

# 武陵山脉龙山段土壤有机碳密度分布及控制机制

邓飘云<sup>1</sup>, 陈建国<sup>2,3</sup>, 闫文德<sup>2,3</sup>

(1. 贵州森林资源资产评估有限公司, 贵州 贵阳 550003; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410004; 3. 会同杉木生态系统国家野外科学研究所, 湖南 会同 418307)

**摘要:**为了探究山地地貌背景下土壤有机碳密度的分布规律及影响因子,以湘西北龙山县土壤有机碳(0~100 cm 土层)为研究对象,对其密度及储量进行了研究。运用 ArcGIS 空间插值法估算了该县土壤有机碳密度的空间分布格局并利用 Surfer 软件绘制有机碳密度地形空间分布图。结果表明:龙山县 0~100 cm 土层土壤有机碳储量为  $30\,537.07 \times 10^9$  g, 平均有机碳密度达  $10.61 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 略高于全国平均水平 ( $9.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )。研究区有机碳密度以位于境内两条山脉西北坡的山原最高, 龙山主脉山脊、紧接河谷的中低山山地有机碳密度次之, 河谷开坝地与山地之间的缓坡地带土壤有机碳密度再次, 龙山主脉两侧河谷开坝地带最低。山脉东西坡水热条件的差异是东西坡土壤有机碳密度差异的根本原因; 人为因素的影响导致旱耕地土壤有机碳密度低于山地土壤。

**关键词:**土壤有机碳密度; 湘西北; 空间分布; 山地

**中图分类号:** S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2767(2017)08-0035-05 DOI: 10.11942/j.issn1002-2767.2017.08.0035

土壤碳包括土壤无机碳和有机碳, 土壤无机碳 (Soil Inorganic Carbon, SIC) 相对稳定; 而土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 以有机质的形式贮存于土壤中, 稳定性低于无机碳, 它一方面影响着土壤物理、化学和生物性状<sup>[1-2]</sup>, 另一方面因土壤有机碳库数量大 (全球约有  $1.5 \times 10^{18}$  g<sup>[3]</sup>, 是大气碳库的 2 倍<sup>[4]</sup>, 陆地植被的 2~3 倍<sup>[5-6]</sup>), 它的变动制约着全球气候的变化。土壤有机碳密度是指单位面积土壤贮存有机碳的数量, 不同地方土壤有机碳密度的变化规律能表征土壤有机碳的分布规律, 因而研究土壤有机碳密度对充分合理利用土地资源、缓解全球气候变化具有重要意义。本文以湘西北山区龙山县为例, 探究山地地貌背景下土壤有机碳密度的分布规律及影响因子, 为中南部山区资源保护和利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

龙山县位于湘、鄂、渝三省(市)边境, 湖南省湘西自治州西北边陲,  $N28^{\circ}46' \sim 29^{\circ}38'$ 、 $E109^{\circ}13' \sim 109^{\circ}46'$ , 处于云贵高原之东, 武陵山系

东南部, 总面积  $299\,767.4 \text{ hm}^2$ 。境内最高海拔  $1\,736.5 \text{ m}$ , 最低  $218.2 \text{ m}$ , 属于中亚热带山地季风气候, 多年平均气温  $10.4 \sim 17.0^{\circ}\text{C}$ ; 多年平均降水量为  $1\,046.2 \sim 1\,740.0 \text{ mm}$ , 区内降雨量随海拔升高而增多。

### 1.2 数据来源

本研究土壤数据源自湖南省龙山县第 2 次土壤普查资料, 以土种为单位, 按照土壤发生层分别采集 227 个典型剖面的土壤类型、土壤有机质含量、土层厚度、容重、砾石含量等数据。地理信息数据源自 Google earth, 利用 Google earth 软件采集相关土壤剖面所在位置的经纬度、海拔高程。气候数据采自于《湖南省龙山县农业区划报告集·不同地区气候资源简要数据表》, 从中采集各典型剖面所在位置的年平均气温和年总降水量数据。

