



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

弃耕行为对亚热带农田土壤有机质时空变化作用机理研究

张童瑶, 胡月明, 任向宁, 陈飞香, 冯雪珂

引用本文:

张童瑶, 胡月明, 任向宁, 等. 弃耕行为对亚热带农田土壤有机质时空变化作用机理研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 805–817.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0480>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄土高原东部潇河流域农田土壤有机质时空变异及影响因素

解文艳, 周怀平, 杨振兴, 冯悦晨, 白雪, 杜艳玲

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 96–104 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0195>

增施有机肥对稻田亚耕层土壤的培肥效应

韩上, 武际, 张祥明, 胡鹏, 杨友兵, 李敏, 王慧, 唐杉

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 334–341 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0319>

基于高光谱数据的北疆绿洲农田灰漠土有机质反演

单海斌, 蒋平安, 颜安, 朱磊, 郭星

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 276–282 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0256>

潮土区菜田土壤肥力现状评价

王倩姿, 王书聪, 张书贵, 张静芝, 孙志梅, 马文奇, 薛澄

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 645–653 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0233>

华北小麦玉米轮作区耕地地力等级划分及特征

薛彦东, 辛景树, 任意, 万广华, 张桂兰, 杨瑞让

农业资源与环境学报. 2015(6): 530–536 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0146>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张童瑶, 胡月明, 任向宁, 等. 弃耕行为对亚热带农田土壤有机质时空变化作用机理研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 805–817.

ZHANG Tong-yao, HU Yue-ming, REN Xiang-ning, et al. Study on the spatiotemporal variation of soil organic matter induced by abandoned tillage behavior[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6): 805–817.



开放科学 OSID

弃耕行为对亚热带农田土壤有机质 时空变化作用机理研究

张童瑶¹, 胡月明^{1,2,3,4}, 任向宁^{1,2,3*}, 陈飞香^{1,3,4}, 冯雪珂^{2,3,4,5}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510640; 2. 广东省土地利用与整治重点实验室, 广州 510642; 3. 广东省土地信息工程技术研究中心, 广州 510642; 4. 自然资源部建设用地再开发重点实验室, 广州 510642; 5. 广州市华南自然资源科学技术研究院, 广州 510640)

摘要:为明晰弃耕行为对耕地质量关键性指标——土壤有机质时空变化的作用机理,以粤东粮食主产区海丰、陆丰和陆河3个县(市)农田为研究对象,2015—2018年连续4年对205个典型亚热带农田样点进行跟踪监测,综合野外调查采样、农户调查走访及室内检测分析,采用统计分析与地理探测器相结合的方法,构建了研究区典型弃耕行为模式,分析了不同地理情境下弃耕行为对农田土壤有机质含量变化的作用机理。结果表明:研究区农田弃耕行为主要表现为季节弃耕、调整弃耕、年轮弃耕、长期弃耕4种模式,在总体监测样点中具有弃耕行为的农田样点173个,占总数的84.39%,其中年轮弃耕和长期弃耕综合占比达59.03%。各种弃耕行为模式农田土壤有机质均呈增长趋势,而长期耕作则导致整体下降,监测样点4年间土壤有机质平均增加量表现为:季节弃耕($1.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 调整弃耕($1.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 年轮弃耕($0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 长期弃耕($0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 长期耕作($-0.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。在不同地理情景下,随着海拔高度增加,弃耕农田的土壤有机质整体下降;田间含水量过大或较少,会导致弃耕行为对农田土壤有机质影响显著;相对于滨海沙土,容重较大的赤红壤和红壤农田土壤有机质对弃耕行为的响应更强,应重点防范台地、水浇地及容重较大的土壤类型农田因弃耕行为导致的耕地质量下降。研究表明,农田弃耕行为在我国部分地区表现异常严重,且弃耕类型在不同地理情景下对土壤有机质含量影响不同,亟需通过制定相关政策制度将无序弃耕规范为有序休耕。

关键词:弃耕行为;亚热带农田;土壤有机质;地理探测器;作用机理

中图分类号:S153

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)06-0805-13

doi: 10.13254/j.jare.2020.0480

Study on the spatiotemporal variation of soil organic matter induced by abandoned tillage behavior

ZHANG Tong-yao¹, HU Yue-ming^{1,2,3,4}, REN Xiang-ning^{1,2,3*}, CHEN Fei-xiang^{1,3,4}, FENG Xue-ke^{2,3,4,5}

(1. College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China; 3. Guangdong Province Engineering Research Center for Land Information Technology, Guangzhou 510642, China; 4. Ministry of Natural Resources for Construction Land Transformation, Guangzhou 510642, China; 5. South China Academy of Natural Resources Science and Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With the acceleration of non-agricultural processes in China, the marginal cost of agricultural production is increasing, leading to the increasingly serious phenomenon of disordered abandonment and its adverse impact on national food security. Therefore, it is necessary to analyze the mechanism of abandoned behavior on the quality of cultivated land, especially the key index of farmland soil

收稿日期:2020-08-31 录用日期:2020-10-15

作者简介:张童瑶(1995—),女,河北正定人,硕士研究生,从事耕地大数据研究。E-mail:812601607@qq.com

*通信作者:任向宁 E-mail:xnren@scau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFD1100801)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2018YFD1100801)

<http://www.aed.org.cn>

organic matter. In this study, the farmland of Haifeng, Lufeng, and Luhe, the main grain-producing areas in east Guangdong, was used as target areas. From 2015 to 2018, 205 typical subtropical farmland samples were tracked and monitored. Field survey and sampling, household surveys, and indoor laboratory analysis were used in combination with statistical analysis and a geodetector method to construct the typical abandonment behavior pattern in the study area and analyze the mechanism of the effects of abandonment on soil organic matter content in farmland under different geographical conditions. Results showed that there were four patterns of farmland abandonment in the study area: seasonal abandonment, adjustment abandonment, annual ring abandonment, and long-term abandonment. Among the total monitoring sites, 173 farmland samples were abandoned, accounting for 84.39% of the total, of which annual ring abandonment and long-term abandonment accounted for 59.03% of the total. Soil organic matter increased under all kinds of abandoned tillage patterns but decreased under long-term tillage. Results showed that the average increase during the four years was as follows: season abandonment (1.55 g kg^{-1}) > adjustments abandonment (1.43 g kg^{-1}) > annual ring abandonment (0.27 g kg^{-1}) > long-term abandonment (0.24 g kg^{-1}) > long-term cultivation (-0.42 g kg^{-1}). For different geographical situations, as the altitude increased, the of abandoned farmland in the soil organic matter decreased. If the water content in the field was too high or too low, the abandonment behavior would significantly affect soil organic matter. Compared with coastal sandy soil, the response of soil organic matter in lateritic red soil and red soil with higher bulk density was stronger than that in coastal sandy soil. Therefore, it is necessary to focus on the prevention of farmland quality degradation caused by abandoned tillage in the mesa area, in irrigated land, and in areas containing soil type with high bulk density. The behavior of farmland abandonment is very serious in some areas of China. Moreover, the effects of different types of abandoned land on soil organic matter content are different under different geographical situations. Therefore, it is necessary to formulate relevant policies and regulations to convert disordered abandonment into orderly abandonment.

