



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>

近30年广西土壤有机质演变特征

谢贤胜, 康吉利, 冯鑫鑫, 刘文奇, 侯显达, 王钰今, 贾书刚, 刘书田, 侯彦林

引用本文:

谢贤胜, 康吉利, 冯鑫鑫, 刘文奇, 侯显达, 王钰今, 贾书刚, 刘书田, 侯彦林. 近30年广西土壤有机质演变特征[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1014–1024.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0442>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 805–817 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0480>

山东“蓝黄”两区耕层土壤有机质的时空分异特征

李因帅, 赵庚星, 李涛, 李建伟, 窦家聪, 范瑞彬

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 891–899 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0572>

黄淮海平原农区农用地土壤肥力评价及时空变化特征——以山东省博兴县为例

李颖慧, 姜小三

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 602–612 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0100>

江西井冈蜜柚种植区果园土壤肥力现状及区域分布特征

吴强建, 肖委明, 赵晓东, 谢志坚, 彭剑峰, 周春火

农业资源与环境学报. 2022, 39(5): 1025–1032 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0475>

山东棕壤耕地地力评价及其特征分析

张颖, 赵庚星, 王卓然, 陈晓娜, 宿宝巍

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 359–366 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0246>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

谢贤胜, 康吉利, 冯鑫鑫, 等. 近30年广西土壤有机质演变特征[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1014–1024.

XIE X S, KANG J L, FENG X X, et al. The evolutionary characteristics of soil organic matter in Guangxi over the past 30 years[J]. *Journal of*

Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(5): 1014–1024.



开放科学 OSID

近30年广西土壤有机质演变特征

谢贤胜^{1,4}, 康吉利⁵, 冯鑫鑫⁴, 刘文奇⁵, 侯显达^{1,2,3}, 王铄今^{1,2,3}, 贾书刚^{1,2,3},
刘书田^{1,2,3*}, 侯彦林^{1,2,3*}

(1. 南宁师范大学广西地标作物大数据工程技术研究中心, 南宁 530001; 2. 南宁师范大学广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001; 3. 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001; 4. 南宁师范大学地理科学与规划学院, 南宁 530001; 5. 广西壮族自治区土壤肥料工作站, 南宁 530007)

摘要:土壤有机质(SOM)是衡量农业生产力与土壤整体健康的重要指标,对促进区域粮食安全和缓解全球变暖下的粮食危机具有重要意义。为揭示1984—2009年广西全域SOM变化情况,基于广西第二次土壤普查项目(1984年)和广西测土配方施肥项目(2009年)两期数据,利用地统计学、动态度、分布指数等方法分析了广西土壤表层SOM时空演变特征及其在不同海拔高度上的分布状况。结果显示,近30年广西SOM总体含量大幅提升,各含量等级已由零散交错的不均匀分布演变为相对集中的连片分布,分布面积呈现:等级4($20\sim30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>等级5($30\sim40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>等级6($>40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>等级3($10\sim20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>等级1($\leq 6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>等级2($6\sim10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),等级4和等级5所占比例分别由1984年的28.20%和18.73%提升至2009年的38.09%和36.19%。在变化速率方面,等级2减少最为迅速,动态度为-3.76%,等级5增加最为迅速,动态度为3.73%,各等级动态度表现为等级2>等级5>等级1>等级3>等级4>等级6。在不同海拔高度上,除等级4和等级6外,其余等级的分布指数曲线均发生了较大变动。在海拔 $\leq 200\text{ m}$ 的区域,等级3始终保持着高优势位特征,而等级6对海拔变动保持较强的选择性,随海拔上升其优势位愈发明显。研究表明,广西SOM各含量等级及空间分布均存在较大差异,海拔是其重要的影响因素。

关键词:广西;土壤有机质;时空演变;动态度

中图分类号:S153.621

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)05-1014-11

doi: 10.13254/j.jare.2021.0442

The evolutionary characteristics of soil organic matter in Guangxi over the past 30 years

XIE Xiansheng^{1,4}, KANG Jili⁵, FENG Xinxin⁴, LIU Wenqi⁵, HOU Xianda^{1,2,3}, WANG Shuojin^{1,2,3}, JIA Shugang^{1,2,3}, LIU Shutian^{1,2,3*},
HOU Yanlin^{1,2,3*}

(1. Guangxi Geographical Indication Crops Research Center of Big Data Mining and Experimental Engineering Technology, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 3. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf of Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 4. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 5. Guangxi Soil Fertilizer Workstation, Nanning 530007, China)

Abstract: Soil organic matter(SOM) is an important indicator of agricultural productivity and soil health, which plays a significant role in promoting regional food security and alleviating the food crisis under global warming. Based on the data from the second soil investigation project(1984) and the soil testing and formulated fertilization project(2009) in Guangxi, temporal and spatial evolution characteristics of

收稿日期:2021-07-20 录用日期:2021-11-03

作者简介:谢贤胜(1999—),男,广西北流人,硕士研究生,研究方向为生态学。E-mail:XSXIEAIHQ@hotmail.com

*通信作者:刘书田 E-mail:liushutian6952@126.com; 侯彦林 E-mail:2483977138@qq.com

基金项目:广西科技基地和人才专项(AD18126012);广西一流学科(地理学)建设经费;广西八桂学者专项经费;南宁师范大学大学生创新创业训练计划项目(202010603275);北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室开放课题(GTEU-KLOP-X1704)

Project supported: Guangxi Science and Technology Base and Talent Special Project(AD18126012); Guangxi First Class Discipline(Geography) Construction Funds; Guangxi Bagui Scholars Special Fund; Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students of Nanning Normal University(202010603275); The Opening Foundation of Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Use, Ministry of Education(GTEU-KLOP-X1704)

surface SOM and its distribution at different elevations were studied using geostatistics, dynamic methods, and distribution indices to further reveal the change in SOM in Guangxi from 1984 to 2009. The results showed that the total SOM content has increased significantly over the past 30 years. The gradient of SOM content in Guangxi had evolved from an uneven point distribution to a relatively concentrated contiguous distribution. The distribution area was as follows: grade 4 ($20\sim 30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > grade 5 ($30\sim 40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > grade 6 ($>40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > grade 3 ($10\sim 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > grade 1 ($\leq 6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > grade 2 ($6\sim 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). The proportions of grade 4 and grade 5 rose from 28.20% and 18.73% in 1984 to 38.09% and 36.19% in 2009, respectively. In terms of change speed, grade 2 reduced rapidly, with a dynamicity of -3.76% , grade 5 increased rapidly, with a dynamicity of 3.73% , showing that grade 2 > grade 5 > grade 1 > grade 3 > grade 4 > grade 6. Except for grade 4 and grade 6, the remaining grades of the distribution index curves changed at different altitudes. In the area of altitude $\leq 200\text{ m}$, grade 3 had consistently maintained highly dominant features. Grade 6 remained highly selective to altitude changes. As the altitude increases, the superiority becomes obvious. The content and spatial distribution of SOM in Guangxi are quite different. Altitude is an important factor for it.

