

辽宁西部沿海地区土壤碳库时空分布特征及其影响因素

王诚煜,李玉超,于成广,王成龙,王大鹏
(辽宁省地质矿产调查院有限责任公司,沈阳 110031)

摘要:沿海地区是海陆交互特殊地带,其土壤碳库变化对全球碳循环具有特殊意义。本文选择辽宁西部沿海多目标区域地球化学调查覆盖区作为研究重点,计算了区内土壤碳储量和碳密度,对其空间分布特征及近40年来土壤碳库变化状况和影响因素进行研究,旨在为该区今后土地利用规划、生态环境保护提供数据支撑。结果表明:研究区表、中、深层土壤碳密度空间分布规律基本一致,从20世纪80年代至今,表、中层土壤有机碳储量和碳密度总体均呈显著增加态势,表层土壤有机碳储量增加1.93 Mt,中层土壤有机碳储量增加9.88 Mt。其空间分布特征显示,高海拔、低温多雨有利于土壤有机碳的积累,降水增多、土壤酸化不利于土壤无机碳的积累。此外,土壤类型、土地利用类型、地貌类型和地质单元均与土壤碳密度显著相关,土地利用类型对土壤碳库影响最为深刻。

关键词:土壤碳密度;土壤碳储量;沿海地区;时空变化

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2019)03-0208-11

陆地土壤是全球地表系统中碳库的重要组成部分,全球土壤碳库达到 $2.2 \times 10^3 \sim 3 \times 10^3 \text{ Pg}^{[1-2]}$,其中有有机碳储量约为 $1.5 \times 10^3 \sim 1.6 \times 10^3 \text{ Pg}^{[3]}$ 。土壤碳库储量的较小幅度变动,会以温室效应的加强或削弱来强烈地影响地球气候系统^[4]。近年来,随着土壤无机碳研究深入,无机碳库的重要性凸显出来^[5],IPCC估计全球0~100 cm深度土壤无机碳库储量约为835 Pg^[6]。土壤碳库在陆地生态系统中不断发生着“源”“汇”相互转化^[7]。研究表明,土地利用方式变化、农业耕作水平都会显著影响土壤碳储量^[8-9],同时,土壤有机碳含量与温度、降雨等气候因子相关^[10]。

因众多河流入海,沿海地区具有强烈的海陆交互作用,是陆地碳库与海洋碳库交换的重要区域^[11]。沿海优越的地理优势,导致城市化和农业化较高,对土壤碳库的影响相对较大,因此该区域土壤碳库被诸多学者关注。刘国华等基于全国第二次土壤普查数据采用土壤类型法计算了环渤海地区的土壤有机碳库空间分布格局,研究显示人类活动对土壤有机碳影响明显^[12]。

目前,我国沿海地区土壤碳库研究较少,且计算

方法大多采用土壤类型法、植被类型法和模型法等进行估算,存在不确定因素多,误差跨度大等问题^[12-14]。多目标区域地球化学调查是21世纪初开展的全国范围内的基础地质调查,积累了最新的土壤碳数据,同时结合自身技术特点,提出依据单位土壤碳量的计算方法^[15]。近年来,已有多数研究采用该方法精确计算了我国典型地区的土壤碳储量^[16-18]。

辽宁西部沿海地区是我国东北重要的沿海经济带,通过多目标区域地球化学调查已积累了大量表、深层土壤有机碳、全碳分析数据。本文计算土壤碳密度和碳储量,旨在分析土壤碳库空间分布特征,研究20世纪80年代至今约40年间土壤有机碳变化趋势,同时探索自然因素和人为因素对土壤碳库的影响。

1 研究区概况

研究区地处辽宁西部沿海,行政区划属葫芦岛市、兴城市和绥中县,总面积约6 200 km²(图1)。研究区依山傍海,地形地势受燕山山脉制约,区内山地属燕山山脉的东延部分,地势自西北向东南逐渐降

收稿日期:2019-05-13

资助项目:中国地质调查局“辽宁西部沿海经济带1/25万土地质量地球化学调查项目(DD20160316-1)”

作者简介:王诚煜(1987-),男,工程师,博士,毕业于中国地质大学(北京),主要从事土地质量地球化学调查与评价工作;E-mail:kingback28@163.com。

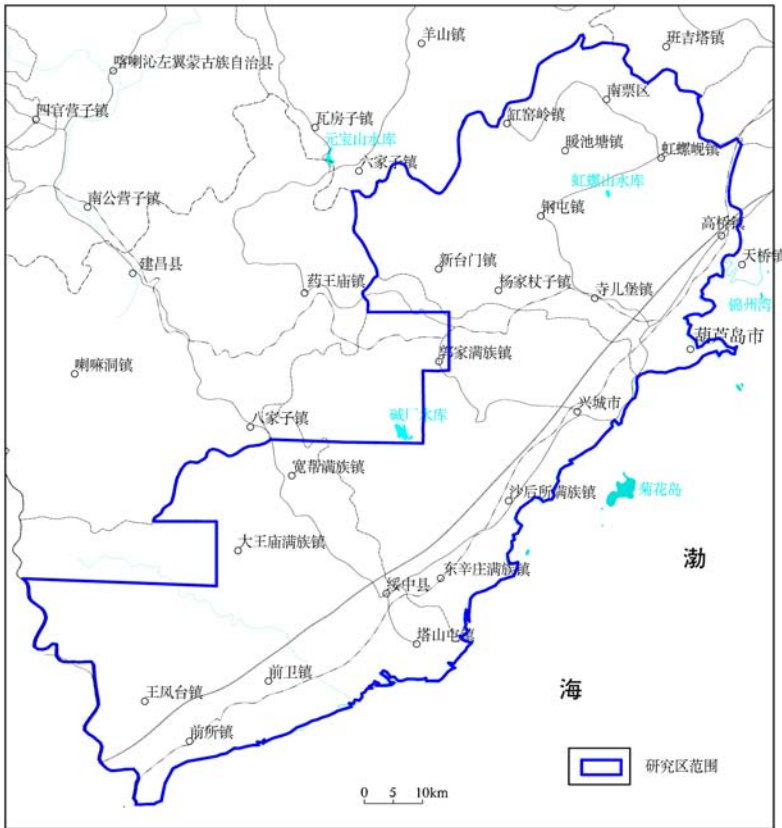


图1 研究区位置图
Fig.1 Study area location map

低,由海拔400 m以上的山区,经丘陵区到海拔20 m以下的滨海平原,在渤海海岸形成狭长的滨海平原,素有“辽西走廊”之称。研究区属温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,水热同期,降水集中,日照充足,季风明显。年平均气温在8.7~9.8℃,年平均降水量为600~652.5 mm,年平均蒸发量为1 714.6 mm,无霜期175天左右,年均日照时数2 544.2小时,日照百分率为57%。