### 1.3 方法

1.3.1 图的绘制 采用的基础图件主要包括龙山县行政区划图、龙山县土壤有机碳密度空间分布图、龙山县地形图。土壤有机碳密度空间分布图是用 ArcGIS 软件制作的数字矢量图形, 利用 Kriging 最优内插法对整个区域进行插值, 将插值后的有机碳密度分布图与行政区划图叠加, 并进行空间统计, 得到龙山县有机碳密度的空间分布图。地形图的绘制是利用 Google earth 软件采集对应土壤剖面所在位置的经纬度、海拔高程数据, 然后将该数据导入 Surfer 软件获得等高线地形图。最后, 在 ArcGIS 系统中将等高线地形图

收稿日期: 2017-06-01

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项资助项目(2014 04316); 湖南省科技重点研发计划(农业支撑领域)资助项目(2015NK3025); 湖南省优势重点学科资助项目

第一作者简介: 邓飘云(1989-), 女, 湖南省邵阳市人, 硕士, 助理工程师, 从事森林资源资产评估工作。E-mail: dengpiaoyun@163.com。

与有机碳密度空间分布图进行空间叠加,得到龙山县土壤有机碳密度地形空间分布图。

1.3.2 土壤剖面有机碳密度、有机碳储量的估算方法 有机碳含量由有机质含量除以 1.732 计算得出。部分缺少土壤容重数据的土壤剖面,其土壤剖面容重数据根据《湖南土壤》<sup>[7]</sup>提出的不同土壤类型土壤容重与有机质含量的经验公式进行估算。

本研究中 SOC 密度( $D$ )和储量( $P$ )计算公式如下:

$$D_j = \sum SOC_i \cdot h_i \cdot w_i \cdot 1\,000 \cdot (1 - \delta \%) \tag{1}$$

$$P = \sum S_j \cdot D_j \cdot 1\,000 \tag{2}$$

(1)式中: $D_i$ 为*i*土种土壤有机碳密度(kg·m<sup>-2</sup>),SOC<sub>*i*</sub>为土壤剖面*i*土层土壤有机碳含量(%), $w_i$ 为*i*土层土壤容重(t·m<sup>-3</sup>), $h_i$ 为土壤剖面*i*土层厚度(m),*i*为土壤剖面土层序号, $\delta\%$ 为第*i*层中土壤砾石(粒径>2 mm)的体积分数;(2)式中:

表 1 龙山县不同土壤类型、土壤利用类型、海拔高度和土壤剖面有机碳密度及储量

Table 1 Soil organic carbon density and storage in soil profiles of 0~100 cm from different types of soil, patterns of soil use, and altitudes in Longshan county							
项目 Items		面积/hm <sup>2</sup> Area	面积比重/% Percentage of total area	有机碳密度/ (kg·m <sup>-2</sup> ) Density of organic carbon	变异系 数/% CV	有机碳储 量/×10 <sup>9</sup> g Storage of organic carbon	有机碳储 量比重/% Percentage of storage of SOC
土壤类型 Types of soil	水稻土	24558.3	8.2	12.87 ab	41.6	3160.66	10.35
	红壤	51743.6	17.3	10.72 ab	49.3	5546.91	18.16
	黄壤	85565.7	28.5	11.27 ab	48.1	9643.26	31.58
	黄棕壤	40224.9	13.4	13.17 ab	35.9	5297.62	17.35
	石灰土	94142.8	31.4	7.10 ab	44.4	6684.14	21.89
	紫色土	3363.8	1.1	5.58 b	39.4	187.70	0.61
	潮土	137.3	4.5×10 <sup>-4</sup>	8.76 ab	52.6	12.03	0.04
土地利用类型 Patterns of soil use	菜园土	30.9	1.0×10 <sup>-4</sup>	15.40 a	5.9	4.75	0.02
	水田	24558.3	8.2	12.87 a	41.6	3160.66	10.35
	旱耕地	33605.1	11.2	11.15 b	51.4	3746.96	11.72
海拔高度 Altitudes	山地	241604.0	80.6	10.37 b	45.1	25054.33	78.39
	<500 m	66710.8	22.3	10.51 a	43.7	7011.31	18.80
	500~800 m	148414.1	49.5	12.33 a	45.8	18299.46	49.07
	800~1000 m	46584.9	15.5	13.61 a	40.9	6340.21	17.00
	>1000 m	38057.6	12.7	14.83 a	35.5	5643.94	15.13

不同小写字母表示在 0.05 水平存在显著性差异。下同。  
Different lowercase mean significant difference at 0.05 level. The same below.