Keywords: Guangxi; soil organic matter; spatiotemporal evolution; dynamicity

土壤有机质(Soil organic matter, SOM)作为土壤重要组分之一,在改善土壤理化性质、保障植物正常生长等方面发挥着重要作用,被称为“土壤养分储藏库”^[1],而土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)作为SOM的重要组成部分,是陆地生态系统中碳储量的重要来源,也是全球碳循环重要的源与汇^[2]。由于土壤属于时空连续的变异集合体,在不同尺度上广泛存在空间异质性^[3],SOM作为土壤组分也具有同样特征。因此,研究SOM时空分布特征及变化规律对评估区域土壤质量、土壤肥力、土壤碳储量以及环境可持续性等重要具有重要的现实意义^[4]。

目前,SOM时空分布特征研究方法主要有两种:一是通过布设土壤长期定位监测点,对比监测期内各样点SOM含量变化情况^[5];二是利用土壤普查等项目不同时期的大量调查点数据,结合地统计学和ArcGIS技术模拟演变过程^[6]。相较于后者,前者监测点数量往往较少,虽然保证了数据的完整性和可靠性,但很难在区域尺度上观察异质性情况。随着地统计学的不断完善,基于地理加权回归的克里金插值法(Geographically weighted regression kriging, GWRK)逐步应用于土壤和环境科学研究中^[7],并被证明其插值效果及精度优于普通克里金插值法(Ordinary kriging, OK)和全局回归克里金插值法(Regression kriging, RK),在预测SOM及空间制图方面具有良好的可行性^[8]。

海拔作为重要的地形因子,通过立地条件调控物质与能量的再分配过程^[9],不仅影响着SOM空间分布格局,也影响其演变过程。特定区域地形与SOM的关系,可一定程度反映人地关系的特点、过程和驱动力^[10]。广西地处云贵高原向东南沿海丘陵过渡的地带,喀斯特地貌广泛分布,石漠化程度较高,生态环境

较为脆弱,土壤资源保护与利用之间的矛盾较为突出^[11]。此前研究广西SOM的区域范围多集中于地市级和县级,例如广西中南部的柳州市、来宾市、南宁市等^[12],以及马山县^[13]、富川县^[14]、环江县^[15]等,研究内容集中于SOC、SOM对生态修复的响应程度,以及SOM与有效态养分含量的相关性等,较少从省域尺度研究SOM的空间分布特征。尽管钟聪等^[16]在省级尺度上研究了SOM空间变异特征和广西SOM储量,但都是基于1990年汇编的广西第二次土壤普查剖面数据,无法在区域层面上分析近30年广西SOM的变化情况。另外,虽有研究^[5]对近35年广西耕地SOM演变趋势进行分析,但研究数据仅限于广西35个耕地质量长期定位监测点,不能很好地反映广西全域的SOM含量演变过程。同时,上述研究也未考虑地形因子对广西SOM空间分布的影响情况。

鉴于此,本研究基于广西第二次土壤普查项目(1984年)和广西测土配方施肥项目(2009年)数据,结合地统计学、动态度、分布指数等分析方法,研究了1984—2009年广西SOM含量演变特征,以期为合理制定农田土壤管理政策、改善土壤肥力、促进土壤碳固定和减少碳损失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

广西壮族自治区位于祖国南疆,与广东、湖南、贵州、云南等省份相邻,南部为北部湾,西南部与越南交界。气候上,广西光热水充足,雨热同期,年平均温度 $17.5\sim 23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $1\,086\sim 2\,755\text{ mm}$ (数据来源于国家气象科学数据中心, <http://data.cma.cn>),属于典型的亚热带季风气候。地形地貌上,广西处在云贵高原向东南沿海丘陵过渡的地带,总体地势自西北向东

南倾斜,四周多山,中部和南部多平原,故有“广西盆地”之称,西部、北部为云贵高原边缘、东北部为南岭山地,地势均较高(图1)。同时,广西也是我国主要的喀斯特地貌分布区域之一。

1.2 数据来源

研究所用数据主要包括广西第二次土壤普查项目成果附图、广西测土配方施肥项目原始数据集、DEM(数字高程模型)数据、环境协变量栅格数据等。广西第二次土壤普查项目样品采集于1979—1984年,成果附图来源于广西土壤肥料工作站编著的《广西土壤》^[17]。广西测土配方施肥项目样品采集于2005—2009年,原始数据集由广西土壤肥料工作站提供,涵盖广西全域约4.3万个采样点的基础养分数据,从中提取SOM指标数据。为便于说明两期数据的时间跨度,研究分别以两期项目样品采集结束的时间为基准,即1984—2009年。同时,两期项目样品均采自表层土壤(0~20 cm),SOM检测均采用油浴加热重铬酸钾氧化容量法,数据检测方法具有可比性。DEM数据来自地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为30 m。参照邹润彦等^[18]的研究方法,选取地形因子、气象、植被数据作为环境协变量,参与广西测土配方施肥项目SOM数据的地理加权回归分析以及制图表达,具体数据来源见表1。

1.3 研究方法

1.3.1 数据处理方法

(1)广西1984年SOM数据处理

利用高扫描扫描仪(分辨率600 dpi)对《广西土壤》中内部附图——广西土壤有机质分布图进行平整扫描,获取光栅图像。将光栅图像导入ArcGIS 10.5软件,选取经纬线交点、边界点等30个控制点,利用“地理配准”工具栏完成配准,并定义地理坐标系(WGS 1984)。以图像作为底图,根据不同类别情况划分SOM含量等级为6个级别,分别为等级1($\leq 6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、等级2($6 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、等级3($10 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、等级4($20 \sim 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、等级5($30 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、等级6($> 40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

表1 环境协变量数据列表

Table 1 List of environmental covariate data

数据类型 Data type	变量指标 Variable indicator	数据来源 Data source
地形因子 数据	海拔	基于DEM数据,利用ArcGIS 10.5软件提取获得
	坡度	
	坡向	
气象数据	年平均降水	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)逐年平均气温和降水空间插值数据集
	年平均气温	
植被数据	年平均最大归一化植被指数(NDVI)	国家生态科学数据中心(http://www.nesdc.org.cn)2000—2020年中国30米年最大NDVI数据集

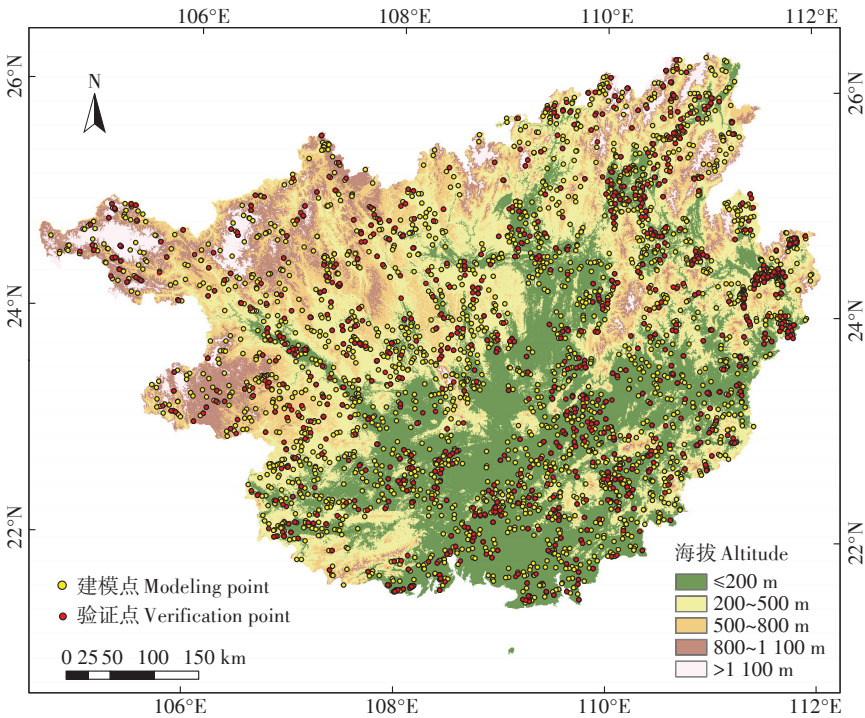


图1 研究区地形及采样点分布

Figure 1 Terrain and sampling point distribution in the study area

kg⁻¹),随后手动创建相应的面,完成矢量化处理。

(2)广西2009年SOM数据处理

利用ArcGIS 10.5软件对广西测土配方施肥项目SOM数据随机均匀选取80%的采样点用作建模点(参与空间插值),剩余20%的采样点用作验证点(用于评估插值精度),见图1。利用GWR4软件构建建模点SOM与环境协变量的GWR模型,然后对模型中的残差项进行OK插值,最终通过栅格运算得到SOM的GWRK插值结果。对应广西1984年SOM数据分类情况进行相应的重分类操作,保证含量等级划分一致,并依次提取各类别,再利用ArcGIS 10.5软件的“栅格转面”工具完成矢量化处理。

