

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2019.03.011

雷州半岛土壤碳储量及其有机碳时空变化规律

贾黎黎, 朱鑫, 赵艺, 李婷婷

JIA Li-Li, ZHU Xin, ZHAO Yi, LI Ting-Ting

(广东省地质调查院, 广州 510080)

(Guangdong Geological Survey, Guangzhou 510080, Guangdong, China)

摘要:区域土壤有机碳调查在全球土壤碳循环的研究中具有重要作用。通过开展土地质量地球化学调查,获得了雷州半岛土壤全碳和有机碳数据。土壤碳储量计算结果显示雷州半岛土壤有机碳总体分布特征如下:表层(0~0.2 m)土壤有机碳储量为 4.41×10^7 t,碳密度为 3.39 kg/m^2 ;中层(0~1.0 m)土壤有机碳储量为 1.57×10^8 t,碳密度为 12.08 kg/m^2 ;深层(0~1.8 m)土壤有机碳储量为 2.31×10^8 t,碳密度为 17.74 kg/m^2 。雷州半岛土壤碳密度略高于全国平均水平,与第二次土壤普查比较,33年间雷州半岛表层土壤有机碳密度和有机碳储量有所增加,增加幅度为26.81%,其增加趋势及强度在空间上具有较大差异,其中农用地和林地这两种利用类型土壤有机碳的改变是影响区域土壤有机碳储量的主要因素。

关键词:土地质量地球化学调查;土壤碳储量;有机碳;时空变化规律;雷州半岛

中图分类号:P595;S153.6

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2019)03-0373-07

Jia L L, Zhu X, Zhao Y and Li T T. Spatial and Temporal Variation of Soil Carbon Storage and Organic Carbon Content in Leizhou Peninsula, Guangdong Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2019, 35(3): 373-379.

Abstract: Regional soil organic carbon survey plays an important role in the study of global soil carbon cycle. The total carbon and organic carbon content of soil in Leizhou Peninsula were obtained by geochemical survey of land quality. The results of soil carbon storage calculation show that the total distribution of soil organic carbon in Leizhou Peninsula is as follows: surface (0-0.2 m) soil organic carbon storage is 4.41×10^7 ton, carbon density is 3.39 kg/m^2 ; middle (0-1.0 m) soil organic carbon storage is 1.57×10^8 ton, carbon density is 12.08 kg/m^2 ; deep (0-1.8 m) soil organic carbon storage is 2.31×10^8 ton, carbon density is 17.74 kg/m^2 . The soil carbon density in Leizhou Peninsula is slightly higher than the national average level. Compared with the second National Soil Survey, the organic carbon density and storage in the surface soil of Leizhou Peninsula increased by 26.81% in 33 years, and their increasing trend and intensity are quite different in space. The change of soil organic carbon in agricultural land and forest land is the main factor affecting the soil organic carbon storage.

Key words: geochemical survey of land quality; soil carbon reserve; organic carbon; spatial and temporal change law; Leizhou Peninsula

收稿日期:2019-5-1;修回日期:2019-6-30;责任编辑:董好刚

基金项目:中国地质调查局“粤桂湘鄂1:25万土地质量地球化学调查”二级项目之“珠江下游基本农田土地质量地球化学调查”子项目(DD20160327-04)

第一作者:贾黎黎(1989—),女,硕士,工程师,主要从事地球化学勘查、农业地质调查与研究工作,E-mail:lichia@126.com

土壤碳库是陆地生态系统碳库的主体,同时也是陆地生态系统最大且周转时间最慢的碳库,由有机碳库和无机碳库组成,土壤无机碳库所占比例较小,土壤有机碳的积累和分解的速率决定着土壤碳库的储量;土壤有机碳也是土壤肥力的重要组成部分^[1]。因此,无论从研究地球各圈层的物质循环以保护生态环境,还是保护珍贵的土壤资源以维护农业经济的可持续发展,都需对土壤有机碳的储量和分布特征进行详细研究^[2]。目前对全球土壤有机碳储量的计算一般是基于植被类型、土壤类型、生命带或模型法,不同研究者所用的各种统计方法并无本质不同,但由于资料来源不同,所得结果存在一定的差异^[3-7]。利用多目标区域地球化学调查数据定量计算土壤碳储量及估算土壤碳的变化,分析雷州半岛土壤碳储量的空间格局及其变化,具有重要的理论意义和现实意义。