Keywords: abandonment behavior; subtropical farmland; soil organic matter; geodetector; function mechanism

土壤有机质 (Soil organic matter, SOM) 是农田质量、土壤健康与可持续利用的关键性指标^[1], 也是耕地维持土壤肥力和农业生产力的重要组分, 主要由胡敏酸 (Humic acid, HA)、富里酸 (Fulvic acid, FA) 和胡敏素这类腐殖物质以及碳水化合物、碳氢化合物以及含氮化合物等非腐殖物质组成^[2]。土地利用方式的改变会影响 SOM 的转化及积累, 进而对耕地质量及粮食产量产生巨大影响^[3-4]。随着我国社会从传统农业型向现代工业型转变^[5], 农田弃耕行为日渐显著。农田弃耕是指耕地具备耕种的条件, 但由于各种因素的共同作用, 使农户在不定期内对现有耕地停止或减少耕种, 从而导致耕地处于一种荒芜或未充分利用的状态, 其一般是单个农户自发、分散的选择行为^[6-7]。弃耕最早开始于 20 世纪初的欧洲, 西欧的山区、草原和东欧的土壤贫瘠地区出现大量的自发性和无序性弃耕行为^[8-9]。到 20 世纪 50 年代, 多个国家出台耕种补贴政策, 弃耕行为得以缓解, 并逐渐向有序性及规划性的休耕行为转变^[10]。我国在改革开放后, 工业化和城市化的快速发展吸引大量农业劳动力向东南沿海工业区和大中型城市集聚, 山区、丘陵等偏远地区弃耕现象开始显现^[11-12]。目前弃耕行为已广泛出现在我国各地区, 成为我国面临的较为普遍的社会问题。弃耕导致的土地利用变化通过改变土壤理化性质影响植物生长发育及土壤微生物活性, 从而影

响 SOM 的转化及积累^[13]。当林地转变为耕地或果园时, 加剧了 SOM 的矿化, 且当耕地撂荒后有利于 SOM 的固定^[14]; 当传统耕作方式转变为免耕时, 则有利于 SOM 积累, 提高 SOM 的含量^[15-16]。但是目前的研究主要集中在旱地转变为水田, 森林、草地开垦为耕地或是退耕还林、还草等土地利用方式变化对农田 SOM 的影响^[17-18], 而不同弃耕行为对农田 SOM 的时空变化作用机理研究还相对较少。

本研究以广东省东部粮食主产区汕尾市陆丰市、海丰县及陆河县为研究区, 基于 2015—2018 年连续 4 年间对研究区 205 个典型有效农田样点的跟踪监测结果, 采用统计分析与地理探测器相结合的方法, 在不同的地貌类型、农田利用方式及土壤类型中, 明晰弃耕行为对农田 SOM 的作用机理, 旨在为我国无序的弃耕行为转变为有序规划性的休耕制度奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以广东省东南部汕尾市的海丰、陆丰和陆河 3 个县(市)为研究区 ($22^{\circ}37' \sim 23^{\circ}29' \text{N}$, $114^{\circ}54' \sim 116^{\circ}14' \text{E}$) (图 1), 总面积 $4\,443 \text{ km}^2$ 。研究区地貌复杂, 地势北部高、南部低, 海拔最高 $1\,337 \text{ m}$ 、最低 45 m 。受地壳运动褶皱、断裂的影响, 研究区形成山地、丘陵、台地、

平原兼有的复杂地形,北部以山地为主,中部丘陵、台地分布较多,南部沿海多为台地、平原,其中平原占研究区陆域总面积的51%,丘陵占30%,台地占6%,山地占13%。研究区属南亚热带海洋性季风气候,全年气候温和,雨水充沛,年最高温度36.0℃,最低温度1.0℃,年平均气温为20.5℃,年平均日照时数1900~2100h,年平均降雨量1983mm。根据第二次土壤普查结果,研究区土壤类型复杂多样,有水稻土、黄壤、赤红壤等10多个土类,40多个土属,70多个土种。2018年研究区农田面积9.4万hm²,占研究区总面积的21%,其利用方式主要为水田、水浇地、旱地和果园。

1.2 数据材料

本研究涉及的弃耕行为数据依据2015—2018年实地踏勘、现场农户访问,并结合广东数据与应用中心下载的高分1号遥感影像解译数据综合判定;农田土壤有机质含量数据来源于野外定点采样的4期土壤样品实验室测定结果;DEM数据来源于ASTER GDEM数据(国家基础数据中心),用于研究区海拔高度、地形坡度等信息提取,空间分辨率为30m;土壤

类型图以及行政区划界线图采集自第二次土壤普查县级成果和县级土地利用变更调查成果。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤样点布设及测定

在研究区2010年测土配方施肥采样点的基础上,结合土壤类型图、土地利用类型图、地形图等资料,按照土地利用方式-地貌-土壤类型联合组成斑块^[19],以75%的密度进行随机抽样,最终确定研究区205个样点。于2015—2018年每年1月10—20日,在相同地理位置采集4年样点数据,每年共采集205个样点,其中陆丰市81个、海丰县61个、陆河县63个(表1)。

土壤样品的野外取样方法为棋盘式采样法^[20]。即在单元地块中,按棋盘的格式进行采样。考虑到研究对象为农田耕作层,在确定的采样点上,将土壤表层杂物刮去,采用土钻垂直采集0~15cm土样,各样点取土深度、质量一致。将各采样点样品充分混合后装入密封的保鲜袋中,每个样品取1kg左右。将野外取回的土样置于托盘中,先剔除动植物残体及石块等杂质,将土块压碎在室内进行自然风干后采用重铬酸

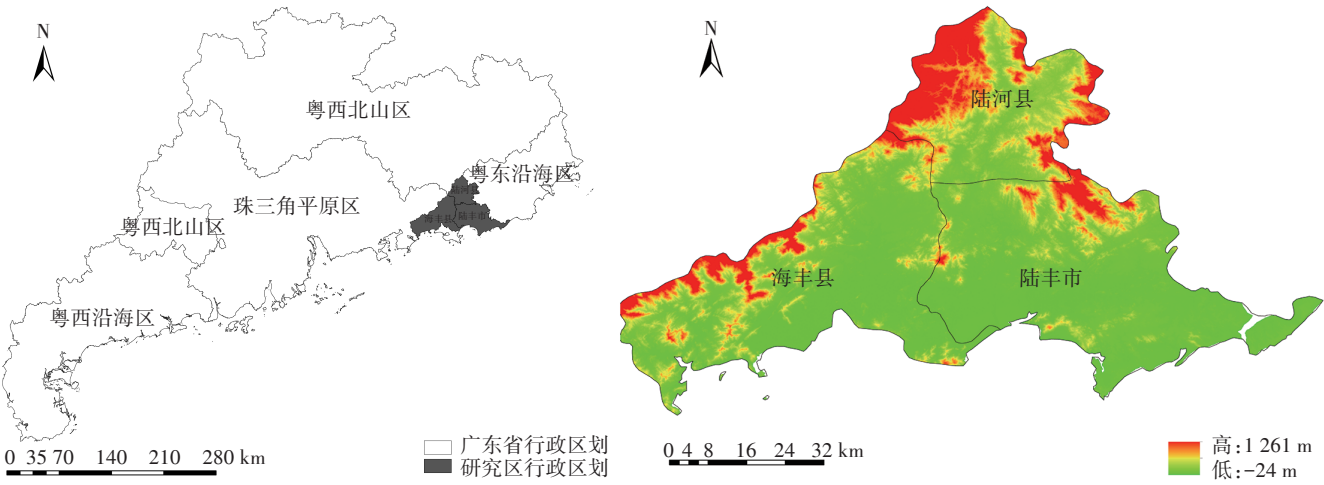


图1 研究区行政区划图及DEM图

Figure 1 The administrative division map and DEM map of the study area

表1 研究区样点数量分布

Table 1 Samples distribution in the study area

区域Region	农田利用方式 Farmland use pattern			地貌类型 Landform type			
	水田Paddy field	旱地Dry land	水浇地Irrigated land	平原Plain	丘陵Hill	台地Mesa	山地Mountain
陆丰市	46	29	6	35	25	7	14
海丰县	34	21	6	34	20	0	7
陆河县	38	19	6	35	17	6	5
研究区	118	69	18	104	62	13	26

钾容量法测定 SOM 含量^[21], 2015—2018 年研究区每年样点 SOM 平均值为 29.70~43.92 g·kg⁻¹, 平均含量为 36.80 g·kg⁻¹(表 2)。

