



茶园化肥减施增效技术模式社会经济效果评价——以闽东绿茶区为例
冉秦, 吴道宁, 吴志丹, 花文元, 罗良国

引用本文:

冉秦, 吴道宁, 吴志丹, 花文元, 罗良国. 茶园化肥减施增效技术模式社会经济效果评价——以闽东绿茶区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 536–544.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水稻作物化肥减施增效技术评价指标体系构建

尼雪妹, 罗良国, 李宁辉, 王娜娜, 潘亚茹, 杨森

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 301–310 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0059>

自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式对坡耕地紫色土肥力质量的影响

彭石磊, 何丙辉, 王润泽, 唐柄哲

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 318–326 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0045>

有机肥配施对中国农田土壤容重影响的整合分析

刘丽媛, 徐艳, 朱书豪, 高艺, 郑向群

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 867–873 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0500>

紫云英翻压条件下氮肥运筹对双季稻产量和肥料利用率的影响

王慧, 唐杉, 武际, 胡润, 韩上, 刘英, 朱勤, 李敏, 王允青, 石祖梁

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 327–333 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0321>

华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 503–510 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

冉秦, 吴道宁, 吴志丹, 等. 茶园化肥减施增效技术模式社会经济效果评价——以闽东绿茶区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 536-544.

RAN Q, WU D N, WU Z D, et al. Evaluation of social and economic effects of chemical fertilizer application reduction and efficiency improvement technical modes in tea gardens: A case study of green tea gardens in eastern Fujian, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3): 536-544.



开放科学 OSID

茶园化肥减施增效技术模式社会经济效果评价 ——以闽东绿茶区为例

冉秦¹, 吴道宁¹, 吴志丹^{2,3}, 花文元¹, 罗良国^{1*}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 福建省农业科学院茶叶研究所, 福州 350013; 3. 国家土壤质量福安观测实验站, 福建 福安 355015)

摘要:为深入推进化肥减量行动,需要对已研发出的茶园化肥减施增效技术模式进行社会经济效果评价,筛选出适宜当地优先推广的技术模式。本研究采用文献综合研究法和专家咨询法,构建了一套适宜茶园化肥减施增效技术模式社会经济效果评价的指标体系,并运用基于专家意见多重相关性的灰色关联分析模型,对福建省闽东绿茶区5种化肥减施增效技术模式(模式1:施用专用肥模式;模式2:有机肥料替代部分化肥模式;模式3:施用脲甲醛复合新型肥料模式;模式4:施用生物炭基肥模式;模式5:地力改良与施生物炭结合模式)进行实证评价。结果表明:采用专家组多重相关性赋权法得到的最终权重中,技术特征指标权重最高,为36.52%,经济效益指标权重次之,为26.95%,社会效益指标权重为21.24%,管理指标权重最低,为15.29%;5项技术模式的综合评价得分排序为模式2(0.798 6)>模式1(0.744 4)>模式4(0.560 0)>模式3(0.482 4)>模式5(0.467 6)。研究表明,福建省闽东绿茶区适合优先推广有机肥料替代部分化肥技术模式,其次是专用肥模式,而其他三项技术模式有待进一步研究优化。

关键词:茶园;化肥减施;有机肥料;社会经济效果;指标体系;评价模型;闽东

中图分类号:F326.12;S571.1 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2022)03-0536-09 doi: 10.13254/j.jare.2021.0036

Evaluation of social and economic effects of chemical fertilizer application reduction and efficiency improvement technical modes in tea gardens: A case study of green tea gardens in eastern Fujian, China

RAN Qin¹, WU Daoning¹, WU Zhidan^{2,3}, HUA Wenyuan¹, LUO Lianguo^{1*}

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Tea Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 3. National Agricultural Experimental Station for Soil Quality, Fu'an 355015, China)

Abstract: To further promote the action of chemical fertilizer reduction, it is necessary to evaluate the socio-economic effects of the developed chemical fertilizer application reduction and efficiency improvement technical modes in tea gardens and select the appropriate and prioritized technical modes for application. The index system was constructed by comprehensive literature research and expert consultation method to evaluate the socio-economic effects of chemical fertilizer application reduction and efficiency improvement technical modes. The grey correlation analysis model based on multiple correlation of expert opinions was used to evaluate the socio-economic effects of five chemical reduction and efficiency improvement technical modes (mode 1 is special fertilizer for tea, mode 2 is partial replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer, mode 3 is new urea formaldehyde compound fertilizer, mode 4 is biochar-based fertilizer, and mode 5 is soil fertility improvement and biochar combination application) in the green tea gardens of eastern Fujian Province, China. Among the final weights obtained using the multiple correlation weighting method, the technical characteristics index had

收稿日期: 2021-01-16 录用日期: 2021-04-26

作者简介: 冉秦(1995—), 女, 湖北恩施人, 硕士研究生, 主要从事环境友好型农业技术评价及政策研究。E-mail: ranqin@caas.cn

*通信作者: 罗良国 E-mail: luolianguo@caas.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201306)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2016YFD0201306)

the highest weight at 36.52%, followed by the economic efficiency index weighting at 26.95% and the social efficiency index weighting at 21.24%; the lowest weight was the management index at 15.29%. The order of comprehensive evaluation scores of the five technical modes, from high to low, was as follows: mode 2(0.798 6) > mode 1(0.744 4) > mode 4(0.560 0) > mode 3(0.482 4) > mode 5(0.467 6). The results indicated that the green tea gardens in eastern Fujian is suitable for popularizing partial replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer mode, followed by special fertilizer for tea mode, while other three technical modes need further research and optimization.

