

# 云南省土壤有机碳储量估算及空间分布

包承宇, 曾和平, 张梦妍, 李浩, 潘波

(昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 根据云南省第二次土壤普查资料, 采用土壤类型法估算了云南省主要土壤类型的有机碳(SOC)密度和储量, 并对云南省土壤有机碳密度的空间分布差异和影响土壤有机碳储量的主要因子进行了分析。结果表明, 云南省 0—20 cm 土层平均 SOC 密度为 59.77 t/hm<sup>2</sup>, SOC 储量为 2.30×10<sup>9</sup> t; 0—100 cm 土层平均 SOC 密度为 159.95 t/hm<sup>2</sup>, SOC 储量为 6.15×10<sup>9</sup> t, 占全国储量的 7.28%, 占全球陆地生态系统 SOC 储量的 0.41%; 其中 SOC 储量占前 4 位的土壤类型为红壤、黄棕壤、赤红壤、棕壤, 不同深度下 4 者之和约占云南省总储量的 60%。在土壤有机碳密度空间分布上, SOC 密度分布最高的区域为云南省西北部 and 东北部地区, 其次是西部的横断山脉和东部的云南高原地区, 而以紫色土为主的中北部地区 SOC 密度则最低。由于降雨量、温度、海拔和土地利用类型的共同影响, 导致了区域内的 SOC 密度分布不均, 其中降雨量、温度和海拔等自然因素是影响 SOC 密度分布的主要因子。

**关键词:** 土壤有机碳密度; 土壤有机碳储量; 空间分布; 影响因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0260-07

中图分类号: S153.6

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.053

## Spatial Distribution and Estimation of Soil Organic Carbon in Yunnan Province

BAO Cheng-yu, ZENG He-ping, ZHANG Meng-yan, LI Hao, PAN Bo

(Faculty of Environment Science and Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** According to the data from the second soil survey of Yunnan Province, the soil organic carbon (SOC) density and storage were estimated with soil type method; Meanwhile the spatial distribution of SOC density in Yunnan Province and the main factors on SOC density were analyzed. The results showed that the SOC density estimated in the 0—20 cm layer was 59.77 t/hm<sup>2</sup> and stock was about 2.30×10<sup>9</sup> t; and the SOC density estimated in the 0—100 cm layer was 159.95 t/hm<sup>2</sup>, its storage was about 6.15×10<sup>9</sup> t accounting for 7.28% of the total in China and 0.41% of the global terrestrial ecosystems; the top four soil types in SOC storage were red soil, yellow-brown soil, lateritic red soil and brown soil totally taking up about 60% of that in Yunnan Province. The spatial distribution pattern of SOC density was the highest in Yunnan Province was in the northwest and northeast of Yunnan Province, followed by east of Hengduan Mountains and the western Yunnan plateau, and that of the purple soils in the north central area was the lowest. Otherwise, due to the impact of rainfall, temperature, elevation and land use types, the distribution of SOC density in the region was uneven. Furthermore the natural factors such as rainfall, temperature and elevation were the main factors affecting SOC density.

**Keywords:** soil organic carbon density; soil organic carbon storage; spatial distribution; affecting factors

全球陆地土壤碳库约为 1 500 Pg (1 Pg = 10<sup>9</sup> t)<sup>[1]</sup>, 是全球动植物碳库的 3 倍<sup>[2]</sup>, 大气碳库的 2 倍<sup>[3]</sup>。另外, 土壤有机碳(SOC)库的微小幅度的变化都会使大气中 CO<sub>2</sub> 浓度产生改变<sup>[4-5]</sup>。此外, 人类对森林、湿地和草地大量地开垦及不合理利用造成土地大面积退化, 全球土壤有机碳储量在过去 100 a 中始

终呈下降趋势<sup>[6]</sup>。有研究显示, 全球自然土壤耕作后有机碳的损失是十分明显的<sup>[3]</sup>。根据 IPCC 的估计, 土壤有机碳损失对全球大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的贡献率在 30%~50% 之间<sup>[7]</sup>。因此土壤碳库是全球碳循环中重要的组成部分, 已成为全球研究气候变化的热点问题<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2013-10-31

修回日期: 2013-12-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“富铝土—有机污染物相互作用中自由基的产生、稳定及迁移”(41273138); 国家自然科学基金优秀青年项目(41222025)

作者简介: 包承宇(1988—), 男(汉族), 云南省昆明市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤资源和地理信息系统。E-mail: vipbcy1226@qq.com。

通信作者: 潘波(1976—), 男(汉族), 湖北省枝江市人, 博士, 教授, 主要从事土壤环境中污染物行为研究。E-mail: panbocai@gmail.com。

