

近 30 年海南岛土壤有机质时空变异特征及成因分析

姜赛平^{1,2}, 张认连¹, 张维理¹, 徐爱国¹, 张怀志¹, 谢良商³, 冀宏杰¹

(¹中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; ²北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;

³海南省农业科学院农业环境与土壤研究所, 海口 571100)

摘要:【目的】土壤有机质 (SOM) 是评价土壤肥力和土壤碳库的重要指标。由于复杂的成土过程及人类活动的影响, SOM 通常存在较强的时空变异性。研究 SOM 的时空变异特征可为农业种植结构调整、应对全球气候变化提供重要参考依据。【方法】以海南岛为研究区域, 通过资料收集、野外调查、采样与分析获取全国第二次土壤普查 (1980s) 和 2012 年 0—20 cm 土层 SOM 含量数据, 首先采用随机森林模型分别对两个时期训练集 410 个、128 个样点 SOM 空间分布规律进行预测, 并通过验证集 103 个、32 个验证点对模型精度进行验证; 采用统计学方法, 结合农业统计数据, 研究时隔 30 年海南岛不同土地利用类型 SOM 时空变异特征, 并对驱动因素进行探讨。【结果】1980s SOM 含量均值为 20.57 g·kg⁻¹, 呈现出从西南向东北降低的空间分布趋势, 全岛 SOM 含量主要集中在 15—20 和 20—30 g·kg⁻¹ 两个等级, 共占全岛面积的 75.29%; 2012 年 SOM 含量均值为 15.89 g·kg⁻¹, 呈现出西南和东北高, 西部、南部沿海低的空间分布趋势, SOM 含量主要集中在 10—15 和 15—20 g·kg⁻¹ 两个等级, 共占全岛面积的 78.28%, 而 15—20 和 20—30 g·kg⁻¹ 两个等级占全岛面积 66.04%, 同 1980s 相比减少了 9.25 个百分点。【结论】(1) 时隔近 30 年, 海南岛 SOM 含量整体呈减少趋势。2012 年 SOM 平均含量较 1980s 减少了 4.68 g·kg⁻¹, 减少率为 22.75%。其中水田的 SOM 含量减少最为明显, 减少了 6.42 g·kg⁻¹, 减少率为 27.34%; 其次为园地, 减少了 2.65 g·kg⁻¹, 减少率为 14.25%; 而旱地减少量最小, 为 1.28 g·kg⁻¹, 减少率为 8.84%; (2) 水稻连作改为稻菜轮作 (水田连作改为水旱轮作)、林地开垦为园地、土地利用强度加大是造成海南岛 SOM 含量下降的主要原因。

关键词: 海南岛; 土壤有机质; 时空变异; 成因分析

Spatial and Temporal Variation of Soil Organic Matter and Cause Analysis in Hainan Island in Resent 30 Years

JIANG SaiPing^{1,2}, ZHANG RenLian¹, ZHANG WeiLi¹, XU AiGuo¹, ZHANG HuaiZhi¹,
XIE LiangShang³, JI HongJie¹

(¹Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture and Rural, Beijing 100081; ²Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875; ³Agricultural Environment and Soil Research Institute of Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100)

Abstract: 【Objective】 Soil organic matter (SOM) is an important index for evaluating soil fertility and soil carbon pools. SOM usually has strong spatial and temporal variability for the complicated soil forming process and human activity. Studying the temporal and spatial variability of SOM could provide an important reference for the adjustment of agricultural planting structure and response to global climate change. 【Method】 The contents of SOM of 0-20 cm soil layer in Hainan Island in 1980s and 2012 were collected and measured by field investigation and soil sampling. RandomForest (RF) model was used to predict spatial distribution of

收稿日期: 2018-08-01; 接受日期: 2018-11-15

基金项目: 科技部基础性工作专项 (2012FY112100)、国家重点研发计划 (2017YFD0200607)、国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201503121-13)

联系方式: 姜赛平, E-mail: saipingjiang@163.com. 通信作者徐爱国, E-mail: xuaiguo@caas.cn

SOM based on the training set of 410 and 128 samples, and then the predictions were validated with validating set of 103 and 32 samples, respectively. Then the spatial and temporal variability and driving factors of different land use types in Hainan Island in recent thirty years were studied by using statistical method combined agricultural statistical data. 【Result】 The mean value of SOM contents in 1980s was $20.57 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, showing a distribution that SOM contents gradually decreased from southwest to northeast parts of the island. And SOM contents were mainly in two levels of 15-20 and 20-30 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, which occupied 75.29% area of the whole island. The mean value of SOM contents in 2012 was $15.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, showing a distribution that SOM contents were higher in the southwest and northeast parts, lower in the west and south parts. And the contents of SOM were mainly in two levels of 10-15 and 15-20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, which occupied 78.28% area of the whole island, but the ratio of 15-20 and 20-30 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ levels was 66.04%, which lowered 9.45 percentage points compared with 1980s. The order of SOM contents in different land use types was: paddy field > garden plot > dry land. And there was a significant difference in SOM contents among three land use types in 1980s. In 2012, there was a significant difference in SOM contents between paddy fields and dry land, dry land and garden plot, while the difference in SOM contents between paddy fields and garden plot was not significant. 【Conclusion】 After nearly 30 years, SOM contents of Hainan Island showed a decreasing trend overall. In 2012, the mean value of SOM contents decreased by $4.68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ compared with 1980s, with a reduction of 22.75%. The mean value of SOM contents of paddy field decreased by $6.42 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with a reduction of 27.34%, which was most obvious among three land use types. And the mean value of SOM contents of garden plot decreased by $2.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with a reduction of 14.25%, while the mean value of SOM contents of dry land decreased by $1.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with a reduction of 8.84%. Rice crop rotation, land reclamation and increasing multiple crop indexes were the main reasons that caused the decrease of SOM contents in Hainan Island.

Key words: Hainan Island; soil organic matter; spatial and temporal variation; cause analysis

0 引言

【研究意义】土壤有机质 (SOM) 具有较强的时空变异性^[1-4]。研究 SOM 的时空变异特征对了解区域土壤质量状况、土壤与农业可持续利用、应对全球气候变化具有重要参考价值^[5-8]。【前人研究进展】目前,关于时空变异的研究主要集中在两个方面:(1)采用统计学方法分析两、三个时期采样数据 SOM 含量的变化趋势。如: PAN 等^[9]采用基于点位的统计分析方法,对全国第二次土壤普查数据和国家耕地土壤监测点数据(1980s—2003) 20 余年耕地 SOC 的变化特征进行分析。黄耀等^[3]基于 200 篇文献数据的分析指出,1980—2000 年间,我国华东、华北地区 SOM 增加明显,东北地区总体呈下降趋势。杨帆等^[4]在总结测土配方施肥项目耕层数据的基础上指出,全国第二次土壤普查 30 多年来,我国农田耕层 SOM 平均含量整体上升了 $4.85 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中以安徽、湖南、贵州、四川、江西、广西、江苏和内蒙古等地增幅最大,超过了 $4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而北京和青海 SOM 含量则呈下降趋势,分别减少 1.02、1.06 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其他省份 SOM 含量基本稳定。(2)利用地统计学方法分析不同时期 SOM 含量的空间格局演变特征。如:胡克林等^[10]采用 1980、1990、2000 年三期数据对比了北京周边地区 SOM 的时空变异特征及其驱动因素,结果表明,1980—2000 年 SOM 呈上升趋势,土地利用方式转换

