

半干旱区不同土层深度土壤有机碳变化

李龙¹, 姚云峰¹, 秦富仓¹, 郭月峰¹, HABURA Borjigin², 常伟东³

(1. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 日本国立环境研究所 地理环境研究中心, 日本 筑波 305-8506; 3. 赤峰市敖汉旗林业局, 内蒙古 敖汉 024300)

摘要: 选择内蒙古自治区赤峰市敖汉旗黄花甸子流域为研究对象, 运用地统计学与 ArcGIS 空间分析工具相结合的方法研究了不同土层深度土壤有机碳含量、密度以及储量的变化情况。结果表明, 不同土层有机碳含量与密度由高到低均表现为: 表层(0—20 cm) > 中层(20—60 cm) > 底层(60—100 cm)。表层土壤碳密度随海拔高度的增加而下降, 有机碳含量呈现先增加后降低的趋势; 底层土壤有机碳含量随海拔高度的改变无明显变化。同时海拔高度对土壤有机碳的影响也随土壤深度的增加而减小。研究区有机碳总储量为 2.04×10^5 t, 不同土层有机碳储量由高到低表现为: 中层(8.56×10^4 t) > 底层(6.41×10^4 t) > 表层(5.47×10^4 t)。土壤有机碳储量与其对应海拔高度下面积的大小具有显著相关性。

关键词: 海拔高度; 土壤有机碳; 土层; 半干旱区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0118-05

中图分类号: S153.6

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.036

Change of Soil Organic Carbon in Different Soil Depths in Semi-arid Area

LI Long¹, YAO Yun-feng¹, QIN Fu-cang¹, GUO Yue-feng¹, HABURA Borjigin², CHANG Wei-dong³

(1. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolian Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 305-8506, Japan; 3. Forest Bureau in Aohan Banner of Chifeng City, Aohai, Inner Mongolia 024300, China)

Abstract: We selected Huanghuadianzi watershed in Aohan Banner of Chifeng City in Inner Mongolia as the research area and analyzed the changes in soil organic carbon content, density and storage in different soil layers through geostatistical and ArcGIS methods. The results showed that soil organic carbon content and density decreased from the surface layers to the middle layer then to bottom layers; Carbon density of soil surface decreased with the increase of altitude, but the underlying soil organic carbon content had no obvious change with the change of altitude, moreover, carbon content increased first and then decreased while the effects of altitude on soil organic carbon also decreased with the increase of soil depth. The organic carbon reserve of the study area was 2.04×10^5 t, and the soil organic carbon reserves of different soil layers were as follows: the middle layer(8.56×10^4 t) > bottom(6.41×10^4 t) > surface(5.47×10^4 t). Soil organic carbon storage has significant correlation with its corresponding area of the given altitude.

Keywords: altitude; soil organic carbon; soil layers; semi-arid area

全球陆地生态系统中, 土壤碳库约在 1 200 ~ 2 500 Pg 之间^[1-5], 是大气碳库的 2 倍, 是陆地生物圈碳库的 2~3 倍, 土壤碳库的微小变动都将对整个陆地生态系统碳库产生巨大影响, 在维持陆地生态系统的碳平衡中发挥着重要作用^[6-7]。然而, 由于不同学者对土壤碳库的研究的尺度大小不同, 土壤本身不同土层的有机碳也存在明显差异, 难以准确获得土壤碳信息, 致使同一地区的研究结果常常存在较大的差异。因此, 以小流域为单位分土层分析土壤碳库的研

究开始被广泛关注, 并开始逐步探究其影响因素。在以小流域为研究对象时, 影响不同土层土壤有机碳分布的因素众多, 而自然因素中地貌的起伏变化对土壤有机碳的影响十分显著, 其主要以不同的坡度、坡向、坡位、海拔等因素来控制区域的水热再分配, 从而影响土壤有机碳的空间分布及大小^[8]。

对于影响土壤碳库的因素我国已有许多相关研究^[9-10]。其中, 一些学者将海拔高度的变化与不同土层土壤建立联系对土壤碳库进行了分析, 并得出许多

收稿日期: 2013-05-07

修回日期: 2013-05-21

资助项目: 内蒙古自治区应用研究与开发计划项目“农林牧耦合生态系统固碳关键技术”(20110732)

作者简介: 李龙(1989—), 男(汉族), 吉林省吉林市桦甸市人, 博士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: lilongdhr@126.com。