(3)DEM数据处理

根据广西地形特点及数据的可定量性,基于常规的地貌类型划分及广西的实际情况,应用ArcGIS 10.5软件对DEM数据进行重分类。将海拔≤200 m分为一级,>100 m分为一级,然后按等间距划分中间等级,共划分为5个高程级别,分别为Ⅰ级(≤200 m)、Ⅱ级(200~500 m)、Ⅲ级(500~800 m)、Ⅳ级(800~1100 m)和Ⅴ级(>1100 m)(图1)。

(4)数据处理流程

具体的数据处理流程见图2。

1.3.2 分析方法

(1)地统计学插值及模型评价

GWRK将GWR模型应用于克里金插值法当中,是对OK和RK的深化,同时也是地统计学上的重要突破。研究以OK、RK为对比,基于GWRK进行空间

插值,具体方法可参考文献[19]。将OK、RK、GWRK插值结果按照验证点经纬度输出相应的预测值数据,并与其实际测量值进行对比,以平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)对模型进行精度评价,公式分别为:

$$ME = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (S_i - T_i) \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |S_i - T_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (S_i - T_i)^2} \quad (3)$$

式中: N 为验证点个数; S_i 为第*i*个验证点的实际测量值; T_i 为第*i*个验证点的模型预测值; ME 反映插值无偏性程度,其值越接近0,说明结果越无偏; MAE 和 $RMSE$ 反映插值精度,其值越小,说明插值精度越高。

(2)动态度分析

单一动态度指数可定量描述区域特定类型变化的剧烈程度。借鉴土地利用动态度模型^[20],引入SOM动态度模型,公式为:

$$K = [(U_b - U_a)/U_a] \times T^{-1} \times 100\% \quad (4)$$

式中: K 为SOM含量等级的动态度; U_a 、 U_b 分别表示研究初期和末期SOM含量等级的面积; T 为研究时长, a 。

(3)分布指数

为消除各SOM含量等级面积差异的影响,采用分布指数^[21]定量描述不同SOM含量等级在不同海拔高度上的分布情况。分布指数是一个标准化、无量纲

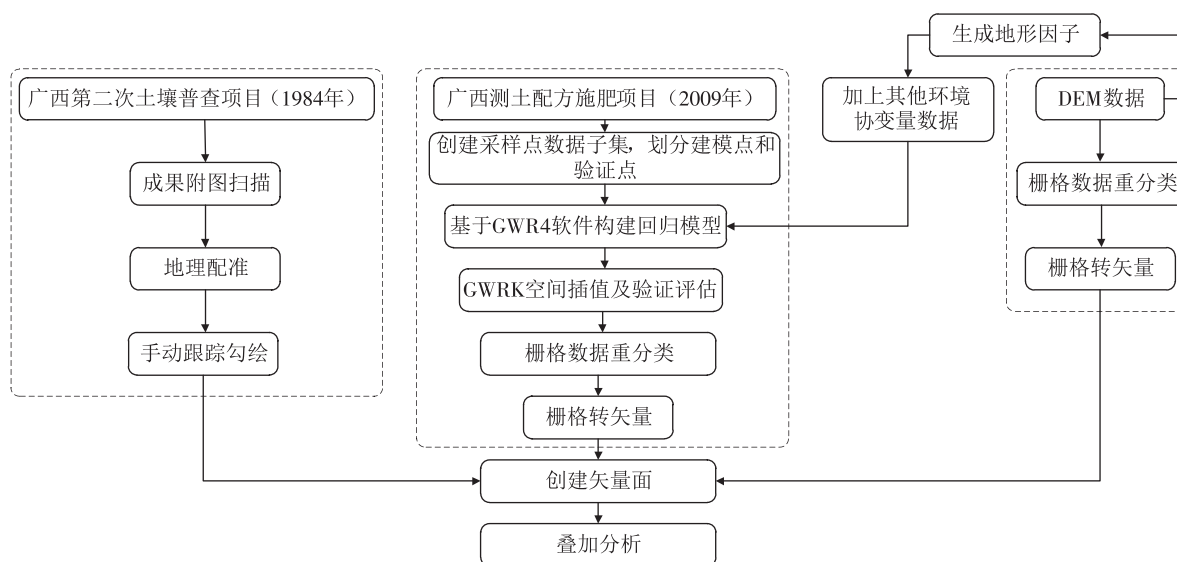


图2 数据处理流程

Figure 2 Data processing

的指数,公式如下:

$$P = \left(\frac{S_{ie}}{S_i} \right) \div \left(\frac{S_e}{S} \right) \quad (5)$$

式中: P 为分布指数; e 为海拔因子; S_{ie} 为 e 海拔高度下的 i 类SOM含量的面积; S_i 是 i 类SOM的总面积; S_e 是整个区域 e 海拔高度下SOM的总面积; S 是全域面积。分布指数曲线越平缓,表示某类SOM含量等级的分布与标准分布的偏差越小,其对海拔差异的适宜性就越大;反之,则表示其分布对海拔具有较强的选择性。 $P>1$ 表明某类SOM含量等级在该海拔高度上的面积占比大于该类SOM含量等级总面积在研究区中所占比例,因此将 $P>1$ 的区间视为该类SOM含量等级的优势位。

2 结果与分析

2.1 空间变化特征

如图3a所示,1984年广西各SOM含量等级的空间异质性较为突出。等级6和等级1集中分布在桂北、桂西等地(如河池、百色、桂林),等级1主要为石山地,等级2和等级3集中分布在桂东南、桂南、桂西南等地(如玉林、贵港、崇左),等级4和等级5集中分布在桂中、桂东等地(如南宁、来宾、梧州)。

经不同空间插值模型交叉验证发现,GWRK无论是在插值无偏性上,还是在插值精度上,都表现出极大的优势(表2)。通过GWRK拟合发现,2009年广西SOM含量等级已由零散交错的不均匀分布演变为相

对集中的连片分布(图3b),等级4和等级5广泛分布于各地区,等级3在桂西南等地仍有大量分布,等级6在桂北仍保留较大面积,而桂东南,特别是北流市,SOM含量下降。

2.2 时间变化特征

总体而言,近30年广西SOM含量已大幅提高(图4和表3)。1984年,广西SOM含量整体较低,不同含量等级的面积表现为等级4>等级5>等级6>等级1>等级3>等级2。2009年,不同含量等级的面积表现为等级4>等级5>等级6>等级3>等级1>等级2。尽管两期SOM含量等级的面积都以等级4和等级5为主,但其占比已发生了较大变化。1984年二者合计占46.93%,而2009年共占74.28%。等级6面积占比虽下降了1.26个百分点,但等级1、等级2、等级3面积占比也分别下降了14.98、5.85、5.26个百分点。

如表3所示,近30年广西SOM含量在等级1和等级5中变动最大,等级1面积减少了 $3.56\times 10^6\text{ hm}^2$,等

表2 不同空间插值模型精度评价指标对比
Table 2 Comparison of precision evaluation indices of different models

插值模型 Model	ME/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	MAE/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	RMSE/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	相关系数 Correlation coefficient
OK	-1.62	6.14	7.31	0.68**
RK	-0.59	5.41	6.78	0.71**
GWRK	-0.57	5.15	6.00	0.79**

注:**表示 $P<0.01$ (双尾检验)。
Note:** indicate $P<0.01$ (two-sided test).