研究区土地利用类型多样化,其中耕地约2 318 km²(37.51%),林地约1 802 km²(29.16%),草地约823 km²(13.32%),园地约550 km²(8.90%)。土壤类型主要有棕壤、潮土、粗骨土、褐土、滨海盐土、石质土、水稻土等。其中,棕壤分布最广,面积约为2 905 km²(47%),其次为潮土和粗骨土,面积分别约为1 916 km²(31%)和1 143 km²(18.5%)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文计算土壤碳密度和碳储量的参数提取于两种土壤数据:全国第二次土壤普查数据和多目标区

域地球化学调查数据。全国第二次土壤普查数据来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)所构建的世界和谐土壤数据库(HWSD),数据分辨率为1 km。中国境内数据来源为南京土壤研究所提供的1/100万土壤数据,主要汇编自20世纪80年代开展的全国第二次土壤普查成果。该数据集可通过“地球系统科学数据共享平台”^[19]浏览下载,数据为grid栅格格式,WGS84投影。该数据提供了20世纪80年代土壤有机碳含量数据,用于分析研究区土壤碳密度的变化特征。

多目标区域地球化学调查数据来源于2016—2017年,辽宁省多目标区域地球化学调查项目,其采用双层网格化土壤测量方法^[20-21],表层(0~20 cm)土壤样品采样密度为1个点/km²,深层(0~180 cm)土壤样品采样密度为1个点/4 km²。土壤的分析样品由4个表层单点样组合而成,即表层土壤分析单元为1个点/4 km²,深层土壤分析单元为1个点/16 km²。

本文采用的1 km温度降水气候栅格提取自多年平均气温和多年平均降水数据^[22],其中多年平均气温来自库中收录的李泽辉等提供的1961年至1990年平均气温插值后的1 km栅格数据。多年平均降水来源于该数据库收录的倪建华等提供的1961至1990年平均气温插值后的1 km栅格数据。

2.2 样品测试

样品分析测试由国土资源部沈阳矿产资源监督检查中心负责,土壤有机碳和全碳分析采用X-射线荧光光谱法和重铬酸钾容量法,样品的测试和质量监控按《多目标区域地球化学调查规范(1/250 000)》执行^[20-21],测试分析质量参数见表1。

2.3 数据处理

数据处理基于Microsoft Excel™ 2007、SPSS™

表1 测试分析质量参数表
Tab.1 Test and analyze quality parameters

	分析准确度		分析精密度		内检合格 合格	报出率
	RSD%	合格率	ΔlgC	合格率		
有机碳	0.93 ~ 9.44	100%	< 0.0001 ~ 0.025	100%	100%	100%
全碳	2.43 ~ 17.0	100%	0.002 ~ 0.024	100%	100%	100%

23、MapGIS™ 6.7和ArcGIS™ 10.2完成。

辽宁西部沿海地区多目标地球化学调查数据的表层和深层分析数据被赋予所在网格的中心坐标,并在ArcGIS中分别制作成表层和深层点文件。按照最近距离原则进行空间连接,将1个深层点数据赋给邻近4个表层点数据,形成以表层点为基准的空间信息数据库。将全国第二次土壤普查数据、地形地貌数据、土地利用类型数据、地质单元数据、土壤类型数据、1 km温度降水气候栅格数据等矢量和栅格数据与表层点进行叠加分析,按照空间位置获取各点属性信息,并加入到属性表中,最终导出属性表到Microsoft Excel软件中以做分析计算。

土壤碳含量、碳密度与影响因素的多元回归分

(1)土壤有机碳密度^[8](SOCD,单位kg/m²)

①表层土壤有机碳密度(0~20 cm)

$$SOCD_{表} = TOC_{表} \times \rho_{表} \times \frac{100 - G_{表}}{100} \times \Delta D \div 10$$

式中:TOC_表为表层土壤有机碳含量(%); ΔD 为表层土壤深度,取20 cm; $\rho_{表}$ 为表层土壤容重(g/cm³);G_表为表层土壤砾石含量百分比(%)。

②中层土壤有机碳密度(0~100 cm)

$$SOCD_{中} = \left\{ \frac{\left(TOC_{表} \times \rho_{表} \times \frac{100 - G_{表}}{100} - TOC_{深} \times \rho_{深} \times \frac{100 - G_{深}}{100} \right) \times [(d_1 - d_3) + d_3 \times (\ln d_3 - \ln d_2)]}{d_3 \times (\ln d_1 - \ln d_2)} + TOC_{深} \times \rho_{深} \times \frac{100 - G_{深}}{100} \right\} \times \Delta D \div 10$$

式中:TOC_深为深层土壤有机碳含量(%); ΔD 为中层土壤深度,取100 cm; $\rho_{深}$ 为深层土壤容重(g/cm³);G_深为深层土壤砾石含量百分比(%); d_1, d_2, d_3 分别取10 cm,180 cm和100 cm。

③深层土壤有机碳密度(0~180 cm)

$$SOCD_{深} = \left[\frac{\left(TOC_{表} \times \rho_{表} \times \frac{100 - G_{表}}{100} - TOC_{深} \times \rho_{深} \times \frac{100 - G_{深}}{100} \right) \times (d_1 - d_2)}{d_2 \times (\ln d_1 - \ln d_2)} + TOC_{深} \times \rho_{深} \times \frac{100 - G_{深}}{100} \right] \times \Delta D \div 10$$

式中: ΔD 为深层土壤深度,取180 cm。

(2)土壤无机碳密度(SICD,单位kg/m²)

①表层土壤无机碳密度(0~20 cm)

$$SICD_{表} = TIC_{表} \times \rho_{表} \times \frac{100 - G_{表}}{100} \times \Delta D \div 10$$

式中:TIC_表为表层土壤无机碳含量(%); ΔD 为表层土壤深度,取20 cm。

②中层土壤无机碳密度(0~100 cm)

$$SICD_{中} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{\left(TIC_{表} \times \rho_{表} \times \frac{100 - G_{表}}{100} - TIC_{深} \times \rho_{深} \times \frac{100 - G_{深}}{100} \right) \times (d_1 - d_3)}{(d_2 - d_1)} + 2TIC_{表} \times \rho_{表} \times \frac{100 - G_{表}}{100} \right] \times \Delta D \div 10$$

式中:TIC_深为深层土壤无机碳含量(%); ΔD 为中层土壤深度,取100 cm。

析和相关性分析通过SPSS实现,其中数值型数据采用pearson相关分析,非数值型数据采用spearman相关分析。土壤碳密度图在MapGIS软件中完成。

2.4 数据计算方法

依据多目标区域地球化学调查所采用的双层采样网格化模式,计算土壤0~20 cm、0~100 cm、0~180 cm三个深度土壤碳库的碳密度和碳储量。本文有机碳和无机碳密度计算方法是以奚小环的计算方法为基础加以修正的^[9,15]。土壤表层和深层容重、砾石体积百分比等基本参数来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)所构建的世界和谐土壤数据库(HWSD)。具体公式方法如下:

③深层土壤无机碳密度(0~180 cm)

$$SICD_{深} = \frac{1}{2} \times \left[TIC_{表} \times \rho_{表} \times \frac{100 - G_{表}}{100} + TIC_{深} \times \rho_{深} \times \frac{100 - G_{深}}{100} \right] \times \Delta D \div 10$$

式中:ΔD为深层土壤深度,取180 cm。

(3)单位土壤碳量^[21](USCA,单位t)

$$USCA_{TOC} = SOCD \times 4 \times 10^3$$

式中:USCA_{TOC}为单位土壤有机碳量(t)。

$$USCA_{TIC} = SICD \times 4 \times 10^3$$

式中:USCA_{TIC}为单位土壤无机碳量(t)。

$$USCA_{TC} = USCA_{TOC} + USCA_{TIC}$$

式中:USCA_{TC}为单位土壤碳量(t)。

(4)土壤碳储量^[21](SCR,单位t)

$$SCR_{TOC} = \sum_{i=1}^n USCA_i$$

式中:n:土壤有机碳储量统计范围内,单位土壤碳量加和的个数。

$$SCR_{TIC} = \sum_{i=1}^n USCA_i$$

式中:n:土壤无机碳储量统计范围内,单位土壤碳量加和的个数。

3 结果与分析

3.1 土壤碳储量和密度空间分布特征

辽宁西部沿海地区土壤碳储量和土壤密度分布特征见表2,表层、中层和深层土壤全碳储量分别为16.46 Mt、61.36 Mt和93.37 Mt。与辽河流域、环渤海地区以及东北平原相比较,研究区全碳密度略低于辽河流域^[23](表层2.65 kg/m²,中层10.28 kg/m²,深层16.45 kg/m²),有机碳密度均低于环渤海地区^[12](表层2.88 kg/m²,中层8.94 kg/m²)和东北平原^[24](表层3.33 kg/m²,中层12.90 kg/m²,深层16.16 kg/m²)。研究区土壤有机碳密度、无机碳密度和全碳密度在各深度的空间分布特征基本一致(图2~4),高值区主要分布在葫芦岛市连山区和南票区以及绥中县西部。

研究区土壤有机碳分布与土地利用类型密切相关,高值区集中分布在低山丘陵区,以林草地为主,土壤开垦程度低,植被丰富,土壤有机碳易于累积,显示相对较

表2 辽宁西部沿海地区各深度土壤碳储量和土壤碳密度
Tab.2 Soil carbon reverse and soil carbon density at different depths in the western coast of Liaoning province

类型	表层		中层		深层	
	碳储量 / Mt	平均碳密度 / (kg/m ²)	碳储量 / Mt	平均碳密度 / (kg/m ²)	碳储量 / Mt	平均碳密度 / (kg/m ²)
有机碳	13.65	2.14	48.41	7.60	71.89	11.29
无机碳	2.81	0.44	12.95	2.03	21.48	3.37
全碳	16.46	2.58	61.36	9.63	93.37	14.66

高的含量水平。低值区与研究区耕地分布较为吻合,长期的过度开垦以及不合理的耕种模式,势必会导致土壤有机质含量降低,进而消耗有机碳含量水平。此外,在兴城-葫芦岛沿海一带,表层土壤有机碳相对于深层表现出高值区,该区域是城镇集中区,人类活动显著,可能是城市土壤中工业、生活垃圾等有机废弃物输入较多,促进了有机碳的积累。由于土壤无机碳的来源一部分是有机碳分解释放CO₂进入土壤溶液转化而来,因此,研究区无机碳的分布特征与有机碳具有相同的趋势^[25]。

3.2 土壤有机碳储量和密度时间分布特征

通过对研究区现阶段和20世纪80年代的表层、

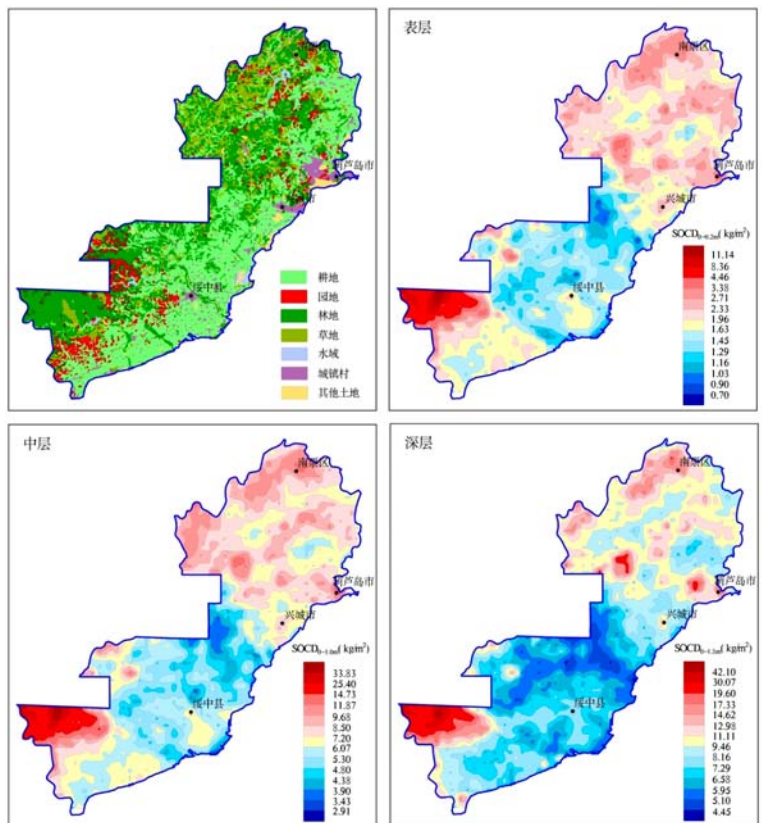


图2 辽宁西部沿海地区表层、中层和深层土壤有机碳密度分布图
Fig.2 Distribution of organic carbon density in top, middle and deep soil in the western coast of Liaoning province