1.3.2 弃耕行为模式确定

综合野外调查、农户访问, 以及室内遥感影像解译辅助, 根据弃耕时间长短将研究区内采样地块分为长期耕作、调整弃耕、季节弃耕、年轮弃耕和长期弃耕 5 种模式。其中季节弃耕是指该地耕作制度为一年一季或两季, 其中停耕一季, 且在调查期间每年均有停耕现象, 并在实地观测中发现农田沟渠、田垄完善齐整。调整弃耕是指在野外踏勘中, 该样点土地利用方式发生变化, 即由耕地转变为果园、茶园等其他农用地类的情况。年轮弃耕是指农田弃耕周期达 1 年以上, 在观察期内 1~2 年未种植任何农作物, 但有一定的种植痕迹, 且沟渠、田垄有一定破损。长期弃耕则是在研究期内 3 年及 3 年以上未种植作物, 踏勘现场无耕种痕迹, 并出现杂草灌木不规则分布, 沟渠、田垄基本消失的状况(表 3)。

1.3.3 地理探测器

地理探测器是用来探测事物空间分异性并揭示其背后驱动力的一组统计学方法。由于该模型可以克服传统统计方法处理变量的局限性, 被广泛应用于探测地理要素空间格局成因和机理的研究^[22]。模型中的因子探测器可以识别影响因子, 是研究复杂地理因素驱动作用机理的有效工具, 其通过比较某一环境因素和地理事物的变化在空间上是否有显著的一致性, 来判断环境因素对地理事物的重要作用和意义^[23]。本研究使用该模型中的因子探测器来检验不同弃耕行为和 SOM 空间分异的驱动力及大小, 计算方法见公式(1)。

$$P_{D,H} = 1 - \frac{1}{N\sigma_H^2} \sum_{i=1}^m N_{D,i} \sigma_{H_{D,i}}^2 \quad (1)$$

式中: $P_{D,H}$ 为评价因子 D 对 SOM 分布变化的解释力; H 为因子 D 的次级分区; N 为研究区总样本数; σ_H^2 为研

究区 SOM 的方差; $N_{D,i}$ 为次级分区的样本数量; $\sigma_{H_{D,i}}^2$ 为次级分区 SOM 的方差; m 为次一级分区的数量。 $P_{D,H}$ 的取值越大, 表示影响因子 D 对 SOM 变化的影响越大, 能更大程度地解释 SOM 的空间分异特征。

2 结果与分析

2.1 弃耕行为空间分布特征

研究区 205 个研究样点中具有弃耕行为的样点 173 个, 占总数的 84.39%。不同弃耕行为样点数量差异较大, 从多到少依次为: 年轮弃耕 (31.71%) > 长期弃耕 (27.32%) > 季节弃耕 (18.54%) > 调整弃耕 (6.83%) (表 4)。其中季节弃耕主要分布在研究区南部的滨海平原地带, 该地区地势平坦、耕地集中连片且降水丰富, 适于农作物耕种。年轮弃耕则主要分布在研究区中部的河流冲积平原地区以及北部的丘陵地区, 该地区旱地偏多且人口较少, 但地势相对山地较为平缓, 年轮耕种制度显著。长期弃耕分布较为集中, 主要分布在研究区的丘陵-台地-山地区, 且由丘陵向山地, 随着海拔高度增加农田长期弃耕数量也逐渐增加, 该地段地形复杂, 耕作条件差且劳动力少, 被动弃耕明显。而调整弃耕在研究区分布较少, 主要分布在陆河县东部的丘陵、台地区, 大多由旱地转变为果园、水田转变为茶园等(图 2)。

2.2 不同弃耕行为农田 SOM 时空变化特征

农田 SOM 在人为活动频繁扰动下, 具有较强的不稳定性。对比观察 2015—2018 年样点 SOM 平均变化值, 分析不同弃耕行为下农田 SOM 的变化特征发现, 4 种弃耕行为 SOM 变化趋势一致, 农田 SOM 呈现不同程度的增长趋势, 而长期耕作下农田 SOM 呈下降趋势。这说明农田弃耕后, 人为对土壤的扰动减少有利于农田 SOM 的积累, 适当的弃耕行为可有效提高农田 SOM 含量。各弃耕行为对 SOM 影响差异较大, 并呈现出随弃耕时间增加, SOM 增加量均值逐步减小的规律, 具体表现为: 季节弃耕 (1.55

表 2 研究区 2015—2018 年耕层土壤有机质含量(g·kg⁻¹)

Table 2 Organic matter content of the cultivated soil in the study area from 2015 to 2018 (g·kg⁻¹)

区域 Region	2015 年		2016 年		2017 年		2018 年	
	区间 Interval	平均值 Average value	区间 Interval	平均值 Average value	区间 Interval	平均值 Average value	区间 Interval	平均值 Average value
海丰县	9.11~82.92	31.53	9.04~60.45	29.70	5.71~65.15	31.65	7.49~104.52	38.36
陆河县	5.28~81.35	41.81	5.92~78.56	39.77	7.91~72.47	39.82	6.27~91.80	43.92
陆丰市	5.54~91.28	37.38	7.84~78.34	35.33	3.50~64.11	33.43	2.40~87.12	38.97
研究区	5.28~91.28	36.91	5.92~78.74	34.93	3.50~72.47	34.96	2.40~104.52	40.41

表3 研究区不同弃耕行为模式特征

Table 3 Characteristics of different abandonment behavior patterns in the study area

弃耕行为模式 Abandonment behavior pattern	农户访谈 Farmer interview	实地踏勘 Field survey	景观特征 Landscape	
长期耕作	不间断耕作 (如:早稻-晚稻- 冬甘薯)	观察期农作物生长正常; 沟渠、田垄完善、齐整, 农田管理效果明显		
季节弃耕	存在季节性弃耕 (如早稻-晚稻, 冬季弃耕)	观察期个别种植季未 种植作物,但种植痕迹明显; 沟渠、田垄完善、齐整		
调整弃耕	将农田改造为 果园或茶园	观察期内由耕地调整为园地		
年轮弃耕	存在1年或2年的弃 耕行为	观察期内存在1~2年未种植 作物现象,但有一定的种植 痕迹;沟渠、田垄有一定破损		
长期弃耕	3年及3年以上 弃耕	观察期内三年及三年以上 未种植作物,现场无耕种痕迹, 杂草灌木不规则分布; 沟渠、田垄基本消失, 丧失耕种保障功能		

表4 研究区农田监测样点弃耕行为模式统计

Table 4 Statistics of abandonment behavior patterns of farmland in the study area

区域 Region	样本数 Samples	长期耕作 Long-term farming	季节弃耕 Seasonal abandonment	调整弃耕 Adjustment abandment	年轮弃耕 Annual ring abandonment	长期弃耕 Long-term abandonment	占比 Percentage/ %
研究区	205	32	38	14	65	56	—
陆丰市	81	15	17	3	24	12	39.51
海丰县	61	8	14	15	18	16	29.76
陆河县	63	9	7	6	13	28	30.73
样点数量占比/%		15.61	18.54	6.83	31.71	27.32	—

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 调整弃耕($1.43\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 年轮弃耕($0.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 长期弃耕($0.24\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 长期耕作($-0.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)(图3)。粤东粮食主产区的主要耕作方式为早稻-晚稻-冬甘薯,季节弃耕过程中,绝大部分水稻稻秆还田,施用有机肥料等人类活动使得农田SOM得到不断的积累和补充,这有利于SOM增加值升高,另外,水田土壤长期处于厌氧条件,从而减少农田土壤

有机碳的分解,因此短时间内弃耕更有利于SOM含量的增高^[24]。研究区受粤东地区季风气候影响,土壤干湿明显,其硬度随土壤深度的增加而增加,不利于有机物的摄入和释放,从而出现弃耕年限时间越长其SOM增加值越低的状态。

长期耕作下的研究区农田SOM平均增加量范围为 $-1.02\sim0.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中在海丰县内最高,为 $0.39\text{ g}\cdot$