1 研究区概况

雷州半岛位于中国大陆最南端、广东省西南部,东濒南海,南隔琼州海峡与海南省相望,西临北部湾,地处广东、广西、海南三省区的交汇地带,三面环海,区内海陆空交通便利,交通基本形成立体网络。黎湛铁路、三茂铁路、粤海铁路和 207、325 国道贯穿全境。

雷州半岛在大地构造上属华南褶皱系,涉及范围横跨云开大山隆起及粤中凹陷两个构造单元,按板块构造观点,属华夏板块之云开地块和粤中地块。区内大部分由半岛和岛屿组成,多为海拔 100 m 以下的台阶地。全市总面积中,平原占 66.0%,丘陵占 30.6%,山区占 3.4%。调查区地处北回归线以南的低纬度区,属热带和亚热带季风气候。四季温度适宜,基本不受冬季寒潮影响,年平均气温 23℃。4-9 月是多雨季节,10-3 月雨水较少,年平均降雨量 1 396 ~ 1 723 mm。影响该区的主要气象灾害有:台风、暴雨、雷电、高温、浓雾、干旱等。

2 样品采集与分析

根据《多目标区域地球化学调查规范 1:250000》(DZ/T 0258-2014)^[8],项目组在工作区内按照 1:25 万精度采用双层网格化采样布局,系统采

集土壤表层(0 ~ 20 cm)和深层(150 cm 以下)样品。土壤测量采样密度分别为:表层样品为 1 ~ 2 个点/km²,深层样品为 1 个点/4 km²。样品分析密度,表层样品按照 1 个点/4 km² 组合分析,深层样品按照 1 个点/16 km² 组合分析。广东省地质实验测试中心承担土壤样品分析工作,采用以 X-射线荧光光谱仪、等离子体质谱仪和等离子发射光谱仪等大型精密分析仪器为主体的分析方法,分析样品中 71 项元素指标。其中有机碳、全碳分别采用氧化热解-电位法和氧化燃烧-气相色谱法分析。该分析配套方案为目前我国多目标区化样品分析最佳分析配套方案之一,各种元素分析方法的质量参数包括方法检出限、方法准确度和方法精密度均达到规范规定的要求,完全可以满足本测区样品分析要求,保证了分析数据的准确性。

3 土壤碳储量计算方法

土壤碳密度是指单位面积内(km²)一定深度土体中碳元素(包括有机碳和无机碳)的储量(质量),单位一般为 kg/m²、t/km²。土壤碳储量是指一定面积内一定深度土壤的碳储量(质量),一般用质量单位表示,常用单位有 t、Gt、Pg 等。分别计算表层(0-20 cm)、中层(0-100 cm)、深层(0-180 cm)、底层(150-180 cm)等不同层位土壤全碳、有机碳、无机碳储量及密度。具体计算方法如下^[8]。

3.1 土壤碳密度

土壤碳密度计算公式:

$$SCD = D \times \rho \times C \div 10$$

式中:SCD 代表土壤碳密度,单位为千克每平方米(kg/m²);D 为土壤深度,单位为厘米(cm); ρ 为土壤容量,单位为克每立方厘米(g/cm³);C 为土壤碳含量(%);10 为单位换算系数。

土壤碳密度计算深度不同,土壤有机碳和无机碳含量取值不同:

D=20 cm 时,C 为表层土壤碳含量(无机碳和有机碳);

D=100 cm 时,计算公式如下:

有机碳含量:

TOC=

$$\frac{(TOC_{表} - TOC_{深}) \cdot [(d_1 - 100) + 100 \cdot (\ln 100 - \ln d_2)]}{100(\ln d_1 - \ln d_2)} + TOC_{深}$$

无机碳含量:

$$TIC=\frac{(TIC_{表}-TIC_{深})\cdot (d_2-100)}{100(d_2-d_1)}+TIC_{深}$$

D=180 cm 时,计算公式:

有机碳含量:

$$TOC=\frac{(TOC_{表}-TOC_{深})\cdot (d_1-d_2)}{d_2(\ln d_1-\ln d_2)}+TOC_{深}$$

无机碳含量:

$$TIC=\frac{(TIC_{表}+TIC_{深})}{2}$$

式中:TOC_表和 TIC_表为表层土壤有机碳和无机碳含量(%);TOC_深和 TIC_深为深层土壤有机碳和无机碳含量 (%);d₁ 等于 10;d₂ 为深层土壤实际采样深度,单位为厘米(cm)。

3.2 单位土壤碳量

单位土壤碳量是指以 4 km² 为单位的范围内,一定深度土体中的碳量。

单位土壤碳量计算公式如下:

$$USCA=4\times 10^3\times SCD$$

式中:USCA 为单位土壤碳量,单位为吨(t);4×10³ 为换算系数;SCD 为土壤碳密度,单位为千克每平方米(kg/m²)。

3.3 土壤碳储量

土壤碳储量计算公式:

$$SCR=\sum_{i=1}^nUSCA_i$$

式中:SCR 为土壤碳储量,单位为吨(t);USCA 为单位碳储量,单位为吨(t);n 为土壤碳储量统计范围内单位土壤碳量的加和个数。

4 结果

4.1 不同深度碳储量及区域分布特征

按照上述不同层位土壤碳储量计算方法,分别

计算了调查区表层(0-20 cm)、中层(0-100 cm)、底层(150-180 cm)、深层(0-180 cm)等不同深度土壤总有机碳(TOC)、总碳(TC)和总无机碳(TIC)量(表 1)。

由表 1 可知,调查区内表层土壤(0-20 cm)全碳密度平均值为 3.65 kg/m², 底层土壤碳密度平均值为 2.36 kg/m², 土壤表层碳密度大于底层土壤碳密度,是底层土壤碳密度的 1.55 倍。表层土壤碳储量同样是底层土壤碳储量的 1.55 倍, 远大于底层土壤碳储量。

调查区内表层、中层、深层土壤碳储量分别为 4.75×10⁷ t、1.74×10⁸ t、2.61×10⁸ t, 其中有机碳分别为 4.41×10⁷ t、1.57×10⁸ t、2.31×10⁸ t, 占相应层位总碳储量的比例分别为 92.79%、90.34%和 88.32%, 各层位有机碳占碳总储量的比例较高。无机碳储量远小于有机碳储量, 分别为 3.42×10⁶ t、1.68×10⁷ t、3.05×10⁷ t, 占相应层位总碳储量的比例分别为 7.21%、9.66%、11.68%。一般认为,土壤碳库主要是由土壤有机碳库贡献的,而土壤无机碳库对整个土壤碳库的贡献是极少的,可以忽略的。

经过对比,雷州半岛土壤有机碳密度高于珠三角、阳江-茂名地区^[9-10](表 1)。由于广东省地形起伏大,地势北高南低,全境大致为向海倾降的斜坡。调查区位于广东省最南端,三面环海,气候、植被、土壤类型、成土母质、pH 等理化性质等与珠三角、阳江-茂名地区均有不同,特别是雷州半岛的土壤容重相对珠三角、阳江-茂名地区要大,历史上植被更为繁茂,由此雷州半岛的土壤有机碳密度也更大。

与我国其它地区土壤相比 (表 1), 调查区表层、中层、深层土壤有机碳密度均略高于全国平均水平,但低于四川、湖南等地区,高于河北地区^[12]。陈雅敏、王绍强等^[13]研究发现,四川的土壤有机质含量全国最高,主要是由于其地处湿润地区,自然

表 1 雷州半岛不同层土壤各种形式的元素量

Table 1 Elements composition in different depth of soil in Leizhou Peninsula, Guangdong Province

深度 (cm)	总量(t)			本区碳密度(kg/m²)			其他地区有机碳密度(kg/m²)					
	TC	TOC	TIC	TC 密度	TOC 密度	TIC 密度	四川 ^[11]	湖南 ^[11]	珠三角 ^[9]	阳茂 ^[10]	河北 ^[11]	全国平均 ^[11]
表层	4.75E+07	4.41E+07	3.42E+06	3.65	3.39	0.26	4.22	3.97	2.27	2.39	2.24	3.19
中层	1.74E+08	1.57E+08	1.68E+07	13.37	12.08	1.29	17.58	12.82	8.67	8.59	7.34	11.65
底层	3.07E+07	2.57E+07	5.04E+06	2.36	1.97	0.38			1.16	1.5		
深层	2.61E+08	2.31E+08	3.05E+07	20.09	17.74	2.35	24.81	18.17	13.72	13.1	10.52	15.34

注:表层深度为 0-20 cm,中层为 0-100 cm,深层为 0-180 cm,底层为 150-180 cm.