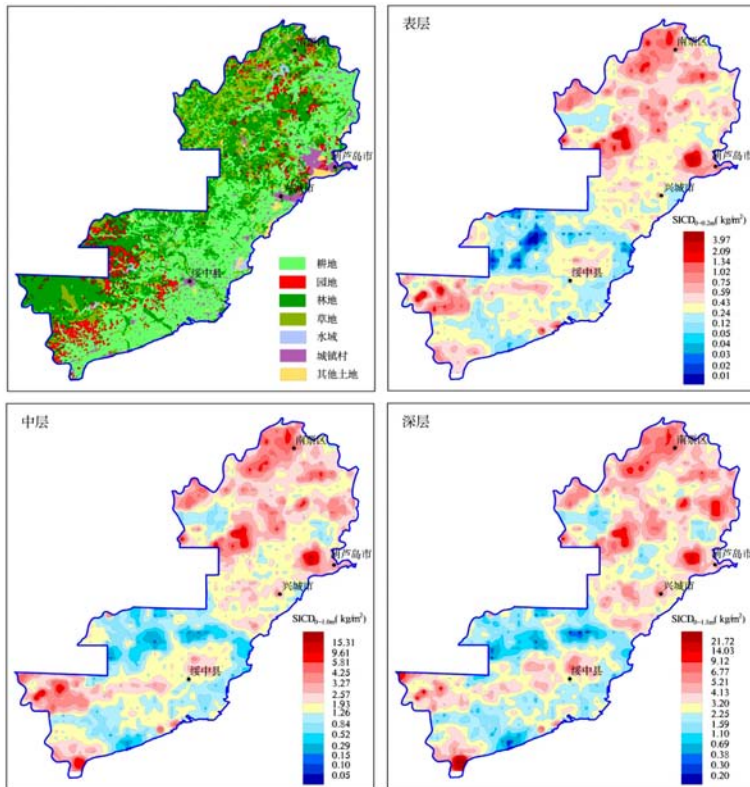


图3 辽宁西部沿海地区表层、中层和深层土壤无机碳密度分布图
Fig.3 Distribution of inorganic carbon density in top, middle and deep soil in the western coast of Liaoning province

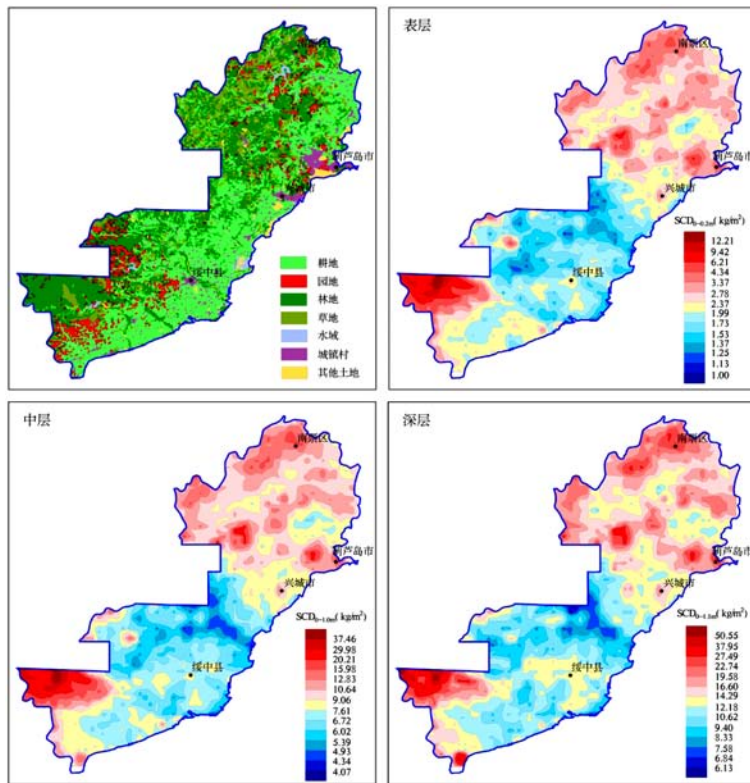


图4 辽宁西部沿海地区表层、中层和深层土壤全碳密度分布图
Fig.4 Distribution of total carbon density in top, middle and deep soil in the western coast of Liaoning province

中层土壤有机碳密度进行成对双样本均值分析t-检验,结果表明表层、中层土壤有机碳密度在40年间具有显著差异($\alpha < 0.01$),表层和中层土壤有机碳储量和碳密度均呈增加态势,表层土壤有机碳储量增加量为1.93 Mt,碳密度增加量为0.30 kg/m²。中层土壤有机碳储量增加量为9.88 Mt,碳密度增加量为1.55 kg/m²(表3)。

区内土壤表层和中层有机碳密度具有相同的空间变化特征(图5)。近40年间,葫芦岛市连山区、南票区以及绥中县西部土壤有机碳密度呈上升趋势,表层和中层各平均增高4.18 kg/m²和12.91 kg/m²,特别是研究区西南角的加碑砬地区增加量最高。而兴城市中南部、绥中县东部地区土壤有机碳密度呈下降趋势,表层和中层各平均下降1.78 kg/m²和4.19 kg/m²,其中兴城市碱厂满族乡周边区域较为明显。

近40年间碳密度变化特征显示,土壤有机碳变化与土地利用类型密切相关,升高区主要为低山丘陵区的林草地,有利于土壤有机碳的积累,是土壤固碳的一种重要方式。降低区主要分布在耕地集中区,反映了受人类农业活动影响,土壤中碳不断释放。因此,农耕地较林草地更容易成为碳源,释放出较多的碳。

4.3 土壤碳库影响因素

土壤碳库会受到自然因素和人为因素的影响,自然因素主要包括温度、水分、土壤理化性质、地形、地表植被等;而人为因素主要包括农业活动,用地类型变更等因素,涉及土地利用和土地覆被变化,耕作措施,秸秆还田和施加有机肥,种植制度和作物系统等,自然和人为因素相互作用形成土壤碳库的空间差异^[26]。为了准确识别这些因素对区域土壤碳库的影响程度,本文通过pearson和spearman相关分析及多元回归分析方法,从地形、气候、土壤理化性质、土壤类型、地质背景、土地利用类型以及地貌类型等因素分析调查区土壤碳含量以及碳密度的影响机制。

4.3.1 地形因素

表3 辽宁西部沿海地区土壤有机碳储量和密度变化特征表
Tab.3 Characteristics of soil organic carbon reserve and density change in the western coast of Liaoning province

土壤深度	有机碳储量 / Mt			平均有机碳密度/(kg/m ²)		
	2016—2017	20世纪80年代	差值	2016—2017	20世纪80年代	差值
表层(0~20 cm)	13.65	11.72	1.93	2.14	1.84	0.30
中层(0~100 cm)	48.41	38.53	9.88	7.60	6.05	1.55

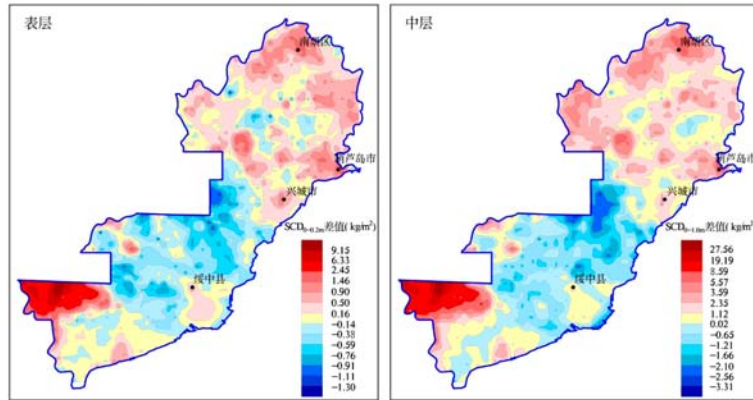


图5 辽宁西部沿海地区土壤表层和中层有机碳密度变化图

Fig.5 Change of organic carbon density in top and middle soil in the western coast of Liaoning province