鉴于全球对温室效应的关注,研究 SOC 储量、空间分布、转化及衰减机理,不仅为土壤生产力、土壤水文特性提供重要的信息<sup>[9]</sup>,还将对科学地利用和保护现有的土壤资源,防止水土流失,维护农业经济可持续发展具有重要的现实意义。20 世纪 80 年代以来,国内学者对中国 SOC 库进行了估算<sup>[10-14]</sup>,还开展了不同地理区域和省区 SOC 库估算及其时、空变化进行了研究<sup>[15-25]</sup>,但由于土壤本身是一个复杂的不均匀三维结构体,在空间上呈现复杂的镶嵌性,并与气候及陆地生物发生复杂的相互作用,SOC 分布存在极大的空间变异性。因此 SOC 库估算的结果存在很大差异,例如利用全国土壤普查数据估算中国 SOC 储量的估算结果为 84.40~100.18 Pg<sup>[10-11,13-14]</sup>,而利用模型估算全国 SOC 储量约为 82.70~119.80 Pg<sup>[12,26]</sup>。此外,云南省拥有独特的地形地貌,海拔高差变化悬殊,气候复杂多变,研究此区域内影响 SOC 密度分布规律的因素,对其他区域的相关研究提供有价值的参考。虽然张勇等<sup>[25]</sup>已研究了滇黔桂地区土壤有机碳储量及通过初步回归分析方法分析了影响 SOC 密度的主要因子,但并未突出 SOC 密度的分布规律,及以宏观方式表现 SOC 密度与影响因子之间的联系。本研究试图利用第二次土壤普查资料的数据和云南省土壤类型分布图,对云南省 0—20 cm 和 0—100 cm 深度的 SOC 的密度及储量进行再次估算,并分析

SOC 密度分布规律,探讨区域内不同影响因素,更加直观地为环境保护及水土保持等工作提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

云南省地处中国西南边陲,界于 97°31′—106°11′,北纬 21°8′—29°15′之间。属于低纬度内陆地区。东面与贵州、广西省交界,北部和西北与四川省和西藏自治区相接,南部与越南、老挝等国接壤,西部及西南部与缅甸毗邻。总面积为 390 000 km<sup>2</sup>。

以元江谷地和云岭山脉南段的宽谷为界,云南省可分为东、西两大地形区。其外部形态及地质构造截然不同,东部为云南高原,西部为横断山山地,分别占该省总面积的 63.5%和 30.5%。因此,云南省地势由西北高,东南低,海拔高差悬殊。海拔最高点为梅里雪山的卡格博峰,海拔 6 740 m,而与越南交界的河口地区海拔只有 76.4 m。

云南省大部分地区年温差小,一般为 10~15 °C。全年干湿季分明,80%~90%的雨量集中在每年的 5—10 月,而 11 月至次年 4 月的降雨量仅为 10%~20%。受山地自然环境条件的影响,产生了多层次、多种类的森林立地环境,其分布上具有纬向和显著的垂直地带性分布特征。云南省主要土壤类型分布详见表 1。

表 1 云南省主要土壤类型分布

土壤类型	海拔高度/m	主要植被分布
紫色土	1 400~2 800	以热带雨林和季雨林为主,种植香蕉,咖啡等热带经济作物
燥红土	600~1 350	稀数草坡,小石积、余甘子等
赤红壤	600~1 500	季风常绿阔叶林,刺栲、思茅松林等
砖红壤	200~800	雨林和季雨林,莎草、龙脑香料等
新积土	1 100~3 000	华山松林和次生草地
红壤	1 200~2 400	云南松、华山松林和次生草地
黄棕壤	1 800~2 700	中山湿性长阔叶林,旱冬瓜、银木荷等
水稻土	500~2 400	主要种植水稻
石灰(岩)土	800~2 300	小灌木,杂草,喜钙植物蜈蚣草等
黄壤	1 200~2 800	落叶阔叶林,次生云南松
棕壤	2 600~3 300	中山湿性长阔叶林,山地苔藓林,寒温性针叶林和硬叶长阔叶林等
暗棕壤	2 700~3 800	寒温性针叶林,云杉、冷杉等
棕色针叶林土	3 400~4 100	寒温性针叶林,冷杉等
亚高山草甸土	3 100~4 200	以高山草地为主,还有报春、龙胆等

注:土壤类型根据第二次土壤普查分类系统命名<sup>[27]</sup>。

### 1.2 数据来源

云南省土壤有机碳相关数据来自全国第二次全国土壤普查资料的成果汇编《云南土种志》、《云南土壤》、《云南省第二次土壤普查数据资料集》,共 569 个采样点,采集深度为 0—20 cm 的表层土和 0—100 cm