植被生长良好,生物量大,且温度相对较低,因此有利于有机质的积累;广东省内虽然自然环境条件也很优越,但温度相对比四川、湖南等地要高,有机质易于分解,因此土壤有机质含量要低于四川、湖南;而河北处于干旱和半干旱区,降雨量少且植被稀

疏,土壤有机质输入量少,所以土壤有机碳密度较低^[14-15]。

从表层、中层、深层土壤的碳密度空间分布可见(图1),各层位总碳和有机碳区域分布较为相似。表层土壤有机碳与全碳密度高值区大片分布在

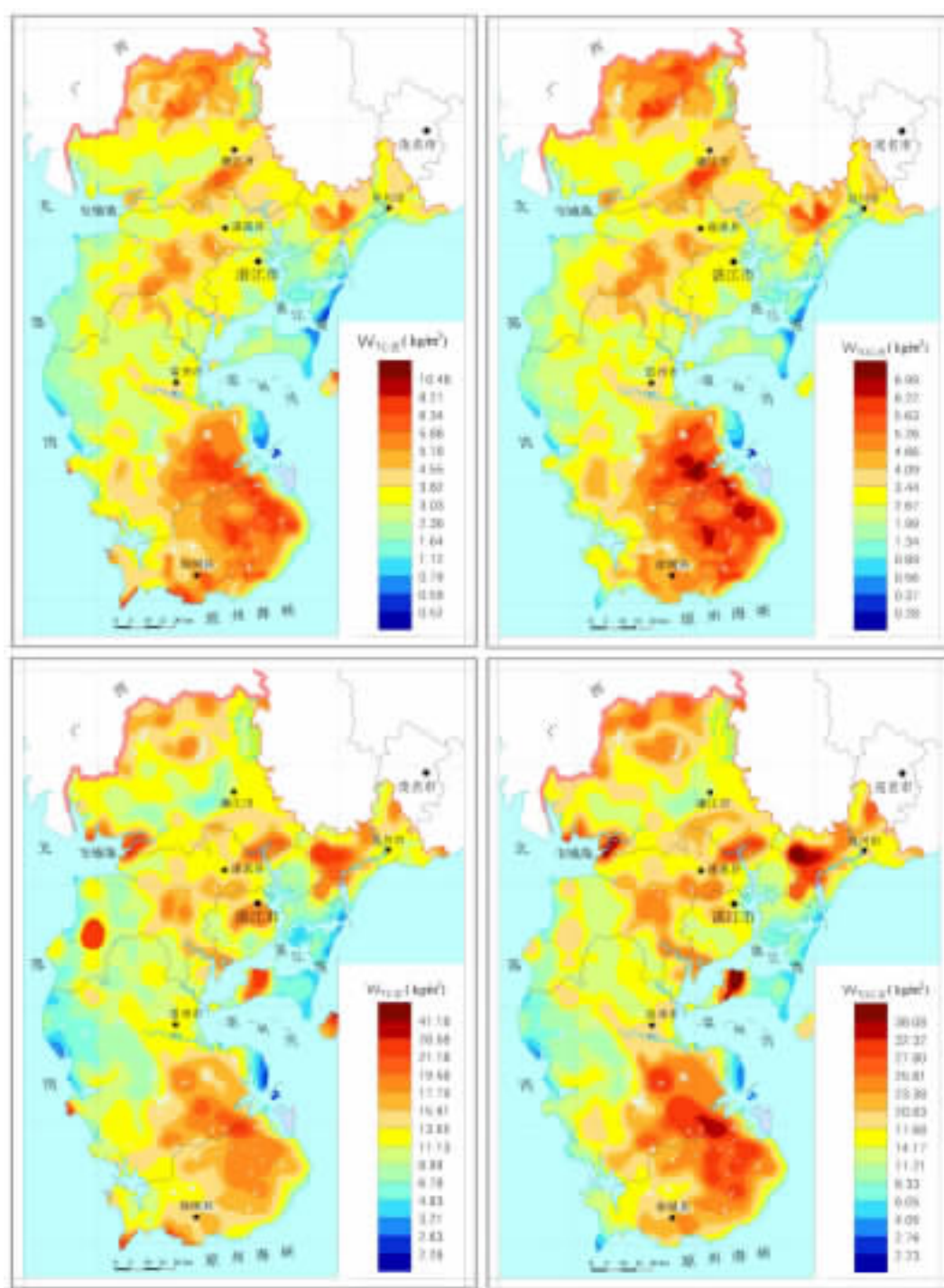


图1 雷州半岛表层、深层土壤有机碳和总碳密度空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of organic carbon content and total carbon density in surface and deep soil in Leizhou Peninsula, Guangdong Province

调查区东南部徐闻县附近,其他高值区分布于调查区中北部遂溪县岭北镇、廉江市和寮镇等地区。

深层土壤有机碳与全碳密度高值区主要分布在调查区的南部(大片分布)及调查区中北部廉江市良垌镇、遂溪县岭北镇和湛江市湖光镇一带,在调查区的西部沿海地带碳密度值较低。极高值点主要位于廉江市营仔镇以南、吴川市塘缀镇等河流入海地区。