Keywords: tea garden; chemical fertilizer application reduction; organic fertilizer; social and economic effect; index system; evaluation model; eastern Fujian

在茶园管理中,施肥是茶园生产的重要环节。但茶农习惯性施肥使得茶园存在施肥过量、养分投入比例不合理等问题^[1-3],这不仅给茶园造成土壤酸化、面源污染等负面影响^[4-5],而且直接影响了茶叶的品质和茶农的经济收入。为保障茶产业可持续发展,保护茶园生态环境,“十三五”重点研发项目设置了“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”专项,包括专门针对茶园而研发的系列化肥减施增效技术模式,如控释肥替代化肥^[6]、不同比例有机肥替代化肥^[7-8],以及集成套种技术^[9]等模式。根据“十四五”规划和生态环境部、农业农村部联合印发的《农业面源污染治理与监督指导实施方案(试行)》要求,为了治理面源污染,全面推进乡村振兴,需深入实施化肥减量行动。为此,有关茶园化肥减施增效技术模式的评价和筛选应当加快进程。

茶园化肥减施增效技术模式在实际生产中是否具有实用性、稳定性和可推广性,能否满足政府管理部门、社会生产部门以及农户的需求,迫切需要开展科学的评估。部分研究者在评析技术模式时,多关注茶叶产量与品质,而缺少了对技术模式所带来的经济效益的分析^[10-11]。马立锋等^[12]、陈玉真等^[13]、周波等^[14]在关注化肥减量的同时,还从茶叶产量、品质 and 经济效益等方面对技术模式进行了分析和筛选。孟令宇等^[15]则针对勐海茶园化肥减施增效技术模式构建了以土壤肥力、水环境和经济指标为主的指标体系,并应用模糊综合评价法对其进行了整体评价。现有研究多数是基于田间试验效果单独分析茶叶产量、品质、经济效益以及茶园土壤环境等指标,并未针对不同技术模式从多维度进行整体评估,且鲜有研究者考虑技术模式本身以及管理指标。虽然少数学者构建了指标体系并对技术模式进行了整体评价,但却忽视了技术模式应用推广带来的社会效益,无疑会影响到技术模式筛选结果的科学性和可靠性。

因此,本研究以针对福建省闽东绿茶区存在的施肥问题而研发的5项化肥减施增效技术模式为评价

对象,从技术特征、经济效益、社会效益、管理和区域差异5个层面构建指标体系,运用基于专家意见多重相关性的灰色关联分析模型进行评价排序,以期筛选出可在闽东绿茶区大规模推广的最佳技术模式,满足闽东茶农技术需求,深入推进当地化肥减量行动,为农户优化茶园施肥及政府进行技术推广提供参考和决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

闽东泛指福建省东部地区,包括福州和宁德两市,闽东绿茶区茶园化肥减施增效技术模式试验区位于宁德市周宁县,处于北纬 $26^{\circ}53' \sim 27^{\circ}19'$ 、东经 $119^{\circ}06' \sim 119^{\circ}29'$ (图1),境内多山地丘陵,平均海拔800 m,属于亚热带季风气候,土壤类型为红黄壤,试验区茶树品种为福云6号,茶树树龄约40年,生产茶类主要为绿茶(名优绿茶和珠茶)。该地茶农习惯施用化肥量偏高,折纯总养分量高达 $915 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中折纯化学N为 $555 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O 为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.2 茶园化肥减施增效技术模式

本研究所评价的技术模式及相关参数由福建省农业科学院茶叶研究所和国家土壤质量福安观测实验站研究团队提供。5种化肥减施增效技术模式包括施用专用肥模式(模式1)、有机肥料替代部分化肥模式(模式2)、施用脲甲醛复合肥新型肥料模式(模式3)、施用生物炭基肥模式(模式4)、地力改良与施生物炭结合模式(模式5),各项技术模式主要集成了新型高效肥料技术、有机肥替代部分化肥技术和土壤改良技术等。由于5种技术模式所针对的问题不同、目标不同,因而各模式的关键技术环节措施也有所差异,详见表1、表2。5种模式施肥方式均采用撒施后旋耕,时间运筹为一基两追,基肥、春茶追肥和秋茶追肥比例按照40%、30%和30%进行,土壤水分、病虫害等其他管理措施均保持一致。

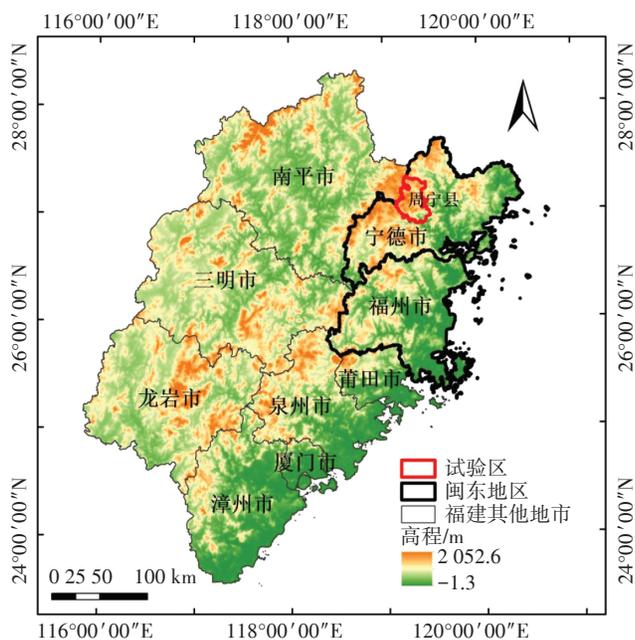


图1 试验区位置图

Figure 1 Location of the test zone

1.3 构建技术模式社会经济效果评价指标体系

在遵循科学性、可比性、系统性、动态性、层次性、典型性、区域性等原则的基础上,综合考虑技术可行

性、经济可持续性、社会可接受性等维度,采用文献综合研究法,初步构建茶园化肥减施增效技术模式社会经济效果评价指标体系^[16-21],并邀请农学、土壤化学、植物营养和农业经济及管理等多个学科的专家,通过多轮讨论,对指标体系进行筛选和优化,最终确立了包含5个一级指标、16个二级指标和38个三级指标的茶园化肥减施增效技术模式社会经济效果评价指标体系(表3)。