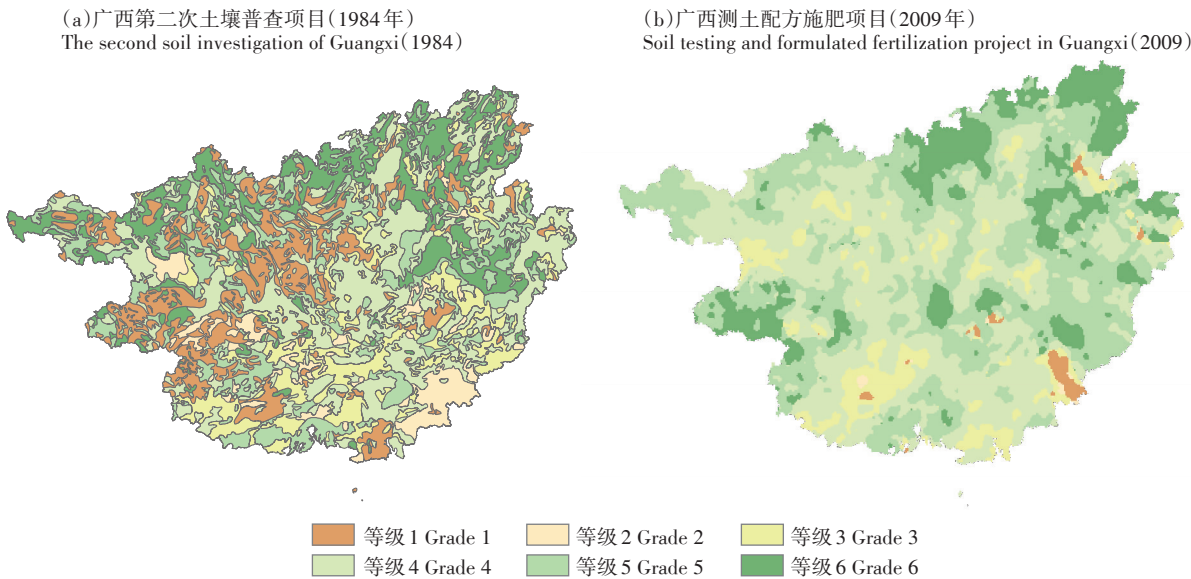


图3 不同时期广西SOM含量等级分布

Figure 3 Distribution of SOM content grade in Guangxi in different periods

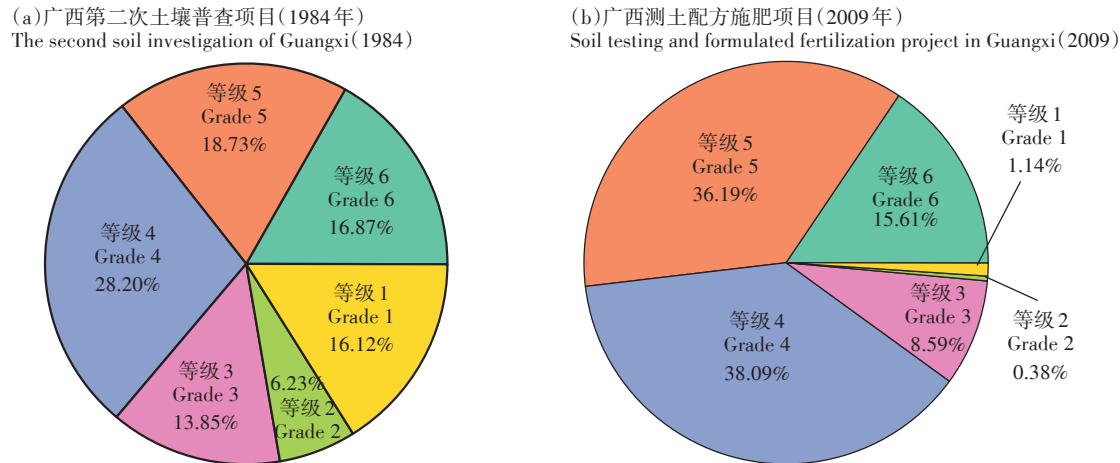


图4 不同时期广西SOM含量等级面积占比
Figure 4 The proportion of the SOM content grade in Guangxi in different periods

表3 不同时期广西SOM含量等级变动
Table 3 The changes of SOM content grade in Guangxi in different periods

SOM 含量等级 SOM content grade	1984年面积 The area of 1984/10 ⁶ hm ²	2009年面积 The area of 2009/10 ⁶ hm ²	面积变化 The change of area/ 10 ⁶ hm ²	变动比例 Variation proportion/%	动态度 Dynamic degree/%
等级 1	3.83	0.27	-3.56	-14.98	-3.72
等级 2	1.48	0.09	-1.39	-5.85	-3.76
等级 3	3.29	2.04	-1.25	-5.26	-1.52
等级 4	6.70	9.05	2.35	9.89	1.40
等级 5	4.45	8.60	4.15	17.47	3.73
等级 6	4.01	3.71	-0.30	-1.26	-0.30

注:变动比例表示SOM含量等级的变动面积占广西总面积的比例。
Note: The variation proportion indicates the proportion of the change area of SOM content grade in the total area of Guangxi.

级5面积增加了4.15×10⁶ hm²,各等级变动比例表现为等级5>等级1>等级4>等级2>等级3>等级6。从动态度可以看出,等级2在近30年变化中减少最为迅速,动态度为-3.76%,等级5增加最为迅速,动态度为3.73%,各等级动态度表现为等级2>等级5>等级1>等级3>等级4>等级6。

2.3 不同海拔高度上分布状况

在不同海拔高度上,广西SOM呈现出较大的空间异质性,各含量等级在不同高程区的分布见表4。

2.3.1 1984年广西SOM在不同海拔高度上的分布

从纵向上看,高程Ⅰ级(≤200 m)的SOM主要为等级4(34.73%)和等级3(23.11%),高程Ⅱ级(200~500 m)的SOM主要为等级4(28.75%)、等级1(18.87%)和等级5(18.36%),高程Ⅲ级(500~800 m)的SOM主要为等级6(27.63%)和等级4(22.11%),高程Ⅳ级(800~1 100 m)的SOM主要为等级6(35.84%)和等级1(23.45%),高程Ⅴ级(>1 100 m)的SOM主要为等级6(47.67%)。

从横向上看,等级1的SOM集中分布在<800 m的高程区(合计约占81.72%),等级2的SOM集中分布在<500 m的高程区(合计约占87.84%),等级3的SOM集中分布在<500 m的高程区(合计约占90.88%),等级4的SOM集中分布在<500 m的高程区(合计约占79.40%),等级5的SOM集中分布在<800 m的高程区(合计约占86.52%),等级6的SOM集中分布在200~1 100 m的高程区(合计约占79.05%)。