的土层。该区域基本分布于云南省的各州市,其中大部分覆盖了主要农作区,在一定程度上可以反映云南省不同类型的土壤表层有机碳变化。上述土壤有机碳含量由土壤有机质含量乘以 0.58 得出。各土属面积根据云南省第二次土壤普查数据统计得出。为了

真实地反映当时采样点的气候条件,气象资料选取了 1982 年编撰的《云南气候图册》,记录了 131 个气象站点近 30 a 的年降水量和年平均气温数据,绘制云南省年降水量和年平均气温分布图。

### 1.3 土壤有机碳密度和储量的计算方法

土壤有机碳密度是指单位面积已达深度的土层中土壤有机碳的储量,由于排除了面积因素的影响而以土体体积为基础来计算,土壤有机碳密度已成为评价和衡量土壤中有机碳储量的一个及其重要的指标。

因为部分采样深度小于或者大于 100 cm,可根据公式(1)<sup>[28]</sup>计算,按照各土壤类型模拟出土壤有机质浓度与采样深度的关系,插值后求出采样深度 100 cm 的有机质含量,最后乘以 0.58 得到 100 cm 深度处的 SOC 含量。

$$Y=1/(a+bL) \quad (1)$$

式中: $Y$ ——有机质浓度(%); $L$ ——采样深度(cm),通过各土壤类型拟合的最佳曲线确定参数 $a$ 、 $b$ 。对于采样深度 $D$ 大于 100 cm, $SOC_{(0-100)}$ 密度直接由公式(1)插值计算得到;当 $D$ 小于 100 cm 时, $SOC_{(0-100)}$ 密度等于 $SOC_D$ 加上 $SOC_{(D-100)}$ ,其中 $SOC_{(D-100)}$ 由公式(1)插值计算得出。

某一土层的有机碳密度 $SOCD_i$ (t/hm<sup>2</sup>)计算公式<sup>[29]</sup>为:

$$SOCD_i=S_i \cdot H_i \cdot B_i(1-G_i)/10 \quad (2)$$

式中: $i$ ——土壤类型; $S_i$ —— $i$ 种土壤类型的土壤有机碳含量(g/kg); $H_i$ —— $i$ 种土壤类型的厚度(cm); $B_i$ —— $i$ 种土壤类型的土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $G_i$ —— $i$ 种土壤类型大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%)。

由于土壤剖面缺少土壤容重的数据,则根据 Song 等<sup>[30]</sup>的研究,按自然土壤和耕作土壤容重分别计算:

$$\text{自然土壤: } B_i=1.3565e^{-0.0048S_i} \quad (3)$$

$$\text{耕作土壤: } B_i=1.3770e^{-0.0048S_i} \quad (4)$$

云南省土壤总有机碳储量 $SOCS$ (t)的计算公式<sup>[29]</sup>为:

$$SOCS=\sum_{i=1}^k S_i \cdot SOCD_i \quad (5)$$

式中: $S_i$ —— $i$ 种土壤类型的分布面积(hm<sup>2</sup>)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳密度及储量估算

本研究区域中 14 种土壤类型分布面积为 $3.84 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,约占云南省总国土面积的 97.4%,其分布面积和土壤有机碳密度状况详见表 2。0—20 cm 的 SOC 密度的平均值为 59.77 t/hm<sup>2</sup>,0—100 cm 的

SOC 密度的平均值为 159.95 t/hm<sup>2</sup>,分别高于张勇等<sup>[24]</sup>研究的滇黔桂地区表层土(0—20 cm)SOC 密度 56.20 t/hm<sup>2</sup>和土壤剖面(0—100 cm)SOC 密度 139.80 t/hm<sup>2</sup>。从表 2 可以看出,不同类型土壤的有机碳含量差别较大,区域内 0—20 cm 深度土层 SOC 密度依次为:棕色针叶林土>暗棕壤>亚高山草甸土>棕壤>黄棕壤>黄壤>石灰(岩)土>赤红壤>红壤>水稻土>新积土>砖红壤>紫色土>燥红土。0—100 cm 深度土层的 SOC 密度与 0—20 cm 深度土层 SOC 密度次序基本一致,大小顺序依次为:棕色针叶林土>亚高山草甸土>暗棕壤>棕壤>黄棕壤>水稻土>黄壤>石灰(岩)土>赤红壤>红壤>新积土>砖红壤>燥红土>紫色土。由表 2 看出,云南省 0—20 cm 深度的 SOC 储量为 $2.30 \times 10^8$  t,0—100 cm 深度的 SOC 储量为 $6.15 \times 10^8$  t,表层土(0—20 cm)SOC 储量占土层(0—100 cm)的 37.43%。由于土壤面积对 SOC 储量的影响,部分类型 SOC 的密度虽然并不高,但由于土壤面积大,导致其 SOC 储量排在全省 SOC 储量前几位。例如,云南省分布最广的土壤是红壤,面积为 $1.21 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,约占全省土壤面积的 31.60%,0—20 cm 和 0—100 cm 的 SOC 储量分别占 25.99%和 24.02%。赤红壤为云南省第二大土壤类型,面积为 $5.61 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,约占全省土壤面积的 14.63%,0—20 cm 和 0—100 cm 的 SOC 储量分别占 12.29%和 11.67%。