1.4 茶园化肥减施增效技术模式的评价模型

在茶园化肥减施增效技术模式社会经济效果评价指标体系中,每个指标从不同层面反映了一项技术模式社会经济管理基本特征。而要从总体上和各准则层面测度不同化肥减施增效技术模式的效果,则需要开展量化评估。本研究主要借鉴了专家组多重相关性赋权法^[22]和灰色关联分析法^[23-24],将主观赋权和客观评价结合起来,形成了基于专家意见多重相关性的灰色关联分析模型^[25]。

1.4.1 专家组多重相关性赋权法

专家组多重相关性赋权法属于主观赋权方法,是在决策者的经验基础上,根据决策者对指标重要性的判断进行赋权的一种方法。一般情况下,常采用简单

表1 5项技术模式比较

Table 1 Comparison of five technical modes

技术模式 Technical mode	所针对问题 Aiming at the problem	目标 Goal	特色 Characteristic
模式1	闽东茶区氮磷钾养分投入不平衡	氮磷钾养分投入与茶树养分需求相一致,降低养分投入30%以上	针对区域茶树品种及生产茶类养分需求规律,制定茶园养分管理方案
模式2	闽东茶区有机肥施用比例低	茶园有机养分投入占比30%以上,化肥用量减少50%以上	茶园有机肥替代部分化肥,减量增效
模式3	养分铵硝比与茶树养分需求不匹配	化肥用量减少30%以上,茶叶产量提高2%	速效养分与长期养分相结合,茶树生长季持续供应铵态氮,提高养分利用效率
模式4	闽东茶区土壤板结、酸化,有机质含量低	土壤pH每年提高0.1个单位,化肥用量减少30%以上	利用生物炭多孔、稳定等性质,改良土壤理化性质,提高土壤pH
模式5	闽东茶区土壤酸化,盐基离子缺乏、比例失调	土壤pH每年提高0.2个单位,化肥用量减少30%以上	利用土壤调理剂增加土壤钙、镁等盐基离子含量,提高土壤pH;利用生物炭多孔、稳定等性质,改良土壤理化性质

表2 5项技术模式施肥特征

Table 2 Characteristics of fertilization amount of five technical modes

技术模式 Technical mode	肥料组合 Fertilizer combination	N/ (kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)	养分总量 Total nutrient/(kg·hm ⁻²)	化肥减量比例 Chemical fertilizer reduction rate
模式1	茶叶专用肥	375	80	120	575	37%
模式2	有机肥+茶叶专用肥	225	48	72	345	62%
模式3	脲甲醛控释复合肥	300	75	150	525	43%
模式4	生物炭基肥料	300	80	128	508	44%
模式5	土壤调理剂+生物炭基肥料	315	90	135	540	41%

注:化肥减量比例一栏的数值取整数。

Note: The chemical fertilizer reduction rate in the column is be rounded up.

表3 茶园化肥减施增效技术模式评价指标体系及释义

Table 3 The evaluation index system and definition of chemical fertilizer application reduction and efficiency improvement technical mode in tea gardens

