

典型红壤区井冈蜜柚果园土壤肥力空间分布与综合评价^①

关贤交^{1,2}, 梁喜欢^{1,2}, 陈先茂^{1,2}, 严志雁^{1,3}, 谢江^{1,2}, 邓国强^{1,2}, 钱银飞^{1,2}, 邱才飞^{1,2}, 李秀秀^{1,2}, 胡娟^{1,2}, 彭春瑞^{1,2}, 陈金^{1,2*}

(1 井冈山红壤研究所(江西省农业科学院井冈山分院), 江西吉安 343016; 2 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所/国家红壤改良工程技术研究中心/农业农村部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室/国家农业环境宜春观测实验站/耕地改良与质量提升江西省重点实验室, 南昌 330200; 3 江西省农业科学院农业经济信息研究所, 南昌 330200)

摘要: 为了解典型红壤区井冈蜜柚果园土壤养分现状, 分析了 13 个县(市、区)101 个井冈蜜柚果园的土壤 pH、有机质、阳离子交换量、大量元素和有效微量元素等 16 个肥力指标的等级和空间分布特征, 并采用模糊数学隶属函数模型及权重系数法对果园土壤肥力进行了综合评价。结果表明: 典型红壤区井冈蜜柚果园土壤 pH 平均值为 5.17, 处于酸性状态; 水解性氮含量平均值为 56.40 mg/kg, 处于缺乏状态; 有效硼含量平均值为 0.23 mg/kg, 处于极缺状态; 电导率平均值为 64.52 μS/cm, 处于极低盐度状态, 这些是限制井冈蜜柚果园土壤肥力的主要障碍因子。有机质、全氮、速效钾含量等处于中等状态, 全磷、全钾和有效磷含量处于丰富状态; 有效锌、有效铜、交换性锰、有效硫和有效铁等微量元素含量处于丰富或极丰富状态。从空间分布来看, 土壤 pH 呈中部高四周低分布, 土壤有机质、水解性氮、速效钾含量呈东低西高分布, 土壤有效磷含量呈南北较高中间较低分布。果园土壤肥力综合指数平均为 0.45, 总体土壤肥力水平为中等, 其中永新县、吉水县和吉安市青原区土壤肥力综合指数分别为 0.37、0.38 和 0.34, 是肥力较差的 3 个县(市、区)。因此, 建议研究区井冈蜜柚果园增施有机肥配施石灰, 结合间作绿肥、增施硼肥等土壤综合改良与培肥技术, 以提高果园土壤肥力。

关键词: 井冈蜜柚; 果园; 土壤肥力; 综合评价; 空间分布

中图分类号: S158 文献标志码: A

Spatial Distribution and Comprehensive Evaluation of Soil Fertility in Jinggang Honey Pomelo Orchard of Typical Red Soil Area

GUAN Xianjiao^{1,2}, LIANG Xihuan^{1,2}, CHEN Xianmao^{1,2}, YAN Zhiyan^{1,3}, XIE Jiang^{1,2}, DENG Guoqiang^{1,2}, QIAN Yinfei^{1,2}, QIU Caifei^{1,2}, LI Xiuxiu^{1,2}, HU Juan^{1,2}, PENG Chunrui^{1,2}, CHEN Jin^{1,2*}

(1 Jinggangshan Institute of Red Soil (Jinggangshan Branch of Jiangxi Academy of Agricultural Sciences), Ji'an, Jiangxi 343016, China; 2 Soil and Fertilizer & Resources and Environment Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences / National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment of Yichun / Key Laboratory of Arable Land Improvement and Quality Improvement of Jiangxi Province, Nanchang 330200, China; 3 Institute of Agricultural Economics and Information, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

Abstract: To understand the current status of soil nutrients of Jinggang honey pomelo orchards in typical red soil area, the grades and spatial distribution characteristics of 16 fertility indicators, including soil pH, organic matter, cation exchange capacity, macroelements, and available trace elements, were analyzed in 101 Jinggang honey pomelo orchards of 13 counties (cities, districts) in Ji'an City, a typical red soil area of south China, and the fuzzy mathematical membership function model and weight coefficient method were used to comprehensively evaluate the soil fertility of the orchards. The results showed that the average pH was 5.17, in an acidic state. The average value of hydrolytic nitrogen was 56.40 mg/kg, in a deficient state. The average value

^①基金项目: 井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目(20222-051246), 江西省现代农业科研协同创新专项(JXXTCX201904)和江西省重大科技研发专项(20203ABC28W014)资助。

* 通信作者(chenjin200477@163.com)

作者简介: 关贤交(1979—), 男, 湖南武冈人, 博士, 副研究员, 研究方向为土壤改良与培肥。E-mail: guanxianjiao@126.com

of available boron was 0.23 mg/kg, in a severe deficiency state. The average value of electrical conductivity was 64.52 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicating a very low salinity. Therefore, pH, hydrolytic nitrogen, available boron and electrical conductivity were the main limiting factors limiting soil fertility. The contents of organic matter, total nitrogen, and available potassium were in moderate states, while total phosphorus, total potassium, and available phosphorus were in rich states. Available trace elements such as zinc, copper, sulfur, iron, and exchangeable manganese were abundant or extremely abundant. From a spatial distribution perspective, soil pH was high in the middle while low in the surrounding areas. Soil organic matter content, hydrolyzable nitrogen, and available potassium were low in the east while high in the west. Soil available phosphorus was high in the north and south while low in the middle. Soil integrated fertility index (IFI) was 0.45, in the moderate level. Soil IFI in Yongxin County, Jishui County, and Qingyuan District of Ji'an City were 0.37, 0.38, and 0.34, respectively, indicated their soil fertility were poor. In conclusion, in the study area it was recommended to apply organic fertilizer combined with lime, and integrated soil improvement and fertility enhancement techniques such as intercropping green manure in orchards and increasing boron fertilizer application to improve soil fertility in orchards.