中层土壤有机碳和全碳密度高值区分布与深层土壤有机碳和全碳密度高值区分布十分相似。但其高值区的分布范围比深层有所减小,湛江市东山镇、湖光镇、龙头镇和吴川市吴阳镇一带地区有机碳密度有所降低。

4.2 土壤有机碳不同时间变化规律

利用多目标区域地球化学调查实测土壤有机碳密度与 1985 年广东省第二次土壤普查取得的土壤有机碳密度进行对比^[16],分析 33 年来,调查区在高强度人类活动改造下土壤有机碳的变化情况(表 2)。其中第二次土壤普查数据依据《广东土壤》第二次土壤普查数据制作的耕层土壤有机质含量分布图(1:280 万),对应多目标区域地球化学调查采样网格提取土壤有机质平均含量值,除以转换系数 1.724 换算为有机碳含量值。

对比结果表明,33 年来,雷州半岛土壤有机质含量略有增加。1985 年调查区表层土壤有机质平均含量为 1.62%,2018 年表层土壤有机质平均含量为 2.11%,总体增加幅度较大。从空间变化上来看,增加幅度较大地区主要分布在调查区中北部丘陵地带,与北部花岗岩、中部玄武岩出露范围相似,其他地区增加的趋势及强度在空间上具有较大差异

(图 2),其高值点主要出现在廉州市良垌镇以西、廉州市塘蓬镇以东、吴川市兰石镇、吴川市吴阳镇、雷州市北和镇以东、遂溪县河头镇、徐闻县海安镇。其中,在廉州市良垌镇以西、廉州市塘蓬镇以东,增加幅度最大,碳密度增加量均在 2.83 kg/m² 以上。与此同时,土壤有机碳储量减少地区主要分布在徐闻县和安镇、徐闻县曲界镇、遂溪县下六镇以东等地区,其中以徐闻县和安镇周边降低趋势尤为显著。