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	子指标层 Sub index layer	指标释义 Definition of index	单位 Unit
化肥减施增效技术评价指标体系 A	技术特征 B1	化肥施用强度 C1	单位面积化肥 N 用量 D1	当季茶叶生产每公顷茶园化肥折纯养分 N 施用量	kg·hm ⁻²
			单位面积化肥 P ₂ O ₅ 用量 D2	当季茶叶生产每公顷茶园化肥折纯养分 P ₂ O ₅ 施用量	kg·hm ⁻²
			单位面积化肥 K ₂ O 用量 D3	当季茶叶生产每公顷茶园化肥折纯养分 K ₂ O 施用量	kg·hm ⁻²
		技术简易性 C2	单位面积劳动力投入时间 D4	当季茶叶生产每公顷茶园投入劳动力总计时长	h·hm ⁻²
		技术稳定性 C3	单位种植面积茶青产量 D5	每公顷茶园收获茶叶鲜叶产量	kg·hm ⁻²
		化肥 N 利用率 C4	化肥 N 农学效率 D6	当季茶园施肥和不施肥处理茶青产量差与化肥折纯 N 用量之比	kg·kg ⁻¹
		稳产下有机 N 替代率 C5	有机肥 N 与无机肥 N 配施比例 D7	当季每公顷茶园以有机肥 N 替代化肥折纯养分 N 投入的百分比	%
		施肥方式 C6	叶面喷施 D8	液态肥料喷洒于茶园茶叶表面	—
			深施用(沟施、穴施) D9	以开沟或表层土翻埋形式施肥料于茶园土壤耕作层	—
		土壤肥力 C7	水肥一体化 D10	将水和化肥按一定比例混合后通过管道直接施入茶树根区	—
	碱解氮 D11		每千克土壤中碱解氮含量	mg·kg ⁻¹	
	有效磷 D12		每千克土壤中有效磷含量	mg·kg ⁻¹	
	速效钾 D13		每千克土壤中速效钾含量	mg·kg ⁻¹	
	有机质 D14		每千克土壤中有机质含量	g·kg ⁻¹	
	茶叶品质 C8	pH D15	土壤酸碱性检测值	—	
		水浸出物 D16	每千克茶叶中水浸出物含量	%	
		茶多酚 D17	每千克茶叶中茶多酚含量	%	
		咖啡碱 D18	每千克茶叶中咖啡碱含量	%	
	经济效益 B2	单位产值成本效益 C9	氨基酸 D19	每千克茶叶中氨基酸含量	%
单位种植面积茶叶产值 D20			每公顷茶园所获茶叶毛收益	元·hm ⁻²	
单位种植面积人工投入成本 D21			每公顷茶园的人工投入费用	元·hm ⁻²	
单位种植面积肥料成本 D22			每公顷茶园有机、无机肥料投入费用	元·hm ⁻²	
单位种植面积机械成本 D23			每公顷茶园的机械投入费用	元·hm ⁻²	
单位种植面积农药成本 D24			每公顷茶园的农药投入费用	元·hm ⁻²	
单位种植面积其他成本 D25		每公顷茶园的其他投入费用	元·hm ⁻²		
单位面积增量收益 C10	与传统技术相比单位面积净增收益 D26	每公顷茶园使用新技术后的净收益增加量	元·hm ⁻²		
	与传统技术相比单位面积技术应用补贴支持量 D27	每公顷茶园使用新技术的补贴量	元·hm ⁻²		
社会效益 B3	技术的推广率 C11	技术推广种植面积占习惯种植面积比例 D28	采用技术的种植面积与习惯种植面积的百分比	%	
	技术的农户响应率 C12	接受技术培训茶农占全区茶农比例 (培训率) D29	接受技术培训农户数量与全区农户数量的百分比	%	
	规模经营户采纳率 C13	集中连片规模 3 hm ² 以上采纳技术户占区域全部规模户比例 D30	采纳技术的规模户数量与区域全部规模户数量的百分比	%	
管理 B4	地方政府配套政策 C14	是否被当地政府纳入文件列为主推技术 D31	将该技术写进当地政府文件中	—	
		有无配套政策 D32	主要指补贴政策	—	
		媒体、报纸报道次数 D33	体现对技术的宣传作用	次	
	当地专业力量支持 C15	该技术推广有无专业技术人员 D34	有农作物栽培、土壤化学、农业生态等背景知识	—	
	技术员有无专业职称 D35	具有推广系列的职称或专业背景的学位	—		
	是否发布技术使用手册 D36	指技术应用流程/规范等详细说明	—		
区域差异 B5	区域 C16	坡度 D37	—	—	
		土壤 D38	—	—	

的算数平均法去测度一个指标的最终权重,存在忽视专家意见的差异性和偏好的不足,导致最终评价结果不理想。为此,本研究采用了基于专家组多重相关的赋权方法,即通过获取专家组的打分意见,建立权重(打分)矩阵,然后计算两个不同专家打分之间的相关系数,利用打分意见的相关性,重新赋予每个指标专家组意见一致的权重。专家组多重相关性赋权法计算步骤如下:

第一步:建立权重(打分)矩阵。设指标个数为 n 个,由 m 名专家对各个指标进行打分,获得 m 个主观权重组合,构成权重(打分)矩阵 W :

$$W = \begin{pmatrix} \omega_1^1 & \omega_2^1 & \cdots & \omega_n^1 \\ \omega_1^2 & \omega_2^2 & \cdots & \omega_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_1^m & \omega_2^m & \cdots & \omega_n^m \end{pmatrix}$$

第二步:计算专家 p 与专家 q 之间相关系数 r_{pq} 。综合计算得出 m 名专家指标权重的相关系数,相关系数范围为 $[-1, 1]$ 。在正相关情况下,相关系数越大,两位专家的意见越一致,同时定义他们为较权威专家;在负相关情况下,相关系数越小,两位专家意见越相悖,并定义该专家为较不权威专家。较权威的专家所赋权重将在最终的权重结果中占有重要地位。

相关系数计算公式如下:

$$r_{pq} = \frac{\sum_{k=1}^n (\omega_k^p - \bar{\omega}^p)(\omega_k^q - \bar{\omega}^q)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (\omega_k^p - \bar{\omega}^p)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (\omega_k^q - \bar{\omega}^q)^2}} \quad (1)$$

$$\bar{\omega}^p = \sum_{k=1}^n \omega_k^p / n \quad (2)$$

第三步:运用 SPSS 软件计算得到各位打分专家的相关系数矩阵 R 。

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mm} \end{pmatrix}$$

第四步:对矩阵 R 进行归一化处理,然后得到归一化后的相关系数矩阵 R' 。计算公式如下:

$$r_{pq}' = r_{pq} / \sum_{q=1}^m r_{pq} \quad (3)$$

$$R' = \begin{pmatrix} r_{11}' & r_{12}' & \cdots & r_{1m}' \\ r_{21}' & r_{22}' & \cdots & r_{2m}' \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1}' & r_{m2}' & \cdots & r_{mm}' \end{pmatrix}$$

第五步:计算专家加权重矩阵 Q :

$$Q = R' \times W \quad (4)$$

此时,专家加权重矩阵不具有收敛性,为了获得收敛矩阵,即获得一致性的指标赋权值,需要重复此过程。即每一次将此矩阵作为新的权重矩阵,重复第二步至第五步的过程,直至得到收敛的权重结果。

第六步:求出各个层次指标的最终主观权重。计算收敛的加权重矩阵各列的平均值,将平均值进行绝对值归一化处理,最终得到主观权重。为便于计算,将 n 个子指标的权重记为列矩阵 ω 。