是影响 SOM 时空变异的重要因素。赵明松等^[8]采用地统计学方法和 GIS 技术对江苏省 1980—2006 年 0—20 cm 土层 SOM 含量的时空变异特征进行分析,得出江苏省 SOM 含量整体呈增加趋势,秸秆还田、土地利用方式变化是影响 SOM 发生变化的重要因素。关于 SOM 的时空演变特征,目前研究更趋向于对变异驱动因素的探讨。研究表明,土地利用方式转变^[11-12]、秸秆还田^[13]、施肥方式^[14]等是导致 SOM 含量时空变化的重要因素。这些研究多集中在温带、亚热带地区。对具体地区而言,由于所处气温、降水等环境不同、土地利用转变的方向不同,导致 SOM 含量时空变异的结果也有差异。【本研究切入点】海南岛处于热带地区,岛内地形复杂,土地利用多样,具有丰富的热带作物资源,是我国重要的热带作物生产基地。在时空变异方面,已有研究主要针对水稻田^[15]、橡胶园^[16]等特定农田^[17];吕丽平等^[18]对海南岛 SOM 时空变异分析指出,1980s—2000s 的 20 年间土壤有机碳呈下降趋势,但该研究并未分析不同土地利用类型土壤有机碳的时空变异特征。【拟解决的关键问题】因此,本文采用随机森林模型^[19] (RandomForest, RF) 利用海南岛各县第二次土壤普查土壤剖面数据和 2012 年土壤采样数据,模拟 20 世纪 80 年代初期和 2012 年两个时期 SOM 的空间分布规律及变化,并结合农业统计数据,对引起 SOM 时空变异的成因进行探讨。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本文研究区域覆盖海南全岛。海南岛地处 18°10′—20°10′N, 108°37′—111°3′E, 是我国第二大岛, 岛内土地面积 32 900 km²。该岛属于热带季风气候, 全年暖热, 雨量充沛, 干湿季节明显, 年均气温 23—25℃, ≥10℃年积温 8 200—9 200℃, 年平均降水量为 1 720 mm, 但岛内分布不均。其中, 东部迎风区年均降水量在 2 000—2 500 mm 之间, 而西部背风区低于 1 000 mm。岛内地形复杂, 由山地、丘陵、台地、平原组成中间高耸、四周低平的环形层状地貌。成土母质有花岗岩、砂页岩、浅海沉积物、玄武岩等 10 种。土壤类型包括砖红壤、水稻土、赤红壤、燥红土、风沙土、紫色土等 15 个土类。土地利用主要为水田、旱地、林

地, 该区除水稻、瓜菜外, 以种植热带作物为主。

1.2 数据来源

1.2.1 土壤数据

(1) 2012 年土壤数据 土样采集时间为 2012 年 11—12 月, 采用近似网格法进行采样, 并综合考虑当地的地形地貌、土壤类型和土地利用类型等因素, 在全岛 19 个县市布点, 采样间距平均为 10 km, 共采集 0—20 cm 土层样点 163 个, 记录样点经纬度、地形和土地利用类型等信息。土样所属土壤类型有砖红壤、水稻土、赤红壤、燥红土、火山灰土、紫色土、风沙土、石灰(岩)土等 8 个土类。土地利用类型包括水田、旱地、园地。各土地利用类型的样点统计情况见表 1。

土壤样品 SOM 含量的测定采用重铬酸钾-硫酸消化法, 具体步骤参见文献[20]。

表 1 样点土地利用类型统计表¹⁾

Table 1 The statistics table about the land-use types of samples

土地利用类型 Land-use types	作物类型 Crop types	样点数 Number of samples
水田 Paddy field	水稻 Rice、稻菜轮作 Rice crop rotation	70
旱地 Dry land	菜豆 Bean、菊花 Chrysanthemum、辣椒 Pepper、辣椒-西瓜 Pepper-watermelon、木薯 Cassava、玉米 Corn、菠萝 Pineapple、甘蔗 Sugarcane、甘蔗-香蕉 Sugarcane-Banana 香蕉 Banana ²⁾	32
园地 Garden plot	芒果 Mango、荔枝 Litchi、胡椒 Piper nigrum、绿橙 Green orange、红毛丹 Rambutan、茶叶 Tea、橡胶 Rubber、槟榔 Areca catechu、桉树 Eucalyptus、桑树 Mulberry ³⁾	60

¹⁾水稻、蔬菜、橡胶单产(根据《海南统计年鉴 2011—2013》计算所得, 取 2010—2012 年每种作物单产均值)分别为 454 4.6、210 80.3、733.6 kg·hm⁻²。

²⁾土地利用类型主要参照 GB/T 21010-2017, 菠萝、甘蔗、香蕉施肥等农作措施与蔬菜相近, 因此纳入旱地。³⁾橡胶、槟榔、桉树的施肥管理则与园地相近, 故纳入园地

¹⁾The per unit area yield of rice, vegetables and rubber is 454 4.6, 210 80.3 and 733.6 kg·hm⁻². ²⁾Land use types are classified by GB/T 21010—2017. The fertilization and other agricultural measures of pineapple, sugarcane and banana are similar with vegetables, so classifying them into dry land. ³⁾The fertilization and other agricultural measures of rubber, Areca catechu and eucalyptus are similar with orchard, so classifying them into Garden plot

(2) 1980s 剖面数据 收集海南省第二次土壤普查中各县市土壤普查报告书, 共计 17 个县、市, 选取 990 个典型土壤剖面。

1.2.2 其他要素数据来源

(1) 统计数据来源 海南省农业统计数据源自海南省统计局官方网站《海南统计年鉴 2015》: <http://www.stats.hainan.gov.cn/2015nj/index-cn.htm>、《海南统计年鉴 1988》, 其中, 2010—2012 年水稻播种面积、蔬菜播种面积分别源自《海南统计年鉴 2011》、《海南统计年鉴 2012》、《海南统计年鉴 2013》。海南省水稻单产及施肥数据源自中华人民共和国国家统计局官方网站年度数据: <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>。河南省牲畜存栏量数据源自《河南统计年鉴 2011》: <http://www.ha.stats.gov.cn/>

hntj/lib/tjnj/2011/indexch.htm。(用于和海南省牲畜存栏量进行对比)

(2) 空间数据来源 辅助变量: RF 在 6 个地形因子: 高程 (x_1)、坡度 (x_2)、坡向 (x_3)、平面曲率 (x_4)、剖面曲率 (x_5)、地形湿度指数 (x_6), 3 个环境因子: 归一化植被指数 (NDVI, x_7), 土地利用类型 (x_8)、土壤类型 (x_9) 的基础上进行筛选。

辅助变量数据来源: (1) 海南岛 1:50 000 等高线矢量图; (2) 遥感影像: 1991 年 10 月 30 日、1990 年 12 月 5 日、1989 年 2 月 17 日、1988 年 6 月 8 日 4 个时期的 Landsat 4—5 TM 遥感影像, 数据源自中国科学院资源环境科学数据中心; 2013 年 10 月 26 日和 2013 年 12 月 6 日的海南岛 Landsat8 OLI_TIRS 四景卫星影像, 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心

国际科学数据镜像网站 (<http://www.gscloud.cn>)。其中, 1991 年 10 月 30 日与 2013 年 10 月 26 日影像基本重合, 两个时期该部分影像占全岛面积 80% 以上。

(3) 土壤图 琼中县、海口市土壤图为 1:50 000, 其余县市源自海南岛 1:200 000 土壤图。1970 年代末期 (1980 年) 和 2010 年 1:100 000 遥感解译土地利用图 (图 1 海南岛遥感解译土地利用图中的分类“园地与其它林地”中, 包含了 GB/T 21010—2017 中的园

地和未成林地、迹地、苗圃, 未成林地、迹地、苗圃所占图斑较小, 本文将“园地与其它林地”看作园地参与模型计算), 数据源自中国科学院资源环境科学数据中心。

其他数据图层: 包括 1:50 000 居民点图、海南省行政区划图 (提取自国家基础地理信息中心 1:250 000 公开版数据), 用于 1980s 土壤剖面点的重定位。