2.3.2 2009年广西SOM在不同海拔高度上的分布

从纵向上看,高程Ⅰ级(≤200 m)的SOM主要为等级4(42.73%)和等级5(36.64%),高程Ⅱ级(200~500 m)的SOM主要为等级4(36.97%)和等级5(37.23%),高程Ⅲ级(500~800 m)的SOM主要为等级4(41.96%)、等级5(27.39%)和等级6(21.11%),高程Ⅳ级(800~1 100 m)的SOM主要为等级5(38.94%)、等级4(28.76%)和等级6(27.88%),高程Ⅴ级(>1 100 m)的SOM主要为等级5(55.81%)和等级6(36.05%)。

从横向上看,除等级6外,其余等级SOM均集中

分布在<500 m 的高程区,其中等级1 合计约占85.18%,等级2 合计约占88.88%,等级3 合计约占78.43%,等级4 合计约占73.70%,等级5 合计约占71.51%。等级6 的SOM集中分布在200~800 m 的高程区,合计约占56.33%。

2.3.3 近30年广西SOM在不同海拔高度上的变动

通过对比两期SOM在不同海拔高度上的变化(表5)发现:等级1 和等级2 在所有高程区上的面积均发生不同程度的缩减,等级1 在800~1 100 m 的高程区降幅最大(-23.01%),等级2 在≤200 m 高程区降幅最大(-9.13%);等级3 在500~1 100 m 的高程区上

的面积出现增长,其余为缩减,其在≤200 m 的高程区降幅较大(-12.18%);等级4 除>1 100 m 高程区外,其余高程区上的面积均表现为增长趋势,高程在500~800 m 时增长最快(19.85%);等级5 在所有高程区上的面积均发生不同程度增长,在>1 100 m 的高程区增幅最大(40.70%);等级6 在>200 m 高程区上的面积发生不同程度缩减,在>1 100 m 的高程区内降幅最大(-11.63%)。

2.3.4 分布优势

由图5 可知,1984 年分布指数特征:在I 级高程区,等级2、等级3 和等级4 的SOM 均处于优势位,等

表4 广西SOM含量在不同海拔高程区的分布情况

Table 4 Distribution of SOM content under different elevations in Guangxi

年份	SOM 含量等级 Year SOM content grade	I 级(≤200 m)			II 级(200~500 m)			III 级(500~800 m)			IV 级(800~1 100 m)			V 级(>1 100 m)			总计
		面积 Area/ 10 ⁶ hm ²	比例1 Ratio 1/%	比例2 Ratio 2/%	面积 Area/ 10 ⁶ hm ²	比例1 Ratio 1/%	比例2 Ratio 2/%	面积 Area/ 10 ⁶ hm ²	比例1 Ratio 1/%	比例2 Ratio 2/%	面积 Area/ 10 ⁶ hm ²	比例1 Ratio 1/%	比例2 Ratio 2/%	面积 Area/ 10 ⁶ hm ²	比例1 Ratio 1/%	比例2 Ratio 2/%	面积 Area/ 10 ⁶ hm ²
1984	等级1	0.82	9.24	21.41	1.47	18.87	38.38	0.84	21.11	21.93	0.53	23.45	13.84	0.17	19.77	4.44	3.83
	等级2	0.85	9.58	57.43	0.45	5.78	30.41	0.15	3.77	10.14	0.02	0.88	1.35	0.01	1.16	0.67	1.48
	等级3	2.05	23.11	62.31	0.94	12.07	28.57	0.23	5.78	6.99	0.05	2.21	1.52	0.02	2.33	0.61	3.29
	等级4	3.08	34.73	45.97	2.24	28.75	33.43	0.88	22.11	13.14	0.38	16.82	5.67	0.12	13.95	1.79	6.70
	等级5	1.64	18.49	36.85	1.43	18.36	32.14	0.78	19.60	17.53	0.47	20.80	10.56	0.13	15.12	2.92	4.45
	等级6	0.43	4.85	10.72	1.26	16.17	31.42	1.10	27.63	27.43	0.81	35.84	20.20	0.41	47.67	10.23	4.01
	总计	8.87	100	—	7.79	100	—	3.98	100	—	2.26	100	—	0.86	100	—	23.76
2009	等级1	0.14	1.58	51.85	0.09	1.15	33.33	0.03	0.75	11.11	0.01	0.44	3.71	0	0	0	0.27
	等级2	0.04	0.45	44.44	0.04	0.51	44.44	0.01	0.25	11.12	0	0	0	0	0	0	0.09
	等级3	0.97	10.93	47.55	0.63	8.09	30.88	0.34	8.54	16.67	0.09	3.98	4.41	0.01	1.16	0.49	2.04
	等级4	3.79	42.73	41.88	2.88	36.97	31.82	1.67	41.96	18.46	0.65	28.76	7.18	0.06	6.98	0.66	9.05
	等级5	3.25	36.64	37.79	2.90	37.23	33.72	1.09	27.39	12.68	0.88	38.94	10.23	0.48	55.81	5.58	8.60
	等级6	0.68	7.67	18.33	1.25	16.05	33.69	0.84	21.11	22.64	0.63	27.88	16.98	0.31	36.05	8.36	3.71
	总计	8.87	100	—	7.79	100	—	3.98	100	—	2.26	100	—	0.86	100	—	23.76

注:比例1 表示某SOM 等级面积在其相应的高程级别区中的占比;比例2 表示某高程级别区下的SOM 等级面积在此类SOM 总面积中的占比。

Note: Ratio 1 is the proportion of SOM content grade in the respective elevation level area. Ratio 2 is the proportion of SOM content under specific elevation levels in the total area of this SOM.

表5 近30年广西SOM含量在不同高程下变化情况

Table 5 Changes of SOM content at different elevations over the past 30 years in Guangxi

SOM 含量等级 SOM content grade	I 级(≤200 m)		II 级(200~500 m)		III 级(500~800 m)		IV 级(800~1 100 m)		V 级(>1 100 m)	
	面积变化 The change of area/10 ⁶ hm ²	变动比例 Variation proportion/%	面积变化 The change of area/10 ⁶ hm ²	变动比例 Variation proportion/%	面积变化 The change of area/10 ⁶ hm ²	变动比例 Variation proportion/%	面积变化 The change of area/10 ⁶ hm ²	变动比例 Variation proportion/%	面积变化 The change of area/10 ⁶ hm ²	变动比例 Variation proportion/%
等级1	-0.68	-7.67	-1.38	-17.72	-0.81	-20.35	-0.52	-23.01	-0.17	-19.77
等级2	-0.81	-9.13	-0.41	-5.26	-0.14	-3.52	-0.02	-0.88	-0.01	-1.16
等级3	-1.08	-12.18	-0.31	-3.98	0.11	2.76	0.04	1.77	-0.01	-1.16
等级4	0.71	8.00	0.64	8.22	0.79	19.85	0.27	11.95	-0.06	-6.98
等级5	1.61	18.15	1.47	18.87	0.31	7.79	0.41	18.14	0.35	40.70
等级6	0.25	2.82	-0.01	-0.13	-0.26	-6.53	-0.18	-7.96	-0.10	-11.63

注:变动比例表示某SOM 等级的变动面积占其相应的高程级别区面积的比例。

Note: The variation proportion indicates the proportion of the change area of SOM content grade in the respective elevation level area.