Key words: Jinggang honey pomelo; Orchard; Soil fertility; Comprehensive evaluation; Spatial distribution

南方红壤丘陵区在我国柑橘等水果种植业中占据着举足轻重的地位。该区属亚热带季风气候区, 热量资源丰富, 雨热同季, 年平均气温 $15\sim18^{\circ}\text{C}$, 年降水量 $1\,300\sim1\,900\,\text{mm}$, 全年70%以上的光、热、水量分布在作物生长期, 得天独厚的自然资源有利于柑橘等水果的生长, 柑橘种植面积约为 $1.79\times10^6\,\text{hm}^2$, 年产量占全国总产量的70%以上^[1-2]。江西省作为典型红壤丘陵区, 该地区雨量充沛、光照充足, 宜果土地资源丰富, 柑橘种植面积和产量均列全国第三, 已形成以“南橘北梨中柚”为代表的果业发展格局。其中, 井冈蜜柚通过加快推进品种化、标准化、规模化和品牌化的“四化”发展模式, 产业规模持续扩大, 截至2024年种植面积达46.71万亩^[3], 作为江西柚类代表成为具有地方特色的优势农产品品牌, 也成为促进农业增效和农民增收的重要区域支柱产业。

土壤肥力是指土壤供给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]。研究表明, 果园土壤的养分状况对于果树产量及品质具有重要影响, 同时也是果园科学施肥和培肥的重要依据^[5-6]。对土壤肥力进行合理分析和客观评价, 揭示土壤养分分布及肥力状况, 才能指导科学合理施肥, 提高果树产量与品质^[7-8]。为此, 不少学者已对红壤区的一些果园土壤肥力状况进行了调查研究, 评价结果对果园科学施肥起到了重要的指导作用。如江泽普等^[9]对广西壮族自治区13个县市共151个果园的13个土壤肥力指标进行了综合评价, 发现广西红壤果园土壤肥力综合指数IFI在0.17~0.25, 果园土壤肥力属中下水平。曹胜等^[10]对湖南省82个典型柑橘园的土壤肥力指标进行了分析测试, 结果表明86.75%的柑橘园土壤pH为酸性至强酸性, 78.31%的土壤有机质含量

处于适宜水平, 有效氮、磷、钾缺乏土壤比例分别为15.66%、69.88%和27.71%。陈会玲等^[11]在湖北省秭归县柑橘园采集了57个土壤样品, 以土壤养分含量8项为土壤肥力评价指标, 发现柑橘园土壤肥力综合指数IFI均介于0.90~1.80, 属于中等肥力。郝奇等^[12]选取江西省具有代表性的新余蜜桔园进行样地布设, 共采集150个样点土样, 以pH、有机质、大量营养元素为评价指标对桔园土壤肥力进行了综合评价, 结果表明桔园土壤肥力综合指数IFI平均值为0.40, 土壤综合肥力一般偏下, 且土壤酸度较高。

井冈蜜柚果园土壤多为红壤, 本身具有酸性强、土质黏重、有机质含量低等特点。近年来, 随着井冈蜜柚产业规模的扩大, 许多农户在生产中为提高果树产量和节省劳力而盲目施用大量化肥, 加上管理不规范, 从而导致不少果园出现土壤板结、酸化加剧、肥力偏低、养分失衡等问题, 影响了蜜柚的产量和品质。研究土壤肥力现状对井冈蜜柚产业可持续发展具有重要的指导意义^[13]。吴强建等^[14]对江西省吉安市9个井冈蜜柚主产区的果园土壤肥力状况进行了分析, 探明了井冈蜜柚种植区果园表层土壤pH均值为4.93, 酸性较强, 不利于蜜柚生长。但井冈蜜柚在典型红壤区覆盖面广, 其他地区的肥力状况及其综合评价尚有待完善。因此, 为全面了解典型红壤区井冈蜜柚果园土壤肥力状况, 充分挖掘井冈蜜柚的生产潜力, 本研究于2020年对区域内13个县(市、区)的101个代表性井冈蜜柚果园土壤进行了调查和采样, 选取16个土壤肥力指标综合分析了井冈蜜柚果园土壤肥力现状, 并采用模糊数学隶属函数模型及权重系数计算了果园土壤肥力综合指数, 对果园土壤肥力进行了综合评价, 以期为典型红壤区井冈蜜柚果园土壤

改良培肥和科学施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择井冈蜜柚主产区江西省吉安市全域为研究区, 地理位置 $25^{\circ}58'32''N \sim 27^{\circ}57'50''N$ 、 $13^{\circ}46'E \sim 115^{\circ}56'E$, 位于江西省中部, 地处赣江中游和罗霄山脉中段, 地形以山地、丘陵为主, 土壤类型以典型红壤为主。该区属中亚热带季风湿润性气候, 具有气候温和、雨量充沛、光照充足、四季分明等气候特征, 为井冈蜜柚栽培提供了有利的水热条件。

1.2 土样采集

选取研究区内 13 个县(市、区)的 101 个果园作为土样采集点, 依据各县(市、区)井冈蜜柚种植面积、果园代表性, 各县(市、区)采样的果园数量分别为遂川县 7 个、泰和县 10 个、新干县 6 个、万安县 10 个、峡江县 3 个、吉安县 10 个、井冈山市 4 个、永新县 7 个、安福县 10 个、吉水县 12 个、永丰县 3 个、吉安市青原区 9 个、吉安市吉州区 10 个。果园土壤类型为红壤, 果树品种为金沙柚、金兰柚和桃溪蜜柚, 树龄在 5 ~ 8 年。土样采集时间为 2020 年 9—10 月。在每个果园分东、南、西、北、中 5 个方向选取 5 棵果树, 在每棵果树前、后、左、右 4 个方向的滴水线内侧 10 cm 位置, 避开施肥穴, 用土钻采集 0 ~ 40 cm 土层的土壤。每个果园 5 棵果树的土壤均匀混合, 去除其中的石砾、动植物残体和其他杂物, 用四分法取 1 kg 左右作为待测土样带回实验室, 自然风干后过筛备用。

1.3 测定项目与方法

结合井冈蜜柚果园土壤管理习惯和土壤特征, 本研究选取土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、水解性氮、有效磷、速效钾、阳离子交换量(CEC)、有