地形因素主要包括海拔和坡度,通过对土壤温度、水分以及土壤表层风化速度的影响,继而影响土壤碳的输入和输出^[27]。随着海拔高度的升高,气温下降会导致微生物活性降低,土壤有机碳含量显著增加。

相关性分析显示,研究区不同深度、不同类型的土壤碳含量和碳密度均与海拔、坡度呈显著正相关。其中,海拔、坡度对有机碳的影响要高于无机碳,表现出相关系数较高。中层的土壤碳密度与海拔、坡度的相关系数高于表层和深层,可见,地形因素影响土壤碳库的垂直距离是有限的(表4,表5)。此外,研究区近40年间土壤有机碳库的变化与海拔、坡度呈显著正相关,侧面表明高海拔的低山丘陵林草区有利于土壤有机碳的积累。

4.3.2 气候因素

对土壤碳的输入与分解过程起关键作用的气候因子主要是温度和降水,尤其对有机碳影响显著^[28]。气候通过影响土壤水分和土壤温度,影响微生物对地面凋落物、

表4 土壤碳含量与影响因素的相关系数

Tab.4 Correlation coefficient of soil carbon content and influencing factors

因素	TC		TOC		TIC	
	表层	深层	表层	深层	表层	深层
海拔	0.506**	0.511**	0.517**	0.626**	0.154**	0.125**
坡度	0.566**	0.508**	0.569**	0.636**	0.190**	0.114**
年均温	-0.466**	-0.307**	-0.442**	-0.374**	-0.216**	-0.078
年降水量	0.015	-0.041	0.089**	-0.055	-0.17**	-0.004
SiO ₂	-0.174**	-0.117*	-0.100**	-0.123*	-0.246**	-0.053
Al ₂ O ₃	-0.097**	-0.192**	-0.126**	-0.213**	0.047	-0.073
TFe ₂ O ₃	0.060*	0.115*	0.060*	0.147**	0.035	0.029
MgO	0.175**	0.28**	0.121**	0.179**	0.200**	0.241**
CaO	0.185**	0.179**	0.072**	0.046	0.364**	0.225**
Na ₂ O	-0.424**	-0.245**	-0.357**	-0.239**	-0.280**	-0.121*
K ₂ O	-0.118**	-0.107*	-0.082**	-0.035	-0.112**	-0.120*
N	0.886**	0.689**	0.907**	0.813**	0.248**	0.197**
P	0.071**	0.057	0.079**	0.103*	0.013	-0.001
S	0.518**	0.152**	0.448**	0.215**	0.327**	0.011
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.015	-0.081	-0.038	-0.083	0.143**	-0.038
pH	0.276**	0.088	0.191**	0.050	0.297**	0.074
土壤容重	-0.069**	-0.069	-0.06*	-0.089	-0.045	-0.010

注:**和*分别表示在p < 0.01和p < 0.05水平上有显著相关性

表5 土壤碳密度与影响因素的相关系数

Tab.5 Correlation coefficient of soil carbon density and influencing factors

因素	SCD			SOCD			SCID			SOCID _{1980s-2018} 差值	
	表层	中层	深层	表层	中层	深层	表层	中层	深层	表层	中层
海拔	0.531**	0.573**	0.495**	0.531**	0.596**	0.562**	0.172**	0.192**	0.100**	0.435**	0.561**
坡度	0.586**	0.615**	0.511**	0.580**	0.632**	0.573**	0.207**	0.224**	0.114**	0.486**	0.598**
年均温	-0.475**	-0.520**	-0.499**	-0.450**	-0.508**	-0.524**	-0.229**	-0.249**	-0.172**	-0.371**	-0.475**
年降水量	0.027	-0.031	-0.138**	0.088**	0.040	-0.073**	-0.173**	-0.171**	-0.167**	0.110**	0.051*
土壤类型	0.165**	0.167**	0.116**	0.176**	0.185**	0.145**	0.022	0.033	0.000	0.098**	0.163**
土地利用类型	0.263**	0.299**	0.271**	0.227**	0.272**	0.275**	0.190**	0.187**	0.108**	0.187**	0.257**
地貌类型	-0.282**	-0.328**	-0.305**	-0.264**	-0.321**	-0.325**	-0.146**	-0.155**	-0.095**	-0.202**	-0.298**
地质单元	-0.291**	-0.314**	-0.284**	-0.269**	-0.301**	-0.298**	-0.159**	-0.163**	-0.100**	-0.296**	-0.307**

注:**和*分别表示在p < 0.01和p < 0.05水平上有显著相关性

土壤有机碳的分解和转化^[29]。

相关性分析显示,研究区不同深度、不同类型的土壤碳含量和碳密度均与温度呈显著负相关,可见温度升高不利于土壤碳库的积累。对于降水因素,与表层有机碳含量呈显著正相关,与表层无机碳呈显著负相关。同时,不同深度的土壤无机碳密度也表现出显著的负相关,可见降水增多有利于土壤有机碳库积累,不利于无机碳库积累。此外,研究区近40年间土壤有机碳库的变化与温度、降水密切相关,低温多雨会促使土壤有机碳库的增加(表4,表5)。

4.3.3 土壤理化因素

土壤理化特性在局部范围内影响土壤有机碳的含量,如粘土矿物类型、pH值、物理结构及其养分状况等均会影响有机碳在土壤中的积累^[30]。

相关性分析显示(表4,表5),研究区不同深度的碳含量与氮含量均呈显著正相关,其中全碳和有机碳具有较高的相关系数,表明土壤碳含量的保持和质量分数在一定程度上取决于氮含量的多少,这与土壤氮含量对微生物活性的较大影响有直接关系。土壤磷、硫含量均与与表层全碳、表层和深层有机碳呈显著正相关,而钾含量与不同深度的全碳、无机碳含量均呈显著负相关。

对于土壤中的矿质元素,研究区不同深度的各类型碳含量与Na₂O呈显著负相关,而与CaO、MgO呈显著正相关。各深度的全碳和有机碳与SiO₂、Al₂O₃均呈显著负相关,而与TFe₂O₃呈显著正相关。已有研究表明,碱性离子(如Ca、Mg)、铝铁氧化物与土壤有机碳存在关联^[31-32],铝铁氧化物能够影响有机碳与粘粒的吸附作用,但对其影响不同研究存在差异^[33-34],与本研究结果一致,可能与地域或其他因素有关。

土壤酸碱性与无机碳含量密切相关,酸性土壤不利于土壤无机碳的累积,研究区不同深度的土壤全碳、无机碳含量均显示与pH呈显著正相关。

研究区表层全碳和有机碳含量均与容重呈显著负相关,这是由于土壤容重的升高,改变了土壤的水分、空气、热量状况,使土壤孔隙度逐渐降低,土壤结构性逐渐下降,土体逐渐变得紧实致密,从而致使土壤碳含量的流失。