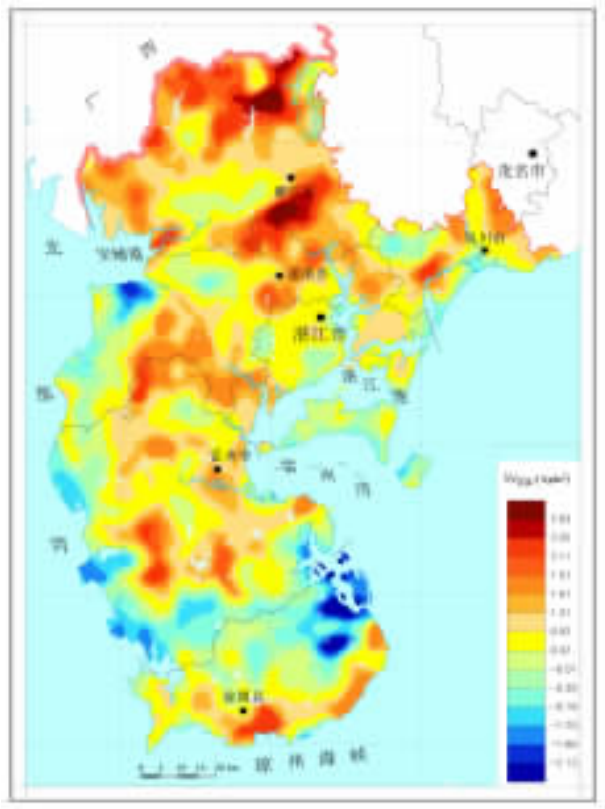


图2 雷州半岛表层土壤有机碳密度变化量空间分布图

Fig. 2 Spatial variation of organic carbon content of surface soil in Leizhou Peninsula, Guangdong Province

表2 雷州半岛不同时期土地利用类型表层土壤有机碳储量分布对比

Table 2 Organic carbon storage in surface soil comparison among different use-type lands in 1985 and 2018 in Leizhou Peninsula, Guangdong Province

土地利用类型	面积 (km ²)	地球化学调查 (2018 年)		第二次普查 (1985 年) ^[15]		变化趋势		
		总有机碳 储量(t)	碳密度/ (kg/m ²)	总有机碳 储量(t)	碳密度/ (kg/m ²)	有机碳 储量(t)	碳密度/ (kg/m ²)	比例(%)
农用地	7932	2.94E+07	3.56	2.27E+07	2.75	6.25E+06	0.76	27.55
城镇用地	77	2.17E+05	2.72	1.94E+05	2.42	1.31E+04	0.16	6.76
林地	3736	1.31E+07	3.39	1.02E+07	2.64	3.04E+06	0.79	29.72
水域	745	1.27E+06	1.64	1.57E+06	2.02	-4.76E+03	-0.01	-0.30
汇总	12940	4.40E+07	3.39	3.47E+07	2.67	9.30E+06	0.72	26.81

东西两侧沿海地带同样存在较大面积弱降低区域。

不同利用类型土壤有机碳密度统计结果见表2。与1985年土壤有机碳密度相比,33年间雷州半岛土壤有机碳密度和有机碳储量有所增加,增加幅度为26.81%。农用地、城镇用地、林地有机碳密度均有所增加,有机碳密度分别增加 0.76 kg/m^2 、 0.16 kg/m^2 、 0.79 kg/m^2 ,增加幅度分别为27.55%、6.76%、29.72%。其中,林地有机碳密度增加幅度最大,达29.72%,而滩涂土壤有机碳密度降低 0.01 kg/m^2 ,降低幅度为0.3%,降幅较小,可能与部分样品含砂较多有关。调查区内林地和农用地分布面积较大,农用地和林地有机碳储量分别增加 $6.25\times 10^6\text{ t}$ 和 $3.04\times 10^6\text{ t}$,占全区有机碳储量变化量的比例分别为27.55%和29.72%。

5 讨论

5.1 分布特征及成因分析

(1) 表层土壤有机碳高值区的分布与花岗岩、玄武岩出露地区较为吻合。从地形来看,有机碳高值区主要分布在丘陵和缓坡地带。高值区大片分布的徐闻地区在辛亥革命之前,全境几乎全被原始森林覆盖,对有机碳的累计起到了相当大的作用。同时,深层和中层土壤有机碳与全碳密度极高值点主要位于河流入海地区,这是由于地表径流的侵蚀冲刷作用,有机碳进入河流并在沿岸富集。另外,深层土壤有机碳密度在东山岛东部出现高值点,而此地表层有机碳密度较低,说明在湛江港内富含动植物腐殖质的淤泥较厚,而表层有机碳受地表淋滤作用更易流失。有机碳的这种分布特征说明,调查区内,植被覆盖对表层土壤有机质的贡献较大,而河流径流作用对中层和深层土壤有机碳贡献较大。

(2) 调查区东南部有机碳密度在全区范围内属于较高水平,同时也是有机碳密度降幅较大地区。究其原因,徐闻县在五十年代砍伐原始森林,大面积种植橡胶树,大力发展农场,充分利用土地,导致土壤中有有机质逐渐降低。由此说明,调查区东南部属于有机碳密度高值区,同时又属于有机碳流失地区,应该引起重视。