效硼、有效锌、有效硫、有效铜、有效铁、交换性锰及电导率共 16 个肥力指标进行测定和分析。

其中, 土壤 pH 的测定方法参照 NY/T 1121.2—2006《土壤检测 第 2 部分: 土壤 pH 值的测定》^[15], 有机质含量的测定方法参照 NY/T 1121.6—2006《土壤检测 第 6 部分: 土壤有机质的测定》^[16], 全氮含量的测定方法参照 NY/T 53—1987《土壤全氮测定法(半微量开氏法)》^[17], 全磷含量的测定方法参照 NY/T 88—1988《土壤全磷测定法》^[18], 全钾含量的测定方法参照 NY/T 87—1988《土壤全钾测定法》^[19], 水解性氮含量的测定方法参照 LY/T 1228—2015《森林土壤氮的测定》^[20], 有效磷含量的测定方法参照 Y/T 1121.7—2014《土壤检测第 7 部分: 土壤有效磷的测定》^[21], 速效钾含量的测定方法参照 NY/T 889—2004《土壤速效钾和缓效钾含量的测定》^[22], 阳离子交换量的测定方法参照 LY/T 1243—1999《森林土壤阳离子交换量的测定》^[23], 有效硼含量的测定方法参照 NY/T 1121.8—2006《土壤检测 第 8 部分: 土壤有效硼的测定》^[24], 有效硫含量的测定方法参照 NY/T 1121.14—2006《土壤检测 第 14 部分: 土壤有效硫的测定》^[25], 有效铜含量的测定方法参照 LY/T 1260—1999《森林土壤有效铜的测定》^[26], 有效锌含量的测定方法参照 LY/T 1261—1999《森林土壤有效锌的测定》^[27], 有效铁含量的测定方法参照 LY/T 1262—1999《森林土壤有效铁的测定》^[28], 交换性锰含量的测定方法参照 LY/T 1263—1999《森林土壤交换性锰的测定》^[29], 电导率的检测方法参照鲍士旦^[30]的方法。

1.4 井冈蜜柚果园土壤养分含量分级标准

井冈蜜柚果园土壤 pH、有机质及各营养元素分级标准根据庄伊美^[31]和鲁剑巍等^[32]的分级标准, 并结合果园土壤实际情况而定。土壤指标分级标准见表 1、表 2。

表 1 土壤 pH、有机质和大量元素分级标准
Table 1 Classification standards for soil pH, organic matter and major elements

指标	等级					
	极缺	缺乏	中等	较丰富	丰富	极丰富
有机质(g/kg)	<6	6 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	>40
全氮(g/kg)	<0.50	0.50 ~ 0.75	0.75 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	>2.0
全磷(g/kg)	<0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0	>1.0
全钾(g/kg)	<5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	>25
水解性氮(mg/kg)	<30	30 ~ 60	60 ~ 90	90 ~ 120	120 ~ 150	>150
有效磷(mg/kg)	<3	3 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 40	>40
速效钾(mg/kg)	<30	30 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 150	150 ~ 200	>200
pH	强酸性	酸性	弱酸性	中性	碱性	强碱性
	<4.5	4.5 ~ 5.5	5.5 ~ 6.5	6.5 ~ 7.5	7.5 ~ 8.5	>8.5

表2 土壤阳离子交换量和微量元素有效态分级标准
Table 2 Classification standards for soil cation exchange capacity and available trace elements

指标	等级				
	极缺	缺乏	适量	丰富	极丰富
CEC(cmol/kg)	<6.2	6.2~10.5	10.5~15.4	15.4~20	>20
有效硼(mg/kg)	<0.25	0.25~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	>2.0
有效锌(mg/kg)	<0.5	0.5~1.0	1.0~5.0	5.0~10.0	>10.0
有效硫(mg/kg)	<12	12~17	17~31	31~50	>50.0
有效铜(mg/kg)	<0.3	0.3~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	>2.0
有效铁(mg/kg)	<5	5~10	10~20	20~50	>50
交换性锰(mg/kg)	<2	2~5	5~20	20~50	>50
土壤电导率(μS/cm)	极低盐度 <250	低盐度 250~600	中盐度 600~800	高盐度 800~1 000	超高盐度 >1 000

1.5 土壤肥力综合评价

1) 隶属度函数值计算: 将土壤肥力评价指标测定值通过相应的隶属度函数转化为0~1之间的无量纲值。根据常用理化指标与作物生长反应间的关系, 适合肥力指标评分的隶属度函数一般有抛物线型、正S型与反S型3种, 本研究采用抛物线型和正S型两种。

抛物线型计算公式:

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

式中: $f(x)$ 表示隶属度函数值; x 表示指标实测值; a 和 d 分别表示下限和上限临界值; b 和 c 分别表示最优值的下限和上限临界值。

正S型计算公式:

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

式中: $f(x)$ 表示隶属度函数值; x 表示指标实测值; a 和 d 分别表示下限和上限临界值。

根据前人研究结果, 符合抛物线型函数的指标为pH, 符合正S型函数的指标为有机质、全氮、全磷、全钾、水解性氮、有效磷、速效钾、交换性镁、交换性钙、CEC、有效硼、有效锌、有效硫、有效铜、有效铁、交换性锰和电导率^[33-35]。隶属函数转折点取值(表3)参考前人研究结果^[36-37]并结合研究区实际土壤状况进行确定, 各指标隶属度计算结果见表4。

2) 单项指标权重系数确定: 采用相关系数法计算权重系数。先计算各单项肥力指标的相关系数, 再求各单项肥力指标与其他肥力指标间相关系数的平均值, 以其平均值占所有肥力评价指标的相关系数

平均值总和的比值作为该单项肥力指标的权重系数(W_i), 结果见表5。

表3 隶属函数曲线中评价指标的转折点取值
Table 3 Transition point values of soil evaluation indicators in membership function curves

评价指标	隶属函数模型	转折点			
		下限 a	最优值下限 b	最优值上限 c	上限 d
pH	抛物线型	4.5	6.5	7.0	7.5
有机质	S型	10			20
全氮	S型	0.5			1.2
全磷	S型	0.2			1.0
全钾	S型	5			25
水解性氮	S型	25			150
有效磷	S型	3			40
速效钾	S型	30			200
CEC	S型	6.2			20
有效硼	S型	0.2			1
有效锌	S型	0.5			10
有效硫	S型	12			160
有效铜	S型	0.3			2
有效铁	S型	4.5			200
交换性锰	S型	5.0			100
电导率	S型	25			120

3) 土壤肥力综合指数计算: 根据模糊数学中的加权乘法原则, 土壤肥力综合指数(Integrated fertility index, IFI)采用下列公式计算:

$$IFI = \sum_i^n W_i \times N_i \quad (3)$$

式中: n 为肥力指标数量; W_i 为第 i 项土壤肥力评价指标的权重值; N_i 为第 i 项土壤肥力评价指标的隶属度值。土壤肥力综合指数 IFI 范围在 0~1, 数值越高, 表示土壤肥力质量越高。

表 4 各县(市、区)井冈蜜柚果园土壤指标隶属度
Table 4 Membership degrees of soil indicators of Jinggang honey pomelo orchard in each county (city, district)