研究区样品没有直接测试土壤质地,这里使用Al₂O₃和SiO₂质量分数之比 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{SiO}_2)$ 表达土壤质地信息, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{SiO}_2)$ 数值越大代表了样品

中粘粒成分越高^[35]。已有研究表明土壤有机碳含量随粘粒含量的增加而增加^[35],但研究区土壤有机碳含量与质地并没有显著的相关性,而与表层土壤无机碳含量呈显著正相关,说明质地对土壤碳含量的影响复杂,存在地区差异性。

4.3.4 其他因素

土壤碳含量还受成土母质类型、土壤类型、地貌类型以及农业经营实践等多种物理因素、自然因素和人为因素的控制,并存在各种因子之间的相互作用^[36]。

相关性分析显示(表4,表5),研究区不同深度的土壤全碳、土壤有机碳密度均与土壤类型呈显著正相关;不同深度的各类型土壤碳密度均与土地利用类型呈显著正相关,而与地貌类型、成土母质呈显著负相关,在所有相关系数中以土地利用类型最大。这表明研究区土壤碳含量的分布是受人类活动和自然因素的共同影响,尤其以人类活动影响最为明显,且发现人类活动已影响到深层土壤,这一现象应引起足够重视。此外,研究区近40年间土壤有机碳库的变化与土壤类型、土地利用类型、地貌类型和成土母质也存在显著的相关性。

4.3.5 土壤碳库综合影响分析

分别以土壤碳含量和土壤碳密度含量为因变量,以地形、气候、理化因子为自变量,进行多元线性回归分析,采用逐步法剔除不显著和有相关关系的因子,得到标准回归方程,以探索各种影响因素综合对土壤碳库作用的程度。

(1) 表层土壤碳含量:

$$TC_{\text{表层}} = 0.006MAP + 0.018SLO + 0.001N + 0.001S - 0.053\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0.328\text{CaO} - 0.111\text{Na}_2\text{O} - 0.156\text{MgO} - 3.164 (F = 1099.885, p < 0.001)$$

$$TOC_{\text{表层}} = 0.008MAP - 0.09MAT + 0.01SLO + 0.001N + 0.001S - 0.023\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0.093\text{CaO} - 0.052\text{K}_2\text{O} - 0.074\text{MgO} - 4.135 (F = 869.695, p < 0.001)$$

$$TIC_{\text{表层}} = 0.062MAT + 0.008SLO + 0.00006N - 0.00007P - 0.062\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0.204\text{CaO} - 0.09\text{Na}_2\text{O} - 0.091\text{MgO} - 0.017\text{SiO}_2 + 1.013 (F = 74.211, p < 0.001)$$

(2) 深层土壤碳含量

$$TC_{\text{深层}} = 0.001N + 0.082\text{CaO} + 0.01\text{SiO}_2 - 0.781 (F = 108.937, p < 0.001)$$

$$TOC_{\text{深层}} = 0.001N + 0.00007P + 0.001ELV -$$

$$0.03\text{pH} - 0.029\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0.282 (F = 206.851, p < 0.001)$$

$$\text{TIC}_{\text{深层}} = 0.117\text{MgO} - 0.037\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0.084 (F = 14.992, p < 0.001)$$

(3) 表层土壤碳密度

$$\text{SOCD}_{\text{表层}} = 0.085\text{SLO} - 1.577\text{MAT} + 0.06\text{MAP} - 18.865 (F = 423.603, p < 0.001)$$

$$\text{SICD}_{\text{表层}} = 0.021\text{SLO} - 0.001\text{ELV} - 0.144\text{MAT} - 0.003\text{MAP} + 3.674 (F = 27.224, p < 0.001)$$

$$\text{SCD}_{\text{表层}} = 0.101\text{SLO} - 1.625\text{MAT} + 0.055\text{MAP} - 15.425 (F = 382.458, p < 0.001)$$

(4) 中层土壤碳密度

$$\text{SOCD}_{\text{中层}} = 0.28\text{SLO} - 4.523\text{MAT} + 0.158\text{MAP} - 44.615 (F = 514.513, p < 0.001)$$

$$\text{SICD}_{\text{中层}} = 0.065\text{SLO} - 0.004\text{ELV} - 0.984\text{MAT} + 10.878 (F = 40.089, p < 0.001)$$

$$\text{SCD}_{\text{中层}} = 0.334\text{SLO} - 4.881\text{MAT} + 0.145\text{MAP} - 32.294 (F = 414.582, p < 0.001)$$

(5) 深层土壤碳密度

$$\text{SOCD}_{\text{深层}} = 0.24\text{SLO} - 5.528\text{MAT} + 0.136\text{MAP} - 19.095 (F = 343.002, p < 0.001)$$

$$\text{SICD}_{\text{深层}} = -1.783\text{MAT} - 0.006\text{ELV} + 20.127 (F = 29.948, p < 0.001)$$

$$\text{SCD}_{\text{深层}} = 0.259\text{SLO} - 6.014\text{MAT} + 0.109\text{MAP} + 4.677 (F = 236.081, p < 0.001)$$

式中:ELV为海拔,SLO为坡度, MAT为年均温, MAP为年均降水。

为进一步检验回归方程的可靠性,将土壤碳含量及碳密度与回归方程预测值进行显著性相关分析(图6~10)。各深度全碳和有机碳含量预测值与实测值线性关系拟合较好,相关系数均大于0.7,且呈显著正相关(表6);而土壤碳密度计算值与预测值虽然表现出显著相关性,但相关系数偏低,因此碳密度的预测效果不如碳含量。这可能是因为土壤的理化因素参与碳含量的回归分析,而未参与碳密度。可见,土壤碳库是多因素共同作用的结果。

4 结论

(1) 辽宁西部沿海地区表层、中层和深层土壤全碳储量分别为16.46 Mt、61.36 Mt和93.37 Mt,全碳平均密度分别为2.58 kg/m²、9.63 kg/m²和14.66 kg/m²。各深度土壤碳密度分布特征基本一致,葫芦岛市连山区和南票区以及绥中县西部土壤碳密度较高。

(2) 在时间上,从20世纪80年代至今,研究区表

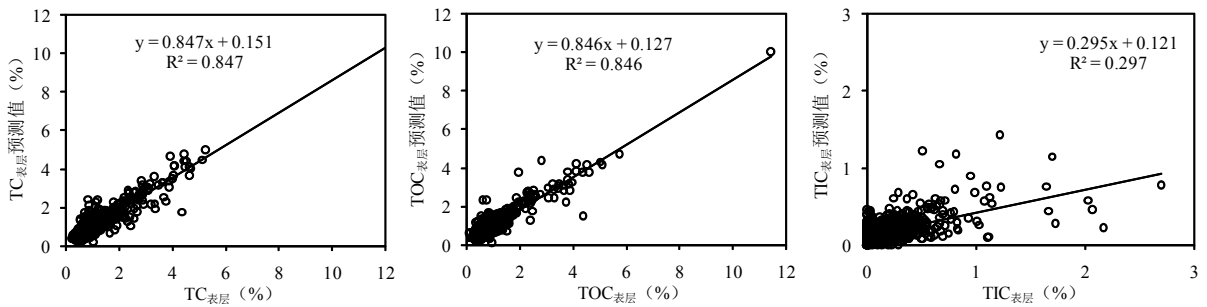


图6 表层土壤总碳含量、有机碳含量和无机碳含量多元回归预测值散点图

Fig.6 Scatter plots of multiple regression predicted values of total carbon content, organic carbon content and inorganic carbon content in top soil