通信作者: 姚云峰(1959—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区阿拉善左旗人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治领域的工作。E-mail: yaoyunfeng@yahoo.com.cn。

有价值的结论。柯娴、张璐等^[11]对粤北亚热带山地森林的土壤有机碳的研究结果表明 0—20 cm 和 20—40 cm 土层有机碳含量均随海拔梯度变化呈极显著差异。郭建明、胡理乐等^[12]研究表明秦岭太白红杉林北坡 0—100 cm 土层土壤有机碳密度随海拔的增加呈显著减小趋势。傅华、陈亚明等人^[13]在阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征研究中发现,土壤有机碳含量随海拔高度的降低而逐渐降低,其垂直分异规律为山地荒漠草原沿土壤剖面依次降低,高山草甸、草原化荒漠和沙砾质草原化荒漠 0—20 cm 与 20—40 cm 土层差异不显著,但高于 40—60 cm 土层。由此可见,在地形因子的影响下不同土层的土壤碳分布也有着明显差异,并以海拔作为影响土壤有机碳的主导因子,在不同研究区对土壤有机碳的影响作用也具有明显差别,同时海拔对不同土层深度的土壤含水率、有机质含量以及土壤质量都有着重要影响,这些因素对土壤碳库都有着不同程度的影响^[14-16]。

内蒙古自治区赤峰市敖汉旗位于半干旱地区,属于温带大陆性季风气候,在我国碳汇林营造中起步较早规模较大,其中在敖汉旗的中意合作项目“中国东北部内蒙古敖汉旗防治荒漠化青年造林项目”是我国第一个碳汇造林项目,其造林面积达 3 000 hm²,对我国其它地区的碳汇研究工作具有积极的借鉴作用,对该地区的土壤碳库研究更具指导价值。因此,以内蒙古自治区赤峰市敖汉旗黄花甸子流域为研究对象,以实地调查土壤数据为基础,结合 GIS 地理信息系统与地统计学,分析流域不同土层土壤有机碳的空间分布情况,以及海拔对土壤有机碳分布的影响,以期对土壤碳库的研究提供科学参考和基础数据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于赤峰市敖汉旗西部的黄花甸子流域内。流域位于老哈河中游南岸,科尔沁沙地南缘。地处 42°17′—42°33′N,119°36′—119°53′E,面积为 32.5 km²,东临通辽市奈曼旗,西与辽宁省建平县接壤,南与辽宁省朝阳市、北票市毗邻,北与赤峰市松山区、翁牛特旗隔老哈河相望。流域内总体属于低山丘陵区,地势起伏不大,海拔在 440~806 m。属于中温带半干旱大陆性季风气候区,四季分明。年均降雨量多在 400~470 mm,年均蒸发量多在 2 290~2 400 mm。全年日照数 2 940~3 060 h,历年平均日照数 2 999.3 h,10℃以上积温为 3 189℃。春季风力大持续时间较长,年平均风速 4~6 m/s。土壤类型大部分为栗钙土,伴随着少量的风沙土,体现了森林土壤向草原土

壤过渡的特点,pH 值呈弱碱性到碱性,全剖面具有石灰反应。该流域主要有天然草地、灌丛林、乔灌混交林、针阔混交林和阔叶纯林等森林植被类型,主要以人工植被为主。

1.2 研究方法

1.2.1 数据提取 对不同土层土壤有机碳的分布及海拔对土壤有机碳含量、密度及其储量的影响情况进行研究。在 ArcGIS 软件的空间分析工具支持下,根据流域 DEM 数据提取流域高程信息并划分等级^[17-18]。以体现研究区域地形特征、符合自然规律为原则,将高程以 50 m 为一个单元等距划分为:<550 m,550~600 m,600~650 m,650~700 m,700~750 m,>750 m 共 6 个等级,用以对比分析不同海拔高度下土壤有机碳分布状况的。

1.2.2 土壤样品采集 于 2012 年 6 月采集研究区土壤样品,结合流域 1:5 万地形图、土地利用现状图,采用网格法^[19],兼顾代表性和均匀性沿海拔梯度均匀取样,保证不同海拔等级下的样地数基本相同,每个样地内采用 S 采样法共确定 4 个采样点。每个样点挖掘深 1 m×1 m×1.5 m 土壤剖面,按 0—20 cm 表层,20—60 cm 中层,60—100 cm 底层划分 3 个层级分层取样,每层取 3 个重复,并用环刀法取土测定土壤容重。共计 148 个土壤剖面,2 220 个土壤样品。将每个样地的 4 个样点采得土壤样品均匀混合。采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳含量,105℃恒温烘干法测定土壤含水率等数据。