另一方面,虽然黄棕壤、棕壤、暗棕壤在全区分布面积并不大,分别占 10.55%、5.68%和 2.62%,但是由于 SOC 密度很高,导致这 3 种土壤在 0—20 cm 和 0—100 cm 深度的 SOC 储量在区域内占有重要位置。黄棕壤在 0—20 cm 和 0—100 cm 深度的 SOC 储量分别占到 14.50%和 15.59%,棕壤在 0—20 cm 和 0—100 cm 深度的 SOC 储量分别占到 8.94%和 9.95%,暗棕壤在 0—20 cm 和 0—100 cm 深度的 SOC 储量分别占到 7.06%和 7.85%。

### 2.2 土壤有机碳密度的空间分布

因为 0—20 cm 深度和 0—100 cm 深度的 SOC 密度的空间分布特征基本相同,所以根据云南省土壤类型分布图绘制出了 0—20 cm 深度的土壤有机碳密度空间分布图(图 1)。云南省的 SOC 密度总体上呈由北向南逐步减少,由东向西逐步增加的趋势。特别是在西北部三江纵谷区的 SOC 密度最高,其次为西南部横断山山区,而东部的云南高原次之,以紫色土为主的中北部地区 SOC 密度最低。一方面,由于西部横断山山地地形复杂,分布着许多较高 SOC 含量的土壤类型,所以高低 SOC 密度均有分布;而在东部

高原地区,地势平缓,土壤类型较为单一,大部分区域 SOC 密度集中在  $60\sim 80\text{ t/hm}^2$ 。另一方面,SOC 的分布受所处海拔高度、气候条件的众多影响,尤其使有河流流经的河谷区域,SOC 密度变化较大,例如有金沙江、澜沧江、怒江流经的西北高山地带时,河岸两侧的河谷地区 SOC 密度明显降低。位于云南东北部

东川区境内的部分地区则显示 SOC 密度很高,主要是由于该区域内有牯牛山和轿子雪山,最高海拔分别为  $4\ 017$  和  $4\ 247\text{ m}$ ,分布着大量 SOC 含量很高的高山草甸土。另外,云南东北部昭通附近的大片区域由于主要土壤类型为黄壤和黄棕壤,所以 SOC 密度较高。

表 2 云南省主要土壤有机碳密度和储量

土壤类型	样本数/个	土壤面积/ $10^4\text{ hm}^2$	0—20 cm		0—100 cm	
			碳密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^2)$	碳储量/ $10^6\text{ t}$	碳密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^2)$	碳储量/ $10^6\text{ t}$
紫色土	43	512.71	$34.40\pm 8.45$	$177.37\pm 43.32$	$83.71\pm 15.32$	$430.27\pm 78.55$
燥红土	19	47.28	$27.36\pm 7.47$	$13.02\pm 3.53$	$90.30\pm 15.43$	$42.84\pm 7.30$
赤红壤	53	561.25	$50.34\pm 15.04$	$282.87\pm 84.41$	$127.76\pm 19.78$	$717.68\pm 111.02$
砖红壤	32	75.25	$47.10\pm 12.53$	$36.47\pm 9.43$	$101.87\pm 18.41$	$78.07\pm 13.85$
新积土	16	4.89	$47.13\pm 12.17$	$2.49\pm 0.60$	$107.42\pm 25.74$	$5.79\pm 1.26$
红壤	90	1 213.87	$49.22\pm 11.54$	$598.37\pm 140.08$	$121.62\pm 20.49$	$1\ 477.72\pm 248.72$
黄棕壤	42	404.72	$82.29\pm 18.16$	$333.88\pm 73.50$	$236.83\pm 35.14$	$958.98\pm 142.22$
水稻土	140	181.95	$48.64\pm 8.83$	$89.47\pm 16.06$	$186.85\pm 21.29$	$341.02\pm 38.74$
石灰(岩)土	32	144.28	$53.65\pm 11.57$	$77.97\pm 16.69$	$138.75\pm 19.77$	$200.82\pm 28.52$
黄壤	33	298.69	$67.46\pm 13.97$	$201.69\pm 41.73$	$145.27\pm 21.18$	$434.97\pm 63.26$
棕壤	31	217.84	$93.83\pm 32.42$	$205.74\pm 70.63$	$279.89\pm 43.71$	$611.78\pm 95.22$
暗棕壤	14	100.47	$161.05\pm 25.22$	$162.52\pm 25.34$	$478.47\pm 47.88$	$482.77\pm 48.11$
棕色针叶林土	7	70.49	$163.58\pm 29.17$	$115.46\pm 20.56$	$500.64\pm 49.56$	$353.87\pm 34.93$
亚高山草甸土	17	2.80	$150.72\pm 28.57$	$4.74\pm 0.80$	$481.09\pm 51.68$	$14.49\pm 1.45$
合计	569	3 836.50	$59.77\pm 17.43^*$	$2\ 302.06\pm 668.70$	$159.95\pm 29.02^*$	$6\ 151.07\pm 1\ 113.35$