地点	pH	有机质	全氮	全磷	全钾	水解性氮	有效磷	速效钾	CEC	有效硼	有效锌	有效硫	有效铜	有效铁	交换性锰	电导率
遂川县	0.31	0.88	0.90	0.71	0.83	0.37	0.67	0.63	0.27	0.18	0.58	0.35	0.67	0.40	0.26	0.36
泰和县	0.61	0.56	0.65	0.84	0.82	0.30	0.60	0.74	0.46	0.18	0.45	0.66	0.39	0.16	0.56	0.55
新干县	0.49	0.34	0.68	0.92	0.90	0.39	0.79	0.57	0.34	0.13	0.82	0.44	0.82	0.58	0.64	0.43
万安县	0.29	0.53	0.56	0.68	0.73	0.30	0.49	0.60	0.39	0.16	0.39	0.44	0.58	0.47	0.42	0.35
峡江县	0.13	0.99	0.86	0.70	0.69	0.68	0.57	0.68	0.36	0.18	0.31	0.62	0.53	0.43	0.14	0.71
吉安县	0.65	0.59	0.65	0.73	0.55	0.34	0.40	0.63	0.28	0.16	0.56	0.32	0.58	0.31	0.53	0.50
井冈山市	0.31	0.73	0.67	0.84	0.80	0.52	0.57	0.87	0.51	0.31	0.38	0.35	0.28	0.25	0.37	0.44
永新县	0.22	0.61	0.81	0.62	0.70	0.45	0.24	0.68	0.39	0.21	0.36	0.70	0.23	0.11	0.32	0.42
安福县	0.28	0.91	0.89	0.80	0.72	0.39	0.59	0.76	0.58	0.21	0.63	0.67	0.66	0.20	0.38	0.50
吉水县	0.32	0.42	0.42	0.70	0.90	0.19	0.39	0.65	0.47	0.13	0.40	0.61	0.35	0.18	0.36	0.50
永丰县	0.22	0.59	0.75	0.75	0.87	0.19	0.50	0.56	0.61	0.10	0.46	0.83	0.36	0.18	0.45	0.20
青原区	0.36	0.42	0.41	0.68	0.83	0.28	0.42	0.43	0.26	0.12	0.50	0.35	0.46	0.26	0.40	0.24
吉州区	0.38	0.74	0.73	0.81	0.70	0.26	0.50	0.83	0.64	0.21	0.62	0.63	0.54	0.36	0.36	0.42
平均值	0.35	0.64	0.69	0.75	0.77	0.36	0.52	0.66	0.43	0.18	0.50	0.54	0.50	0.30	0.40	0.43

表 5 各县(市、区)井冈蜜柚果园土壤指标权重系数
Table 5 Weight coefficients of soil indicators in Jinggang honey pomelo orchards in each county (city, district)

地点	pH	有机质	全氮	全磷	全钾	水解性氮	有效磷	速效钾	CEC	有效硼	有效锌	有效硫	有效铜	有效铁	交换性锰	电导率
遂川县	0.071	0.061	0.052	0.072	0.039	0.050	0.071	0.059	0.068	0.061	0.077	0.067	0.035	0.040	0.050	0.073
泰和县	0.079	0.051	0.053	0.071	0.073	0.043	0.038	0.084	0.054	0.053	0.059	0.047	0.050	0.060	0.050	0.061
新干县	0.042	0.066	0.057	0.071	0.052	0.053	0.060	0.071	0.070	0.062	0.058	0.071	0.051	0.059	0.040	0.068
万安县	0.055	0.043	0.067	0.078	0.034	0.075	0.076	0.044	0.036	0.063	0.069	0.048	0.074	0.081	0.066	0.050
峡江县	0.067	0.061	0.071	0.060	0.065	0.035	0.064	0.066	0.047	0.048	0.040	0.065	0.066	0.066	0.067	0.057
吉安县	0.077	0.077	0.069	0.049	0.073	0.074	0.060	0.050	0.050	0.050	0.056	0.047	0.057	0.041	0.063	0.044
井冈山市	0.065	0.060	0.062	0.062	0.054	0.065	0.058	0.051	0.061	0.059	0.050	0.053	0.062	0.058	0.055	0.064
永新县	0.046	0.074	0.073	0.030	0.051	0.064	0.067	0.065	0.069	0.064	0.049	0.040	0.063	0.050	0.043	0.081
安福县	0.063	0.052	0.062	0.061	0.050	0.037	0.062	0.069	0.065	0.066	0.060	0.065	0.058	0.060	0.049	0.058
吉水县	0.061	0.068	0.073	0.066	0.054	0.070	0.062	0.050	0.042	0.056	0.065	0.054	0.070	0.066	0.040	0.052
永丰县	0.053	0.029	0.069	0.067	0.068	0.069	0.063	0.068	0.034	0.033	0.064	0.062	0.062	0.065	0.064	0.064
青原区	0.036	0.058	0.072	0.060	0.041	0.075	0.069	0.057	0.047	0.062	0.067	0.030	0.070	0.054	0.075	0.053
吉州区	0.056	0.054	0.059	0.077	0.058	0.065	0.073	0.059	0.029	0.073	0.074	0.042	0.051	0.045	0.046	0.069
平均值	0.059	0.058	0.064	0.063	0.055	0.060	0.063	0.061	0.052	0.058	0.060	0.053	0.059	0.057	0.055	0.061

1.6 数据处理与分析

采用 Excel 2013 软件对数据进行前期处理和作图, 利用 SAS 9.2 进行描述统计和相关性分析, 在 ArcGIS 中运用普通克里格(Kriging)法对土壤 pH、有机质、水解性氮、有效磷、速效钾和土壤肥力综合指数 IFI 进行空间插值分析, 并绘制空间分布图。

2 结果与分析

2.1 土壤指标的描述性统计特征

由井冈蜜柚果园土壤指标描述性统计特征(表 6)可知, 土壤 pH 平均值为 5.17, 处于酸性状态; 水解性氮

含量平均值为 56.40 mg/kg, 处于缺乏状态; 有效硼含量平均值为 0.23 mg/kg, 处于极缺状态; 电导率平均值为 64.52 μS/cm, 处于极低盐度状态; 有机质和全氮含量平均值分别为 17.06 g/kg 和 0.98 g/kg, 均处于中等状态; 速效钾含量平均值为 144.48 mg/kg, 处于较丰富状态; 全磷、全钾和有效磷含量平均值分别为 0.85 g/kg、21.85 g/kg 和 23.05 mg/kg, 均处于丰富状态; CEC 平均值为 11.26 cmol/kg, 处于适量状态; 有效锌、有效铜和交换性锰含量平均值分别为 5.11、1.60 和 38.52 mg/kg, 均处于丰富状态; 有效硫和有效铁含量平均值分别为 84.89 mg/kg 和 53.70 mg/kg, 处于极丰富状态。