采用手持 GPS 标记各采样点坐标并导入 ArcGIS 软件,生成具有土壤有机碳信息的采样样点数据用以进行克里格空间插值分析。

1.2.3 土壤有机碳密度、储量的计算方法 土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量。采用的计算方法为^[20]:

$$SOC_i = d_i \cdot p_i \cdot O_i \times 10^{-2} \quad (1)$$

$$S_i = A_i \cdot SOC_i \quad (2)$$

式中: i ——土壤不同层次; SOC_i ——土壤的碳密度(kg/m²); d_i ——研究土层平均厚度(cm); p_i ——土壤平重均容(g/cm³); O_i ——土壤有机碳含量(g/kg); A ——各类型所占面积(m²); S ——土壤有机碳储量(kg)。

在不同土层深度下有机碳密度的计算中,均采用 10 cm 土层厚度进行计算,以便结果的对比分析。

1.2.4 数据处理 通过 ArcGIS 软件下 3D 分析工具以 TIN 格式生成研究区高程图并统计不同海拔高度下所对应的海拔面积;基于地统计学原理,在 ArcGIS 软件 Geostatistical Analyst 工具下对采样点进

行克里格插值,生成不同土层土壤有机碳含量、密度的空间分布图。利用 ArcGIS 空间分析工具建立覆盖整个研究区的 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的 grid 网格,共计 16 800 个;通过区域统计分析,计算出每个 grid 网格的内对应的海拔高度、各层土壤有机碳含量、密度以及碳储量格数据的均值,从而生成海拔与土壤有机碳空间数据库,采用 SAS 软件进行相关性分析得出海拔影响土壤有机碳的显著水平。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量和密度的水平分布特征

如附图 5 所示,研究区表层土壤有机碳含量大体呈斑块状分布,其高值区 ($10 \sim 20\text{ g/kg}$) 集中分布在流域西北部,低值区 ($1.1 \sim 5.4\text{ g/kg}$) 集中分布在流域西南部;中层土壤碳含量呈条带状分布,其高值区 ($7.4 \sim 12\text{ g/kg}$) 集中分布在流域西北部,低值区 ($1.1 \sim 4.7\text{ g/kg}$) 集中分布在流域西南部;底层土壤碳含量呈斑块状零散分布,在流域中部和东北部出现极低值区 ($0.23 \sim 1.40\text{ g/kg}$),底层土壤碳含量的分布无明显规律。

不同土层下土壤有机碳密度的分布情况与有机碳含量的分布情况基本相同(图略),表层和中层土壤存在较为明显的碳密度高值区和低值区,而底层土壤有机碳密度则呈现斑块状零散分布,无明显分布规律。就其原因可能是土壤有机碳密度与土壤有机碳含量的相关性分析表明二者具有极显著的相关性 ($p < 0.001$)。因而二者在研究区的分布情况也呈现较为相似的分布规律,同时流域内小地形的变化易导致小流域局部降雨不均匀分配、小范围内植被生长的地带性差异等现象,并且研究区内人为因素明显,在研究区西北部分布大面积农田,具有较好的水源灌溉条件;而这些因素都是促使土壤有机碳含量和密度的不均匀分布的重要原因,在一定范围内易形成明显的高值区与低值区。而底层土壤有机碳的含量与密度均处在 $60 \sim 100\text{ cm}$ 深度土层,距离地表较远,受地上局部的地形、气候、植被、人为因素等因子的变化并不敏感,以致其土壤有机碳含量与密度的水平分布规律性不强。进而得出,研究区土壤有机碳密度及其含量的水平分布受自然因素和人为因素到综合作用影响,但 60 cm 以下土层土壤有机碳密度及其含量受其影响较弱。

2.2 土壤有机碳含量的垂直分布特征

如图 1 所示,土壤有机碳含量随土层深度的增加而明显下降。表层土壤有机碳含量均值为 6.49 g/kg ,占 $0 \sim 100\text{ cm}$ 层土壤有机碳含量的 40.72% ;