(3) 调查区内林地和农用地分布面积较大,且农用地和林地有机碳储量占全区有机碳储量变化量的比例分别为27.55%和29.72%,可能是由于湛

江市退耕还林政策实施以及土壤长期使用有机肥,促进了土壤总有机碳的累积,这两种利用类型土壤有机碳的改变是影响区域土壤有机碳储量的主要因素。

5.2 后续研究建议

本研究以大量高精度数据为依托,对雷州半岛地区土壤碳储量进行了估算,并分析了33年来该地区土壤有机碳变化规律和影响因素,研究成果为这一地区土壤碳循环研究提供了翔实的依据,具有重要的科学价值和意义。今后,对于土壤有机碳库的动态变化过程与机理等方面的研究,在定性定量上向着更加准确的方向发展,为探讨减少人为碳排放、增加土壤碳储量、延长碳的驻留时间等问题打下坚实的理论基础。

然而,区域尺度上的土壤碳储量研究仍然有大量的问题急需解决,例如土壤容重方面,缺乏标准化的观测方法。目前对于土壤容重和土壤有机碳的相关关系的可靠性及其应用范围探讨的较少,通过这种方式难以取得准确的结果,大大增加了预测土壤有机碳储量分布和动态趋势的不确定性,这还有待于进一步的研究。

6 结论

本文在土地质量地球化学调查基础上,通过分析得出以下结论:

(1) 对比全国其他地区,雷州半岛土壤碳密度略高于全国平均水平。与第二次土壤普查比较,33年期间雷州半岛表层土壤有机碳密度和有机碳储量有所增加,增加幅度为26.81%。

(2) 雷州半岛土壤碳密度增加趋势及强度在空间上具有较大差异,农用地和林地这两种利用类型土壤有机碳的改变是影响区域土壤有机碳储量的主要因素。

参考文献:

- [1] 张文娟,王绍强,常华灯,遥感在土壤碳储量估算中的应用[J].地理科学进展,2005,24(3):119-125.
- [2] 苏永中,赵哈林.土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J].中国沙漠,2002,22(3):220-228.
- [3] 解宪丽,孙波,周慧珍,李忠佩,李安波.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J].土壤学报,2004,41(1):35-43.

- [4] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones [J]. *Nature*, 1982, 298(8):156-159.
- [5] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil [J]. *Nature*, 1990, 348(15): 232-234.
- [6] Eswaran H, Van den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57:192-194.
- [7] Titlynova A A, Bulavko G I, Kudryashova S Y, Naumov A V, Smirnov V V, Tanasienko A A. The reserves and losses of organic carbon in the soils of siberia [J]. *Eurasian Soil Science*, 1998, 31(1):45-53.
- [8] 中国地质调查局. DZ/T0258-2014. 多目标区域地球化学调查规范(1:250000)[S].2014.
- [9] 朱 鑫,珠江三角洲经济区土壤碳储量及有机碳时空变化规律研究[J].*华南地质与矿产*,2014,30(2):176-185.
- [10] 李婷婷,贾黎黎,黎旭荣,罗思亮.广东阳江—茂名地区土壤碳储量及其时空变化规律 [J]. *华南地质与矿产*, 2017,33(1):94-99.
- [11] 奚小环,杨忠芳,廖启林,张建新,白荣杰,张秀芝,金立新,王会峰,李 敏,夏雪齐.中国典型地区土壤碳储量研究[J].*第四纪研究*,2010,30(3):573-583.
- [12] 奚小环,张建新,廖启林,陈德友,白荣杰,黄增芳.多目标区域地球化学调查与土壤碳储量问题——以江苏、湖南、四川、吉林、内蒙古为例[J].*第四纪研究*,2008,28(1):58-67.
- [13] 陈雅敏,冯述青,杨天翔,张韦倩,王寿兵.我国不同类型土壤有机质含量的统计学特征 [J].*复旦学报(自然科学版)*,2013,53(2):220-224.
- [14] 王绍强,周成虎,李克让,朱松丽,黄芳红.中国土壤有机碳库及空间分布特征分析 [J]. *地理学报*,2000,55(5): 533-544.
- [15] 许文强,陈 曦,罗格平,王 涛,蔺 卿.干旱区三工河流域土壤有机碳储量及空间分布特征 [J]. *自然资源学报*, 2009,24(10):1740-1747.
- [16] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤[M].北京:科学出版社, 1993.