表 6 土壤指标的描述统计
Table 6 Descriptive statistics of soil indicators

指标	最小值	最大值	平均值	标准偏差	变异系数 CV(%)	偏斜度	峰度
pH	4.06	8.29	5.17	0.90	0.82	1.91	3.13
有机质(g/kg)	6.34	35.19	17.06	6.59	43.39	0.67	0.11
全氮(g/kg)	0.26	2.07	0.98	0.32	0.10	0.45	0.59
全磷(g/kg)	0.33	2.25	0.85	0.31	0.10	1.82	4.49
全钾(g/kg)	9.07	50.17	21.85	7.96	63.39	0.81	0.75
水解性氮(mg/kg)	7.74	143.10	56.40	26.34	693.81	0.73	0.74
有效磷(mg/kg)	0.61	98.49	23.05	20.90	436.61	1.48	1.97
速效钾(mg/kg)	48.31	371.72	144.48	60.56	3 667.34	0.91	1.11
CEC(cmol/kg)	3.97	26.23	11.26	4.34	18.83	0.95	1.01
有效硼(mg/kg)	0.03	0.67	0.23	0.13	0.02	0.77	0.30
有效锌(mg/kg)	0.55	14.60	5.11	3.63	13.19	1.01	0.09
有效硫(mg/kg)	3.02	238.89	84.89	54.39	2 957.86	0.52	-0.64
有效铜(mg/kg)	0.13	13.29	1.60	2.15	4.64	3.52	14.65
有效铁(mg/kg)	0.05	484.88	53.70	86.50	7 482.19	2.87	9.09
交换性锰(mg/kg)	1.75	136.00	38.52	27.07	732.96	1.15	1.26
电导率(μS/cm)	14.44	219.96	64.52	39.95	1 595.68	1.83	3.34

注: 当 $CV \geq 100\%$ 时, 为强变异性; 当 $10\% < CV < 100\%$ 时, 为中等变异性; 当 $CV \leq 10\%$ 时, 为弱变异性^[38]。

变异系数(CV)的大小可用于表征土壤特性空间变异性的强弱, 由表 6 数据可知, 各土壤指标变异系数表现为有效铁>速效钾>有效硫>电导率>交换性锰>水解性氮>有效磷>全钾>有机质>CEC>有效锌>有效铜>pH>全氮=全磷>有效硼。土壤全氮、全磷、有效硼含量为弱变异性, pH 为中等变异性, 其余土壤养分指标变异系数均大于 100%, 属于强变异性。整体而言, 吉安市井冈蜜柚果园土壤除 pH 较稳定外, 其余指标变异较大, 土壤肥力差异明显。

2.2 土壤肥力指标各等级分布特征

由表 7 可知, 在 101 个井冈蜜柚果园中, 有 9.90% 的果园土壤 pH 为强酸性, 68.32% 为酸性, 11.88% 为弱酸性, 6.93% 为中性, 2.97% 为碱性, 土壤 pH

整体表现为偏酸性; 土壤有机质含量中等比例最大, 达 56.44%, 较丰富等级占 23.76%, 总体表现为中等偏上; 土壤全氮含量较丰富等级比例最大, 达 37.63%, 中等比例占 35.64%, 总体表现为中等偏上; 土壤全磷含量较丰富等级比例最大, 达 42.58%, 丰富等级占 20.79%, 总体表现为比较丰富; 土壤全钾含量极丰富等级比例最大, 达 30.70%, 丰富等级占 20.79%, 总体表现为丰富; 土壤水解性氮含量缺乏等级比例最大, 达 45.55%, 极缺等级占 13.86%, 总体表现为比较缺乏; 土壤有效磷含量较丰富和丰富等级比例最大, 均达 26.73%, 总体表现为比较丰富; 土壤速效钾含量较丰富等级比例最大, 达 40.60%, 丰富等级占 16.83%, 总体表现为比较丰富。

表 7 土壤 pH、有机质和大量元素各等级占比(%)
Table 7 Proportion of each grade of soil pH, organic matter and major elements

指标	等级					
	极缺	缺乏	中等	较丰富	丰富	极丰富
有机质	0.00	15.84	56.44	23.76	3.96	0.00
全氮	5.94	14.85	35.64	37.63	4.95	0.99
全磷	0.00	0.99	12.87	42.58	20.79	22.77
全钾	0.00	2.97	15.84	29.70	20.79	30.70
水解性氮	13.86	45.55	31.68	6.93	1.98	0.00
有效磷	7.92	6.93	15.84	26.73	26.73	15.85
速效钾	0.00	1.98	22.77	40.60	16.83	17.82
pH	强酸性		酸性	弱酸性	中性	碱性
	9.90	68.32	11.88	6.93	2.97	0.00

由表 8 可知, 在 101 个井冈蜜柚果园中, 土壤 CEC 缺乏等级比例最大, 达 39.61%, 适量等级占 36.63%, 总体表现为缺乏; 土壤有效硼含量极缺等级比例最大, 达 61.39%, 缺乏等级占 35.64%, 总体表现为极缺; 土壤有效锌含量适量等级比例最大, 达 54.46%, 丰富等级占 25.74%, 总体表现为适量偏丰富; 土壤有效硫含量极丰富等级比例最大, 达 65.35%, 丰富等级占 17.82%, 总体表现为极丰富; 土壤有效铜含量适量等级比例最大, 达 39.61%, 丰富等级占 22.77%, 总体表现为适量偏丰富; 土壤有效铁含量适量等级比例最大, 达 29.71%, 丰富等级占 22.77%, 总体表现为适量偏丰富; 土壤交换性锰含量丰富等级比例最大, 达 37.63%, 极丰富等级占 28.71%, 总体表现为丰富; 土壤电导率 100% 果园均处于极低盐度等级。因此, 土壤酸化严重和水解性氮、有效硼含量极缺乏以及土壤电导率极低为井冈蜜柚果园土壤的几个主要障碍因子。