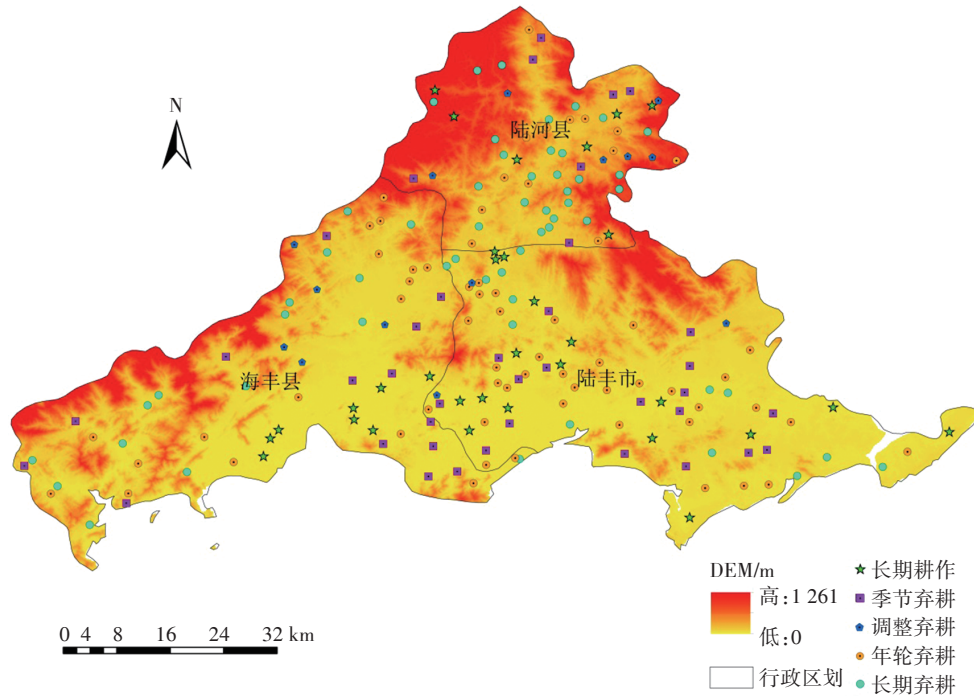


图2 研究区农田弃耕行为模式分布

Figure 2 Distribution of abandonment behavior patterns in the study area

kg^{-1} ,在陆河县内最低,为 $-1.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。季节弃耕下的农田SOM平均增加值范围在 $1.11 \sim 3.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其中在陆河县内最高,为 $3.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别比陆丰市和海丰县高出 $2.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。调整弃耕下农田SOM平均增加值范围在 $0.55 \sim 2.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其中在海丰县内最高,为 $2.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。年轮弃耕下农田SOM平均增加值在 $-0.08 \sim 0.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,陆丰市最高,为 $0.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。长期弃耕下农田SOM平均增加值在 $-0.77 \sim 0.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其中陆河县最高,为 0.74

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表5)。

本研究采用局部空间自相关来分析研究区内部不同区域间的差异情况,利用GaoDa计算出各区域的局部自相关指标及其空间滞后性,据此形成2015—2018年的空间自相关聚类图(图4)。从四年的结果来看,研究区农田SOM含量呈现明显的空间分异特征,与2015年相比,2016—2018年海丰县“高-高”类型区变化整体表现出由西南部向东北部聚集的趋势,该类型区季节弃耕和年轮弃耕行为较多且分布密集;陆河县“高-高”类型区变化整体表现出由中部向西南部聚集的趋势,且在2017年,该地区中部出现“低-高”类型区,该类型区围绕城区且长期弃耕行为广泛;陆丰市“高-低”类型区在四年间未发生变化,均分布在东部,2016—2018年,该地区的“高-高”类型区由西南部向中部聚集且分布多为季节弃耕。

2.3 不同地理情景下弃耕行为对农田SOM的作用机理

2.3.1 弃耕行为对农田SOM的贡献力测度

以监测期205个耕层土壤样本的SOM平均变化值为因变量,4种弃耕行为为自变量,采用地理探测器测度不同地理情景下弃耕行为对农田SOM的贡献力(表6)。在不同地貌情景中的弃耕行为对SOM平均变化值的贡献力(q 值)在 $0.024 \sim 0.486$ 之间,平均为 0.206 ,其中弃耕行为对台地农田SOM变化影响最为

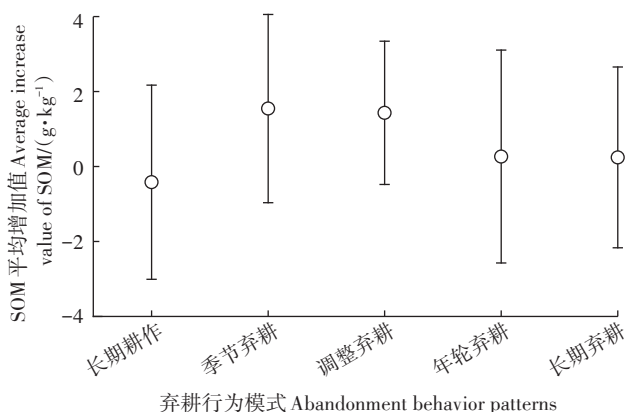


图3 不同弃耕行为模式的SOM平均增加值

Figure 3 Average increase value of SOM under different abandonment behavior patterns

表 5 监测期内不同弃耕行为模式的SOM空间变化(g·kg⁻¹)

Table 5 SOM spatial changes under different abandonment behavior patterns during the monitoring period(g·kg⁻¹)

区域 Region	长期耕作 Long-term farming	季节弃耕 Seasonal abandonment	调整弃耕 Adjustment abandonment	年轮弃耕 Annual ring abandonment	长期弃耕 Long-term abandonment
陆丰市	-0.49	+1.11	+0.55	+0.55	+0.42
海丰县	+0.39	+1.16	+2.67	-0.08	-0.77
陆河县	-1.02	+3.36	+0.61	+0.01	+0.74
研究区	-0.37	+1.88	+1.27	+0.16	+0.13