中层有机碳含量均值为 5.25 g/kg ,占 $0 \sim 100\text{ cm}$ 土层土壤有机碳含量的 32.91% ;底层有机碳含量均值为 4.20 g/kg ,占 $0 \sim 100\text{ cm}$ 层土壤有机碳含量的 26.37% 。不同海拔高度下土壤有机碳含量均表现为:表层 $>$ 中层 $>$ 底层;土壤有机碳含量的这一特点并不随海拔的变化而发生改变。方差分析表明,不同土层土壤有机碳含量差异极为显著 ($p < 0.001$)。这一结果与国内其他相关研究基本一致^[21],这可能与表层土壤根系分布较广,微生物活性较大,地上残枝分解补给易于传输有关。随土层深度增加,动植物残体以及植物根系分布较少,且土壤与地上植被和空气中碳交换减少,不利于土壤有机碳的积累,因此,底层土壤有机碳含量积累明显小于中层和表层。

表层土壤有机碳含量随海拔高度的上升基本呈现抛物线变化,其峰值为 7.51 g/kg 出现在 $550 \sim 600\text{ m}$ 海拔高度处,此后随海拔的升高,土壤有机碳含量呈现出逐级递减的趋势,并在 $>750\text{ m}$ 处出现最小值,而中层和底层土壤有机碳受海拔的影响无明显变化。究其原因,海拔直接影响土壤与植被的垂直地带性分布, 600 m 以下的低海拔地区受人类活动影响较大,由于地势低平有利于大规模农业机械化作业,因此这一地区多种植高产经济作物如玉米,高粱等,加之具有人为灌溉条件,以致土壤有机质得到大量积累,然而,海拔过低 ($<550\text{ m}$) 地区,地势低洼不利于排水,部分地区出现盐渍化,因此土壤有机碳含量的峰值并未出现在 $<550\text{ m}$ 的最低海拔高度处,而是在排水条件较好,人为干扰较强的 $550 \sim 600\text{ m}$ 海拔高度处。此后随海拔高度的增加,太阳辐射强度增强,影响土壤水分的固持,植被蒸发增强,不利于作物生长^[22]。高海拔地区也不宜大型农业机械的作业,所以以天然次生林,荒草地为主要植被类型,土壤出现不同程度的沙化,固碳能力较低。

从土壤有机碳含量的垂直变异情况上看,表层土壤碳含量的变化范围在 $7.51 \sim 5.50\text{ g/kg}$,极差为 2.01 g/kg ;中层土壤的变化范围在 $5.99 \sim 4.33\text{ g/kg}$,极差为 1.66 g/kg ;底层土壤的变化范围在 $3.53 \sim 4.62\text{ g/kg}$,极差为 1.09 g/kg 。其变异系数表现为:表层 (13.86%) $>$ 中层 (13.64%) $>$ 底层 (9.95%)。由此可见,随着土层深度的增加土壤有机碳含量的变异逐渐减小,其原因可能是表层土壤长期受到自然以及人为因素频繁而均匀地干扰,不确定因素较多导致表层土壤碳含量具有较大变异;而深层土壤环境较表层土壤相对封闭,随土层深度的加深,土壤对地上自然以及人为因素的影响反应并不敏感,土壤有机碳含量基本趋于稳定,并无大幅度变动。

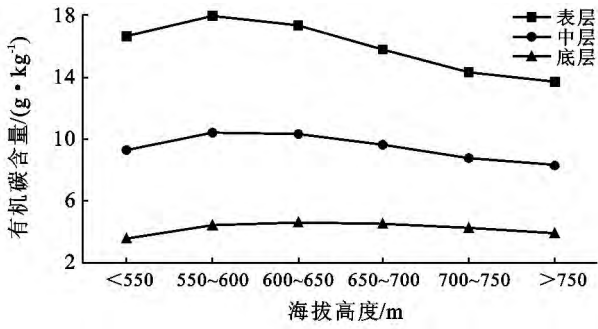


图 1 海拔高度与不同土层土壤有机碳含量的关系

2.3 土壤有机碳密度垂直的分布特征

如图 2 所示,随土壤深度的增加土壤有机碳密度显著下降 ($p < 0.001$),其由高到低有机碳密度表现为:表层 > 中层 > 底层,且这一关系不随海拔高度的变化而发生改变。表层土壤有机碳密度为 0.96 kg/m^2 ,分别是中层和底层有机碳密度的 1.31 和 1.81 倍;中层密度为 0.74 kg/m^2 ,前两层(0—60 cm)有机碳密度之和占土壤有机碳密度的 76%,而底层土壤有机碳密度为 0.53 kg/m^2 ,仅占总密度的 24%。由此可见,在土壤有机碳密度的垂直分布上 0—60 cm 土层的贡献占主要地位。