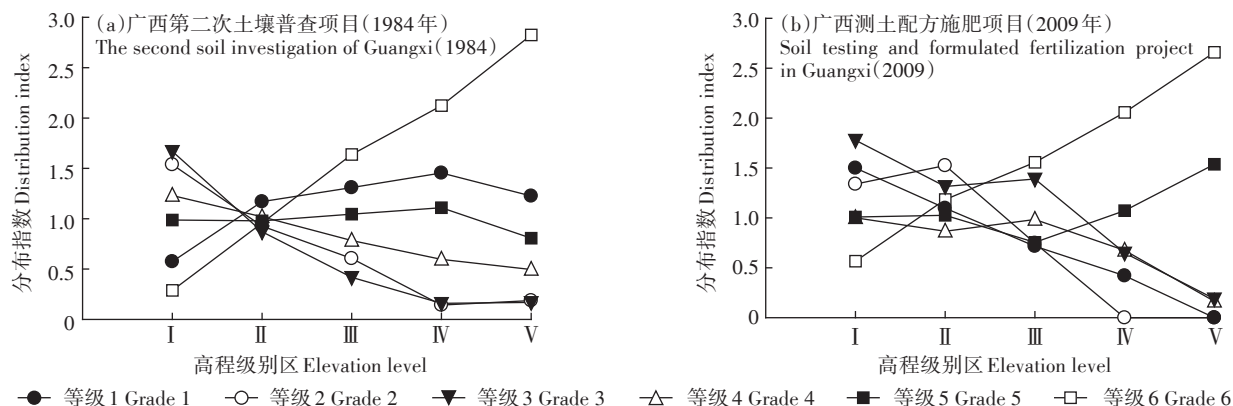


图5 不同时期广西SOM含量在不同高程区分布指数

Figure 5 Distribution index of SOM content grade in different elevation areas in Guangxi in different periods

级3的SOM具有绝对优势;在Ⅱ级高程区,等级1和等级4的SOM处于优势位,等级1的SOM具有绝对优势;在Ⅲ级高程区,等级1和等级6的SOM处于优势位,等级6的SOM具有绝对优势;在Ⅳ级高程区,等级1、等级5和等级6的SOM处于优势位,等级6的SOM具有绝对优势;在Ⅴ级高程区,等级1和等级6的SOM处于优势位,等级6的SOM具有绝对优势。总体上,等级6的SOM分布指数曲线波动最大,说明等级6的SOM对海拔具有较强的选择性,等级1与等级5,等级2、等级3与等级4的SOM分布指数曲线相似,且相对平缓,说明这五个等级SOM对海拔的适应性较强。

2009年分布指数特征:在Ⅰ级高程区,除等级6外,其余等级的SOM均处于优势位,等级3的SOM具有绝对优势;在Ⅱ级高程区,除等级4外,其他等级的SOM均处于优势位,等级2的SOM具有绝对优势;在Ⅲ级高程区,等级3和等级6的SOM处于优势位,等级6的SOM具有绝对优势;在Ⅳ级高程区,等级5和等级6的SOM处于优势位,等级6的SOM具有绝对优势;在Ⅴ级高程区,等级5和等级6的SOM处于优势位,等级6的SOM具有绝对优势。与1984年相比,2009年等级6的SOM分布指数曲线波动仍然最大,等级1、等级2和等级3的SOM分布指数曲线也发生了较大波动。

3 讨论

影响SOM变化的因素很复杂,主要可归结为气候因素、土壤自身的理化性质(如成土母质、地形地貌、海拔)^[22]、人为因素(如农业技术、耕作制度、施肥情况、秸秆还田)^[23]等。

本研究结果显示,桂北、桂西等地(如河池、百色、桂林)SOM含量较高,这主要是因为这些地区土壤多

为黄壤,分布在海拔800~1 400 m的中山地带,温度较低,表层SOM易于富集^[24]。桂中地区土壤类型主要是以红壤为代表的亚热带性土壤,植物生长较迅速,归还土壤的凋落物较多,但由于气候湿润,温度较高,腐殖质分解与转化的速率较快,因此SOM的积累量并不大,这与陈曦等^[25]的研究结果相近。桂南地区土壤以砖红壤为主,主要分布在北海、钦州等冲积平原,这些地区人类活动十分频繁,加剧了SOM的流失,导致SOM含量较低,这与LIU等^[26]的研究结果相近。

李燕丽等^[12]利用遥感技术分析了广西中南部耕地SOM和全氮变化情况,发现近30年广西中南部地区SOM、全氮含量均呈极显著上升趋势。黄文校等^[27]按照桂北、桂中、桂东、桂西、桂西南的地理分布,采集了36个县(市、区)的1 743个土壤样品测定SOM含量,与第二次土壤普查结果相比,SOM平均含量提高的县(市、区)有33个,占91.7%,SOM平均含量为 $31.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。覃迎姿等^[5]在广西南宁市、桂林市、崇左市、百色市、来宾市、河池市、贺州市、北海市、钦州市开展了29~35 a水稻田土壤养分长期定位监测,结果显示监测后期(2014—2018年)SOM平均含量为 $36.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。上述研究结果与本研究SOM含量大幅提升的结果一致,特别是与等级4和等级5的SOM面积大幅增加的结果相吻合。

另外,2009年等级6的SOM面积比1984年减少 $3.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$,减少的区域主要集中在桂西北、桂中和桂东北等区域,这些区域属于石漠化集中连片区域,人地矛盾非常突出,水土流失十分严重。到2000年,广西有30个县的石漠化面积比1930年时增加了4 246 km^2 ,集中分布在广西东北部^[28]。因此可以推测,石漠化加剧、水土流失严重可能是桂西北、桂中和桂东北等区域SOM含量降低的重要原因。

温度是影响SOM分解的关键因素,土壤水分可能是影响SOM分解及其温度敏感性的重要因素^[29]。大量研究表明,温度和水分是通过微生物直接或间接作用对SOM产生重要影响,气候变化主要通过影响植物输入和微生物降解之间的质量平衡来影响SOM分解动力过程^[30]。降水的变化对微生物代谢的影响强烈地制约着SOM的稳定性,而随着降水量的增加,SOM分解速率随之增大,可能导致微生物营养被限制增加^[31]。温度的空间变化常常用来表征当前和较暖条件下温度对SOM储量的影响,SOM分解的内在温度敏感性和表观温度敏感性之间存在复杂的关系,这种关系不仅受SOM的分子化学组成控制,还受SOM分解的临界温度控制^[32]。

有研究表明,近60年广西平均升温速率为每10年上升0.15℃,北部湾海表温度平均每10年上升0.9℃^[33],广西1986—2015年平均气温较1961—1985年平均升高了0.4℃。温度对SOM的影响很复杂,其可通过改变微生物的活性影响SOM的累积。相同肥力水平下,年平均温度越高,作物生物量越大,归还土壤中的凋落物及作物根茬数量也就越多,因此,SOM的输入量会增大。与此同时,年平均温度越高,SOM分解速率也越快。农田土壤中的SOM平衡往往取决于作物和土壤管理措施^[34]。因此,近30年广西地区SOM含量增大是否由年平均温度升高所致还需进一步探究。

海拔高度可通过调节温度和降水间接影响SOM的分布。随着海拔的升高,土壤类型、坡度和植被发生变化,进而影响SOM的储量^[35]。SOM含量与海拔高度显著相关,表现为高海拔地区森林和耕地SOM含量增加^[36]。广西总体地势自西北向东南倾斜,北部地区SOM含量整体上高于中部和南部地区,可见海拔对SOM的累积起到了重要作用,即海拔可通过调节水热配合来影响SOM的累积,从而进一步凸显其空间异质性^[37],这与本研究结果一致。