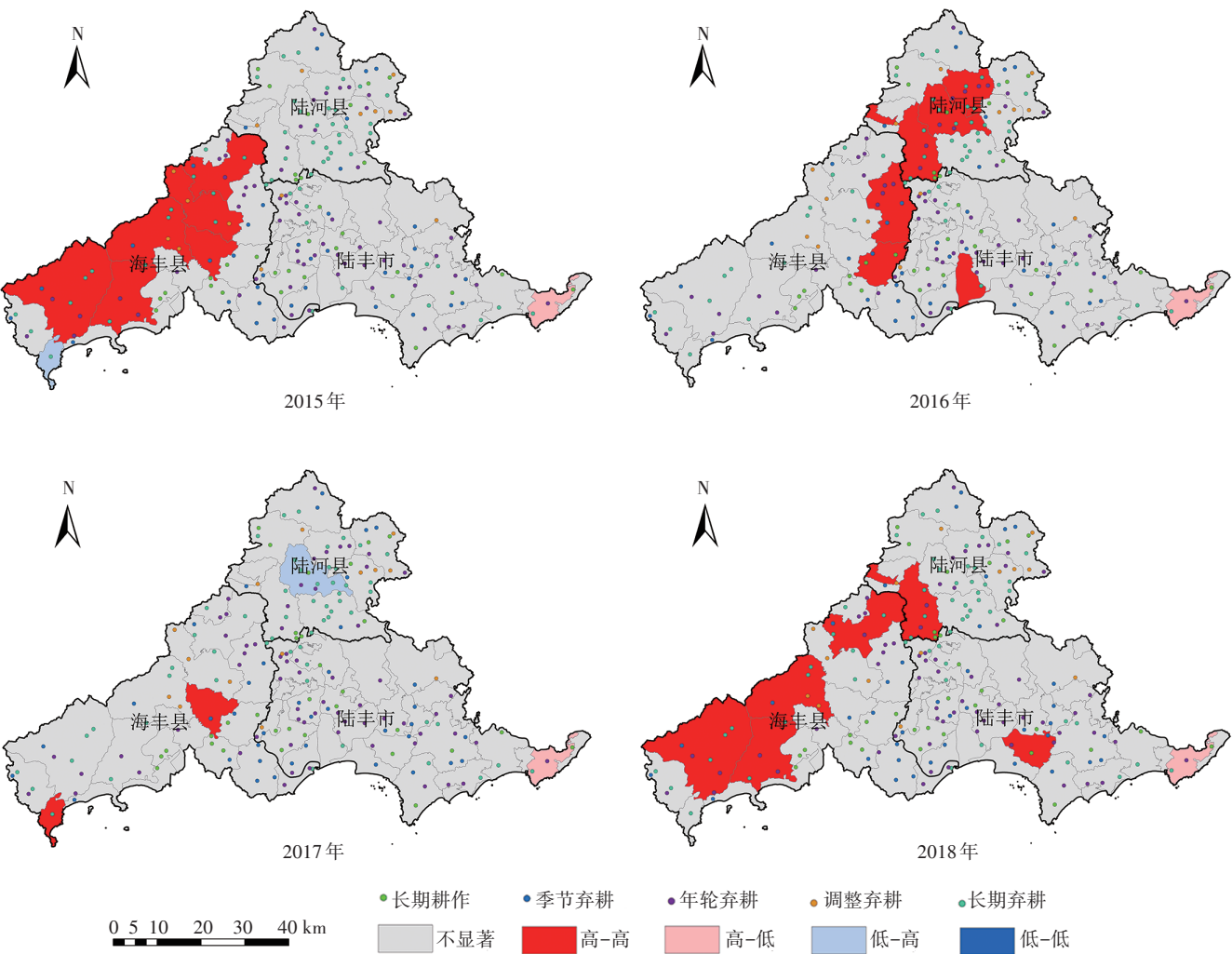


图4 研究区农田土壤有机质含量时空变化

Figure 4 Temporal and spatial variations of SOM content in the study area

明显, q 值为0.486,对山地农田SOM变化影响最小, q 值为0.024。在不同土壤类型情景中,弃耕行为对SOM平均变化值贡献力 q 值在0.154~0.974之间,平均为0.470。其中弃耕行为对水稻土SOM的变化影响最为明显, q 值为0.974,对沙土SOM的变化影响最小, q 值为0.154。在不同农田利用方式情景中弃耕行为对

SOM平均变化值贡献力 q 值在0.183~0.293之间,平均为0.181。其中弃耕行为对水浇地SOM变化影响明显, q 值为0.293,对水田SOM变化影响最小, q 值为0.183(表6)。

2.3.2 弃耕行为对农田SOM的作用机理分析

在不同地貌影响下,弃耕行为农田SOM的平均

表6 不同地理情景下弃耕行为对SOM影响贡献力(q)Table 6 Contribution of abandonment behavior to SOM under different geographical conditions(q)

地理情景 Geographical conditions		q	q 平均值 Average q value
地貌	平原	0.153	0.206
	丘陵	0.162	
	台地	0.486	
	山地	0.024	
土壤类型	赤红壤	0.183	0.470
	沙土	0.154	
	红壤	0.483	
	水稻土	0.974	
农田利用方式	水田	0.183	0.181
	旱地	0.206	
	水浇地	0.293	

变化值受海拔高度影响,整体呈现下降趋势,降幅分别为:长期耕作(41.51%)、季节弃耕(20.15%)、年轮弃耕(35.39%)、调整弃耕(32.07%)、长期弃耕(25.64%)。这是由于海拔间接控制着水热资源的分配,影响土壤的发育程度,水资源的分配直接影响SOM的矿化和腐殖化过程^[25]。海拔升高、温度降低会对土壤微生物群落结构及其活性产生显著的影响,其数量减少、活性减弱会减缓土壤有机碳的分解,进而降低SOM含量^[26]。在丘陵区,因海拔升高导致的农田SOM流失速度大于弃耕状态SOM的累积速度,农田SOM较平原区整体下降。但是在台地和山地区,农田SOM流失速度较快,丰沛的降水量有利于农田SOM的累积。除季节弃耕外,其他弃耕行为导致的农田SOM累积与随海拔增加导致的SOM流失基本处于平衡状态。而季节弃耕下适度的人为耕作将更多的植物残体输入农田系统中,在有利的SOM的累积环境中,导致SOM累积速度远远大于流失速度,弃耕行为的SOM提升效应明显(图5)。

在不同农田利用方式中,各弃耕行为的农田SOM受田间含水量影响差异显著。在水田利用方式中,农田SOM平均增加值由大到小依次为:调整弃耕($2.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>季节弃耕($1.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>年轮弃耕($0.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>长期弃耕($-0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>长期耕作($-0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。这主要是由于水田通过水稻根系及稻秆还田方式不断补充土壤有机物质,调整弃耕和季节弃耕下,土壤表面的稻秆及腐烂草根等有机物质通过微生物腐殖化等作用转化成SOM,从而显著提高农田

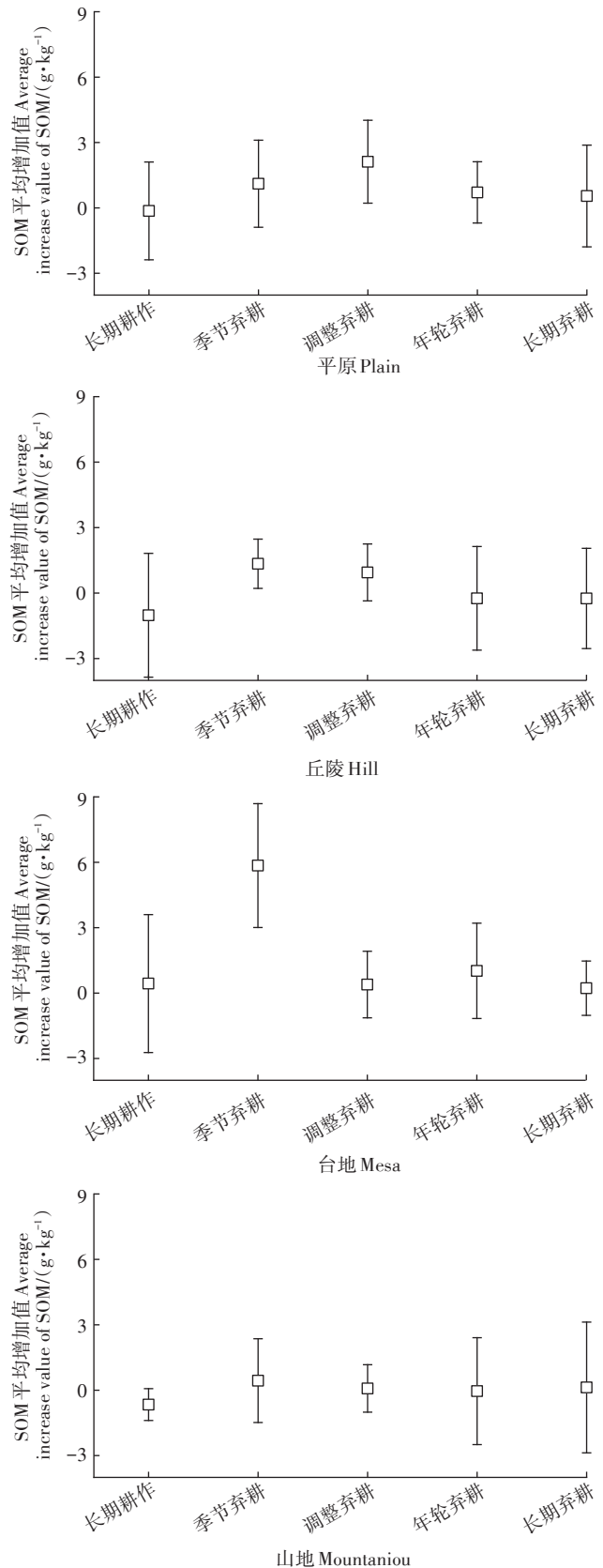


图5 地貌类型环境下弃耕行为的SOM平均增加值

Figure 5 SOM average increase value of abandoned farming behavior under the environment of geomorphic types