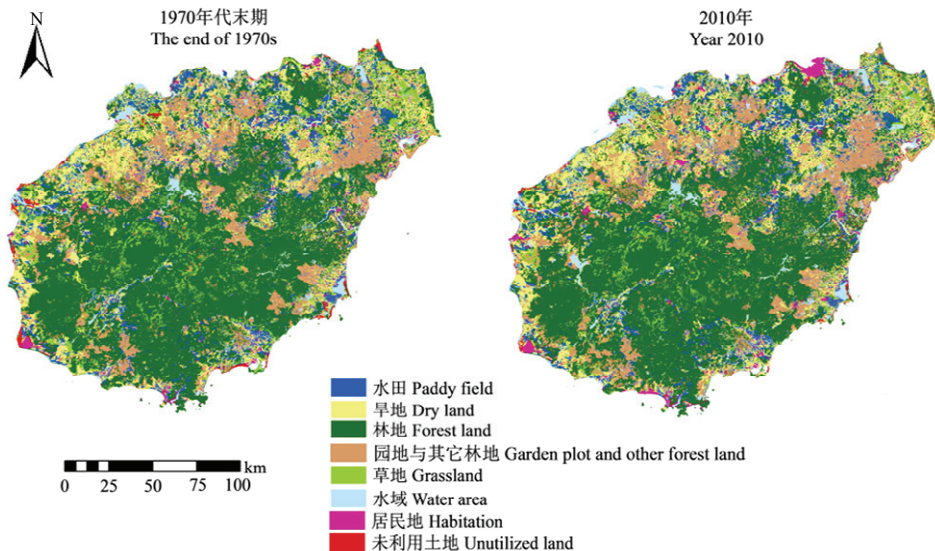


图 1 海南岛遥感解译土地利用图

Fig. 1 Hainan Island remote sensing interpretation land use map

1.3 随机森林模型

RF 是由 Breiman 等提出的一种机器学习方法, 它通过 bootstrap 重采样技术从原始训练集中有放回地随机抽取 M 个样本单元形成新的训练集, 并由新训练集生成 M 棵决策树, 从而构成随机森林, 每次未被抽到的样本构成 M 个袋外数据, 即袋外误差 (out-of-bag), 简称 OOB。对于回归问题, 所有决策树预测结果的均值为最终的预测结果^[21]。

树节点预选的变量个数 ($mtry$) 和随机森林中树的个数 ($ntree$) 是 RF 的两个重要参数。在回归问题中, $mtry$ 的默认值为变量个数的 1/3, Breiman 建议采用默认值、默认值的 1/2、默认值的 2 倍来选择最优的 $mtry$ 值^[22]。也可通过逐次计算来确定最优的 $mtry$ 值^[23]。本文采用后一种方法 (即将 $mtry$ 分别设为 1、2、3...9)。 $ntree$ 的设定值不宜偏小, 太小所形成的随机森林不稳定; 该值也不宜设置的过大, 过大会降低计

算速度。本文设定 $ntree$ 为 500、1 000、1 500、2 000, 结合 $mtry$ 值, 选择使模型袋外误差最小的参数组合用于最终预测。RF 模型建模变量的筛选参见文献^[24]。

1.4 1980s 土壤剖面点定位方法与剖面土层数据处理

1.4.1 1980s 土壤剖面土层 SOM 重新计算 为与 2012 年数据进行对比, 将 1980s 土壤剖面划分为 0—20 cm 土层, 采用加权平均法计算 SOM 含量值。计算公式如下:

$$SOM_{20} = \sum_{i=1}^n N_i \times d_i / 20$$

式中, SOM_{20} 为 0—20 cm 土层 SOM 含量 ($g \cdot kg^{-1}$), N_i 为第 i 层 SOM 含量 ($g \cdot kg^{-1}$), d_i 为第 i 层土壤厚度 (cm), n 为参与计算的土壤层次总数, 当 $d_1 \geq 20$, $n=1$ 。

1.4.2 1980s 土壤剖面点重定位 1980s 全国第二次土壤普查剖面数据没有经纬度信息, 但有地名描述。

本文采用地名—土壤类型最大图斑中心点法确定剖面点坐标。即：在重定位的过程中以市、县为控制单元，依次确定每个市、县内样点的坐标。取剖面记录的村名周边 1—3.5 km 范围内，面积最大的、与剖面土种（或土属）相同的土壤图斑中心点坐标为该剖面点坐标。收集的 990 个剖面点经重定位处理，有 522 个剖面点确定了经纬度信息。

1.5 数据处理与分析

1.5.1 数字高程模型的生成 采用 1 : 50 000 等高线矢量图在 ArcGIS9.3 中生成 10 m 分辨率的数字高程模型栅格影像。

1.5.2 异常值处理与验证集的选取 采用阈值法将区间（平均值±3×标准差）外的数值视作异常值并剔

除，经处理后，2012 年剩余样点 162 个。其中滨海沙土、石灰土均分别仅有一个采样点，在采用预测模型进行空间模拟时，本文参考文献^[7]中土壤类型选择原则，将这两种土壤类型样点剔除，剩余有效样点 160 个，全部保留样点覆盖的土壤类型面积占研究区域面积的 91.24%。

1980s 坐标点经阈值法处理保留有效样点 513 个，这些样点所属土类共计 10 个，分别为砖红壤、水稻土、赤红壤、黄壤、燥红土、风沙土、火山灰土、紫色土、新积土、滨海盐土，面积占全岛面积的 97.81%。

在两个时期有效样点中分别随机选取 80% 的数据作为训练集，用于空间数据分析，其余 20% 的数据用于验证，样点分布见图 2。

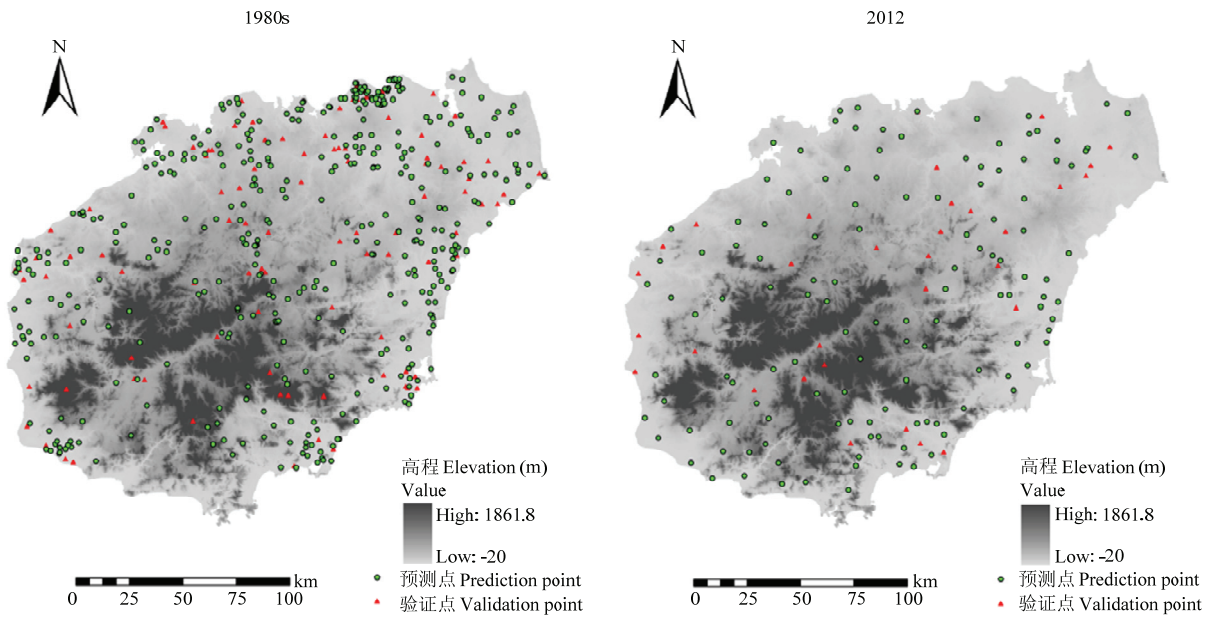


图 2 研究区采样点分布图

Fig. 2 Distribution of sampling sites in the study area

1.5.3 模型精度验证 采用验证集的平均预测误差（ME）、均方根预测误差（RMSE）和决定系数 R^2 来评价预测的准确性。

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n [\hat{Z}(X_i) - Z(X_i)]}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\hat{Z}(X_i) - Z(X_i)]^2}{n}}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\hat{Z}(X_i) - Z(X_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Z(X_i) - \bar{Z}(X_i)]^2}$$