该县水稻土主要分布于海拔 1 000 m 以下的山间盆地及酉水河谷地带, SOC 密度为

$P$  为某区域内土壤碳储量(g), $S_j$  为某区域内  $j$  土种据有的面积(m<sup>2</sup>), $D_j$  为  $j$  土种土壤有机碳密度(kg·m<sup>-2</sup>),  $j$  为土种序号。对于深度不足 100 cm 的剖面,根据不同的情况采用孙维侠等<sup>[8]</sup>的方法计算土壤有机碳密度。

1.3.3 统计分析方法 数据统计分析处理和相关性分析用统计软件 SPSS15.0、Excel 2007 完成。

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型有机碳密度和储量

由表 1 可知,龙山县区域土壤包括石灰土、黄壤、红壤、黄棕壤、水稻土等 8 种类型,其中石灰土面积最大,为 94 142.8 hm<sup>2</sup>, 占全县总面积的 31.4%,菜园土总面积最小,仅 30.9 hm<sup>2</sup>。各土壤类型土壤有机碳密度在 5.58~15.40 kg·m<sup>-2</sup>, 平均有机碳密度为 10.61 kg·m<sup>-2</sup>,其总有机碳储量为 30 537.07×10<sup>9</sup> g。

12.87 kg·m<sup>-2</sup>,远高于相应土层的全县平均土壤有机碳水平(10.61 kg·m<sup>-2</sup>),其有机碳储量占全县的 10.35%。

红壤主要分布于本县海拔<500 m 的地带,面积占全县土壤总面积的 17.3%,其 SOC 密度为 10.72 kg·m<sup>-2</sup>,高于全县平均有机碳密度;SOC 储量占全县土壤总量的比重为 18.16%。黄壤主要分布在该县海拔 500~800 m 的地带,面积占全县土壤总面积的 28.5%,其 SOC 密度为 11.27 kg·m<sup>-2</sup>,有机碳储量为 9 643.26×10<sup>9</sup> g,占全县相应土层 SOC 储量的 31.58%。黄棕壤分布于该县海拔 800~1 000 m 的高山地带,SOC 密度为 13.17 kg·m<sup>-2</sup>,高于全县平均水平,其有机碳储量为 5 297.62×10<sup>9</sup> g,占全县相应土层 SOC 储量的 17.35%。

石灰土面积占全县土壤总面积的 31.4%,是该县的主要土壤类型。这种土壤成土时间短,其性状保有母岩的特性,并不反映地带性的土壤性状。石灰土 SOC 密度为 7.10 kg·m<sup>-2</sup>,其 SOC 储量为 6 684.14×10<sup>9</sup> g,占全县相应土层 SOC 储量的 21.89%,远低于其土壤面积所占的比例(31.4%)。紫色土面积占全县土壤总面积的 1.1%。总的来看,紫色土比全县平均 SOC 密度低,SOC 密度为 5.58 kg·m<sup>-2</sup>,并且其面积较小,SOC 储量占全县 SOC 储量的 0.61%,对该县土壤碳储量影响不大。

潮土,总面积只有 137.3 hm<sup>2</sup>,主要分布在该

县酉水的近水河岸。SOC 密度为 8.76 kg·m<sup>-2</sup>。该县菜园土只有 30.9 hm<sup>2</sup>,菜园土 SOC 密度高达 15.40 kg·m<sup>-2</sup>。但是由于两类土壤面积都较小,其有机碳储量在该县土壤中所占比重小,对该地土壤碳储量影响很小。

2.2 土地利用类型与土壤有机碳密度和储量

由表 1 可知,龙山县区域土地按照利用方式可分为水田、旱耕地、山地 3 类,其中山地面积占总面积的 80.6%,其它两类土壤面积相差不大。3 类土壤相比,SOC 密度以水田最高,旱耕地其次,山地最低。