SOM 含量。在水浇地中,农田 SOM 平均增加值由大到小依次为:季节弃耕($2.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>年轮弃耕($1.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>调整弃耕($1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>长期弃耕($1.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>长期耕作($-0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。这可能由于水浇地中的土壤含水量下降,湿润的土壤更有利于土壤微生物活动,加速土壤有机质的分解。且经问卷调查,研究区水浇地多为蔬菜种植,人为扰动较为频繁,也促进了农田 SOM 的分解。徐明岗等^[27]研究表明,长期依靠化肥补充耕地养分,容易造成有机质老化、活性降低且含量下降。但弃耕行为下农田受人为扰动频率降低,其农田 SOM 的积累效应显著。但随弃耕时间的增加,农田表层板结硬化,有机物难以进入土壤内部系统,会导致 SOM 累积速度下降。而在旱地中土壤含水量进一步减少,且难以保证持续性和稳定性,导致弃耕行为效应水平高于水田,但低于水浇地的效应(图6)。

在不同的土壤类型中,各弃耕行为的农田 SOM 受土壤黏粒的影响,整体表现为:长期耕作下的农田 SOM 平均值降低,弃耕行为下 SOM 增加,且季节弃耕和调整弃耕下的农田 SOM 平均增加值高于年轮弃耕和长期弃耕。黏粒比表面积较高的红壤和赤红壤土壤粒间排列紧密,毛管孔隙多,多形成腐殖质积累于土壤内,SOM 分解慢^[28],季节弃耕的农田 SOM 平均增加值高于其他三种弃耕类型,而年轮弃耕的 SOM 平均增加值却低于其他弃耕行为,其数值更接近于长期耕作,说明在红壤和赤红壤的农田,短期弃耕是提高农田 SOM 的有效方式。在沙土中,长期耕作下的 SOM 平均值明显降低,滨海沙土的土壤通透性良好,机械耕作扰动使土壤较为松软,更有利于土壤有机碳的释放,不利于其固定和转化,这就间接地降低了农田 SOM 含量^[29],且在滨海沙土中,土壤黏粒含量较小,有机物在土壤中分解速度较快,有效地降低农田 SOM 含量^[30]。在水稻土中不同弃耕行为模式下的 SOM 平均增加值相差较小(图7)。

3 讨论

受人口密度、经济发展及人口流动等因素的影响,强度较大的弃耕行为往往出现在经济较为落后、耕种条件差的区域。如研究区北部的陆河县,多山地丘陵、农田中旱地比例偏高、农业人口较少,导致弃耕行为以长期弃耕为主^[31],占该地区监测样点总量的 44.44%。而在地形平坦、水环境优越、农田集中连片、农业人口丰富的区域,弃耕行为主要以季节弃耕、

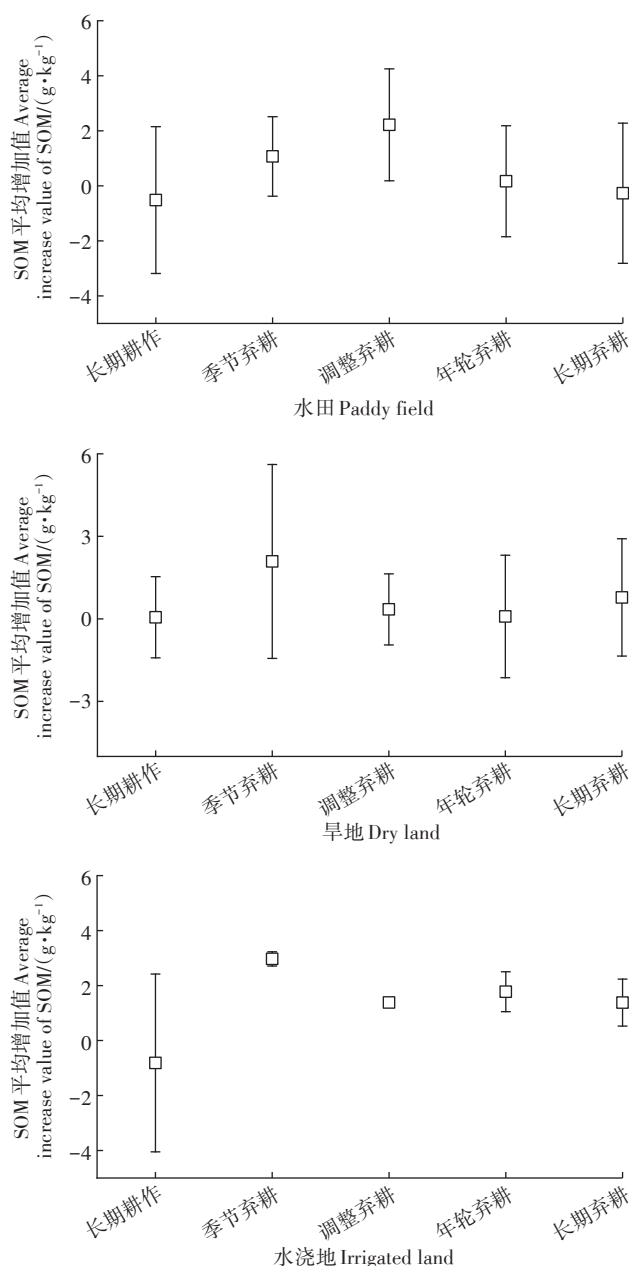


图6 不同农田利用方式下弃耕行为的SOM平均增加值

Figure 6 SOM average increase value of abandoned farming behavior under different farmland use patterns

年轮弃耕等强度较低的弃耕行为为主^[32]。如滨海的陆丰市季节弃耕和年轮弃耕占区域监测样本总量的 20.99% 和 29.63%,海丰县为 22.95% 和 29.51%,这与目前的研究成果基本一致。而研究区所处的粤东地区是广东省弃耕行为最为严重的地区。其原因有可能是粤东地区农田产出效益远低于珠三角地区,而非农经济又较为活跃。针对研究区弃耕现状及弃耕原因问题进行农户访谈,结果发现其受农业生产成本,如灌溉措施、化肥农药、农田管理及人工费用等增加