也有学者认为,在区域尺度上,土壤理化性质可能大于气候因素对SOM动态的影响,土壤pH值是SOM动态变化的关键控制因子,温度和湿度是区域尺度SOM动态变化的次要驱动力^[38]。广西西北部多为喀斯特地貌的石灰性土壤,土壤偏碱性^[15],而中南部的黄壤、红壤呈酸性和强酸性^[39]。广西喀斯特地区土壤相较于红壤地区具有较高的pH值,喀斯特地区SOM含量显著高于红壤地区和水稻土地区^[16],这与本研究结果较为一致。

人为活动,如长期施用化肥,能有效地提高SOM含量,在保障相对充足的养分供应同时,也提高了土壤固碳效率^[40]。另外,秸秆还田可通过增加植物凋落物等方式间接提高SOM含量^[41]。有研究表明,近30年广西化肥施用量提高了6.60倍,秸秆还田面积(自1990年有数据开始计算)提高了2.24倍^[42]。因此,也有学者认为,SOM含量的上升主要是由于耕地长期施肥以及秸秆还田等农业措施增加了土壤有机物质的投入,使得耕地SOM、氮素的投入量大于其消耗量,SOM和氮素得以积累^[43]。总而言之,人为因素在短时期内极可能超过自然因素,成为影响区域SOM变化的主导因素,尤其是在小尺度和微观尺度的研究中体现更为明显^[44]。

4 结论与建议

4.1 结论

(1)广西北部SOM含量整体高于中部和南部地区,SOM含量呈现北高南低的分布格局。

(2)近30年,广西SOM总体含量已大幅提升,各含量等级已由零散交错的不均匀分布演变为相对集中连片分布,各SOM含量等级动态表现为等级2($6\sim 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>等级5($30\sim 40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>等级1($\leq 6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>等级3($10\sim 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>等级4($20\sim 30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>等级6($>40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

(3)近30年,在不同海拔高度上,除等级4和等级6外,其余SOM含量等级的分布指数曲线均发生了较大变动。在 $\leq 200\text{ m}$ 的区域,等级3始终保持着高优势位特征,而等级6对海拔变动保持着较强的选择性,随海拔上升其优势位愈发明显。

4.2 建议

(1)建立农田SOM长期定位监测网络,加强耕地质量长期监测,尤其是土壤理化指标、生物指标、耕地产能等方面的监测,为耕地质量建设提供依据。

(2)继续加大作物秸秆还田力度,有效地增加SOM的含量。

(3)加快转变施肥方式,深入推进科学施肥模式,增加有机肥的施用比例。

(4)在考虑经济效益和可行性的前提下,选取园地等对SOM积累贡献较大的土地利用方式,对于提高土壤肥力具有重要的现实意义。

参考文献:

[1] MINASNY B, MALONE B P, MCBRATNEY A B, et al. Soil carbon 4

- per mille[J]. *Geoderma*, 2017, 292:59–86.
- [2] 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s—2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J]. 地理学报, 2018, 73(11):2150–2167. XU L, YU G R, HE N P. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11):2150–2167.
- [3] 张少良, 张海军, 肖梓良, 等. 东北典型黑土区农田景观多尺度土壤养分时空分异研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(7):86–96. ZHANG S L, ZHANG H J, XIAO Z L, et al. Spatiotemporal heterogeneity of soil nutrients at scales: A review in Mollisol farmland from northeast of China[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2020, 51(7):86–96.
- [4] 江叶枫, 孙凯, 郭熙, 等. 南方红壤区不同侵蚀程度下土壤有机质空间变异的影响因素研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(1):149–160. JIANG Y F, SUN K, GUO X, et al. Spatial variability of organic matter and its influencing factors in red soil with different erosion degrees in South China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1):149–160.
- [5] 覃迎姿, 陀少芳, 梁雄, 等. 基于长期定位监测下的近35年广西耕地质量演变趋势研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(6):1290–1296. QIN Y Z, TUO S F, LIANG X, et al. Evolution trend of cultivated land quality change in Guangxi in the last 35 years based on long-term location monitoring[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(6):1290–1296.
- [6] 王远鹏, 黄晶, 孙钰翔, 等. 近35年红壤稻区土壤肥力时空演变特征——以进贤县为例[J]. 中国农业科学, 2020, 53(16):3294–3306. WANG Y P, HUANG J, SUN Y X, et al. Spatiotemporal variability characteristics of soil fertility in red soil paddy region in the past 35 years: A case study of Jinxian County[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(16):3294–3306.
- [7] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景[J]. 土壤, 2014, 46(1):15–22. QU M K, LI W D, ZHANG C R, et al. Geographically weighted regression and its application prospect in soil and environmental sciences[J]. *Soils*, 2014, 46(1):15–22.
- [8] 罗梅, 郭龙, 张海涛, 等. 基于环境变量的中国土壤有机碳空间分布特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(1):48–59. LUO M, GUO L, ZHANG H T, et al. Characterization of spatial distribution of soil organic carbon in China based on environmental variables[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(1):48–59.
- [9] 黄魏, 韩宗伟, 罗云, 等. 基于地形单元的土壤有机质空间变异研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4):161–167. HUANG W, HAN Z W, LUO Y, et al. Spatial distribution of soil organic matter based on topographic unit[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4):161–167.
- [10] ZENG Y, FANG N F, SHI Z H. Effects of human activities on soil organic carbon redistribution at an agricultural watershed scale on the Chinese loess plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 303:107112.
- [11] 谢玲, 邓晓军, 卢月燕, 等. 广西石漠化地区土地利用空间变化的生态风险研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(8):113–121. XIE L, DENG X J, LU Y Y, et al. Ecological risks caused by land use variations in the rocky desertification mountainous area in Guangxi Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(8):113–121.
- [12] 李燕丽, 潘贤章, 王昌昆, 等. 广西中南部耕地土壤有机质和全氮变化的遥感监测[J]. 生态学报, 2014, 34(18):5283–5291. LI Y L, PAN X Z, WANG C K, et al. Monitoring changes of soil organic matter and total nitrogen in cultivated land in Guangxi by remote sensing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18):5283–5291.
- [13] 章程, 谢运球, 吕勇, 等. 广西弄拉峰丛山区土壤有机质与微量营养元素有效态[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1):63–66. ZHANG C, XIE Y Q, LÜ Y, et al. Soil organic matter and the contents of available micronutrients in soils from karst mountain in Nongla, Guangxi[J]. *Carso-logica Sinica*, 2006, 25(1):63–66.
- [14] 李忠芳, 黄昌治, 潘中田, 等. 广西富川主要脐橙园土壤养分特征及其与有机质间的关联[J]. 南方农业学报, 2015, 46(6):996–1001. LI Z F, HUANG C Z, PAN Z T, et al. Fertility characters and relationship between soil organic matter and nutrients of navel orange orchards in Fuchuan of Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015, 46(6):996–1001.
- [15] 江周, 何寻阳, 韦映雪, 等. 广西西北喀斯特不同植被不同土层的土壤颗粒有机质[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(2):198–205, 252. JIANG Z, HE X Y, WEI Y X, et al. Soil particulate organic matter of different soil horizons with different vegetation in karst areas of northwestern Guangxi[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2020, 46(2):198–205, 252.
- [16] 钟聪, 李小洁, 何园燕, 等. 广西土壤有机质空间变异特征及其影响因素研究[J]. 地理科学, 2020, 40(3):478–485. ZHONG C, LI X J, HE Y Y, et al. Spatial variation of soil organic matter and its influencing factors in Guangxi, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(3):478–485.
- [17] 广西土壤肥料工作站. 广西土壤[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1994. Guangxi Soil and Fertilizer Workstation. *Guangxi soil*[M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 1994.
- [18] 邹润彦, 周宏冀, 郭熙, 等. 环鄱阳湖区农田土壤有机碳影响因素空间分布格局分析及制图研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5):1121–1131. ZOU R Y, ZHOU H J, GUO X, et al. Spatial distribution and mapping of influencing factors of farmland soil organic carbon in the Poyang Lake region[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(5):1121–1131.
- [19] 乔磊, 张吴平, 黄明镜, 等. 基于MGWRK的土壤有机质制图及驱动因素研究[J]. 中国农业科学, 2020, 53(9):1830–1844. QIAO L, ZHANG W P, HUANG M J, et al. Mapping of soil organic matter and its driving factors study based on MGWRK[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(9):1830–1844.
- [20] 温莉, 周廷刚, 刘晓璐, 等. 地形对重庆市土地利用动态变化影响分析[J]. 人民长江, 2019, 50(4):76–80. WEN L, ZHOU T G, LIU X L, et al. Impact analysis of landform for land use dynamic change of Chongqing[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(4):76–80.
- [21] 臧玉珠, 刘彦随, 杨园园. 山区县域土地利用格局变化及其地形梯度效应——以井冈山市为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7):1391–1404. ZANG Y Z, LIU Y S, YANG Y Y. Land use pattern change and its topographic gradient effect in the mountainous areas: A case study of Jinggangshan City[J]. *Journal of Natural Resources*,

