此,重庆花椒主产区可以通过提高土壤有机质、速效磷、碱解氮来培肥土壤、提升椒园土壤肥力等级,从而提高花椒的产量和品质.

椒园土壤养分变化特征研究结果表明,2006—2013 年土壤 pH 值平均降低了 0.5 个单位,土壤酸化进程快.2013 年土壤有效铜、有效锌、有效铁、有效锰平均质量分数分别是 2006 年的 2.2~3.6 倍.且椒园土壤有效微量元素质量分数与 pH 值呈显著负相关,微量元素质量分数的增加与土壤 pH 值下降有关^[23].

张福锁^[39]研究表明氮肥的过量施用是导致我国农田土壤严重酸化的主要原因,尤其在果园生产中农户氮肥的投入量显著高于粮食作物.江津九叶青花椒生产上农户平均纯氮投入量高达 351 kg/hm²,相比高产高效椒园的氮素投入量(272 kg/hm²)高出 29.1%,氮肥过量施用农户占比高达 21.9%^[37].而本研究结果表明,7年间椒园土壤碱解氮虽提高了 34.2%,但仍处于中等偏低水平.椒园氮肥投入虽然较多,但农户多为撒施,重庆地区夏季高温多雨,撒施的氮肥易挥发、径流、淋洗,导致氮肥利用率低、环境污染等问题^[37, 39].椒园施用钾肥以硫酸钾为主,且花椒树周年钾素累积量可达 200 kg/hm²,花椒对钾素的吸收量较大,可能导致 SO₄²⁻ 的累积,进而引起土壤酸化^[37].此外,有研究表明作物带走大量的钙、镁离子也是土壤酸化的主要驱动因素之一.花椒周年带走的钙、镁量分别为 153 kg/hm² 和 35 kg/hm²,进而影响土壤中酸性阴离子的富集,也可能是椒园土壤酸化的主要原因^[4].因此,改良重庆椒园土壤 pH 对花椒绿色可持续生产具有重要意义.土壤有机质的提升对于椒园增产有重要意义^[31].本研究表明,2006—2013 年重庆椒园的土壤有机质增幅较小.重庆属于亚热带季风性湿润气候,降雨较多,土壤微生物活性强,有机质的分解和矿化速率高,且农户有机肥施用少,不利于其积累^[40].因此,在花椒园的施肥管理中,应注重增加土壤碳输入(增施有机肥、种植绿肥和枝条还田等途径).土壤中速效磷质量分数高低是表征土壤为作物提供磷素能力强弱的重要指标^[32].2006—2013 年花椒主产区的土壤速效磷降低了 21.9%,且处于缺乏水平,这可能是因为磷素易被土壤固定^[33],并且椒园多位于坡地丘陵等地区,表面无生草覆盖,磷素随地表径流流失量较大^[32].因此,重庆椒园应重视有机物料的投入,并在表面进行合理的生草覆盖,在降低养分流失的同时培肥土壤.

4 结论

重庆市江津花椒主产区 1 189 个样点土壤 pH 均值为 6.0,呈南高北低的空间分布;椒园土壤酸化进程快,2013 年 126 个定位监测点椒园土壤 pH 值较 2006 年下降了 0.5 个单位.

土壤有机质缺乏(质量分数为 14.2 g/kg),空间上分布较均匀,没有随花椒种植年限的延长发生明显变化.土壤碱解氮和速效钾平均质量分数分别为 85.8 mg/kg,119.1 mg/kg,中等及以上比例分别为 35.4%和 55.3%,空间差异较大.土壤速效磷质量分数低,平均质量分数为 7.6 mg/kg,极缺乏的样点占比 22.0%,且集中在西南片区.土壤有效微量元素均达到很丰富水平;随着椒园年限增加,有效金属微量元素快速提高,2013 年土壤有效铜、有效锌、有效铁、有效锰平均质量分数分别是 2006 年的 2.2~3.6 倍.

126 个定点椒园土壤肥力变化及综合评价表明,重庆花椒主产区从 2006—2013 年土壤综合肥力略有提升,但仍处于较低水平(Ⅲ级),土壤有机质、速效磷和碱解氮是主要限制因子.建议在椒园采用枝条还田、种植绿肥或施用有机肥来提高土壤有机质,并结合土壤养分空间分布特征,合理施肥以保障花椒绿色可持续生产.

参考文献:

- [1] 瞿爽,杨瑞,王勇,等.喀斯特高原顶坛花椒生长过程中土壤养分变化特征[J].经济林研究,2020,38(2):183-191.
- [2] 赖宁,陈晔晔,付彦博,等.基于 GIS 的南疆果园土壤肥力评价[J].新疆农业科学,2019,56(8):1476-1486.
- [3] 姚佳,蒲彪.青花的研究进展[J].中国调味品,2010,35(6):35-39.
- [4] 杨林生.重庆九叶青花椒养分管理现状及优化施肥研究[D].重庆:西南大学,2019.
- [5] 喻阳华,王璐,钟欣平,等.贵州喀斯特山区不同海拔花椒人工林土壤质量评价[J].生态学报,2018,38(21):7850-7858.
- [6] 郭文龙,吴拥强,刘建海,等.渭北旱塬花椒园土壤养分状况及其调控措施[J].贵州农业科学,2020,48(8):99-103.
- [7] 李开萍,刘子琦,李渊,等.喀斯特高原峡谷区花椒林土壤质量评价[J].森林与环境学报,2020,40(4):391-397.
- [8] 吴海燕,金荣德,范作伟,等.基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J].植物营养与肥料学报,2018,24(2):325-334.
- [9] 杨全合,安永龙.基于地统计学和 GIS 的通川区于家务乡土壤肥力综合评价[J].西南农业学报,2019,32(4):882-891.
- [10] 亓丽,潘继花,郇志飞,等.基于熵权的模糊评价法对日照市茶园土壤养分分析与质量评价[J].中国农学通报,2019,

35(6): 54-61.