2.3 土壤肥力综合评价

与单因素评价相比, 土壤综合肥力评价更能真实反映土壤质量。由表 9 可知, 区域内井冈蜜柚果园土壤肥力综合指数 IFI 平均为 0.45, 处于 III 级, 土壤肥力为中等。13 个县(市、区)中, 永新县、吉水县和

青原区果园土壤肥力综合指数 IFI 分别为 0.37、0.38 和 0.34, 均处于 IV 级, 为肥力较差的县(市、区); 其余各县(市、区)果园土壤肥力综合指数 IFI 在 0.4~0.6, 均处于 III 级, 土壤肥力均为中等。13 个县(市、区)的果园土壤肥力综合指数 IFI 高低排序依次为: 安福县=新干县>吉州区>泰和县>峡江县>遂川县=井冈山市>吉安县=万安县=永丰县>吉水县>永新县>青原区。

表 8 土壤阳离子交换量和有效微量元素各等级占比(%)
Table 8 Proportion of each grade of soil cation exchange capacity and available trace elements

指标	等级				
	极缺	缺乏	适量	丰富	极丰富
CEC	8.91	39.61	36.63	10.89	3.96
有效硼	61.39	35.64	2.97	0.00	0.00
有效锌	0.00	5.94	54.46	25.74	13.86
有效硫	3.96	3.96	8.91	17.82	65.35
有效铜	7.92	9.90	39.61	22.77	19.80
有效铁	18.81	3.96	29.71	22.77	24.75
交换性锰	0.99	0.99	31.68	37.63	28.71
电导率	极低盐度	低盐度	中盐度	高盐度	超高盐度
	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 9 各县(市、区)井冈蜜柚果园土壤肥力综合指数 IFI
Table 9 Soil integrated fertility index (IFI) of Jinggang honey pomelo orchard in each county (city, district)

地区	pH	有机质	全氮	全磷	全钾	水解性氮	有效磷	速效钾	CEC	有效硼	有效锌	有效硫	有效铜	有效铁	交换性锰	电导率	IFI
遂川县	0.02	0.05	0.04	0.05	0.03	0.02	0.05	0.04	0.02	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.46
泰和县	0.04	0.03	0.03	0.06	0.06	0.01	0.02	0.06	0.02	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.03	0.49
新干县	0.02	0.02	0.04	0.06	0.04	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01	0.05	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.51
万安县	0.01	0.02	0.04	0.05	0.03	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.42
峡江县	0.01	0.06	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.04	0.03	0.03	0.01	0.04	0.48
吉安县	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02	0.42
井冈山市	0.02	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.46
永新县	0.01	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.01	0.04	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.03	0.37
安福县	0.02	0.04	0.05	0.05	0.04	0.01	0.03	0.05	0.03	0.01	0.04	0.04	0.04	0.01	0.02	0.03	0.51
吉水县	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.38
永丰县	0.01	0.02	0.05	0.05	0.05	0.01	0.03	0.03	0.02	0.00	0.03	0.05	0.02	0.01	0.03	0.01	0.42
青原区	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.34
吉州区	0.02	0.04	0.04	0.06	0.04	0.02	0.03	0.05	0.02	0.01	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.50
平均值	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.45

注: 采用五级分类法对土壤肥力质量进行分类, 即: I 级 $IFI \geq 0.8$, 为土壤肥力好; II 级 $0.6 \leq IFI < 0.8$, 为土壤肥力较好; III 级 $0.4 \leq IFI < 0.6$, 为土壤肥力中等; IV 级 $0.2 \leq IFI < 0.4$, 为土壤肥力较差; V 级 $IFI < 0.2$, 为土壤肥力差^[39-40]。