注: \* 为各土壤类型面积加权平均值。

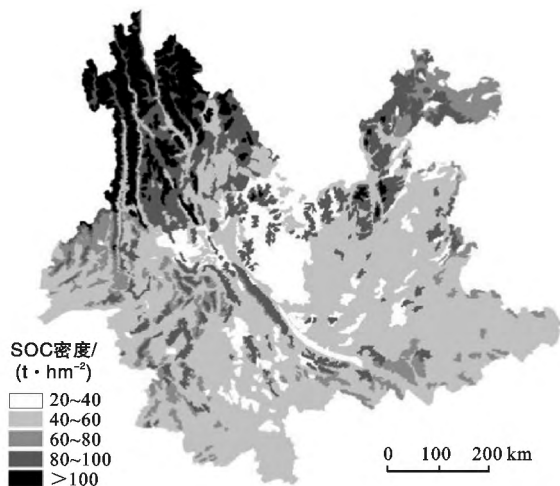


图 1 云南省 0—20 cm 土壤有机碳密度空间分布

### 2.3 影响土壤有机碳库的主要因子

土壤有机碳是进入土壤的动植物残体量及微生物分解失量之间平衡的结果。自然条件不仅决定了动植物的种类,同时制约了微生物的活动,从而影响了进入土壤的有机残体量和分解强度。

2.3.1 降水量 降水量会影响土壤中微生物的活性和有机质的转化。降雨量在一定范围内,微生物的活性与土壤水分成正相关。但如果降雨量过多,土壤通

气不良,则会导致有机质分解速度缓慢,有利于 SOC 的积累。另外,在土壤温度为  $30\text{ }^\circ\text{C}$ ,土壤含水率为  $60\%\sim 80\%$  时,有机质的矿化作用最为明显。

由图 2 可以看出,云南省大部分区域年降水量在  $1\ 500\text{ mm}$  以下,西南地区及部分东部地区受印度洋西南季风和太平洋东南季风气候影响,降水量较高。结果表明,云南省东部大部分地区的降水量为  $1\ 000\sim 2\ 500\text{ mm}$ ,SOC 密度在  $40\sim 60\text{ t/hm}^2$ ;但 SOC 密度较高的云南省北方大部地区的降雨却很少,降水量基本在  $1\ 000\text{ mm}$  以下。此外,由表 3 可知,年降水量在  $500\sim 2\ 000\text{ mm}$  的区域,SOC 密度基本随降水量的增加而逐渐减少,说明微生物活性随降水量升高而升高,加速了 SOC 的分解,并未符合 SOC 密度随降水量的增加而增加这一规律<sup>[28]</sup>。而年降水量在  $750\sim 1\ 000\text{ mm}$  的区域,SOC 平均密度会突然降低,可能是由于所占面积较大,分布着多种土壤类型,致使最后得出的平均 SOC 密度偏低。另外,年降雨量为  $2\ 000\text{ mm}$  以上的地区,SOC 密度有逐步增加的趋势,其原因是区域内植被资源(如热带雨林、亚热带常绿阔叶林等)丰富,有机碳来源丰富,土壤含水量影响程度大于有机质的矿化作用。可见总体上云南省 SOC 密度受降水量影响较大。

表 3 云南省不同降水量下 0—20 cm 土层 SOC 平均密度

降水量/mm	500~750	750~1 000	1 000~1 250	1 250~1 500	1 500~2 000	2 000~2 250	2 250~2 500	2 500 以上
采样点数量/个	41	263	101	87	65	7	5	—
SOC 平均密度/(t·hm <sup>-2</sup> )	66.42±1.60	55.41±1.52	60.34±1.76	58.57±1.84	53.08±2.05	52.41±2.41	59.84±2.77	—