式中，n 代表验证集中的样点个数， $\hat{Z}(x_i)$ 代表预测值 $Z(X_i)$ 代表实测值， $\bar{Z}(x_i)$ 代表实测值的平均值。

ME 和 RMSE 分别为预测无偏和预测精度的量度，ME 越接近 0 表明方法是无偏的，RMSE 越小，预测精度越高。 R^2 为决定系数， R^2 越接近于 1，表示模型对因变量的解释能力越强。

1.5.4 分析工具 地形因子的提取及 SOM 含量空间制图在 Arcgis9.3 软件中完成，遥感影像镶嵌和 NDVI 的提取在 ENVI5.1 软件中完成，随机森林规则在 R3.3.1 的 RandomForest 包中完成，统计分析使用

SAS9.2 软件和 Microsoft Excel 2010 工具。

2 结果

2.1 1980s、2012 年 RF 参数拟合结果

由表 2 可知, 坡度和平面曲率变量在两个时期模型构建中均被剔除, 表明这两个变量对 SOM 含量空间变异影响较小。1980s SOM 含量空间变异的最重要影响因素为土壤类型, 其次为高程; 2012 年 SOM 含量空间变异的最重要影响因素为地形湿度指数, 其次为 NDVI。表明该区 SOM 含量的空间变异主要受水

文、植被和地形因素的影响。从表 3 可看出, 两个时期 ME 均较接近于 0, RMSE 较小, 表明模型能够用于 SOM 含量空间分布预测。从参数拟合结果来看, 1980s 和 2012 年模型分别能够解释 17.79% 和 19.42% 的 SOM 含量空间变异, 解释率较前人^[25-27]的研究结果偏低, 原因可能有两个方面。第一, 1980s 的剖面点坐标通过重新定位获得, 与真实位置会有偏差, 对模型的预测会产生影响。第二, 2012 年采样间距平均约 10 km, 采样密度较小, 可能导致模型的解释率偏低。

表 2 1980s、2012 年 RF 参数拟合结果

Table 2 RF model parameter fitting results

时期 Period	建模变量 Variables	决策树数量 ntree	节点分裂次数 mtry	袋外误差 OOB	模型解释率 var (%)
1980s	x_9 、 x_1 、 x_3 、 x_7	500	1	115.967 4	17.58
		1 000	1	*115.668 8	17.79
		1 500	1	115.736 2	17.75
		2 000	1	115.982 4	17.57
2012	x_6 、 x_7 、 x_8 、 x_1 、 x_5 、 x_9	500	2	47.892 6	19.15
		1 000	2	47.839 6	19.24
		1 500	2	**47.728 5	19.42
		2 000	2	47.834 0	19.24

RF 模型建模变量的筛选参考 Genuer 的研究方法^[24]。Mtry 是根据 ntree 值对建模变量逐次遍历确定的最佳值。建模变量按变量重要性由高到低列出。*、**代表该组参数组合模型的袋外误差最小, 用于最终 SOM 含量空间预测

Variables screened with the method proposed by reference[24]. Mtry is the optimal value determined by successive calculation of the modeling variables based on the ntree value. Variables screened are listed by their importance from high to low. *, **are the smallest OOB of combined parameter, which are used for spatial distribution of SOM

表 3 RF 模型预测精度

Table 3 Prediction accuracy of SOM contents using RF

Period	ME	RMSE	R ²
1980s	-0.464 6	10.146 9	0.206 0
2012	1.816 2	5.783 6	0.247 6

2.2 1980s、2012 年 0—20 cm 土层 SOM 含量时空变异特征

从图 3 可知, 1980s SOM 含量呈现出从西南向东北降低的趋势, 其中高值 (> 30 g·kg⁻¹) 分布在该岛中部偏西南地区。全岛 SOM 含量主要集中在 15—20 g·kg⁻¹ (39.86%) 和 20—30 g·kg⁻¹ (35.43%) 两个等级, 二者共占全岛总面积的 75.29%, 10—15 g·kg⁻¹ 占全岛总面积的 14.57%。2012 年 SOM 含量呈现西南和东北高, 西部、南部沿海低的分布趋势。其中高值 (20—30 g·kg⁻¹) 除在中部偏西南地区分布外, 东部、东北部等地区也有

分布。2012 年全岛 SOM 含量主要集中在 10—15 g·kg⁻¹ (33.22%)、15—20 g·kg⁻¹ (45.06%) 两个等级, 两者共占全岛面积的 78.28%, 而 20—30 g·kg⁻¹ 等级占全岛的 20.98%。同 1980s 相比, 2012 年 SOM 高含量等级面积比例有所下降, 较低含量等级的面积有所增加; 最高等级和最低等级的面积均有下降。2012 年 15—20、20—30 g·kg⁻¹ 占全岛面积的 66.04%, 与 1980s 相比, 减少了 9.25 个百分点, 而 10—15 g·kg⁻¹ 等级的 SOM 含量面积占比增加了 18.65 个百分点。2012 年 SOM 含量没有 >30 g·kg⁻¹ 等级, < 10 g·kg⁻¹ 等级减少了 2.42 个百分点。

从 SOM 含量时空变异图 (图 4) 来看, 时隔近 30 年, 海南岛 SOM 含量整体呈减少趋势。其中东部、东北部沿海部分地区 SOM 含量有所增加。由图 5 可知, SOM 含量减少量在 1—10 g·kg⁻¹ 部分占全岛面积的 60.23%, SOM 含量增加量在 1—10 g·kg⁻¹ 部分占全岛面积的 19.47%。

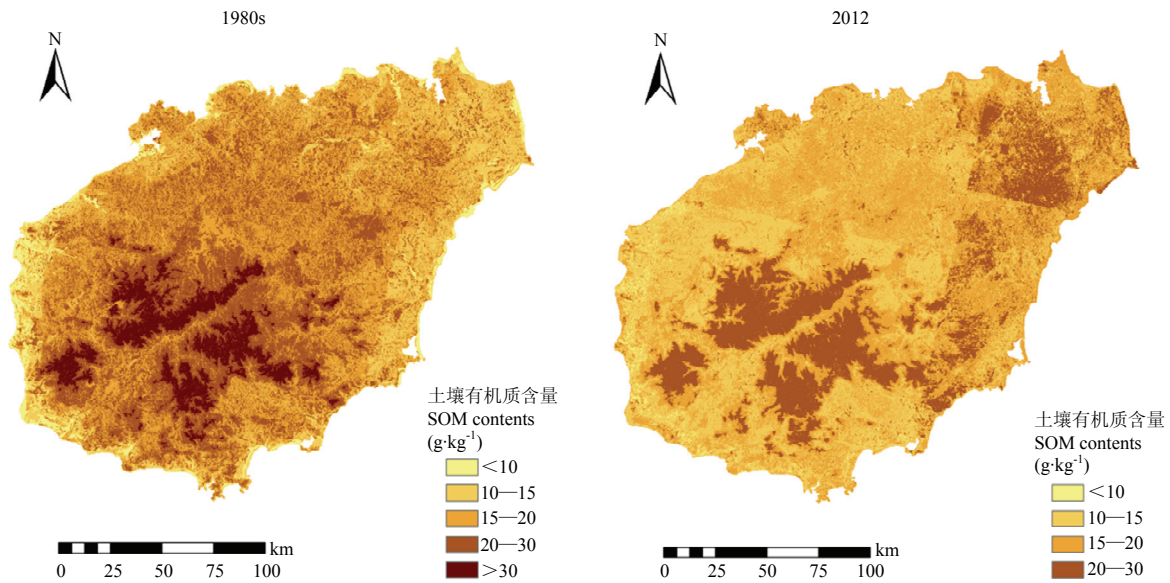


图 3 1980s、2012 年 SOM 含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of SOM contents in 1980s and 2012