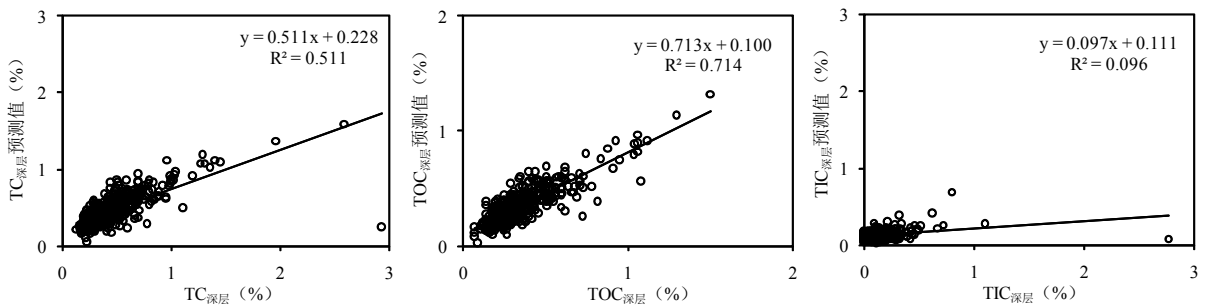


图7 深层土壤总碳含量、有机碳含量和无机碳含量多元回归预测值散点图

Fig.7 Scatter plots of multiple regression predicted values of total carbon content, organic carbon content and inorganic carbon content in deep soil

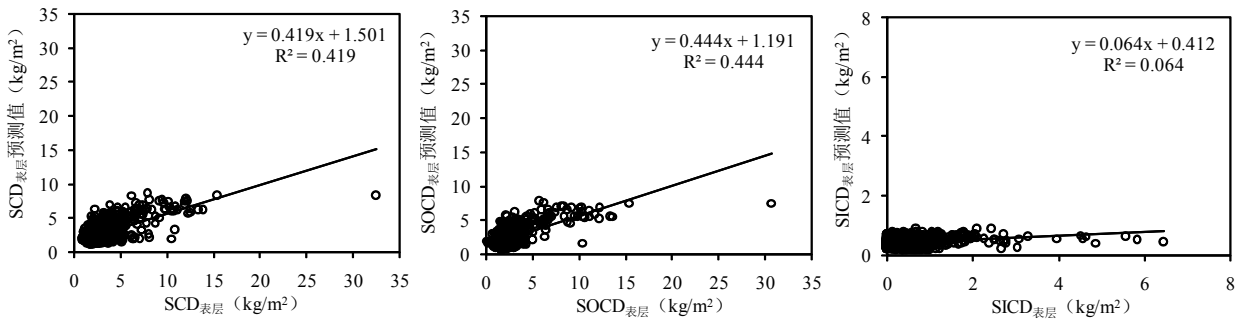


图8 表层土壤总碳密度、有机碳密度和无机碳密度多元回归预测值散点图

Fig.8 Scatter plots of multiple regression predicted values of total carbon density, organic carbon density and inorganic carbon density in top soil

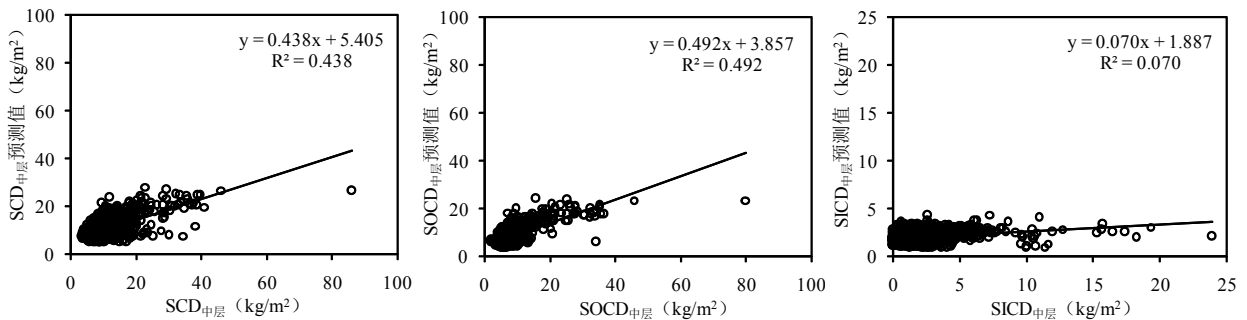


图9 中层土壤总碳密度、有机碳密度和无机碳密度多元回归预测值散点图

Fig.9 Scatter plots of multiple regression predicted values of total carbon density, organic carbon density and inorganic carbon density in middle soil

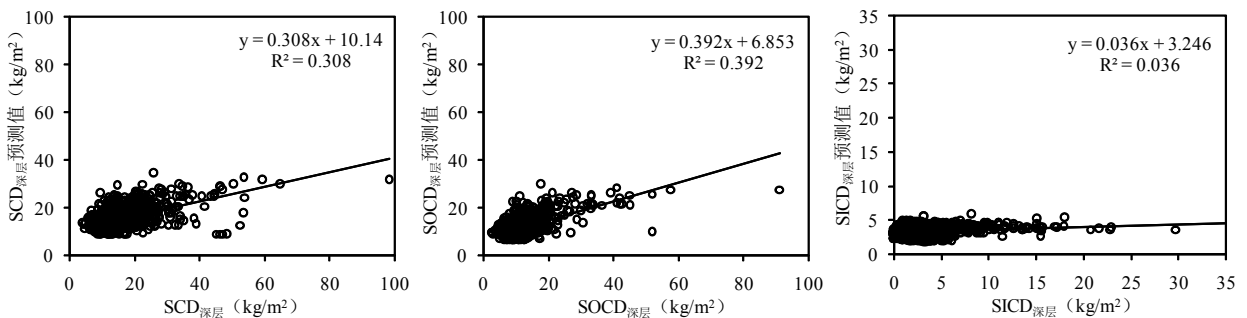


图10 深层土壤总碳密度、有机碳密度和无机碳密度多元回归预测值散点图

Fig.10 Scatter plots of multiple regression predicted values of total carbon density, organic carbon density and inorganic carbon density in deep soil