2.3.2 温度 温度对 SOC 的主要影响表现在对微生物种群和对净初级生产力(NPP)的影响。SOC 的分解速率与微生物密切相关,温度高的区域,微生物活动旺盛,使土壤中的更多的碳释放到大气中。植被生产力的大小在被温度作用的同时,也会对碳循环产生反馈作用<sup>[31]</sup>。例如,温度的较低的地区,植被的种类较为单一,凋落物数量少,因此土壤有机质的来源较少<sup>[17]</sup>。

云南省年平均气温的分布图如图 2 所示。受海拔和纬度因素的影响,云南省低纬度的横断山脉地区年平均温度普遍在 18~21℃,其他区域温度随海拔升

高而降低,某些特殊区域如河谷区及海拔低的区域温度较高。结果表明,云南大部分地区 SOC 密度随温度升高而降低<sup>[32]</sup>,特别表现在东北部高海拔地区(年平均气温为 0~9℃),其原因是区域内温度低,微生物活动受到一定抑制,所以有机质不能很快得到分解,土壤中的有机碳随之慢慢积累,SOC 密度约为 97.20 t/hm<sup>2</sup>。此外,由表 4 可知,云南省年平均气温在 18℃以上区域的 SOC 密度并不是最低值,这是因为此地区多为林地,有稳定的有机碳来源。总体上温度对 SOC 密度的影响占主导地位。

表 4 云南省不同气温下 0—20 cm 土层 SOC 平均密度

气温/℃	0~6	6~9	9~12	12~15	15~18	18~21	21 以上
采样点数量/个	5	5	18	98	250	170	23
SOC 平均密度/(t·hm <sup>-2</sup> )	97.55±2.68	96.91±2.51	75.65±2.17	59.34±1.91	53.55±1.55	57.05±1.87	59.48±2.04

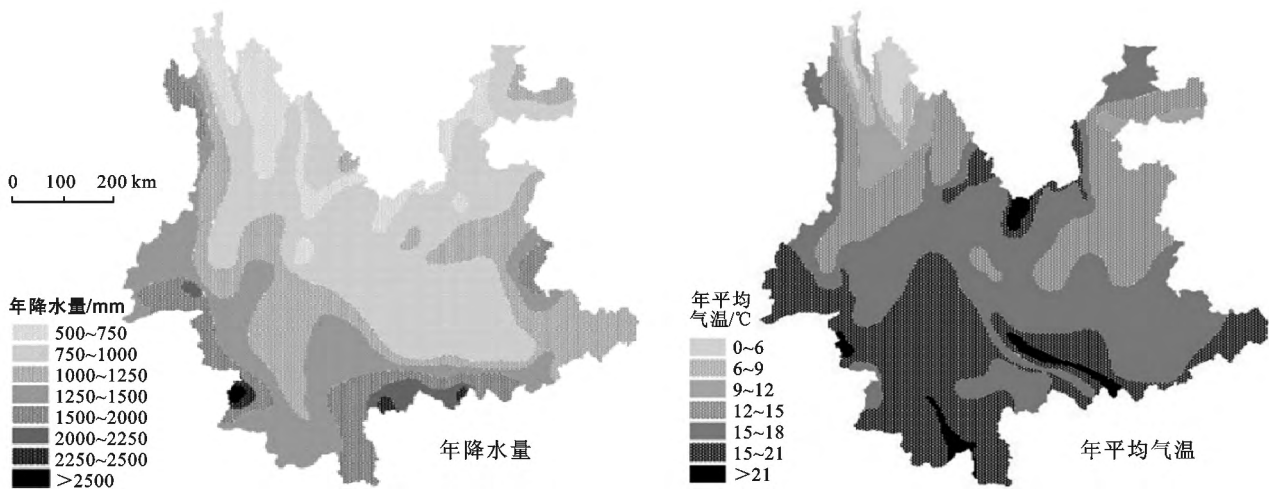


图 2 云南省年降水量和年平均气温空间分布图

2.3.3 海拔 海拔的高低不仅会影响各植被类型的分布,还对气候等条件造成影响。尤其在西北部三江纵谷区,从图 1 可以明显看出,河谷区域的 SOC 密度显著下降,这是因为一方面海拔变化大,不利于植被的生长;另一方面,温差较大,致使土壤中微生物种群和活性受到显著影响。

由表 5 可知,云南省的 SOC 密度随海拔的升高而逐渐增加,尤其是在海拔 3 000~4 000 m 的区域内 SOC 密度比其他地区高出约 1 倍。

同时,这个规律与气温对 SOC 密度影响的趋势是相反的,充分地印证了气温随海拔高度的升高而降低这一自然规律。

表 5 云南省不同海拔下 0—20 cm 土层 SOC 平均密度

海拔高度/m	0~1 000	1 000~1 500	1 500~2 000	2 000~3 000	3 000~4 000
采样点数量/个	63	139	244	105	18
SOC 平均密度/(t·hm <sup>-2</sup> )	50.71±2.52	56.67±2.73	55.28±1.57	57.76±2.95	99.15±3.43