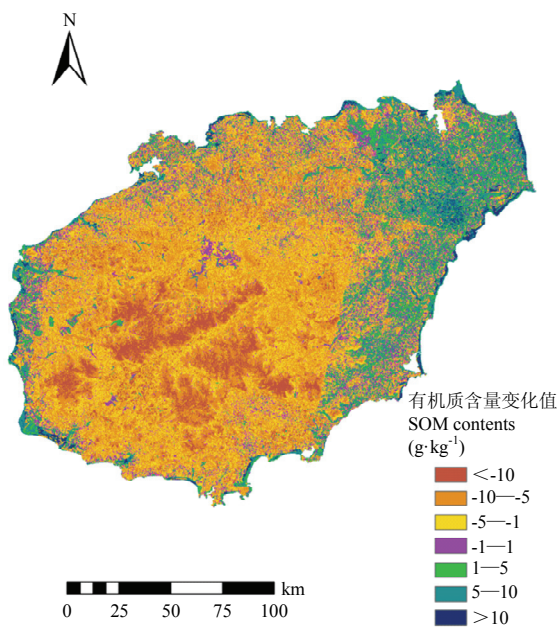


图 4 1980s—2012 年 SOM 含量时空变异图

Fig. 4 Temporal changing distribution of SOM contents from 1980s to 2012

五指山等中部地区虽减小幅度最大 ($< -10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)，但占全岛比例 (7.68%) 很小。SOM 含量变化在 $-1 \sim 1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (变化率 $-5\% \sim 5\%$) 认为 SOM 基本保持不变，占全岛面积 11.30%，在岛内各区均有分布。

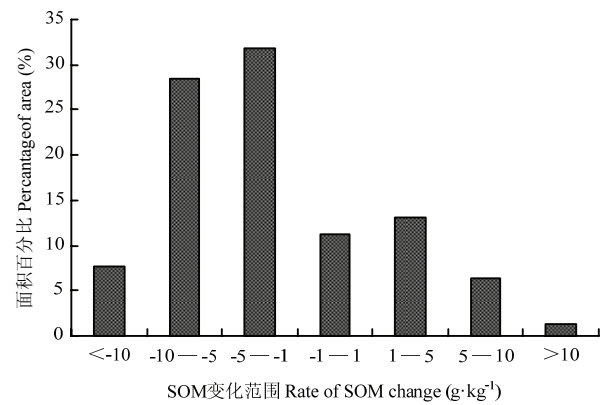


图 5 1980s—2012 年 SOM 含量变化面积百分比

Fig. 5 Percentages of areas changed in SOM contents between 1980s and 2012

2.3 1980s、2012 年不同土地利用类型 SOM 含量变化

由表 4 可知，1980s 及 2012 年各土地利用类型 SOM 含量比较结果均为：水田>园地>旱地。SOM 含量由土壤输入的有机物质质量和不同土地利用类型有机物质矿化速率间的平衡共同决定。不同土地利用类型由于施肥等农业管理措施不同，导致土壤的理化性状发生改变，进而影响 SOM 的分解与转化^[28]。由于水田长期处于嫌气状态，有机物质矿化率较低，有利于 SOM 的积累和保存，而在热带地区旱季，降水减少，园地和旱地土壤处于通气状态，微生物活动强烈，

SOM 分解速率快, 故 SOM 含量相对水田要低。园地只有果实被带离土壤, 落叶仍会还田, 同时, 园地耕翻少, 便于有机质积累, 而该区旱地多种植蔬菜、甘蔗及玉米等作物, 地上部分茎叶大部分被带走, 较少还田, 且每季收获后均耕翻, 利于土壤有机物质矿化, 因此, 旱地 SOM 含量要低于园地。

由表 4 可知, 1980s 和 2012 年 SOM 含量均值分别为 20.57 和 15.89 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 按全国第二次土壤普查养分分级标准, 分别处于三级、四级标准。从标准误差来看, 两个时期分别为 0.43、0.59, 数据波动较小, 表明结果较为可靠。时隔近 30 年, 该区 SOM 含量整体呈减少趋势, 2012 年 SOM 含量较

1980s 减少了 4.68 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 减少率为 22.75%; 从 SOM 含量范围来看, 1980s—2012 年, SOM 含量最小值由 0.20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 3.16 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大值由 86.56 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 减小至 38.12 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

从土地利用类型来看, 3 种类型 SOM 含量均呈减少趋势, 其中水田减少最为明显, 减少了 6.42 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 减少率为 27.34%; 其次为园地, 减少了 2.65 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 减少率为 14.25%; 而旱地减少量最小, 为 1.28 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 减少率为 8.84%。

2.4 SOM 时空变异的驱动因素分析

2.4.1 水田轮作制度变化对 SOM 时空变异的影响

由表 5 可知, 1980s 中期 (1985—1987 年, 下同) 至

表 4 海南岛不同土地利用类型 SOM 含量统计特征

Table 4 Statistical characters of SOM contents of different land use types in Hainan Island

土地利用类型 Land-use types	1980s			2012 年			SOM 含量变化 Change of SOM contents ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
	样本数 Sample size	均值±标准误差 Mean ± Stderr ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	范围 Range ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	样本数 Sample size	均值±标准误差 Mean ± Stderr ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	范围 Range ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
水田 Paddy field	607	23.48±0.57 a	1.4—86.56	70	17.06±0.91 a	4.43—38.12	-6.42
旱地 Dry land	245	14.48±0.70 c	0.2—70.84	32	13.20±1.27 b	3.85—27.81	-1.28
园地 Garden plot	138	18.60±0.93 b	1.54—55.76	60	15.95±0.94 a	3.16—35.3	-2.65
总体 All	990	20.57±0.43	0.20—86.56	162	15.89±0.59	3.16—38.12	-4.68

同一栏内均值±标准误差后不同的字母表示不同土地利用类型 SOM 含量存在显著差异 ($P<0.05$)

Numbers with the same letter in the each column are significantly different ($P<0.05$) using Duncan's multiple range test between different land-use types

表 5 1985—2012 年农业统计数据变化

Table 5 Change of agricultural statistics data from 1985 to 2012

项目 Item	1985—1987 年 ¹⁾ Year 1985-1987	2010—2012 年 ²⁾ Year 2010-2012	变化值 Change	变化率 Rate of change (%)
总耕地面积 Arable land area (hm^2)	434 118	421 324	-12 794	-2.95
水田面积 Paddy field area (hm^2)	258 288	224 206	-34 082	-13.20
旱地面积 Dry land area (hm^2)	175 830	197 118	21 288	12.11
园地面积 (含热作) Garden plot area(include tropical crops) (hm^2)	428 064	825 301	397 236	92.80
热作面积 Tropical crops area (hm^2)	386 864	646 249	259 385	67.05
橡胶面积 Rubber area (hm^2)	328 825	505 825	177 000	53.83
橡胶面积/园地面积 Rubber area/Garden plot area (%)	76.82	61.29	-15.53	--
总播种面积 Total sown area (hm^2)	751 566	842 164	90 598	12.05
复种指数 Multiple cropping index	1.73	2.00	0.27	--
水稻播种面积 Rice sown area (hm^2)	395 371	321 412	-73 959	-18.71
蔬菜播种面积 Vegetables sown area (hm^2)	32 440	223 032	190 592	587.52
水稻播种面积/总播种面积 Rice sown area/Vegetables sown area (%)	52.61	38.16	-14.44	--
蔬菜播种面积/总播种面积 Vegetables sown area/Total sown area (%)	4.32	26.48	22.26	--

¹⁾、²⁾ 分别代表 1985—1987 年、2010—2012 年各项指标的算术平均值

¹⁾ and ²⁾ represent the arithmetic average of the indicators for 1985-1987 and 2010-2012, respectively

2010s 初期 (2010—2012 年, 下同) 近 30 年间, 海南省耕地面积变化不大 (仅减少了 2.95%), 但作物总播种面积 (简称播面, 下同) 大幅度上升, 由 751 566 hm^2 增加到 842 164 hm^2 , 增加了 12.05%。其中, 蔬菜播面占总播面的比例由 1980s 中期的 4.32% 上升到 2010s 中期的 26.48%, 增加了 6 倍, 已占到作物总播面的 1/4 强。除蔬菜外, 其他作物播种面积均在减少, 其中水稻降幅最大, 播种面积占作物总播种面积的比例由 1980s 中期的 52.61% 下降到 2010s 初期的 38.16%, 下降了 14.44 个百分点。除蔬菜和水稻外的其他作物播种面积占总播种面积比例: 1980s 中期为 43.07%, 2010s 初期为 35.36%, 减少了 7.7 个百分点。相应地, 该区复种指数由 1.73 增加至 2.00, 说明作物的茬口增加, 土地利用强度加大。两个年代相比, 海南岛的耕地面积变化不大, 水稻播面大量减少, 而蔬菜播面大幅增加, 占总播面比例由不足 5% 增加到 1/4 强, 说明传统的双季稻、三季稻种植制度 (水田连作) 已经发生改变, 稻菜轮作 (水旱轮作) 在当地种植制度中已经占有相当的比重。