1.4.2 基于专家意见多重相关性的灰色关联分析模型

灰色关联分析模型是一种客观评价法,该方法只计算评价值,而没有权重^[26],因此本研究将灰色关联分析法与专家意见多重相关性赋权法相结合,构建主客观结合的评价模型。具体步骤如下:

第一步:将原始数据(t 项技术模式各项指标的实际监测数据)进行标准化处理,消除量纲差异。

逆向指标:

$$X_{ij}' = \frac{[\max(X_{ij}) - X_{ij}] - \bar{X}_j}{\delta_j} \quad (5)$$

正向指标:

$$X_{ij}' = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{\delta_j} \quad (6)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个评价对象的第 j 项指标值; \bar{X}_j 为评价对象第 j 项指标的均值; δ_j 为评价对象第 j 项指标的标准化。

第二步:构造比较数列和参考数列。以原始数据标准化后的数据作为比较数列,并将标准化后的数据记为 $x_i(k)$,比较数列记为 X_i ;以标准化后不同技术下同一指标的最优值作为参考数列,将最优值记为 $x_0(k)$,参考数列记为 X_0 。

$$X_i = \{x_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\} = \{x_i(1), x_i(2), x_i(3), \dots, x_i(n)\}$$

$$X_0 = \{x_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\} = \{x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(n)\}$$

第三步:计算关联系数,并将关联系数构成矩阵记为 E ,把规范化后的数列与参考数列进行比较,得出第 k 个指标的关联系数:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_k \min_i |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (7)$$

式中: ρ 为分辨系数,介于 0 与 1 之间,一般取值为 0.5。

$$E = \begin{pmatrix} \varepsilon_1(1) & \varepsilon_1(2) & \cdots & \varepsilon_1(n) \\ \varepsilon_2(1) & \varepsilon_2(2) & \cdots & \varepsilon_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_i(1) & \varepsilon_i(2) & \cdots & \varepsilon_i(n) \end{pmatrix}$$

第四步:计算评估数值矩阵。由关联系数矩阵 E 和专家组多重相关性赋权法所计算的意见一致的主观权重 ω 的乘积得到评估数值矩阵 D :

$$D = E \times \omega \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 基于专家意见多重相关性指标赋权结果

根据指标体系设置专家打分表,并邀请了24位农学、土壤化学、植物营养和农业经济及管理等多学科专家进行打分赋权,采用专家组多重相关性赋权法得到最终权重(表4)。总体上看,专家们较为关注化肥减施增效技术模式的技术特征,赋予了技术特征最高的权重,36.52%;其次是经济效益,权重为26.95%;

这既是政府所关心的,更是广大农户关心的;再次是社会效益,权重为21.24%,这是推广部门和学者共同关心的,它反映了专家对科技成果推广率或技术模式社会需求率的重视程度;管理指标权重最小,为15.29%,体现了政府层面对技术成果应用的重视程度。从4个准则层的分项子指标来看,技术特征指标中,化肥N农学效率和单位种植面积茶青产量的权重较高;经济效益指标中,与传统技术相比单位面积净增收的权重较高;社会效益指标中,专家们比较关注的是集中连片规模3 hm²以上采纳技术户占区域全部规模户比例;管理指标中,是否发布技术使用手册和是否被当地政府纳入文件列为主推技术这2个子指标被赋予了相对较高的权重。因本研究待评价的5种化肥减施增效技术模式都在同一个区域开展示范,准则层中体现地域差异的区域指标不再考虑;同时,5种技术模式都没有单独的补贴支持,且部分生产投入和茶园管理相同,因此实际监测数据相同的指

表4 基于专家组多重相关性赋权法的赋权结果

Table 4 The weighting result based on the method of multiple correlation of expert groups

准则层 Criterion layer	准则权重 Criterion weight/%	指标层 Index layer	指标权重 Index weight/%	子指标层 Subindex layer	子指标权重 Subindex weight/%		
技术特征	36.52	化肥施用强度	4.99	单位面积化肥N用量	2.45		
				单位面积化肥P ₂ O ₅ 用量	1.24		
				单位面积化肥K ₂ O用量	1.30		
		技术稳定性	8.14	化肥N利用率	9.80	单位种植面积茶青产量	8.14
						化肥N农学效率	9.80
		稳产下有机N替代率	0.88	土壤肥力	1.27	有机肥N与无机肥N配施比例	0.88
						碱解氮	0.36
		茶叶品质	11.44			速效磷	0.01
						速效钾	0.01
						有机质	0.32
						pH	0.57
						水浸出物	3.57
						茶多酚	2.52
咖啡碱	1.02						
经济效益	26.95	单位产值成本效益	13.63	氨基酸	4.33		
				单位种植面积茶叶产值	5.10		
				单位种植面积肥料成本	4.01		
				单位种植面积人工投入成本	4.52		
社会效益	21.24	单位面积增量收益	13.32	与传统技术相比单位面积净增收	13.32		
				技术的推广率	7.14		
				技术的农户响应率	4.54		
管理	15.29	规模经营户采纳率	9.56	集中连片规模3 hm ² 以上采纳技术户占区域全部规模户比例	9.56		
				地方政府配套政策	8.08		
管理	15.29	当地专业力量支持	7.21	是否被当地政府纳入文件列为主推技术	4.99		
				有无配套政策	2.90		
				媒体、报纸报道次数	0.19		
				是否发布技术使用手册	7.21		

标在模型计算中不再考虑。

2.2 基于专家意见多重相关性的灰色关联分析模型的评价结果

运用基于专家意见多重相关性的灰色关联分析模型进行评价,得到5种化肥减施增效技术模式应用的社会经济效果综合评价结果及排序(表5)。首先,从综合评价得分看,模式2>模式1>模式4>模式3>模式5;其次,从各技术模式在其技术特征、经济效益、社会效益和管理4个准则层面得分来看,不同化肥减施增效技术模式表现出不同的结果及差异化排序。