- [11] 周伟, 王文杰, 张波, 等. 长春城市森林绿地土壤肥力评价 [J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1211-1220.
- [12] 赵瑞芬, 程滨, 滑小赞, 等. 基于主成分分析的山西省核桃主产区土壤肥力评价 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 61-68.
- [13] 潘学军, 张文娥, 刘伟, 等. 黔西北高原核桃优株立地土壤的养分状况 [J]. 贵州农业科学, 2011, 39(8): 110-112.
- [14] 黄小辉, 王玉书, 魏立本, 等. 梁平柚主要产区土壤养分状况及肥力评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 49-56.
- [15] 张庆利, 潘贤章, 王洪杰, 等. 中等尺度上土壤肥力质量的空间分布研究及定量评价 [J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 493-497.
- [16] CHENG X F, SHI X Z, YU D S, et al. Using GIS Spatial Distribution to Predict Soil Organic Carbon in Subtropical China [J]. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 425-431.
- [17] 廖桂堂, 李廷轩, 王永东, 等. 基于 GIS 和地统计学的低山茶园土壤肥力质量评价 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1978-1986.
- [18] 国家林业局. 中国林业统计年鉴(2014) [M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 谢军, 方林发, 徐春丽, 等. 西南紫色土不同施肥措施下土壤综合肥力评价与比较 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1500-1507.
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土壤 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [22] 邸欣月, 安显金, 董慧, 等. 贵州喀斯特区域土壤有机质的分布与演化特征 [J]. 地球与环境, 2015, 43(6): 697-708.
- [23] 刘汝乾. 九叶青花椒缩枝矮化密植技改丰产管理技术初探 [J]. 安徽农学通报, 2012, 18(16): 168-170.
- [24] 薛茹. 汉源花椒主产区土壤肥力特征研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [25] 龙成昌, 陈训. 喀斯特石漠化地区人工生态经济林土壤营养特性典型研究 [J]. 贵州科学, 2010, 28(4): 46-52.
- [26] 薛智德, 方军华, 魏安智, 等. 凤县花椒园土壤养分特征研究 [J]. 陕西林业科技, 2017(4): 18-21.
- [27] 邓利梅, 陆传豪, 刘刚才. 川中丘陵区耕地撂荒对土壤肥力的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 36-44.
- [28] 薛智德, 魏安智, 王胜棋, 等. 凤县花椒园土壤四种微量元素含量分析 [J]. 陕西林业科技, 2017(2): 7-11.
- [29] 丁少男, 薛莲, 刘国彬, 等. 长期施肥对黄土丘陵区农田土壤微量元素有效含量的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 124-130.
- [30] 王齐齐, 徐虎, 马常宝, 等. 西部地区紫色土近 30 年来土壤肥力与生产力演变趋势分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1492-1499.
- [31] 孙馨宇, 张泉, 王金硕, 等. 果园土壤有机质含量影响因素及提升管理策略 [J]. 中国果树, 2021(2): 2-5, 12.
- [32] 何丙辉, 黄巍, 郭甜, 等. 不同施肥处理对紫色土坡耕地地表径流磷素流失的影响 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, 29(3): 42-47.
- [33] 王亚麒, 袁玲. 甜高粱、高丹草和拉巴豆对难溶性磷的活化与吸收 [J]. 草业学报, 2019, 28(10): 33-43.
- [34] 赵静. 土壤酸化对土壤有效养分、酶活性及黄金梨品质的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [35] 谢贤敏, 李志琦, 彭清. 重庆市江津区耕地土壤养分监测与变化评价 [J]. 南方农业, 2017, 11(25): 88-93.
- [36] 杨仕曦, 吕广斌, 黄云, 等. 九龙坡花椒种植区地形、土壤肥力与花椒产量的关系 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1823-1832.
- [37] 杨林生, 杨敏, 彭清, 等. 重庆市九叶青花椒施肥现状评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 61-68.
- [38] 李青, 刘盈盈, 张家春, 等. 高海拔党参产地土壤与植株碳、氮、磷丰缺现状及诊断 [J]. 西南农业学报, 2016, 29(12): 2896-2901.
- [39] 张福锁. 我国农田土壤酸化现状及影响 [J]. 民主与科学, 2016(6): 26-27.
- [40] 苏婷婷, 周鑫斌, 徐墨赤, 等. 重庆市柑橘园土壤养分现状研究 [J]. 土壤, 2017, 49(5): 897-902.