2.3 海拔高度与土壤有机碳密度和储量

由表 1 可知,随着海拔升高,土壤有机碳密度有升高趋势。SOC 储量主要分布于海拔 500~800 m 地带,其有机碳储量比重为 49.07%。

2.4 气候因子与土壤有机碳密度

本研究分别探讨了水田(样本数为 111)、旱耕地(样本数为 46)、山地(样本数为 70)3 种不同的土壤利用类型的有机碳密度与年平均气温、年总降水量之间的相关性(见表 2),水田的土壤有机碳密度与年均气温、年总降水量相关系数接近于 0,表明它们与气温、降水量均不相关;旱耕地 SOC 密度与年均气温、年总降水量分别呈显著负相关、显著正相关,说明旱耕地有机碳密度受气候因子影响大;山地 SOC 密度与年均气温和年总降水量分别呈不显著负相关和正相关,说明山地有机碳密度受气候因子影响较小。

表 2 龙山县不同利用方式 SOC 密度与年均气温、年总降水量的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between soil organic carbon density and annual average temperature and total rainfall under different patterns of soil use in Longshan county			
因素 Factor	水田 Paddy fields	旱耕地 Dry farmland	山地 Mountain land
年平均气温 Annual average temperature	-0.011	-0.143*	-0.156
年总降雨量 Total rainfall	0.032	0.292*	0.175

2.5 成土母质与土壤有机碳密度

由表 3 可知,只有紫色砂页岩母质发育的土壤 SOC 密度显著低于其它母质形成的土壤,其余

成土母质之间差异不显著;表明成土母质只有部分类型对 SOC 密度产生影响。

表 3 龙山县不同成土母质 SOC 密度

Table 3 Soil organic carbon density of different soil parent materials in Longshan county						
项目 Items	土壤有机碳密度/(kg·m <sup>-2</sup> ) SOC					
	石灰岩 Limestone	板页岩 Plate shale	砂岩 Sandstone	第四季红土 The quaternary red earh	紫色砂页岩 Purple sandshale	河流冲积物 River alluvium
0~100 cm	10.67±7.14 a	11.51±4.95 a	12.05±4.88 a	12.43±5.30 a	6.90±2.80 b	12.41±5.19 a
样本数	99	53	21	18	14	22

## 2.6 地形与土壤有机碳密度的空间分布

由图 1 可知,在龙山主脉东南坡,土壤有机碳密度  $0\sim 10.1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  区域分布在洗车河谷的南北两端开阔地带, $10.1\sim 11.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  区域分布在东南、西南部河谷与山地间的缓坡地带,从缓坡地带向外沿坡度增大、海拔增高的方向依次呈现  $11.3\sim 12.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $12.5\sim 13.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  区域,它们分别分布于主脉东南坡的低山、中山地带,四区域分别占总面积的 4.2%、12.6%、7.8%、8.9%,在坡地中段峡谷区上述各级图斑细窄、破碎,所占比重小。在龙山主脉及界山的西北坡,从海拔  $400\sim 550\text{ m}$  的西水河谷盆地、 $600\sim 800\text{ m}$  的低山地带到  $600\sim 900\text{ m}$  的中山山原依次分布着土壤有机碳密度  $< 10.1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $12.5\sim 13.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $> 13.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  的区域,分别占总面积的 3.4%、19.8%和 28.6%, $10.1\sim 11.4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $11.4\sim 12.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  区域分布零散破碎,所占比重分别为 4.2%和 1.3%。

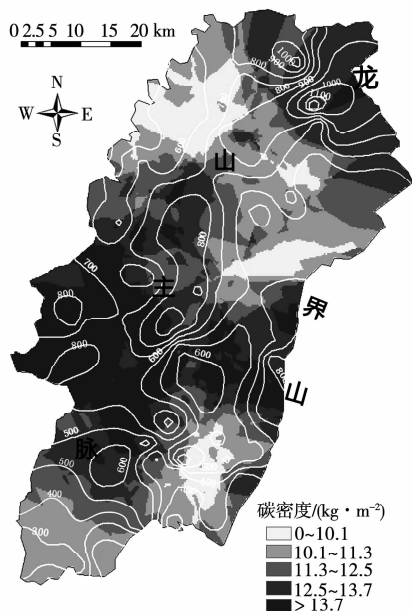


图 1 龙山县 0~100 cm 土层土壤有机碳密度地形空间分布图

Fig. 1 The distribution map of soil organic carbon density of 0~100 cm soil profile based on topography in Longshan county