总体上,5种化肥减施增效技术模式中,茶农一般更关注技术的收益回报性、经济性(低成本)和简易操作性,政府则更关注技术应用的社会性与管理的有效性。尽管有机肥替代部分化肥技术模式(模式2)在技术特征、社会效益和管理方面都优于其他模式(排序都是第一),但其经济效益与农户的期望是有距离的,该模式需要补足收益这个短板,使其更易于推广应用。专用肥技术模式(模式1)因技术特征得分很低,社会效益难免受到影响,若能突破技术障碍使之更符合农户能力可及的范围,则会更易于推广应用。生物炭技术模式(模式4),除了社会效益指标在5项技术模式中排在末尾,其他3项准则层指标得分都处于第二的位次,若能进一步克服相关指标反映的不足,未来在茶园生产中会有很大的推广应用潜力和空间。施用脲甲醛复合肥新型肥料模式(模式3)和地力改良与施生物炭结合模式(模式5)各准则层指标得分排序相当靠后,说明这2种模式不仅社会效益和经济效益差强人意,而且技术特征和管理层面也存在明显不足,有待深入创新研究,不宜立即推广应用。

3 讨论

采用基于专家意见多重相关性赋权与灰色关联分析相结合的模型评估福建闽东绿茶区茶园化肥减施增效技术模式,总体来说,模式1和模式2优势明显

大于其他技术模式,一方面在于这两种模式较其他三种能更好地提高茶叶产量和品质,另一方面这两种模式在管理方面得到了当地政府和专业力量的支持。茶园化肥减施增效技术模式能否被农户采纳,除了与技术本身以及技术所能带来的各种效益有关外,还会受到技术推广服务形式和推广力度的影响^[27]。陶群山等^[28]分析了影响农户采纳农业新技术的因素,发现政府对新技术的扶持和宣传对农户采纳新技术具有显著的作用。而针对模式3、模式4和模式5的劣势,建议在强化技术改良与提升茶青产量和产值的同时,加强政府的支持力度,如利用电话、电视、网络等现代信息化技术加大宣传,派遣专业技术人员对茶农进行技术培训,都是提升茶农对这些技术模式认可和接纳非常有效且必要的措施。

有学者统计了茶园施用茶叶专用肥后的茶园产量、产值和肥料投入成本,发现茶园产值收益显著提高^[29]。本研究中,模式1具有较好的经济效益,主要源于该技术模式所带来的高产值和低成本。但在化肥减量方面,模式1的化肥N和化肥总养分投入虽较当地茶农习惯施用量减少32%和37%,但其单位面积化肥N施用量上依然是5种技术模式中最高,达到375 kg·hm⁻²,直接导致单位面积化肥N投入而获得的茶青产量稍低于模式2,使其在技术特征指标一项中处于劣势。部分学者认为,茶树专用肥能够一定程度提高茶叶产量和品质,若与有机肥配施或增加其有机质含量则更利于发挥其对茶叶产量和品质的提升作用^[30-31]。针对模式1还需进一步优化茶树专用肥中氮磷钾的配比,特别是减N潜力,以达到稳产前提下减少化肥N用量、增加茶园收益的目的。

模式2作为有机肥替代部分化肥技术应用模式,其综合评价得分位列5项技术模式之首,值得优先普及推广。然而,虽然有机肥的施用可提高土壤有机质含量,改善和丰富土壤微生物群落结构,使土壤养分供给能力增强,促进茶叶产量和质量大幅提升^[32],但

表5 基于专家意见多重相关性的灰色关联分析模型的评价结果

Table 5 Evaluation results of grey relational analysis model based on multiple correlation of expert opinions

技术模式 Technical mode	技术特征 Technical characteristic		经济效益 Economic efficiency		社会效益 Social efficiency		管理 Management		综合评价 Comprehensive evaluation	
	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank
	模式1	0.163 2	5	0.245 2	1	0.183 1	2	0.152 9	1	0.744 4
模式2	0.322 5	1	0.110 8	5	0.212 4	1	0.152 9	1	0.798 6	1
模式3	0.182 6	3	0.137 2	3	0.096 3	4	0.066 4	3	0.482 4	4
模式4	0.212 8	2	0.159 0	2	0.081 1	5	0.107 2	2	0.560 0	3
模式5	0.168 2	4	0.133 4	4	0.099 5	3	0.066 4	3	0.467 6	5

该模式化肥减量使用所减少的成本并未抵消或降低总生产成本,反而增加了额外支出,尤其是偏高的有机肥成本,导致该模式的单位面积净增收逊色于其他模式。黄继川等^[33]在研究有机肥替代技术中发现,有机肥用量增加使得有机肥成本升高,再加上当地政府在区域禁止养殖生猪的政策推高了有机肥价格,使有机肥施用成本进一步增加。因此,在推广有机肥替代部分化肥技术模式时,政府需要积极发挥作用,出台包容性绿色增长政策,直补茶农因采纳有机肥替代化肥技术而额外支出的成本,鼓励和引导茶农科学绿色种植的积极性。

4 结论

(1)基于我国闽东地区绿茶生产实际情况,结合国内外学者相关可持续农业技术评价指标筛选研究经验,系统构建了针对茶园化肥减施增效技术模式应用的社会经济效果评价指标体系。该体系虽然与普遍适用或通适的环保型农业技术评价指标体系还有较大差距,但仍可为其他作物化肥减施增效技术应用效果评价指标体系的构建提供参考。