2.3.4 土地利用类型 土地利用的变化不仅会改变生态系统的净第一性生产力及动植物残体等 SOC 的输入过程,同时也会潜在地改变土壤理化性质,进一步影响 SOC 的释放过程<sup>[33]</sup>。因此土地利用在 SOC 储量变化中占有重要地位。云南省主要的土地类型包括林地、耕地、草地等。由表 1 可知,林地主要分布在地,高海拔地区,如暗棕壤和棕色针叶林土区域(西北三江纵谷区)主要生长寒温性针叶林,云杉、冷杉等植被,森林凋落物保护完整,土壤浅层根系生物量大,有较厚的腐殖质层,因而有机碳密度高。而草地集中分布在海拔 3 000 m 以上的高原地区,如亚高山草甸土区域(年平均气温 0~6 °C)内部分被积雪覆盖,以高山草地为主,还有报春、龙胆等,虽然微生物活动受到限制,但植物凋落物较少,基本维持土壤有机碳平衡,相比暗棕壤和棕色针叶林土区域(年平均气温 6~9 °C)的 SOC 密度少。以上两种土地利用类型对 SOC 密度变化的作用较为稳定,而耕地对 SOC 密度变化影响最大。这是由于耕作首先减少了有机质的来源;其次会对土壤中大团聚体造成破坏,破坏了有机质的稳定性,提高了土壤碳的矿化速度;最后会直接影响土壤微生物的活性。所以耕地的 SOC 密度较自然植被下的土壤要少。例如,耕地集中的云南省中北部地区,土壤类型以紫色土为主,其 SOC 密度仅为 20~40 t/hm<sup>2</sup>。

### 3 结论

(1) 云南省 0—20 cm 深度的 SOC 密度为 59.77 t/hm<sup>2</sup>,0—100 cm 深度的 SOC 平均密度估算值为 159.95 t/hm<sup>2</sup>,高于全国平均水平。两个采样深度的 SOC 储量分别为 2.30×10<sup>8</sup> t 和 6.15×10<sup>8</sup> t,如以谢宪丽等<sup>[12]</sup>得出的全国 0—20 cm 和 0—100 cm 深度的 SOC 储量为标准,则分别占到 8.40%和 7.28%;若以全球 SOC 储量 1.50×10<sup>11</sup> t 为标准,则 0—100 cm 深度的 SOC 储量约占全球陆地生态系统 SOC 储量的 0.41%。

(2) 云南省的 SOC 密度的空间分布总体上呈由北向南逐步减少,由东向西逐步增加的趋势。地理区域 SOC 密度顺序为:西北部三江纵谷区>西南部横断山山区>东北部的云南高原>东南部的云南高原>以紫色土为主的中北部地区。

(3) 在降雨量、气温、海拔和土地利用类型等因素的共同作用下,云南省的 SOC 密度的空间分布差异明显。由于云南是高原山区省份,该省山地约占 84%,高原约占 10%,高海拔土地和陡坡土地占有较大比重,制约了土地利用的效率,所以自然因素是影

响云南 SOC 密度的主要因子,而土地利用方式的影响较小。

(4) 本研究所用数据来源于第二次土壤普查资料,由于当时采样方法的限制和时空变化的影响,在计算 SOC 密度时,容重数据和采样深度 100 cm 有机质含量是根据其他文献拟合的公式得出的,估算结果可能会与实际结果有所误差。此外,在分析影响 SOC 储量的因素时,缺乏采样时的土地利用相关数据,并且土地利用类型已发生变化,不能完整地反映出土地利用对云南省的 SOC 的影响程度。

#### [参 考 文 献]

- [1] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982,46(5): 1118-1119.
- [2] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. Nature, 1990,348(48):232-234.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. Geoderma, 2004,123(1):1-22.
- [4] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, et al. The global carbon cycle [J]. American Scientist, 1990,78(4):310-326.
- [5] Amundson R. The carbon budget in soils [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2001,29(1): 535-562.
- [6] 陈庆强,彭少麟.土壤碳循环研究进展[J].地球科学进展,1998,13(6):555-563.
- [7] IPCC report. Climate Change [M]. London: Cambridge Univ. Press, 1995.
- [8] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 1996,47(2):151-163.
- [9] 王海燕,张洪江,杨平,等.不同水土保持林地土壤有机碳研究[J].长江流域资源与环境,2010,19(5):535-539.
- [10] 王绍强,周成虎.中国陆地土壤有机碳库的估算[J].地理研究,1999,18(4):349-356.
- [11] 王绍强,周成虎,李克让,等.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.
- [12] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳储量[J].中国科学:D辑,2003,33(1):72-80.
- [13] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.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.
- [14] 于东升,史学正,孙维侠,等.基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J].应用生态学报,2005,16(12):2279-2283.
- [15] 甘海,吴顺辉,范秀丹.广东土壤有机碳储量及空间分布特征[J].应用生态学报,2003,14(9):1499-1502.