## 3 结论与讨论

### 3.1 土壤有机碳密度的影响因子

水热条件是影响土壤有机碳密度的根本因素之一,它的影响形式表现为以下几个方面。其一,海拔高度的变化包含了水热条件的变化,对土壤

有机碳密度的影响也最终体现了水热条件的不同导致的土壤生化反应的差异:海拔升高则土壤湿度增大、温度降低,土壤微生物分解有机质的活度下降,故而在保持一定有机碳输入速率的情况下土壤有机碳密度也随之增大,这也是研究区垂直地带性土壤(红壤、黄壤、黄棕壤)中土壤有机碳密度依次增大的原因。其二,不同地点年总降雨量、年均气温对土壤有机碳密度的影响:降雨量较大、年均气温较低,则土壤湿度高、温度低,土壤微生物活动较弱<sup>[9]</sup>,土壤存留有机碳较多,有机碳密度较大,相反,亦然。因此旱耕地土壤有机碳密度与年降水量、年均气温分别呈显著正相关、显著负相关。其三,表现为山脉阴阳坡相同海拔高度土壤有机碳密度的差异。研究区龙山主脉东南坡属迎风坡及向阳坡,降雨量大、气温较高,一方面雨水对坡面侵蚀作用强烈、土壤有机碳流失严重,另一方面土壤微生物活度较大、土壤有机碳分解作用强,因而土壤有机碳密度较低;相反山脉西北坡属阴坡,雨水较少、气温较低,地貌发育以山原为主,坡面侵蚀作用弱,同时土壤微生物活度较低,因而相同海拔高度土壤有机碳密度较高。这也与马文瑛<sup>[10]</sup>等关于祁连山南北坡有机碳的结论相似。

人为因素也是土壤有机碳的主要影响因子。本研究中,水稻土是长期水耕形成的人为土,因土壤长期淹水而有机碳分解微弱,土壤有机碳密度高,因而受降雨、气温影响小;旱耕地受旱耕影响直接暴露,其中土壤微生物受湿度、温度影响大,所以土壤有机碳密度受年总降水量、年均气温影响程度大。受人为因素影响小的山地因地表被植被覆盖,降水、气温的影响受到植被缓冲,故其对土壤有机碳密度的影响并不显著。

土壤类型综合体现了海拔、纬度等空间因子,土壤母质,人为因素的影响。研究区地带性土壤包括沿垂直方向分布的红壤、黄壤、黄棕壤,结果表明从河谷到山原依次呈现的红壤、黄壤、黄棕壤其有机碳密度也按顺序升高,这是水热因子综合作用的结果,与前人结论<sup>[11]</sup>一致。母质决定的非地带性土壤有石灰土、紫色土土壤有机碳密度都较低,这一方面是因为其实际土层较浅,另一方面也与土壤养分贫乏、植被生长较差有关。区内人为土有水稻土、潮土、菜园土,水稻土有机碳密度较高,原因在于水耕使其有机质分解速度低于积累;菜园土有机碳密度较高是由于人为施入土壤的有机质多;潮土有机碳密度较低则是因为它发