由此可见, 水田连作改为水旱轮作 (稻菜轮作) 是导致该区水田 SOM 含量下降的重要原因。由于特殊的地理环境以及经济利益的驱使, 自 20 世纪 90 年代以来, 海南岛多地逐渐实行稻-稻-菜或稻-菜轮作方式, 即在每年的 5—11 月份种植双季稻, 11—4 月份种植蔬菜, 或仅种植一季水稻 (早稻或中稻), 直到冬季种植蔬菜, 种植蔬菜期间, 多数地区种植两茬甚至三茬蔬菜, 蔬菜播种面积持续增加^[29]。而该岛 5—10 月为雨季, 11—4 月份为旱季, 水稻在雨季种植, 蔬菜主要在旱季种植。相对于水稻, 蔬菜对养分的需求量更大, 当稻田转化为菜地后, 没有了淹水还原条件, 一方面不利于还田有机物质的积累, 氧化条件使土壤有机质矿化加剧; 另一方面, 11—4 月的蔬菜季为旱季, 降水减少但热带地区气温仍然较高, 有利于土壤有机质的矿化分解。重要的是, 蔬菜多为浅根系, 其根系生物量小, 同时茎叶水分含量大, 收获后, 非食用茎叶极少还田, 因此, 菜季还田生物量少。可见, 水田连作改为水旱轮作 (稻菜轮作) 导致生物输入量减少同时土壤有机质的矿化量增加, 从而造成海南岛 SOM 含量呈下降趋势。本结果也与李忠配、史利江、曾招兵等^[30-31,11]的研究结果相一致。

2.4.2 土地利用方式变化对园地 SOM 时空变异的影响 本文空间统计发现, 1980s—2012 年, 由林地转换成园地部分占有林地转换类型的 94%, 由林地转

换为园地后, SOM 含量减少 2.55 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 减少率为 13.52%。两个时期均为园地部分 SOM 含量亦呈减少趋势, 减少 1.82 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 减少率为 9.85%。

由表 5 可知, 时隔近 30 年, 该区园地面积呈明显的增加趋势, 由 1980s 中期的 428 064 hm^2 增加至 2010s 的 825 301 hm^2 , 增加 397 236 hm^2 , 增加了 92.80%, 橡胶林、果林面积均有大幅度增加。其中, 两个时期橡胶林面积占园地面积的比例均在 60% 以上, 橡胶林增加面积最大, 由 1980s 中期的 328 825 hm^2 增加至 2010s 初期的 505 825 hm^2 , 增加了 53.83%。当天然林转变为人工橡胶林后, SOM 大幅度下降, 其中表层损失较底层更为严重^[32-33]。实际上, 当天然林地开垦为橡胶林和其他果林等园地后, 裸露土面增加, 并有一定耕翻, 造成水土流失增加, 从而加剧养分流失; 同林地相比, 园地植物枯枝落叶减少, 但吸取土壤养分增加, 进而造成 SOM 含量的减少。国内外研究表明: 新垦耕地造成 SOM 含量减少, 其中, 在前 20—30 年 SOM 含量减少比较迅速, 之后减少速度缓慢, 在 30 年左右达到新的平衡^[34]。海南省橡胶种植面积从 1980s 年中期至 2010s 初期增加了 17.7 万 hm^2 , 其他园地面积同期增加了约 22 万 hm^2 , 与此同时耕地面积仅减少约 1.3 万 hm^2 , 由此可见, 海南园地主要由林地开垦而来, 且正处在开垦 10—30 年之间, 开垦年限较短, 因而这些园地的 SOM 含量正处于迅速下降阶段。

另一方面, 园地 SOM 含量变化与农业管理措施等密切相关。橡胶的生长需要吸取大量的土壤养分, 且养分多被割胶所带走, 不再返还胶园土壤中, 长期下来必定会造成土壤养分的下降; 将海南岛坡度图与 2010 年遥感解译土地利用图叠加发现, 该区园地平均坡度为 4.65°, 该区高温多雨, 地形复杂, 园地存在水土流失现象, 且橡胶园地表植被较稀疏, 人为采胶对土地进行践踏, 干扰较为严重, 一定程度上加重了水土流失的发生, 水土流失会带走一部分土壤养分; 此外, 该区存在施肥不合理现象, 重化肥轻施有机肥。因此, 在上述因素的综合作用下致使胶园 SOM 含量呈下降趋势。

3 讨论

3.1 施肥、作物产量与 SOM 时空变异的关系

根据国家统计局官方网站年度数据, 1980s 后期 (1988—1990 年, 下同)、2000s (2000—2002 年, 下同)、2010s 初期 (2010—2012 年, 下同) 农用化

肥施用折纯量均值分别为 11.60、27.40、46.56 万吨, 自 1988 年以来, 海南省农用化肥施用折纯量呈增加趋势, 其中, 2010s 初期农用化肥施用折纯量是 1980s 后期的 4 倍, 与此同时, 水稻产量呈增加趋势, 1980s 后期、2000s、2010s 初期水稻单产均值分别为 3 149.8、4 127.8、4 542.1 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 2010s 初期水稻单产较 1980s 后期增加了 1 392.3 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 增产 44.20%, 而秸秆产量也有相应地增加。研究表明, 大量施肥在短期内能够保证作物产量, 但从长远来看, 并不能维持 SOM 含量等级^[35]。而且海南岛秸秆还田较少^[36], 耕地土壤有机物质的积累有限。长期以来, 海南岛存在施肥不合理现象, 重化肥轻施有机肥。2010 年海南省单县平均牲畜存栏量(牛、山羊、猪年末存栏量与家禽(鸡、鸭、鹅)年内出栏量之和)为 732 万头, 虽与 1990 年(99 万头)相比有了很大提高(是 1990 年的 7 倍), 但同河南省(2010 年和 1990 年分别为 2 481、844 万头)相比, 两个时期分别少 3.4 倍、8.5 倍, 表明海南有机肥来源不足, 调查发现, 该区较少从外地购买有机肥, 有机肥施用量有限, 土壤有机物质补充不足。

从菜地施肥现状来看, 海南岛蔬菜施肥量也远低于其他蔬菜种植大省。吉清妹^[37]对海南省定安、澄迈、文昌、琼海 4 县共计 47 个农户调查显示, 冬瓜和辣椒的平均施氮量分别为 167.94 和 120.64 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 平均 144.29 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中有机肥氮含量占总施肥量的 27% 和 23%。官利兰^[38]在广东省 4 县 74 户蔬菜种植户施肥调查结果显示, 平均施 N 量为 611.19 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中有机肥氮含量占总施氮量的 27%。张怀志^[39]在河北、天津 7 县区 156 户设施菜地的调查结果显示, 平均施氮量为 1127 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。广东、河北上述地区调查的施氮量分别是海南省的 4.2 倍和 7.8 倍, 可见, 对需肥量较高的蔬菜, 海南省的氮肥施用量也少于其他地区, 因此, 肥料氮对土壤有机质的补充有限。

海南地处热带地区, 暴雨、台风频繁, 地形复杂(以五指山、鹦哥岭为中心, 形成中间高耸、四周低平的环形层状梯级地貌)^[40]。在气候与地形的综合影响下, 该区农业土壤水土流失严重。而水土流失容易引起土壤养分流失、土壤质量退化等问题。有研究表明, 在降雨条件下, 该区农田 SOM、N、P 随径流流失, 平均流失量分别为 92.42、3.13、1.30 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 肥料流失严重^[41]。虽然该区施肥量有较大的提高, 但 0—20 cm 土层 SOM 含量整体仍然呈下降趋势。