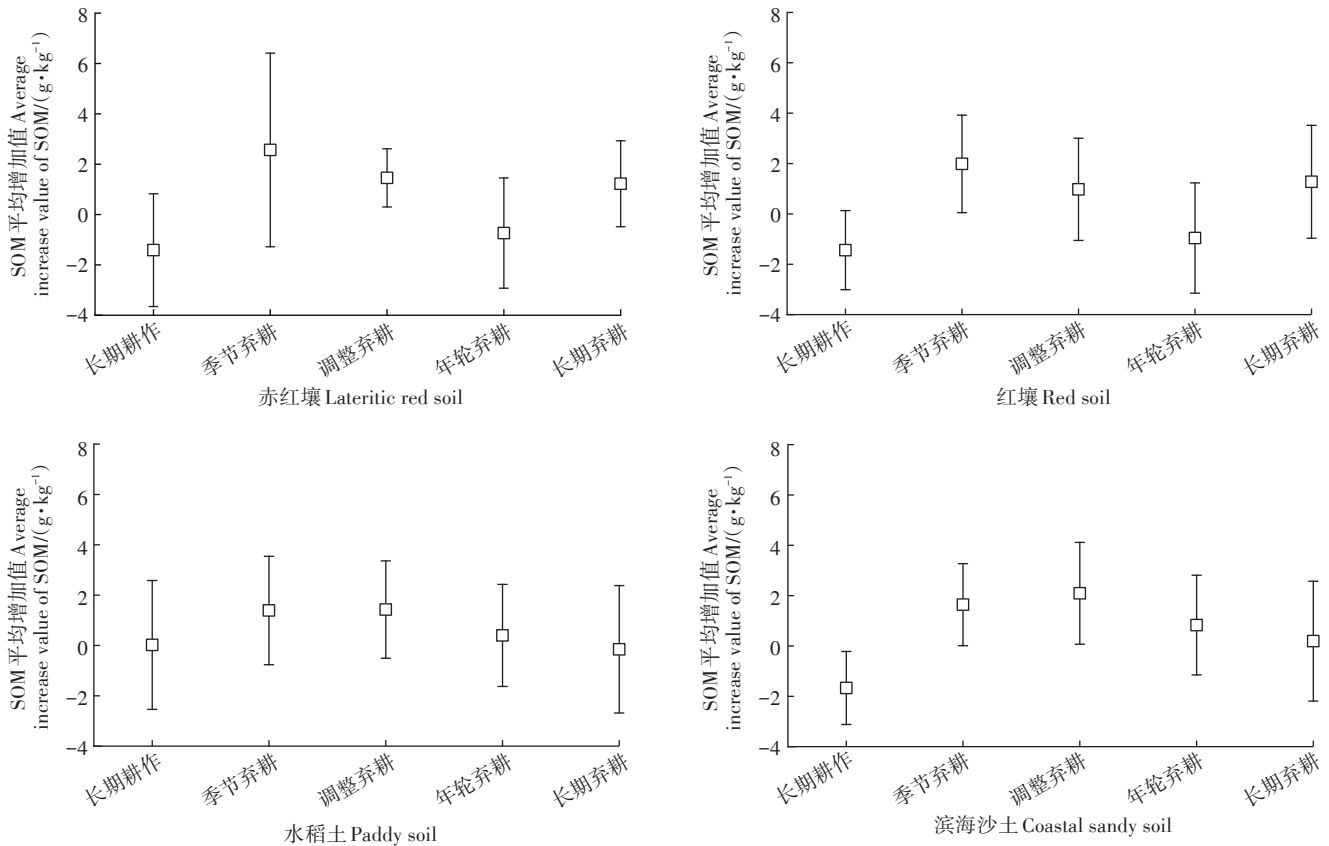


图7 不同土壤类型下弃耕行为的SOM平均增加值

Figure 7 SOM average increase value of abandoned farming behavior under different soil types

的影响,农户的资本流动从农业生产转向商业投资和工业制造。同时,随着中国粮食市场的开放,粮食进口规模的不断增加,我国已经由粮食净出口国转变为粮食净进口国,大量国外粮食的倾销使得国产粮食价格下滑,大量具有生产条件的耕地因此而停止耕种。农户弃耕通常是对农地经营与放弃农地后可能获得的利润进行比较后作出的理性选择,当农业生产成本大于工业劳动成本时,农户往往选择工业生产^[33];受农产品价格下滑影响,单位面积粮食的现金收入不抵资金投入,农户往往选择弃耕^[34]。这与本研究区农户访谈结果一致。

不同弃耕行为中,短期弃耕行为对农田SOM的提升效应高于长期弃耕行为,且对于海拔较高的台地区,田间持水环境频繁变化的水浇地,以及容重偏大的红壤和赤红壤农田,弃耕行为(尤其是季节弃耕行为)对农田SOM累积效应最为显著。这与目前相关研究结果不同,例如赵泽阳等^[35]研究提出,海南岛弃耕时间较短的土壤中土壤有机碳含量受气候条件影响而下降,间接导致SOM含量下降。这主要是由于

研究区内的季节弃耕主要发生在冬季,较低的气温和地温有利于进入土壤系统的农田凋落物转换为SOM^[36]。同时受充沛降水和较低的地下水位双重作用,研究区农田持水量相对较高,农田土壤具有优良的厌氧环境,也进一步降低了农田SOM的分解速度,因此短时弃耕更有利于农田SOM含量的提升^[37-38]。但是,研究区位于亚热带地区,年平均温度较高,SOM整体分解速度较温带、寒温带地区更快。同时,研究区土壤黏性偏大,当弃耕年限增加时,农田表层土壤易于板结硬化,更加不利于农田有机物进入土壤系统转化为SOM^[39-40]。因此,农田长期处于荒废状态,导致人工输入农田土壤系统中的有机物减少,反而不利于SOM的积累。

根据研究结果,建议通过制定合理的激励制度和政策,尽快减少丘陵、台地和山地赤红壤、红壤区的年轮弃耕和长期弃耕行为,规划合理的季节休耕制度提升农田SOM。同时,对广泛种植蔬菜的水浇地,也应降低其耕作强度,通过季节休耕或年轮休耕增加农田SOM。

4 结论

(1)在国内非农经济快速发展、国外粮食大量倾销及农业生产成本不断增加的多重胁迫下,农田弃耕行为在我国部分地区表现异常严重。粤东粮食主产区海丰、陆丰和陆河3个县(市)农田具有弃耕行为的样点占监测样点总数的84.39%,其中年轮弃耕和长期弃耕综合占比达59.03%,亟需通过制定相关政策制度将无序弃耕规范为有序休耕。

(2)不同弃耕行为模式对农田SOM含量及其变化影响明显,与长期耕作相比,短期弃耕可有效增加SOM含量,土壤有机质平均增加量表现为:季节弃耕>调整弃耕>年轮弃耕>长期弃耕。

(3)在不同地貌影响下,农田SOM含量受海拔高度的影响,整体呈现下降趋势,但在台地区季节弃耕能够显著提升农田SOM含量,其贡献力达0.486。同时,弃耕行为对田间含水量变化最为频繁的水浇地影响显著,尤其是季节弃耕可平均提升SOM含量 $2.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,贡献力达0.293。对于水稻土,弃耕行为影响显著,贡献力可达0.974;对于黏粒较大的赤红壤,季节弃耕行为对SOM含量的提升作用也较为明显,平均提升 $2.57\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] Pete S, Helmut H, Alexander P, et al. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2285-2302.
- [2] 王清奎, 汪思龙, 冯宗伟, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 513-519.
WANG Qing-kui, WANG Si-long, FENG Zong-wei, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 513-519.
- [3] Luo Y Q, Anders A, Steven D A, et al. Toward more realistic projections of soil carbon dynamics by earth system models[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, 3(1): 40-56.
- [4] Jonathan S, Tomislav H, Gregory F. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(36): 9575-9580.
- [5] 赵敏娟. 中国现代生态农业的理论与实践[J]. *人民论坛·学术前沿*, 2019(19): 24-31.
ZHAO Min-juan. The theory and practice of modern ecological agriculture in China[J]. *Frontiers*, 2019(19): 24-31.
- [6] 罗婷婷, 邹学荣. 撂荒、弃耕、退耕还林与休耕转换机制谋划[J]. *西部论坛*, 2015, 25(2): 40-46.
LUO Ting-ting, ZOU Xue-rong. Design of transition mechanism among uncultivated, abandoned land, reforestation land and fallow[J].

Western forum, 2015, 25(2): 40-46.

- [7] 罗拥华. 耕地抛荒与休耕辨析[J]. *农村经济与科技*, 2018, 29(9): 35-38.
LUO Yong-hua. Discrimination between arable land abandonment and fallow[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2008, 29(9): 35-38.
- [8] Pointereau P, Coulon F, Girard P, et al. Analysis of farmland abandonment and the extent and location of agricultural areas that are actually abandoned or are in risk to be abandoned[R]. European Commission Joint Research Centre, 2008.
- [9] Matthias B, Tobias K, Marine E, et al. Patterns and drivers of post-socialist farmland abandonment in western Ukraine[J]. *Land Use Policy*, 2010, 28(3): 552-562.
- [10] Tachibana T, Nguyen T M, Otsuka K. Agricultural intensification versus extensification: A case study of deforestation in the northern-hill region of Vietnam[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2001, 41(1): 44-69.
- [11] 陈瑜琦, 李秀彬. 1980年以来中国耕地利用集约度的结构特征[J]. *地理学报*, 2009, 64(4): 469-478.
CHEN Yu-qi, LI Xiu-bin. Structural change of agricultural land use intensity and its regional disparity in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 469-478.
- [12] 辛良杰, 李秀彬, 谈明洪, 等. 近年来我国普通劳动者工资变化及其对农地利用的影响[J]. *地理研究*, 2011, 30(8): 1391-1400.
XIN Liang-jie, LI Xiu-bin, TAN Ming-hong, et al. The rise of ordinary labor wage and its effect on agricultural land use in present China[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(8): 1391-1400.
- [13] 朱玮玮. 广西环江喀斯特地区土地利用变化背景下土壤有机质热稳定性分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
ZHU Wei-wei. Thermal stability analysis of soil organic matter under the background of land use change in Huanjiang karst area of Guangxi [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019.
- [14] 雷利国, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(7): 2669-2677.
LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju. Impacts of land use changes on soil light fraction and particulate organic carbon and nitrogen in Jinyun Mountain[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(7): 2669-2677.
- [15] 黄国勤, 杨滨娟, 王淑彬, 等. 稻田实行保护性耕作对水稻产量、土壤理化及生物学性状的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(4): 1225-1234.
HUANG Guo-qin, YANG Bin-juan, WANG Shu-bin, et al. Effects of 8 years of conservational tillage on rice yield and soil physical, chemical and biological properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4): 1225-1234.
- [16] 张琦, 王淑兰, 王浩, 等. 深松与免耕频次对黄土旱塬春玉米田土壤团聚体与土壤碳库的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(14): 2840-2851.
ZHANG Qi, WANG Shu-lan, Wang Hao, et al. Effects of subsoiling and no-tillage frequencies on soil aggregates and carbon pools in the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(14): 2840-