育于河流冲积物,土壤颗粒较粗,有机质容易分解。

### 3.2 土壤有机碳密度的空间分布

研究区境内的地貌主要由东北-西南走向的龙山主脉及其西北、东南两侧的山原、山地、河谷组成。有机碳密度以位于龙山主脉及界山西北坡的山原最高,主脉山脊、紧接河谷的中低山地有机碳密度次之,河谷开阔地与山地之间的缓坡地带土壤有机碳密度再次,主脉两侧河谷开阔地带最低。山脉西北坡 600~900 m 的山原气温较低、土壤湿度较大,同时坡度小、地表侵蚀弱,土壤有机碳留存多、输出少,向土层深处迁移积淀多,故有机碳密度较高。中低山地坡陡、侵蚀切割强烈,但表面森林茂密,土壤有机碳虽流失多,但有机碳输入也多,故其土壤有机碳密度仅低于山原。河谷与山地间的缓坡地带因坡度较小,多被辟为旱耕地,在人为耕作影响下,土壤有机碳分解强烈而累积少,同时因坡面具有一定坡度,水土流失输出的有机碳也较多,因此土壤有机碳密度低于中低山。河谷开阔地带地势低气温高,土壤微生物活度大,土壤有机碳分解强烈,同时地表径流的冲刷作用强,土壤有机碳容易流失,此外由于农耕作用输入有机质少、有机质分解快,故其土壤有机碳密度最低。

### 参考文献:

- [1] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming[J]. Nature, 1991, 351(23): 304-306.
- [2] 安玲玲, 吕晓男, 麻万诸, 等. 浙江省 SOC 密度与储量的初步研究[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(1): 148-153.
- [3] Lal R. World soils and greenhouse effect[J]. IGBP Global Change Newsletter, 1999, 37(1): 4-5.
- [4] Schlesinger W H. Evidence from chronic sequence studies for a low carbon-storage potential of soils[J]. Nature, 1990, 348: 232-234.
- [5] 周国模, 刘恩斌, 余光辉. 森林土壤碳库研究方法进展[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(2): 207-216.
- [6] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. Global Biochemical Cycles, 1995, 9(1): 23-36.
- [7] 湖南省农业厅. 湖南土壤[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 1989: 256-257.
- [8] 孙维侠, 史学正, 于东升. 土壤有机碳的剖面分布特征及其密度的估算方法研究——以我国东北地区为例[J]. 土壤, 2003, 35(3): 236-241.
- [9] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. Global Change Biology, 2004, 10(1): 79-92.
- [10] 马文瑛, 赵传燕, 王超, 等. 祁连山天老池小流域土壤有机碳空间异质性及其影响因素[J]. 土壤, 2014, 46(3): 426-432.
- [11] 贾宇平, 苏志珠, 段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 31-34.

## Spatial Distribution of Soil Organic Carbon Density and Their Controlled Mechanism on Longshan Segment in Wuling Mountain

DENG Piao-yun<sup>1</sup>, CHEN Jian-guo<sup>2,3</sup>, YAN Wen-de<sup>2,3</sup>

(1. Guizhou Forest Resources Assets Appraisal Limited Company, Guiyang, Guizhou 550003; 2. Southern Forest National Engineering Laboratory for Ecological Applications, Changsha, Hunan 410004; 3. National Field Research Station for Fir Ecosystem in Huitong, Huitong, Hunan 418307)

**Abstract:** In order to study distribution law and influencing factors of soil organic carbon density in mountain, the soil organic carbon density and storage were investigated in Longshan county, in northwest Hunan province. The distribution pattern of soil organic carbon density was estimated in ArcGIS spatial interpolation and the distribution map of soil organic carbon density based on topography was drawn in Sufer software. The results showed that soil organic carbon storage was  $30\,537.07 \times 10^9$  g in Longshan county, and the average organic carbon density of 0~100 cm soil profile reached  $10.61 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , being slightly higher than the national average level ( $9.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ). As for the soil organic carbon density of 0~100 cm soil profile in areas investigated, the highest is in the mountain plateau located in northwest slope of Longshan mountain range and the Boundary mountain, the second is in the Longshan mountain ridge and the medium-low mountain area close to the valleys, the third is in the zone of the gentle slope between the open valley and the steep slope of medium-low mountain, and the lowest is in the open valleys lied in both sides of Longshan mountain range. It is the different hydro-thermal condition between the eastern and western slope of the main mountain range that caused the difference of soil organic carbon density; Due to the human disturbance, the soil organic carbon density of dry farmland was lower than that of mountainous region.

**Keywords:** soil organic carbon density; the northwest of Hunan province; spatial distribution; mountainous region