2.4 土壤主要肥力指标与肥力综合指数空间分布

特征

从土壤肥力指标和肥力综合指数 IFI 的空间分布

特征来看(图 1), 研究区井冈蜜柚果园土壤 pH 呈中部高四周低的空间分布特征, 土壤有机质含量呈东低西高的空间分布特征, 土壤水解性氮含量呈由东向西

逐步升高的空间分布特征, 土壤有效磷含量呈南北较高中间较低的空间分布特征, 速效钾含量呈东南较低

西北较高的空间分布特征, 土壤肥力综合指数 IFI 呈东西高中间低的空间分布特征。

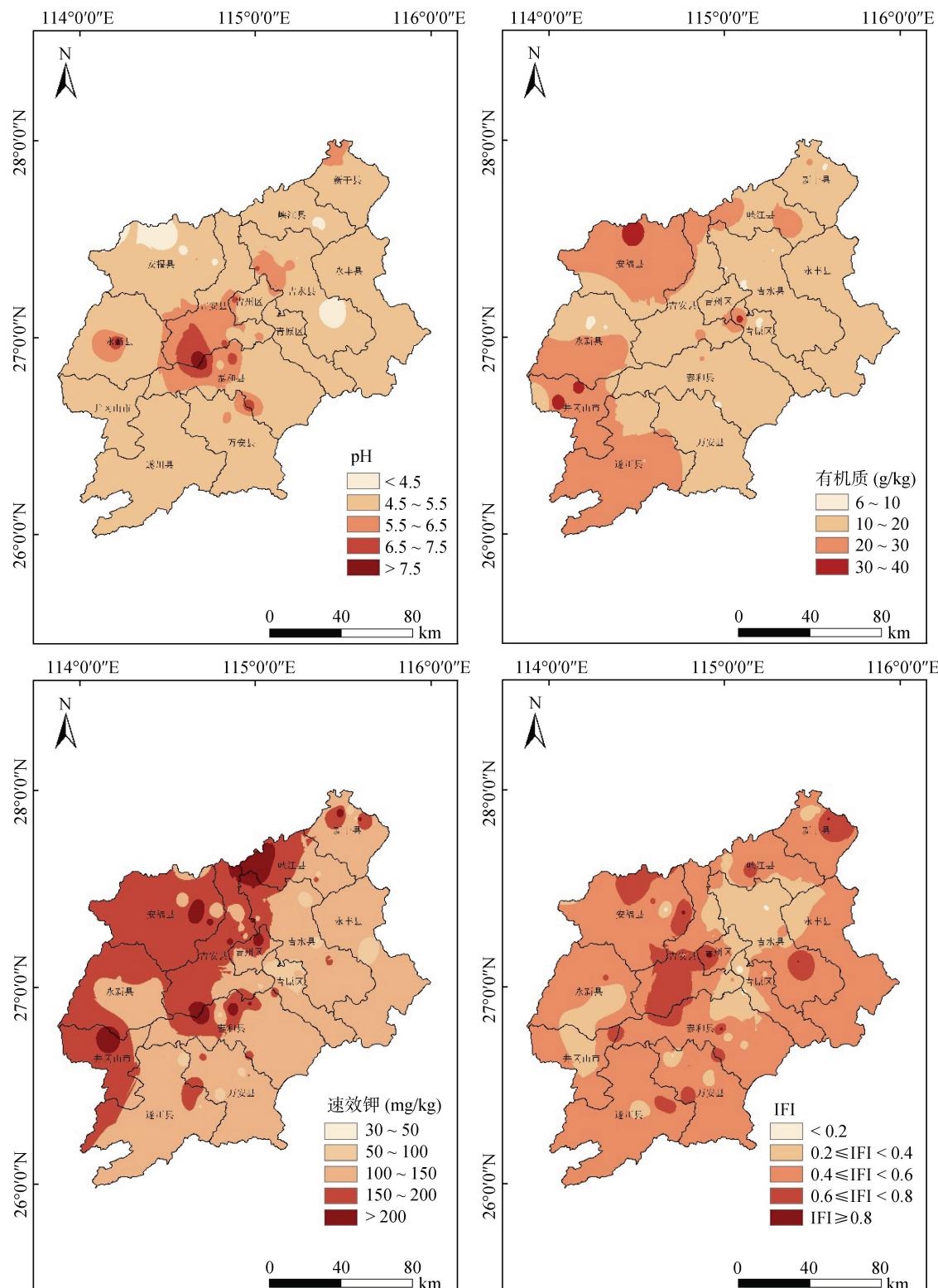


图 1 井冈蜜柚果园土壤主要肥力指标与肥力综合指数的空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of soil main fertility indexes and IFI of Jinggang honey pomelo orchard

3 讨论

土壤肥力是评价土壤生产力的重要指标^[41]。井冈蜜柚最适宜生长的土壤 pH 范围为 5.5~6.5, 而研究区井冈蜜柚果园土壤 pH 平均值为 5.17, 约 78% 的果园土壤 pH 为酸性或强酸性, pH 5.5~6.5 的果园仅占 12% 左右。果园土壤整体酸化程度较高, 与自然和人为因素有关。自然因素方面, 主要是研究区的土壤属于典型红壤, 母质多为砂岩和第四纪红黏土, 再加上该区域高温多雨的气候, 土壤极易发生脱硅富铁铝化过程, 形成酸性土壤; 人为因素方面, 与为追求高产而长期过量施用氮肥有关, 其会导致土壤酸性缓冲能力下降, 加速土壤酸化^[42]。对于土壤酸度较高的井冈蜜柚果园, 应注重土壤酸化改良, 合理施用氮肥, 并适当增施石灰和有机肥。土壤有机质和大量养分元素的含量是土壤肥力的核心^[43]。区域内井冈蜜柚果园土壤有机质含量整体表现为中等偏上, 土壤全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾含量均表现为中等偏上或较丰富及丰富, 而土壤水解性氮含量表现为比较缺乏。区域内井冈蜜柚果园土壤 pH 空间分布特征表现为中部高四周低, 而土壤有机质、水解性氮、速效钾含量呈东低西高的空间分布特征, 有效磷含量呈南北较高中间较低的空间分布特征, 这可能是地形、母质、气候与土地利用、施肥习惯等长期耦合的结果。

对研究区井冈蜜柚果园土壤微量元素的调查发现, 土壤有效锌、有效硫、有效铜、有效铁、交换性锰等含量整体表现为适量及偏丰富以上等级, 而土壤 CEC 表现为缺乏, 土壤有效硼含量表现为极缺。余璇等^[44]对井冈蜜柚品种金沙柚果园的调研结果也表明, 土壤中铁、锰、铜、锌含量在适宜及适宜以上水平的果园占比较大, 而硼元素含量缺乏的占比为 100%。有研究表明, 在柑橘生长过程中, 缺乏某些营养元素会造成树体营养不良, 进而产生裂果^[45], 而施硼能有效提升柑橘果皮中硼、钙、钾元素含量, 减少果皮内裂的发生^[46]。因此, 井冈蜜柚果园应重点注意硼肥施用, 以避免挂果率低和裂果。

影响土壤肥力综合评价的因素很多, 包括土壤肥力指标的选择、肥力等级的划分以及权重系数的确定等均对评价结果有重要的影响^[47]。本文通过对 101 个井冈蜜柚果园土壤肥力的综合评价, 发现井冈蜜柚果园土壤肥力综合指数平均为 0.45, 土壤肥力整体表现为中等水平, 其中永新县、吉水县和青原区为土壤肥力较差的县(区), 土壤养分总体供应不足。空间分布特征表明, 研究区井冈蜜柚果园土壤肥力综合指数

与土壤有机质含量的空间分布特征比较接近, 呈东西高中间低的空间分布特征, 这可能与地形、气候以及施肥习惯等有关。

有研究表明, 果园增施有机肥和石灰, 结合周年间作绿肥可显著降低果园土壤酸度, 提高土壤养分含量, 改善土壤质量^[48]。因此, 建议研究区井冈蜜柚果园在施肥时应注重科学施肥, 采用有机无机配施, 结合施用熟石灰及果园周年间作绿肥等土壤综合改良与培肥技术, 以提高果园土壤肥力。此外, 研究区井冈蜜柚果园还应加强硼肥的施用, 可将硼肥与农家肥、有机肥或适量的细土充分混匀后作基肥施用, 或将硼肥兑水溶解后叶面喷施。

4 结论

1)典型红壤区井冈蜜柚果园土壤酸化严重, 水解性氮含量处于缺乏状态, 有效硼含量处于极缺状态, 土壤电导率处于极低盐度等级, 这些是限制井冈蜜柚果园土壤肥力的主要障碍因子。

2)区域内井冈蜜柚果园土壤各养分变异较大, 土壤肥力差异明显, 应针对不同果园土壤肥力特征进行科学施肥。

3)区域内井冈蜜柚果园土壤 pH 呈中部高四周低的空间分布特征, 土壤有机质、水解性氮、速效钾含量呈东低西高的空间分布特征, 土壤有效磷含量呈南北较高中间较低的空间分布特征, 土壤肥力综合指数呈东西高中间低的空间分布特征。