- 2851.
- [17] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3733-3742.
LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju. Distribution characteristics of soil organic carbon and its physical fractions under the different land uses in Jinyun Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3733-3742.
- [18] 张林森, 刘富庭, 张永旺, 等. 不同覆盖方式对黄土高原地区苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3180-3190.
ZHANG Lin-sen, LIU Fu-ting, ZHANG Yong-wang, et al. Effects of different mulching on soil organic carbon fractions and soil microbial community of apple orchard in Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3180-3190.
- [19] 任向宁, 董玉祥. 基于地理探测器的区域土壤耕层有机碳含量多元复合模型构建——以珠三角核心区为例[J]. 热带地理, 2018, 38(4): 546-556.
REN Xiang-ning, DONG Yu-xiang. Construction of multivariate composite calculation model of soil organic carbon content in plough horizon based on geodetector[J]. *Tropical Geography*, 2018, 38(4): 546-556.
- [20] 霍亚贞, 李天杰. 土壤地理实验实习[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.
HUO Ya-zhen, LI Tian-jie. Experimental practice of soil geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 1986.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2007: 268-391.
BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 268-391.
- [22] 陈志青, 邵天杰, 赵景波, 等. 东北地区臭氧浓度空间格局演变规律及影响因素[J]. 环境科学学报, 40(9): 3071-3080.
CHEN Zhi-qing, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, et al. Evolution and influencing factors of ozone concentration spatial distribution in northeastern region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 40(9): 3071-3080.
- [23] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
WANG Jin-feng, XU Cheng-dong. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [24] 王远鹏, 黄晶, 柳开楼, 等. 东北典型县域稻田土壤肥力评价及其空间变异[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 256-266.
WANG Yuan-peng, HUANG Jing, LIU Kai-lou, et al. Evaluation and spatial variability of paddy soil fertility in typical county of northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(2): 256-266.
- [25] 张志霞, 许明祥, 师晨迪, 等. 黄土丘陵区不同地貌单元土壤有机碳空间变异的尺度效应[J]. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1173-1184.
ZHANG Zhi-xia, XU Ming-xiang, SHI Chen-di, et al. Scaling effect on spatial variability of soil organic carbon in different geomorphic units on the loess hilly region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(7): 1173-1184.
- [26] 张文婷. 江西省不同地貌单元耕地土壤有机碳空间变异的尺度效应[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(11): 2619-2628.
ZHANG Wen-ting. Scaling effect on spatial variation of farmland soil organic carbon in different geomorphic units in different geomorphic units in Jiangxi Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(11): 2619-2628.
- [27] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729.
XU Ming-gang, YU Rong, WANG Bo-ren. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 723-729.
- [28] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1626-1632.
GE Nan-nan, SHI Yun, Yang Xian-long, et al. Distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and water stable aggregates of cropland with different soil textures on the Loess Plateau, northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1626-1632.
- [29] 李慧, 王芳, 赵庚星, 等. 黄泛平原区不同土地利用方式下的土壤养分状况分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 154-158.
LI Hui, WANG Fang, ZHAO Geng-xing, et al. Analysis of different land use types on soil nutrients in the Yellow River alluvial plain area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3): 154-158.
- [30] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5594-5602.
GAO Jun-liang, LUO Feng-min, GAO Yong, et al. Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture-pasture ecotone of northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5594-5602.
- [31] 李升发, 李秀彬, 辛良杰, 等. 中国山区耕地撂荒程度及空间分布——基于全国山区抽样调查结果[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1801-1811.
LI Sheng-fa, LI Xiu-bin, XIN Liang-jie, et al. Extent and distribution of cropland abandonment in Chinese mountainous areas[J]. *Resources Science*, 2017, 39(10): 1801-1811.
- [32] 牛继强, 林昊, 牛樱楠, 等. 经济欠发达地区撂荒地空间格局与驱动因素分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 141-149.
NIU Ji-qiang, LIN Hao, NIU Ying-nan, et al. Analysis of spatial pattern and driving factors for abandoned arable lands in underdevelopment region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 141-149.
- [33] 冯艳芬, 董玉祥, 王芳. 大城市郊区农户弃耕行为及影响因素分析——以广州番禺区农户调查为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(5): 722-734.
FENG Yan-fen, DONG Yu-xiang, WANG Fang. Household farming abandonment behavior and its influencing factors in metropolitan suburbs: A case of households survey in Panyu, Guangzhou[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(5): 722-734.
- [34] 谭术魁. 农民为何撂荒耕地[J]. 中国土地科学, 2001(5): 34-38.

- TAN Shu-kui. Why peasants abandon their cultivated land[J]. *China Land Science*, 2001(5): 34-38.
- [35] 赵泽阳, 赵志忠, 刘玉燕, 等. 海南岛东部地区不同类型农用地土壤有机碳分布特征及影响因素[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(5): 1121-1126.
- ZHAO Ze-yang, ZHAO Zhi-zhong, LIU Yu-yan, et al. Distribution of soil organic carbon in different agriculture lands in east areas of Hainan Island and its controls[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(5): 1121-1126.
- [36] 孔祥斌, 胡莹洁, 李月, 等. 北京市耕地表层土壤有机碳分布及其影响因素[J]. *资源科学*, 2019, 41(12): 2307-2315.
- KONG Xiang-bin, HU Ying-jie, LI Yue, et al. Distribution and influencing factors of soil organic carbon of cultivated land topsoil in Beijing[J]. *Resources Science*, 2019, 41(12): 2307-2315.
- [37] 颜雄, 李文昭, 罗璇, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳的垂直分布特征研究[J]. *农业与技术*, 2020, 40(14): 13-15.
- YAN Xiong, LI Wen-zhao, LUO Xuan, et al. Soil organic carbon component characteristics of different land use in Jinyun Mountain[J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(14): 13-15.
- [38] 孙晓兵, 张青璞, 孔祥斌, 等. 华北集约化农区耕地土壤肥力时空演变特征——以河北省曲周县为例[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(12): 1857-1869.
- SUN Xiao-bing, ZHANG Qing-pu, KONG Xiang-bin, et al. Spatio-temporal characteristics of cultivated soil fertility in the intensive agricultural region of north China: A case study of Quzhou County in Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(12): 1857-1869.
- [39] 胡嗣佳, 邓欧平, 张世熔, 等. 四川盆地水稻土有机碳与全氮的时空变异及影响因素研究[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 401-408.
- HU Si-jia, DENG Ou-ping, ZHANG Shi-rong, et al. Spatial-temporal variability of soil organic carbon and total nitrogen in paddy soils in Sichuan basin[J]. *Soils*, 2016, 48(2): 401-408.
- [40] 李瀚, 邓良基, 胡佳, 等. 成都平原菌渣还田下稻田田面水氮磷动态变化特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 295-300.
- LI Han, DENG Liang-ji, HU Jia, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy fields with fungi residues return in Chengdu Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 295-300.