表层和中层土壤有机碳密度大体都随海拔的增高逐级递减,其最高值分别出现在海拔高度 <550 m 处和 550~600 m 处,最低值均出现在 >750 m 海拔高度处。方差分析表明,表层土壤有机碳密度和海拔呈现出极强的负相关性 ($r = -0.43, p < 0.001$)。

底层土壤有机碳密度随海拔的增加大体呈现先增加后减小趋势,其峰值为 0.59 kg/m^2 出现在 600~650 m 处,此后随海拔增加有机碳密度逐级下降,并在 >750 m 海拔高度出现最小值,为 0.46 kg/m^2 。究其原因可以发现,研究区无论表层、中层、底层土壤有机碳密度均在 550~600 m 海拔高度后出现明显的下降趋势,并在 >750 m 的最高海拔处出现最小值。

这一现象是由于当海拔高度 >600 m 以后,受海拔影响植被和土壤的垂直地带性分布明显,植被由玉米等高产量农田向天然次生林转换,土壤由栗钙土向风沙土过渡,使得有机质的积累明显降低,直到 >750 m 的最高海拔处有部分地区已出现地表裸露、土地沙化等现象,从而在不同土层均表现为在 600~650 m 海拔高度以后,随海拔增加有机碳密度逐级下降的现象。而在海拔高度 <550 m 处的低海拔地区,受人类生产生活影响严重,影响土壤有机碳密度的可变因素较多,以致表层、中层以及底层土壤的有机碳密度并未表现为一致的升降规律。

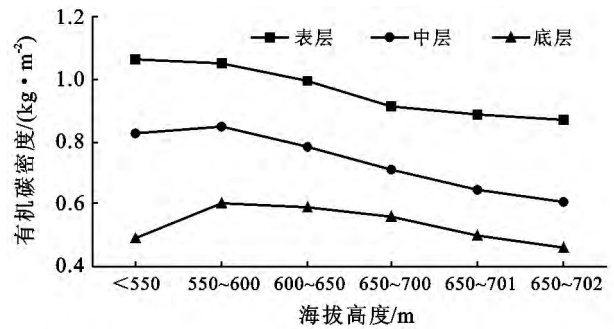


图 2 海拔高度与不同土层土壤有机碳密度的关系

2.4 土壤有机碳储量的分布特征

如表 1 所示,研究区面积为 28.25 km^2 ,总碳储量为 $2.04 \times 10^5 \text{ t}$ 。土壤有机碳储量表现为:中层 ($8.56 \times 10^4 \text{ t}$) > 底层 ($6.41 \times 10^4 \text{ t}$) > 表层 ($5.47 \times 10^4 \text{ t}$),中层土壤碳储量分别是底层和表层碳储量的 1.34 和 1.57 倍,土壤碳储量的这一分布现象主要受土层厚度的影响,表层土壤虽然有机碳密度较高,但其深度仅为 20 cm,对土壤有机碳的储存能力有限;而中层土壤和底层土壤的剖面较深,对有机碳的储量更大,因此 20 cm 以下的深层土壤有机碳的储量更加不容忽视,这一研究结果与郭建明、胡理乐等人^[12]的研究结果相符。

表 1 研究区不同海拔高度土壤有机碳储量及其分配

海拔高度/m	面积		表层(0—20 cm)		中层(20—60 cm)		底层(60—100 cm)		合计	
	数值/ km ²	所占比例/ %	碳储量/ 10 ⁴ t	所占比例/ %	碳储量/ 10 ⁴ t	所占比例/ %	碳储量/ 10 ⁴ t	所占比例/ %	碳储量/ 10 ⁴ t	所占比例/ %
>750	0.54	1.92	0.09	1.72	0.13	1.55	0.10	1.56	0.33	1.62
700~750	3.26	11.55	0.58	10.63	0.84	9.76	0.65	10.19	2.07	10.23
650~700	8.36	29.60	1.52	27.84	2.38	27.74	1.87	29.23	5.77	28.15
600~650	9.17	32.44	1.81	33.20	2.90	33.84	2.16	33.76	6.88	33.55
550~600	5.97	21.11	1.25	22.91	2.00	23.41	1.43	22.34	4.69	22.94
<550	0.95	3.38	0.20	3.70	0.32	3.70	0.19	2.92	0.71	3.51
总计	28.25	100.00	5.47	100	8.56	100	6.41	100	2.04	100