(2)利用专家意见多重相关性的灰色关联分析模型对福建闽东绿茶区5种技术模式应用的社会经济效果进行评估,综合评价得分表现为模式2>模式1>模式4>模式3>模式5。

(3)5项技术模式中,模式2,即有机肥替代部分化肥模式最值得推广,但是因施用有机肥而产生的额外成本,需要政府通过绿色支持政策给予直接补偿,以鼓励茶农在生产实践中持续应用该技术模式。

(4)茶园化肥减施增效技术模式能否被农户采纳,除了与技术本身以及技术所能带来的各种效益有关外,还受到技术推广服务形式和推广力度的影响,建议政府加强对于技术推广的支持力度和宣传力度,积极发挥政府对良好技术普及应用的主导作用。

参考文献:

[1] 倪康,廖万有,伊晓云,等.我国茶园施肥现状与减施潜力分析[J].植物营养与肥料学报,2019,25(3):421-432. NI K, LIAO W Y, YI X Y, et al. Fertilization status and reduction potential in tea gardens of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(3): 421-432.

[2] 马立锋,陈红金,单英杰,等.浙江省绿茶主产区茶园施肥现状及建议[J].茶叶科学,2013,33(1):74-84. MA L F, CHEN H J, SHAN Y J, et al. Status and suggestions of tea garden fertilization on main green tea-producing counties in Zhejiang Province[J]. *Journal of Tea Science*, 2013, 33(1): 74-84.

[3] 钱晓华,廖万有,胡荣根,等.安徽省茶园施肥现状与对策分析[J].茶业通报,2015,37(3):108-113. QIAN X H, LIAO W Y, HU R G, et al. Current situation and countermeasures of fertilization in tea garden of Anhui Province[J]. *Journal of Tea Business*, 2015, 37(3): 108-113.

[4] 蔡翔,李延升,杨普香,等.茶园面源污染现状及防治措施[J].蚕桑茶叶通讯,2018(6):24-26. CAI X, LI Y S, YANG P X, et al. Current situation and control measures of non-point source pollution in tea garden[J]. *Newsletter of Sericulture and Tea*, 2018(6): 24-26.

[5] 樊战辉,唐小军,郑丹,等.茶园土壤酸化成因及改良措施研究和展望[J].茶叶科学,2020,40(1):15-25. FAN Z H, TANG X J, ZHENG D, et al. Study and prospect of soil acidification causes and improvement measures in tea plantation[J]. *Journal of Tea Science*, 2020, 40(1): 15-25.

[6] 杨浩瑜,刘惠见,张乃明,等.化肥减施处理对茶园土壤养分及茶叶品质的影响[J].南方农业学报,2020,51(4):887-896. YANG H Y, LIU H J, ZHANG N M, et al. Effects of different fertilization application reduction methods on tea garden soil nutrient and tea quality[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(4): 887-896.

[7] 吴志江,江福英,尤志明,等.连续5年配施有机肥茶园土壤活性铝含量变化状况[J].土壤,2019,51(6):1070-1077. WU Z D, JIANG F Y, YOU Z M, et al. Variation of active aluminum content in tea garden soil with manure applied for 5 years[J]. *Soils*, 2019, 51(6): 1070-1077.

[8] 王子腾,耿元波,梁涛,等.减施化肥和配施有机肥对茶园土壤养分及茶叶产量和品质的影响[J].生态环境学报,2018,27(12):2243-2251. WANG Z T, GENG Y B, LIANG T, et al. Effects of reducing chemical fertilizer and organic fertilizer combination on tea garden soil and tea yield and quality[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(12): 2243-2251.

[9] 卢杉杉,高水练,郭彬,等.套种紫花苜蓿对茶园土壤及茶叶品质的影响[J].茶叶通讯,2019,46(2):154-161. HU S S, GAO S L, GUO B, et al. Effects of interplanting alfalfa on tea garden soil and tea quality [J]. *Journal of Tea Communication*, 2019, 46(2): 154-161.

[10] 刘声传,龙毅,林开勤,等.化肥减施对‘黔茶1号’产量与品质的影响[J].中国农学通报,2018,34(6):60-64. LIU S C, LONG Y, LIN K Q, et al. Effects of chemical fertilizer reducing on yield and quality of tea ‘Qiancha1’ [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(6): 60-64.

[11] 卢杉杉,高水练,陈倩洁,等.套种大豆对茶园化肥需求量的影响[J].西南农业学报,2019,32(12):2776-2782. HU S S, GAO S L, CHEN Q J, et al. Effect of interplanting soybean on fertilizer demand in tea garden[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(12): 2776-2782.

[12] 马立锋,倪康,伊晓云,等.浙江茶园化肥减施增效技术模式及示范应用效果[J].中国茶叶,2019,41(10):40-43. MA L F, NI K, YI X Y, et al. Technical mode of reducing fertilizer application and increasing benefit and its application effect in tea garden of Zhejiang Province[J]. *China Tea*, 2019, 41(10): 40-43.