- [16] 王义祥,翁伯琦. 福建省土壤有机碳密度和储量的估算[J]. 福建农业学报, 2005, 20(1): 42-45.
- [17] 许信旺,潘根兴,曹志红,等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素[J]. 地理研究, 2007, 26(6): 1077-1086.
- [18] 田玉强,欧阳华,徐兴良,等. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 933-942.
- [19] 于建军,杨锋,吴克宁,等. 河南省土壤有机碳储量及空间分布[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1058-1063.
- [20] 陈芳,盖艾鸿,李纯斌. 甘肃省土壤有机碳储量及空间分布[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(11): 176-181.
- [21] 陈仕栋,方晰. 湖南省土壤有机碳库及其空间分布格局[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 146-151.
- [22] 傅野思,夏学齐,杨忠芳,等. 内蒙古自治区土壤有机碳库储量及分布特征[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 886-895.
- [23] 刘宪锋,任志远,林志慧. 基于 GIS 的陕西省土壤有机碳估算及其空间差异分析[J]. 资源科学, 2012, 34(5): 911-918.
- [24] 孙维侠,史学正,于东升,等. 我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 298-300.
- [25] 张勇,史学正,赵永存,等. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2314-2319.
- [26] Ni Jian. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change[J]. Climatic Change, 2001, 49(3): 339-358.
- [27] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [28] 李忠,孙波,赵其国. 我国东部土壤有机碳的密度和储量[J]. 农业环境保护, 2001, 20(6): 385-389.
- [29] Pan Genxing, Li Lianqing, Wu Laosheng, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils [J]. Global Change Biology, 2004, 10(1): 79-92.
- [30] Song Guohan, Li Lianqing, Pan Genxing, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation [J]. Biogeochemistry, 2005, 74(1): 47-62.
- [31] 傅野思,夏学齐,杨忠芳,等. 内蒙古自治区土壤有机碳储量及分布特征[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 886-895.
- [32] Dai Wanhong, Huang Yao. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China [J]. Catena, 2006, 65(1): 87-94.
- [33] 陈朝,吕昌河,范兰,等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5358-5371.

(上接第 259 页)

- [2] 何英彬,姚艳敏,唐华俊,等. 土地利用/覆盖变化驱动力机制研究新进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(2): 190-195.
- [3] 贾宝全,王成,邱尔发. 南京市景观时空动态变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5848-5857.
- [4] 潘佩佩,杨桂山,苏伟忠. 土地利用变化对土地生产力的影响研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 539-550.
- [5] 陈红,吴世新,冯雪力. 基于遥感和 GIS 的新疆耕地变化及驱动力分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 614-624.
- [6] 孙倩,张飞,丁建丽,等. 渭干河—库车河三角洲绿洲土地利用/覆被时空变化遥感研究[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3252-3265.
- [7] 邵怀勇,仙巍,周万村,等. 三峡工程实施十年间库区土地利用/覆被时空变化研究: 以开县为例[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 241-248.
- [8] 卓静,郭伟,邓凤东,等. 基于 GIS/RS 的榆林市土地利用时空格局动态分析[J]. 水土保持通报, 2013(1): 50-54.
- [9] 董隽,臧淑英. 大庆市城市土地利用变化的驱动机制[J]. 地理研究, 2011, 30(6): 1121-1128.
- [9] 谭雪兰,段建南,朱红梅,等. 长沙市耕地变化的时空特征及其驱动力分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2): 240-244.
- [10] 冉圣宏,张凯,吕昌河. 延河流域土地利用/覆被变化模型的尺度转换方法[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1414-1419.
- [11] 朱利凯,蒙吉军. 国际 LUCC 模型研究进展及趋势[J]. 地理科学进展, 2009, 28(5): 782-790.
- [12] 张永民. 土地利用/覆被变化模型研究面临的几个问题[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(10): 53-58.
- [13] 曹银贵,周伟,袁春. 基于土地利用变化的区域生态服务价值研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 241-246.
- [14] 杨海娟,温晓金,刘焱序,等. 秦岭土石山区土地利用程度对生态恢复力的影响评价[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 261-266.
- [15] 杨奇勇,杨劲松,姚荣江,等. 基于 GIS 和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J]. 农业工程学报, 2010(4): 100-105.