研究区 83.15% 的地区海拔高度在 550~700 m 范围内,这一海拔高度下与其相对应的碳储量为 1.73×10^5 t, 占总储量的 84.64%, 而海拔高度 >750 m 和 <550 m 的地区碳储量之和仅为研究区总碳储量的 5.13%, 这与不同海拔高度所占面积的大小有直接关系。相关分析表明,研究区不同海拔高度下所占的面积与其对应的碳储量表现为机显著相关 ($p < 0.001$)。其主要原因可能是研究区土壤有机碳密度的分布较为平均,各海拔高度下的碳密度无大幅度的变异,因此,由公式(2)可知,不同海拔高度土壤有机碳储量的大小主要取决于各海拔高度下的土壤面积大小。

3 结论

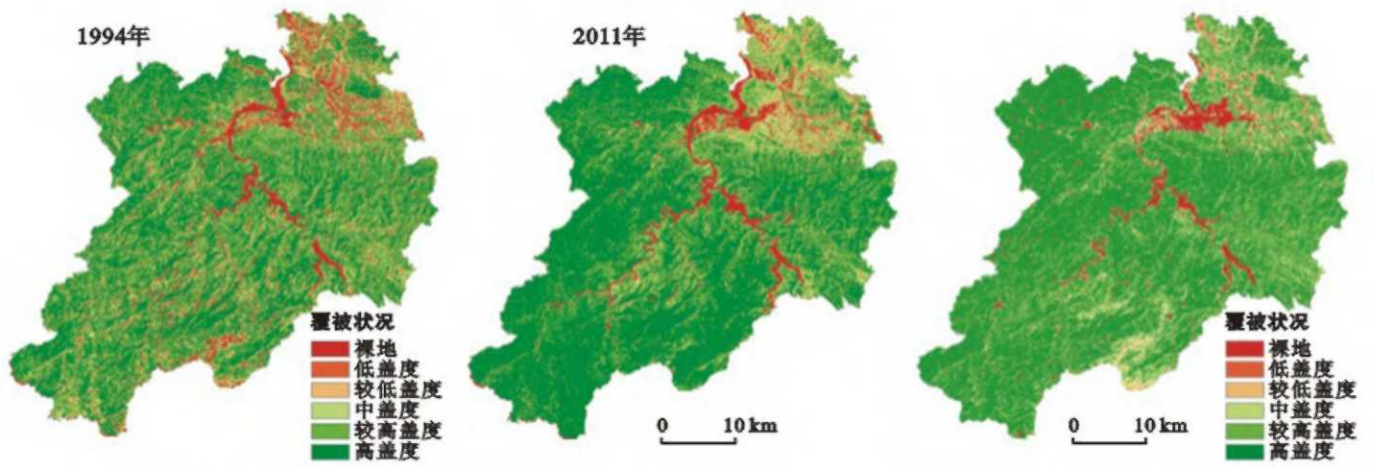
研究区土壤有机碳含量和密度的水平分布具有较高的相似性,60 cm 以上土层的有机碳含量和密度的高值区均集中分布在流域西北部,低值区分布在流域西南,而底层土壤有机碳含量与密度的水平分布较为破碎,规律并不明显。这一分布规律是由于底层土壤环境较为封闭,对外界自然及人为因素反应不敏感而产生。

研究区不同土层土壤有机碳含量与有机碳密度均随土层深度的增加而明显下降,由高到低均表现为:表层(0—20 cm) > 中层(20—60 cm) > 底层(60—100 cm),土壤有机碳的这一垂直分布规律并不受海拔高度的影响而发生改变。60 cm 以上土层有机碳密度随海拔的增加而明显的下降,60—100 cm 层土壤有机碳密度受海拔影响较小。海拔高度对土壤有机碳含量及密度的影响主要体现在表层土壤中,随土层深度增加海拔对土壤有机碳含量及密度的影响逐渐减弱。

研究区有机碳总储量为 2.04×10^5 t,土壤有机碳储量表现为:中层(8.56×10^5 t) > 底层(6.41×10^4 t) > 表层(5.47×10^4 t)。以小流域为单元对土壤碳库进行分土层研究,更细化了研究内容,提升了研究精度,为今后大尺度土壤碳库的研究提供了科学参考和数据基础。