4)区域内井冈蜜柚果园总体土壤肥力水平为中等, 其中永新县、吉水县和吉安市青原区土壤肥力较差, 土壤养分总体供应不足, 应利用土壤综合改良与培肥技术进行改土培肥。

参考文献:

- [1] 马昕伶, 秦文婧, 刘凯, 等. 竹豆间种对柑橘园土壤化学性质及微生物碳源代谢特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 200~206.
- [2] 梁珊珊. 我国柑橘主产区氮磷钾肥施用现状及减施潜力研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [3] 王洋, 李玉兰, 胡晓军, 等. 江西吉安: 井冈蜜柚“甜”到心尖[N]. 光明日报, 2024-12-02(2).
- [4] 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.
- [5] 李泰, 卢士军, 黄家章, 等. 土壤养分对‘富士’苹果品质的影响——基于 3 省 6 县苹果园调查[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(11): 30~38.
- [6] 刘志宗, 王晟, 陈亚俊, 等. 褚橙果实品质指标与土壤养分状况关联分析[J]. 中国土壤与肥料, 2023(7): 182~190.

- [7] Valani G P, Vezzani F M, Cavalieri-Polizeli K M V. Soil quality: Evaluation of on-farm assessments in relation to analytical index[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104565.
- [8] 周奕廷, 周卫军, 黄兰, 等. 永兴县冰糖橙果园土壤肥力特征及其综合评价[J]. *中国南方果树*, 2019, 48(3): 27–33.
- [9] 江泽普, 韦广波, 谭宏伟. 广西红壤果园土壤肥力演化与评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 312–318.
- [10] 曹胜, 欧阳梦云, 周卫军, 等. 湖南省柑橘园土壤营养状况及其对叶片养分的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(4): 665–671.
- [11] 陈会玲, 胡建文, 勾蒙蒙, 等. 湖北秭归柑橘园土壤养分特征和肥力评价[J]. *陆地生态系统与保护学报*, 2022(4): 21–31.
- [12] 郝奇, 周京华, 吴小龙, 等. 江西新余蜜桔园土壤养分分布特征及综合肥力评价[J]. *江西农业大学学报*, 2023, 45(1): 88–100.
- [13] 王斌强, 何绍浪, 林小兵, 等. 井冈蜜柚园土壤肥力和微生物特征调查研究[J]. *中国果树*, 2023(6): 59–66.
- [14] 吴强建, 肖委明, 赵晓东, 等. 江西井冈蜜柚种植区果园土壤肥力现状及区域分布特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(5): 1025–1032.
- [15] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第2部分: 土壤pH的测定: NY/T 1121.2—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第6部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [17] 国家标准局. 土壤全氮测定法(半微量开氏法): NY/T 53—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- [18] 国家标准局. 土壤全磷测定法: NY/T 88—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [19] 国家标准局. 土壤全钾测定法: NY/T 87—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [20] 国家林业局. 森林土壤氮的测定: LY/T 1228—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [21] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第7部分: 土壤有效磷的测定: NY/T 1121.7—2014[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [22] 中华人民共和国农业部. 土壤速效钾和缓效钾含量的测定: NY/T 889—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [23] 国家林业局. 森林土壤阳离子交换量的测定: LY/T 1243—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [24] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第8部分: 土壤有效硼的测: NY/T 1121.8—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [25] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第14部分: 土壤有效硫的测定: NY/T 1121.14—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [26] 国家林业局. 森林土壤有效铜的测定: LY/T 1260—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [27] 国家林业局. 森林土壤有效锌的测定: LY/T 1261—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [28] 国家林业局. 森林土壤有效铁的测定: LY/T 1262—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [29] 国家林业局. 森林土壤交换性锰的测定: LY/T 1263—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] 庄伊美. 柑桔营养与施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [32] 鲁剑巍, 陈防, 王富华, 等. 湖北省柑橘园土壤养分分级研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002(4): 390–394.
- [33] 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.
- [34] 张俊丽, 林剑波, 唐海尧, 等. 基于模糊数学隶属函数模型的某龙眼园土壤肥力综合评价[J]. *现代农业科技*, 2021(24): 142–146, 149.
- [35] 吴敏, 何鹏, 韦家少. 海南岛胶园土壤肥力的综合评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(2): 1–5.
- [36] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. *土壤学报*, 1995, 32(4): 362–369.
- [37] 王杰, 张春燕, 卢加文, 等. 广安区柑橘土壤养分状况及综合肥力评价[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1360–1367.
- [38] 王杰, 张春燕, 卢加文, 等. 广安区柑橘土壤养分状况及综合肥力评价[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1360–1367.
- [39] 戴士祥, 任文杰, 滕应, 等. 安徽省主要水稻土基本理化性质及肥力综合评价[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 66–72.
- [40] 李自林, 陆亚春, 赵磊峰, 等. 广西隆林县植烟土壤肥力评价[J]. *土壤通报*, 2020, 51(5): 1042–1048.
- 骆伯胜, 钟继洪, 陈俊坚. 土壤肥力数值化综合评价研究[J]. *土壤*, 2004, 36(1): 104–106, 111.
- [41] 王冰, 张宇辰, 王昕悦, 等. 持续低量有机肥与化肥配施对绿洲农田土壤肥力和多功能性的影响[J/OL]. *土壤学报*, 2024: 1–13. (2024-12-24). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=TRXB20241223001>.
- [42] 文慧颖, 吴华勇, 董岳, 等. 不同土地利用方式下南亚热带赤红壤酸化特征[J]. *土壤*, 2023, 55(2): 372–378.
- [43] 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.
- [44] 余璇, 文婷, 马青龄, 等. 金沙柚果实品质与土壤、叶片、果实矿质养分的相关性分析[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(1): 70–81.
- [45] 马小焕, 赖九江, 阮树堂, 等. 柑桔裂果的种类、特点及影响因素[J]. *中国南方果树*, 2014, 43(5): 21–24.
- [46] 刘霞, 田洋, 贾晓晨, 等. 施硼对三峡库区(重庆)塔罗科血橙果皮发育、元素吸收及内裂的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2025(3): 102–108.
- [47] 王波, 刘佳洁, 韩万友, 等. 芜湖市烟草种植区土壤肥力综合评价[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(19): 231–236.
- [48] 梁喜欢, 李秀秀, 黎鑫林, 等. 调酸培肥技术对井冈蜜柚果园土壤及果实产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(5): 129–135.