- 2019, 34(7):1391-1404.
- [22] 刘书田. 中国农田土壤有机碳时空分布规律及影响因素研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016. LIU S T. The rule of temporal and spatial distribution of soil organic carbon of cropland and its influencing factors in China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016.
- [23] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 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[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 96-104. XIE W Y, ZHOU H P, YANG Z X, et al. The spatial-temporal variation of soil organic matter and its influencing factors in Xiaohu River basin in eastern Loess Plateau, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 96-104.
- [24] 陈曦. 广西土壤有机碳储量估算及与全国部分省区的比较研究[J]. 地理科学, 2014, 34(10): 1247-1253. CHEN X. Estimation of soil organic carbon reserves in Guangxi and comparison study with some provinces in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(10): 1247-1253.
- [25] 陈曦, 彭稳, 曹建华. 典型峰林平原土壤有机碳储量和分布特征研究[J]. 科技通报, 2012, 28(2): 167-173. CHEN X, PENG W, CAO J H. Study on the distribution and reserves features of soil organic carbon in the typical peak-forest plain, southwest China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2012, 28(2): 167-173.
- [26] LIU Y G, LIU C C, WANG S J, et al. Organic carbon storage in four ecosystem types in the Karst region of Southwestern China[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(2): e56443.
- [27] 黄文校, 滕冬建, 聂文光, 等. 广西耕地土壤质量调查与评价[J]. 广西农业科学, 2006, 37(6): 703-706. HUANG W X, TENG D J, NIE W G, et al. Investigation and evaluation on the soil quality of cultivated land in Guangxi[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2006, 37(6): 703-706.
- [28] 韩昭庆, 冉有华, 刘俊秀, 等. 1930s—2000年广西地区石漠化分布的变迁[J]. 地理学报, 2016, 71(3): 390-399. HAN Z Q, RAN Y H, LIU J X, et al. The changing distribution of rocky desertification in the Guangxi region, 1930s to 2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 390-399.
- [29] CHEN Q Y, NIU B, HU Y L, et al. Warming and increased precipitation indirectly affect the composition and turnover of labile-fraction soil organic matter by directly affecting vegetation and microorganisms[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136787.
- [30] LI X J, XIE J S, ZHANG Q F, et al. Substrate availability and soil microbes drive temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization to warming along an elevation gradient in subtropical Asia[J]. *Geoderm*, 2020, 364: 114198.
- [31] CUI Y X, FANG L C, DENG L, et al. Patterns of soil microbial nutrient limitations and their roles in the variation of soil organic carbon across a precipitation gradient in an arid and semi-arid region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 1440-1451.
- [32] DASH P K, BHATTACHARYA P, ROY K S, et al. Environmental constraints' sensitivity of soil organic carbon decomposition to temperature, management practices and climate change[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105644.
- [33] 黄维, 吴炫柯, 刘永裕, 等. 气候变化对广西双季稻种植布局的影响[J]. 中国农业气象, 2020, 41(9): 539-551. HUANG W, WU X K, LIU Y Y, et al. Impact of climate change on layout of double cropping rice in Guangxi[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2020, 41(9): 539-551.
- [34] GHIMIRE R, BISTA P, MACHADO S. Long-term management effects and temperature sensitivity of soil organic carbon in grassland and agricultural soils[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 12151.
- [35] JIMÉNEZ J J, VILLAR L. Mineral controls on soil organic C stabilization in alpine and subalpine soils in the central Pyrenees: Insights from wet oxidation methods, mineral dissolution treatment and radio-carbon dating[J]. *Catena*, 2017, 149: 363-373.
- [36] LEE C H, KIM S C, KIM M S, et al. Changes of soil organic carbon in forest and arable soil under different altitude levels[J]. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 2018, 51(3): 180-188.
- [37] DORTZBACH D, ASSUNÇÃO S A, PEREIRA M G, et al. Fractions of soil organic matter in the vineyards of altitude regions in Santa Catarina[J]. *Semina: Ciências Agrárias*, 2017, 38(4): 1799-1812.
- [38] XU H F, DEMETRIADES A, REIMANN C, et al. Identification of the co-existence of low total organic carbon contents and low pH values in agricultural soil in north-central Europe using hot spot analysis based on GEMAS project data[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 678: 94-104.
- [39] 郑丹, 李少泉, 梁运献. 广西区耕地土壤有效硼含量现状分析与生产对策[J]. 广西农学报, 2015, 30(4): 33-37. ZHENG D, LI S Q, LIANG Y X. The analysis and production strategy for status of available boron content of cultivated soil in Guangxi[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2015, 30(4): 33-37.
- [40] 张明园, 魏燕华, 孔凡磊, 等. 耕作方式对华北农田土壤有机碳储量及温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 203-209. ZHANG M Y, WEI Y H, KONG F L, et al. Effects of tillage practices on soil carbon storage and greenhouse gas emission of farmland in north China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 203-209.
- [41] 刘书田, 窦森, 侯彦林, 等. 中国秸秆还田面积与土壤有机碳含量的关系[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(6): 723-732, 738. LIU S T, DOU S, HOU Y L, et al. Relationship between area of straw returning to the field and content of soil organic carbon in China[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2016, 38(6): 723-732, 738.
- [42] 国家统计局. 农用化肥施用量[EB/OL].[2021-07-10]. <https://data.stats.gov.cn>. National Bureau of Statistics. Agricultural fertilizer application rate[EB/OL].[2021-07-10]. <https://data.stats.gov.cn>.
- [43] 张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 188-194. ZHANG S M, WANG Z M, ZHANG B, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(5): 188-194.
- [44] 王岩松, 李梦迪, 朱连奇. 土壤有机碳库及其影响因素的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(32): 123-131. WANG Y S, LI M D, ZHU L Q. Research process of soil organic carbon storage and its influencing factors[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(32): 123-131.