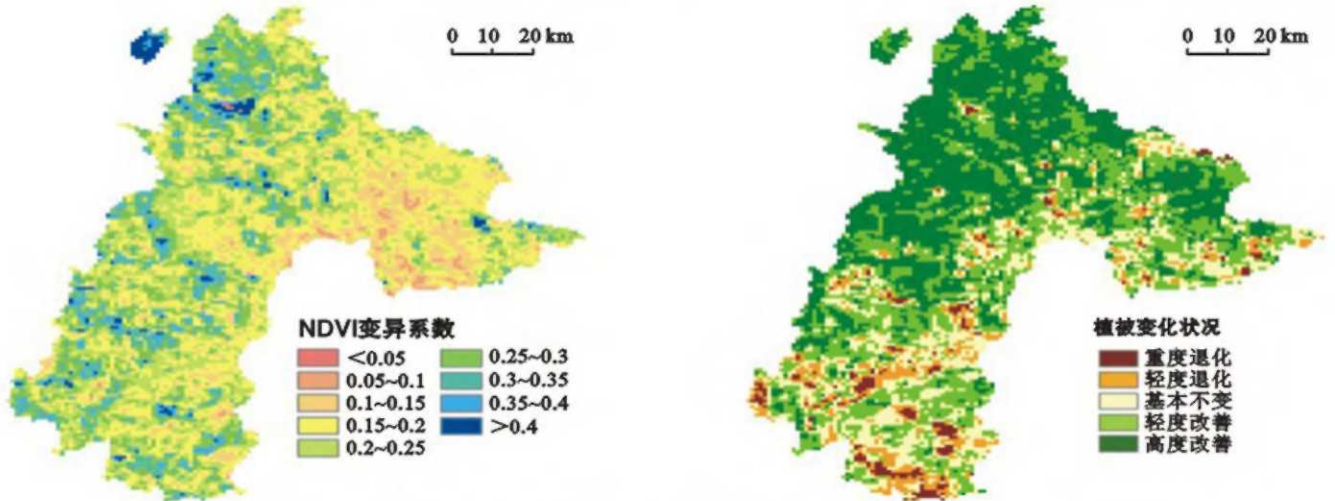
[参 考 文 献]

- [1] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, et al. The global carbon cycle[J]. American Scientist, 1990, 78(4): 310-326.
- [2] Bohn V L. Estimate of organic carbon in world soils: I [J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(3): 468-470.
- [3] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils: II [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5): 1118-1119.
- [4] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and life zones[J]. Nature, 1982, 298(8): 156-159.
- [5] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of soil Science, 1996, 47(2): 151-163.
- [6] 陈泮勤. 地球系统碳循环[M]. 北京: 科技出版社, 2004.
- [7] 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): 220-28.
- [8] 杜有新, 吴从建. 庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1675-1681.
- [9] 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): 1078-1086.
- [10] 唐国勇, 黄道友, 黄敏, 等. 红壤丘陵景观表层土壤有机碳空间变异特点及其影响因子[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 754-759.
- [11] 柯炳焱, 张璐, 苏志尧. 粤北亚热带山地森林土壤有机碳沿海拔梯度的变化[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2): 151-156.
- [12] 郭建明, 胡理乐, 林伟, 等. 秦岭太白红杉林土壤有机碳密度研究[J]. 环境科学研究, 2012, 23(12): 1465-1469.
- [13] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 470-476.
- [14] 秦松, 樊燕, 刘洪斌, 等. 地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 47-52.
- [15] 葛翠萍, 赵军, 王秀峰, 等. 东北黑土区坡耕地地形因子对土壤水分和容重的影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 17-19.
- [16] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 6-9.
- [17] 宋丰骥, 常庆瑞, 钟德燕. 黄土高原沟壑区土壤养分空间变异及其与地形因子的相关性[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(12): 167-180.
- [18] 杨尚斌. 黄土丘陵区延河流域退耕还林草土壤固碳潜力评估[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [19] 张俊华, 李国栋. 黑河中游不同土地利用类型下土壤碳储量及其空间变化[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 983-988.
- [20] 孙文义, 郭胜利. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1604-1616.
- [21] 方运霆, 莫江明. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报, 2011, 24(1): 136-142.
- [22] 刘留辉. 基于 GIS 技术的区域耕地耕层土壤碳储量及其价值时空变化研究[D]. 福建 福州: 福建农林大学, 2009.