[13] 陈玉真,王峰,吴志丹,等.化肥减施对乌龙茶产量、品质和肥料利用率及经济效益的影响[J].茶叶科学,2020,40(6):758-770. CHEN Y Z, WANG F, WU Z D, et al. Effect of chemical fertilizer re-

- duction on yield, quality, fertilizer utilization efficiency and economic benefit of Oolong tea[J]. *Journal of Tea Science*, 2020, 40(6): 758-770.
- [14] 周波, 陈勤, 陈汉林, 等. 广东单丛茶区化肥减施增效技术模式研究[J]. 茶叶科学, 2020, 40(5): 607-616. ZHOU B, CHEN Q, CHEN H L, et al. Technical approach of saving and improving efficiency of chemical fertilizers in Dancong tea area of Guangdong[J]. *Journal of Tea Science*, 2020, 40(5): 607-616.
- [15] 孟令宇, 杨浩瑜, 张乃明, 等. 基于SWAT模型茶园化肥减施增效配比研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1239-1248. MENG L Y, YANG H Y, ZHANG N M, et al. Optimizing chemical fertilizer use in a tea plantation based on the SWAT model[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(8): 1239-1248.
- [16] 尼雪妹, 王艳, 王娜娜, 等. 农业技术评价指标选取及指标体系构建[J]. 农业展望, 2017, 13(12): 65-71. NI X M, WANG Y, WANG N N, et al. Selection of agricultural technology evaluation index and index system construction[J]. *Agricultural Outlook*, 2017, 13(12): 65-71.
- [17] 尼雪妹, 罗良国, 李宁辉, 等. 水稻作物化肥减施增效技术评价指标体系构建[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 301-310. NI X M, LUO L G, LI N H, et al. Establishment of evaluation index system of chemical fertilizer application reduction and efficiency improvement technologies in rice farming[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4): 301-310.
- [18] 杨森. 辽宁寒区设施蔬菜化肥减施增效技术模式评价指标体系构建及应用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020: 14-17. YANG S. Study on evaluation index system construction and application of chemical fertilizer reduction and benefit improvement technology models of protected vegetables in cold region of Liaoning Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020: 14-17.
- [19] VAN CAUWENBERGH N, BIALA K, BIELDERS C L, et al. SAFE: A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 120(2/3/4): 229-242.
- [20] DARNHOFFER I, FAIRWEATHER J, MOLLER H. Assessing a farm's sustainability: Insights from resilience thinking[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2010, 8(3): 186-198.
- [21] REED M S, FRASER E, DOUGILL A J. An adaptive learning process for developing and applying sustainability indicators with local communities[J]. *Ecological Economics*, 2006, 59(4): 406-418.
- [22] 孙德忠, 喻登科, 田野. 一种基于专家组合多重相关的主观赋权方法[J]. 统计与决策, 2012(19): 88-90. SUN D Z, YU D K, TIAN Y. A subjective weighting method based on multiple correlation of expert combination[J]. *Statistics & Decision*, 2012(19): 88-90.
- [23] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046. LIU S F, CAI H, YANG Y J, et al. Advance in grey incidence analysis modelling[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2013, 33(8): 2041-2046.
- [24] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119-121. YU X F, FU D. Review of multiple index comprehensive evaluation method[J]. *Statistics & Decision*, 2004(11): 119-121.
- [25] 尼雪妹. 水稻化肥减施增效技术评价指标体系构建及应用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 13-15. NI X M. Study on establishment and application of evaluation index system for chemical fertilization - reduction and benefit improvement technologies in rice farming[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019: 13-15.
- [26] 俞立平. 客观赋权法本质及在科技评价中的应用研究——以学术期刊为例[J]. 情报理论与实践, 2021, 44(2): 50-56. YU L P. Study on the essence of objective weighting method and its application in scientific and technological evaluation[J]. *Information Studies: Theory & Application*, 2021, 44(2): 50-56.
- [27] 程红莉, 黄恩. 环境友好型农业技术的农户采纳及其影响因素——基于农业技术传播的系统性分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(31): 314-316. CHENG H L, HUANG E. Influencing factors about farmers' adoption of environmental friendly agricultural technology: A systematic analysis based on agricultural technology spreading[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(31): 314-316.
- [28] 陶群山, 胡浩, 王其巨. 环境约束条件下农户对农业新技术采纳意愿的影响因素分析[J]. 统计与决策, 2013(1): 106-110. TAO Q S, HU H, WANG Q J. Analysis of influencing factors of farmers' willingness to adopt new agricultural technologies under environmental constraints[J]. *Statistics & Decision*, 2013(1): 106-110.
- [29] 伊晓云, 马立锋, 石元值, 等. 茶叶专用肥减肥增产增收效果研究[J]. 中国茶叶, 2017, 39(4): 26-27. YI X Y, MA L F, SHI Y Z, et al. Study on the effect of special fertilizer for tea on reducing weight, increasing yield and increasing income[J]. *China Tea*, 2017, 39(4): 26-27.
- [30] 刘凡卫, 孙先勇, 田维超, 等. 茶树专用肥和有机肥在贵州茶树上的施用效果[J]. 农技服务, 2020, 37(12): 45-48. LIU F W, SUN X Y, TIAN W C, et al. Application effect of special fertilizer and organic fertilizer on tea plants in Guizhou[J]. *Agricultural Technology Service*, 2020, 37(12): 45-48.
- [31] 李萍萍, 林永锋, 胡永光. 有机肥与化肥配施对茶叶生长和土壤养分的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 64-69. LI P P, LIN Y F, HU Y G. Effects of compound application of organic and chemical fertilizer on growth, quality of tea plants and soil nutrient[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 64-69.
- [32] 孙宇龙, 张永利, 王辉军, 等. 机采茶园有机替代技术对土壤肥力和茶叶产量品质的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(21): 43-49. SUN Y L, ZHANG Y L, WANG Y J, et al. Effects of chemical fertilizers replaced by organic manure on soil fertility, tea yield and quality in machine-picked tea garden[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(21): 43-49.
- [33] 黄继川, 肖志云, 吴雪娜, 等. 茶园化肥减量增效技术的推广应用——以广东大埔县为例[J]. 广东农业科学, 2020, 47(2): 75-82. HUANG J C, XIAO Z Y, WU X N, et al. Promotion and application of "chemical fertilizer saving and efficiency improving technology" in tea garden: A case study of Dabu County, Guangdong Province[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(2): 75-82.