目前国内外关于作物产量与 SOM 含量之间的关系并未得出一致的结论。LAL^[42]和 PAN^[43]的研究表明

作物产量与 SOM 含量存在较好的正相关关系。但 YANG 等^[44]在吉林地区的研究得出相反的结论, 认为作物产量与 SOM 含量存在负相关关系。LOVELAND 和 WEBB^[45]对温带地区的研究表明, SOM 含量与作物产量之间并没有确定的定量关系。从本研究区水稻单产和 SOM 含量的情况来看, 水稻单产增加可能会耗竭更多土壤养分, 从而导致土壤养分降低。

3.2 海南岛 SOM 时空变异特征

时隔近 30 年, 海南岛 SOM 含量整体呈减少趋势, 减少率为 22.75%。其中, 水田减少最为明显, 减少率为 27.34%。水田连作改为稻菜轮作(水旱轮作)是该区水田 SOM 含量减少的重要原因。这与曾招兵等^[11]在广东省的研究结果相一致。但与赵明松等^[8]在江苏的研究结果不同, 江苏省 1980—2006 年 0—20 cm 土层 SOM 含量整体呈增加趋势, 增加率为 10.63%, 其中, 水田转换为旱地后, SOM 含量亦呈增加趋势, 增加 2.93 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这是因为相对于海南岛, 江苏省气温较低、降水减少, 肥料淋溶损失减弱, 更为重要的是该省大力实行秸秆还田技术, 促进了有机物质的累积。另胡克林等^[46]在北京郊区的研究结果也表明秸秆还田和施用有机肥是 SOM 含量上升的重要原因。因此, 建议今后海南岛推行秸秆还田技术、有效利用畜禽粪便等有机肥料。

4 结论

4.1 时隔近 30 年, 海南岛 SOM 含量整体呈减少趋势, 2012 年 SOM 含量较 1980s 减少了 4.68 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 减少率为 22.75%。其中, 水田的 SOM 含量减少最为明显, 减少率为 27.34%; 其次为园地, 减少率为 14.25%; 而旱地减少量最小, 减少率为 8.84%。

4.2 SOM 含量减小量主要是 1—10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分布在岛内除东部、东北部以外大部分地区, 占全岛面积的 60.23%; SOM 含量增加量主要是 1—5 和 5—10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分布在岛内东北部、东部沿海地区, 占全岛面积的 19.47%; SOM 含量变化在 -1—1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 即 SOM 基本保持不变, 在岛内各区均有分布, 占全岛面积 11.30%。

4.3 水稻连作改为稻菜轮作, 林地开垦为园地、土地利用强度加大是造成海南岛 SOM 含量下降的主要原因。

致谢: 海南省农业科学院农业环境与土壤研究所张文、曾建华、符传良老师和本所李兆君老师在采样方案制定和采样过程中给予指导和帮助。宁东峰、李育鹏在采样中付出辛勤劳动, 在此一并致谢!

References

- [1] 方斌, 吴金凤. 作物种植前后土壤有机质及养分因子的空间变异分析. *生态学报*, 2014, 34(4): 983-992.
FANG B, WU J F. Spatial variation analysis of soil organic matter and nutrient factor for before and after planting crops. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4): 983-992. (in Chinese)
- [2] 齐雁冰, 王茵茵, 陈洋, 刘姣姣, 张亮亮. 基于遥感与随机森林算法的陕西省土壤有机质空间预测. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 1074-1086.
QI Y B, WANG Y Y, CHEN Y, LIU J J, ZHANG L L. Soil organic matter prediction based on remote sensing data and random forest model in Shanxi Province. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 1074-1086. (in Chinese)
- [3] 黄耀, 孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势. *科学通报*, 2006, 51(7): 750-763.
HUANG Y, SUN W J. The change trend of organic carbon content in farmland topsoil in mainland China in recent 20 years. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 750-763. (in Chinese)
- [4] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 孟远夺, 董燕, 李荣, 马义兵. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1047-1056.
YANG F, XU Y, CUI Y, MENG Y D, DONG Y, LI R, MA Y B. Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1047-1056. (in Chinese)
- [5] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 黄土丘陵沟壑区县域土壤有机质空间分布特征及预测. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 112-122.
LIAN G, GUO X D, FU B J, HU C X. Spatial variability and prediction of soil organic matter at county scale on the Loess Plateau. *Progress in Geography*, 2006, 25(2): 112-122. (in Chinese)
- [6] MCGRATH D, ZHANG C S. Spatial distribution of soil organic carbon concentrations in grassland of Ireland. *Applied Geochemistry*, 2003, 18(10): 1629-1639.
- [7] 顾成军, 史学正, 于东升, 徐胜祥, 孙维侠, 赵永存. 省域土壤有机碳空间分布的主控因子——土壤类型与土地利用比较. *土壤学报*, 2013, 50(3): 425-432.
GU C J, SHI X Z, YU D S, XU S X, SUN W X, ZHAO Y C. Main factor controlling SOC spatial distribution at the province scale as affected by soil type and land use. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 425-432. (in Chinese)
- [8] 赵明松, 张甘霖, 吴运金, 李德成, 赵玉国. 江苏省土壤有机质含量时空变异特征及驱动力研究. *土壤学报*, 2014, 51(3): 448-458.
ZHAO M S, ZHANG G L, WU Y J, LI D C, ZHAO Y G. Temporal and spatial variability of soil organic matter and its driving force in Jiangsu Province, China. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3): 448-458. (in Chinese)
- [9] PAN G X, LI L Q, WU L S, ZHANG X H. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2004, 10(1): 79-92.
- [10] HU K L, LI H, LI B G, HUANG Y F. Spatial and temporal patterns of soil organic matter in the urban-rural transition zone of Beijing. *Geoderma*, 2007, 141(3/4): 302-310.
- [11] 曾招兵, 汤建东, 刘一峰, 张满红, 林碧珊. 广东耕地土壤有机质的变化趋势及其驱动力分析. *土壤*, 2013, 45(1): 84-90.
ZENG Z B, TANG J D, LIU Y F, ZHANG M H, LIN B S. Changes and driving forces of farmland organic matter in Guangdong Province, China. *Soils*, 2013, 45(1): 84-90. (in Chinese)
- [12] 周睿, 潘贤章, 王昌坤, 刘娅, 李燕丽, 石荣杰, 解宪丽. 上海市城郊土壤有机质的时空变异特征及其影响因素. *土壤*, 2014, 46(3): 433-438.
ZHOU R, PAN X Z, WANG C K, LIU Y, LI Y L, SHI R J, XIE X L. Spatial-temporal variation characteristics of soil organic matter and its impact factors in suburban Shanghai. *Soils*, 2014, 46(3): 433-438. (in Chinese)
- [13] HUANG B, SUN W X, ZHAO Y C, ZHU J, YANG R Q, ZOU Z, DING F, SU J P. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices. *Geoderma*, 2007, 139: 336-345.
- [14] SHAH Z, SHAH S H, PEOPLES M B, SCHWENKE G D, HERRIDGE D F. Crop residue and fertilizer N effects on nitrogen fixation and yields of legume-cereal rotations and soil organic fertility. *Field Crops Research*, 2003, 83(1): 1-11.
- [15] 漆智平, 张黎明, 桑爱云, 曹启民, 王华, 魏志远, 唐树梅. 海南水稻土有机质的时空变异. *中国农学通报*, 2007, 23(7): 547-551.
QI Z P, ZHANG L M, SANG A Y, CAO Q M, WANG H, WEI Z Y, TANG S M. Spatial-temporal variance of paddy soil organic matter in Hainan Province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(7): 547-551. (in Chinese)
- [16] 杨昭君. 不同尺度下橡胶园土壤养分时空变异特征研究[D]. 海口: 海南大学, 2010.
YANG Z J. Study on time-space variation characters of soil nutrients in different scales of rubber plantation[D]. Haikou: Hainan University, 2010. (in Chinese)
- [17] 方圆. 海南省土壤有机碳时空变异[D]. 海口: 海南大学, 2012.
FANG Y. On the spatial distribution patterns of soil organic carbon in the Hainan Province[D]. Haikou: Hainan University, 2012. (in Chinese)