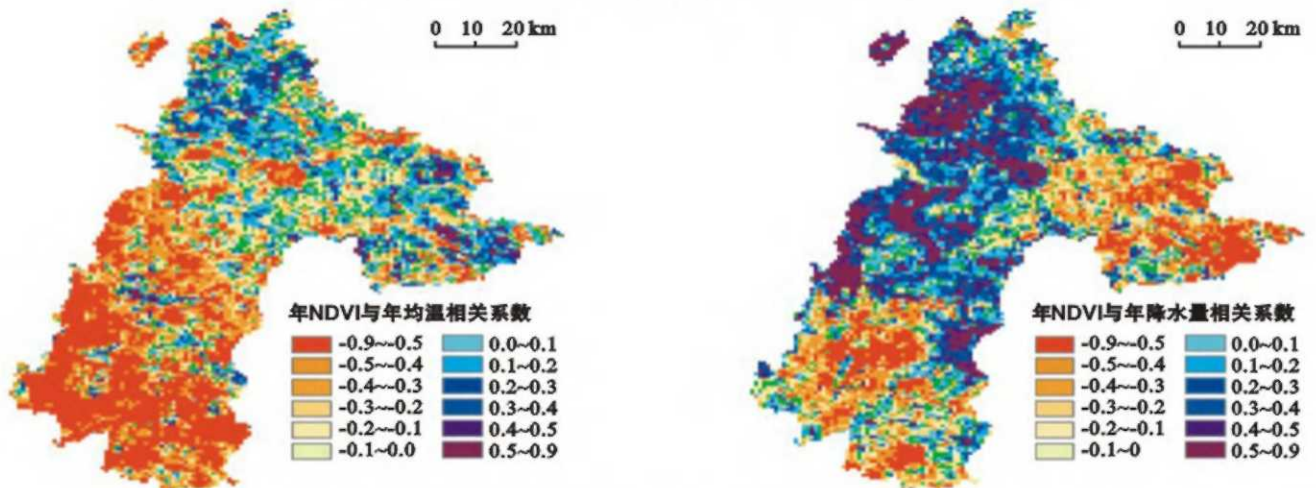


附图1 安徽省霍山县1994和2011年植被覆盖度空间分布

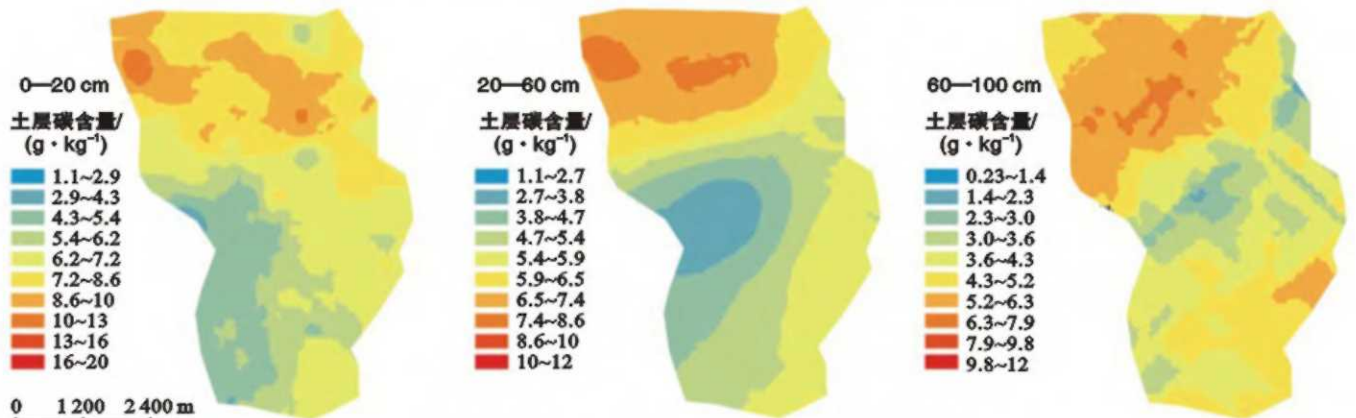
附图2 安徽省霍山县2020年植被覆盖度预测



附图3 贵州省典型喀斯特区域NDVI变异系数和植被变化状况(1999—2010年)



附图4 贵州省典型喀斯特区NDVI与年平均气温和年降水量间相关系数分布(1999—2010年)



附图5 黄花甸子流域各土层土壤有机碳含量分布