- [18] 吕丽平, 王登峰, 魏志远, 漆智平, 唐树梅. 近 20 年海南岛土壤有机质时空变异. 热带作物学报, 2016, 37(2): 338-344.
LV L P, WANG D F, WEI Z Y, QI Z P, TANG S M. The spatial and temporal variability of SOC in Hainan island over the past 20 years. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(2): 338-344. (in Chinese)
- [19] 姜赛平, 张怀志, 张认连, 李兆君, 谢良商, 徐爱国. 基于三种空间预测模型的海南岛土壤有机质空间分布研究. 土壤学报, 2018, 55(4): 1007-1017.
JIANG S P, ZHANG H Z, ZHANG R L, LI Z J, XIE L S, XU A G. Research on spatial distribution of soil organic matter in Hainan island based on three spatial prediction models. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(4): 1007-1017. (in Chinese)
- [20] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012.
ZHANG G L, GONG Z T. *Soil Survey Laboratory Methods*. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [21] BREIMAN L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45: 5-32.
- [22] LIAW A, WIENER M. Classification and regression by RandomForest. *R News*, 2002, 2/3: 18-22[2002-12]. <https://www.researchgate.net/publication/228451484>. ISSN 1609-3631.
- [23] 黄文, 王正林. 数据挖掘--R 语言实战. 北京: 电子工业出版社, 2014.
HUANG W, WANG Z L. *Data Mining: R In Action*. Beijing: Electronic Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [24] GENUER R, POGGI J M, TULEAU-MALOT C. Variable selection using random forests. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(14): 2225-2236.
- [25] 郭澎涛, 李茂芬, 罗微, 林清火, 唐群锋, 刘志崑. 基于多源环境变量和随机森林的橡胶园土壤全氮含量预测. 农业工程学报, 2015, 31(5): 194-200.
GUO P T, LI M F, LUO W, LIN Q H, TANG Q F, LIU Z W. Prediction of soil total nitrogen for rubber plantation at regional scale based on environmental variables and random forest approach. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 194-200. (in Chinese)
- [26] 王茵茵, 齐雁冰, 陈洋, 解飞. 基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究. 土壤学报, 2016, 53(2): 342-354.
WANG Y Y, QI Y B, CHEN Y, XIE F. Prediction of soil organic matter based on multi-resolution remote sensing data and random forest algorithm. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 342-354. (in Chinese)
- [27] WIESMEIER M, BARTHOLD F, BLANK B, KÖGEL-KNABNER I. Digital mapping of soil organic matter stocks using random forest modeling in a semi-arid steppe ecosystem. *Plant and Soil*, 2011, 340: 7-24.
- [28] 李东, 王子芳, 郑杰炳, 高明. 紫色丘陵土不同土地利用方式下土壤有机质和全量氮磷钾含量状况. 土壤通报, 2009, 40(2): 310-314.
LI D, WANG Z F, ZHENG J B, GAO M. Contents of soil organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium under different land-use patterns in purple hill area. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(2): 310-314. (in Chinese)
- [29] 罗文杰, 罗文忠. 海南稻田耕作制度的改革. 海南大学学报自然科学版, 2001, 19(1): 71-75.
LUO W J, LUO W Z. Farming system reform of rice field in Hainan. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2001, 19(1): 71-75. (in Chinese)
- [30] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1712-1721.
LI Z P, WU X C, CHEN B Y. Changes in transformation of soil organic carbon and functional diversity of soil microbial community under different land use patterns. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8): 1712-1721. (in Chinese)
- [31] 史利江, 郑丽波, 梅雪英, 俞立中, 贾正长. 上海市不同土地利用方式下的土壤碳氮特征. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2279-2287.
SHI L J, ZHENG L B, MEI X Y, YU L Z, JIA Z C. Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen under different land use types in Shanghai. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2279-2287. (in Chinese)
- [32] GUO L B, GRIFFORD R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345-360.
- [33] 杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 陈光水, 李旭. 中热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响. 地理学报, 2007, 62(11): 1123-1131.
YANG Y S, XIE J S, SHENG H, CHEN G S, LI X. The impact of land use/cover change on soil organic carbon stocks and quality in mid-subtropical mountainous area of southern China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11): 1123-1131. (in Chinese)
- [34] 全国土壤普查办公室. 中国土壤, 北京: 中国农业出版社, 1998.
National soil survey office. *Chinese Soil*, Beijing: China Agriculture Press, 1998. (in Chinese)
- [35] SONG C, WANG E L, HAN X Z, STIRZAKER R. Crop production, soil carbon and nutrient balances as affected by fertilization in a Mollisol agroecosystem. *Nutrient Cycling In Agroecosystems*, 2011, 89: 363-374.
- [36] 张翠萍, 李睿达, 姜佳. 海南中部国家重点生态功能区农户粮食生产与生态要素的函数研究—以琼中县为例. 安徽农业科学, 2017, 45(12): 213-217.

- ZHANG C P, LI R D, JIANG J. Modelling study based on farm households grain production and ecological element of Hainan middle national key ecological function areas-An empirical analysis of Qiongzong County. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(12): 213-217. (in Chinese)
- [37] 吉清妹, 张文, 王敏, 黄绍文, 唐继伟, 翁艳梅, 潘孝忠, 谢良商. 海南东北部地区蔬菜施肥现状与土壤养分状况. *广东农业科学*, 2011, (22): 61-63.
- JI Q M, ZHANG W, WANG M, HUANG S W, TANG J W, WENG Y M, PAN X Z, XIE L S. The situation of vegetable fertilization and soil nutrient in northeastern ainan. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, (22): 61-63. (in Chinese)
- [38] 官利兰, 伏广农, 徐鹏举, 程根, 姜煜, 张春艳, 张新朋. 广东省菜园土壤施肥状况调查与分析. *南方农业学报*, 2014, 45(3): 420-424.
- GUAN L L, FU G N, XU P J, CHENG G, JIANG Y, ZHANG C Y, ZHANG X P. Investigation and analysis of fertilization status of vegetable soil in Guangdong Province. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(3): 420-424. (in Chinese)
- [39] 张怀志, 唐继伟, 袁硕, 黄绍文. 津冀设施蔬菜施肥调查分析. *中国土壤与肥料*, 2018(2): 54-60. (in Chinese)
- ZHANG H Z, TANG J W, YUAN S, HUANG S W. Investigation and analysis of greenhouse vegetable fertilization in Tianjin and Hebei province. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(2): 54-60. (in Chinese)
- [40] 海南省农业厅土肥站. 海南土壤. 海口: 海南出版社, 1993, P151.
- Soil Fertilizer Station of Hainan Provincial Department of Agriculture. *Hainan Soil*. Haikou: Hainan Press, 1993, P151. (in Chinese)
- [41] 葛成军, 唐文浩, 陈淼, 唐天乐, 冯丹, 俞花美. 海南岛典型农业土壤产流与面源污染特征分析. *热带作物学报*, 2015, 36(8): 1469-1474.
- GE C J, TANG W H, CHEN M, TANG T L, FENG D, YU H M. Runoff characteristics of agricultural non-point source pollutants in typical soils in Hainan Island. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2015, 36(8): 1469-1474. (in Chinese)
- [42] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [43] PAN G X, SMITH P, PAN W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129: 344-348.
- [44] YANG O, ALAIN N R, WANG L X, YAN B X. Spatio-temporal patterns of soil organic carbon and pH in relation to environmental factors-A case study of the Black Soil Region of Northeastern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 245: 22-31.
- [45] LOVELAND P, WEBB J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil & Tillage Research*, 2003, 70: 1-18.
- [46] 胡克林, 余艳, 张凤荣, 王茹. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素. *中国农业科学*, 2006, 39(4): 764-771. (in Chinese)
- HU K L, YU Y, ZHANG F R, WANG R. The spatial-temporal variability of soil organic matter and its influencing factors in suburban area of Beijing. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(4): 764-771. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)