表6 土壤碳含量、碳密度与预测值的相关系数

Tab.6 Correlation coefficient of soil carbon content, carbon density and predicted value

碳密度类型		相关系数	碳含量类型		相关系数
SCD	表层	0.647**	TC	表层	0.921**
	中层	0.662**		深层	0.715**
	深层	0.555**			
SOCD	表层	0.666**	TOC	表层	0.920**
	中层	0.702**		深层	0.845**
	深层	0.627**			
SICD	表层	0.253**	TIC	表层	0.545**
	中层	0.265**		深层	0.312**
	深层	0.190**			

注:**和*分别表示在 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ 水平上有显著相关性

层和深层土壤有机碳储量和碳密度总体均呈显著增加态势,表层土壤有机碳储量增加 1.93 Mt,有机碳平均密度增加 0.30 kg/m²。中层土壤有机碳储量增加 9.88 Mt,有机平均碳密度增加 1.55 kg/m²。在空间上,土壤有机碳密度增加区域集中在葫芦岛市连山区和南票区、以及绥中县西部,而兴城市中南部和绥中县东部地区土壤有机碳密度呈下降趋势。

(3)影响土壤碳库分布的因素较多,其中地形、气候和土壤理化性质均不同程度地影响土壤碳含量及碳密度,高海拔、低温多雨有利于土壤有机碳的积累,降水增多,土壤酸化不利于土壤无机碳的积累。

土壤类型、土地利用类型、地貌类型和地质单元均与土壤碳密度呈显著相关性,土地利用类型对其影响尤为重要。

本文可为辽宁西部沿海地区土地利用规划、生态环境保护及碳循环研究等方面提供重要的数据支撑。

参考文献:

- [1] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, 1(1): 77–91.
- [2] Post W M, Emanuel W R, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156–159.
- [3] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. *土壤*, 2000, (1): 11–17.
- [4] 刘留辉, 邢世和, 高承芳, 等. 国内外土壤碳储量研究进展和存在问题及展望[J]. *土壤通报*, 2009, 40(3): 697–701.
- [5] 王海荣, 杨忠芳. 土壤无机碳研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(35): 21735–21739.
- [6] IPCC. Climate change: the IPCC scientific assessment[R] // Houghton J T, Meira Filho L J, Callader B A, et al. Intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 1990: 1–365.
- [7] 刘留辉, 邢世和, 高承芳. 土壤碳储量研究方法及其影响因素[J]. *武夷科学*, 2007, 23(1): 219–226.
- [8] 郭晶晶, 夏学齐, 杨忠芳, 等. 长江流域典型区域土壤碳库变化及其影响因素[J]. *地学前缘*, 2015, 22(6): 241–250.
- [9] 夏学齐, 杨忠芳, 余涛, 等. 中国东北地区 20 世纪末土地利用变化的土壤碳源汇效应[J]. *地学前缘*, 2011, 18(6): 56–63.
- [10] 钟聪, 杨忠芳, 夏学齐, 等. 青海省土壤有机碳储量估算及其源汇因素分析[J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 896–909.
- [11] 焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 等. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48: 1393–1421.
- [12] 刘国华, 傅伯杰, 吴钢, 等. 环渤海地区土壤有机碳库及其空间分布格局的研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1489–1493.
- [13] 甘海华, 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.
- [14] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. *中国科学*, 2003, 33(1): 72–80.
- [15] 奚小环, 杨忠芳, 夏学齐, 等. 基于多目标区域地球化学调查的中国土壤碳储量计算方法研究[J]. *地学前缘*, 2009, 16(1): 194–205.
- [16] 张素荣, 张燕, 杨俊泉, 等. 海河流域平原区土壤碳密度分布特征和碳储量估算[J]. *地质调查与研究*, 2015, 38(4): 305–310.
- [17] 李随民, 栾文楼, 宋泽峰, 等. 河北省南部平原区土壤有机碳储量估算[J]. *中国地质*, 2010, 37(2): 525–529.
- [18] 刘国栋, 李瑛, 张立, 等. 松嫩平原耕层土壤固碳潜力估算[J]. *中国地质*, 2014, 41(2): 658–664.
- [19] Guenther. Fischer. 世界土壤数据库(HWSD v1.1)(1 公里格网, 2009 年) [EB/OL]. (2010–10–04) [2013–6–25]. <http://www.geodata.cn>.
- [20] Li M, Xi X H, Xiao G Y, et al. National multi-purpose regional geochemical survey in China. *Journal of Geochemical Exploration*. 2014, 139: 21–30.
- [21] 中国地质调查局. DZ/T 0258–2014 多目标区域地球化学调查规范(1/250 000) [S]. 北京: 中国地质调查局, 2014.
- [22] 李泽辉, 苏文, 向世芳. 气候资源数据子库[EB/OL]. (1987–01–01)[2013–10–21]. <http://www.data.ac.cn>.
- [23] 于成广, 杨晓波, 刘明华, 等. 辽河流域土壤碳密度分布特征和碳储量研究[J]. *地质与资源*, 2011, 20(4): 272–277.
- [24] 奚小环, 杨忠芳, 崔玉军, 等. 东北平原土壤有机碳分布与变化趋势研究[J]. *地学前缘*, 2010, 17(3): 213–221.
- [25] Pan G X. Pedogenic carbonates in arid soils of China and the significance in terrestrial carbon transfer[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1999, 22(1): 51–57.
- [26] 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.
- [27] Birkeland P W. *Soils and Geomorphology*[M]. New York: Oxford University Press, 1999: 321–323.
- [28] Hobbie S E, Schimel J P, Trumbore S E, et al. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6: 196–210.
- [29] 常小峰, 汪诗平, 徐广平, 等. 土壤有机碳库的关键影响因素及其不确定性[J]. *广西植物*, 2013, 33(5): 710–716.
- [30] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99–105.
- [31] Oades J M. The retention of organic matter in soil[J]. *Biogeochemistry*, 1988, 5: 35–70.
- [32] Van Hees P A W, Lundström U S. Equilibrium models of aluminum and iron complexation with different organic acids in soil solution[J]. *Geoderma*, 2000, 94: 201–221.
- [33] Schwesig D, Kalbitz K, Matzner E. Effects of aluminum on the mineralization of dissolved organic carbon derived from forest floors[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(2): 311–322.
- [34] Kahle M, Kleber M, Jahn R. Predicting carbon content in illitic clay fractions from surface area, cation exchange capacity and dithionite-extractable iron[J]. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53: 639–644.
- [35] 杨忠芳, 夏学齐, 余涛, 等. 内蒙古中北部土壤碳库构成及其影响因素[J]. *地学前缘*, 2011, 18(6): 1–10.
- [36] Allen D E, Pringle M J, Page K L, et al. A review of sampling designs for the measurement of soil organic carbon in Australian grazing lands[J]. *Rangeland Journal*, 2010, 32(2): 227–246.

Temporal and spatial distribution characteristics of soil carbon pool in western coast of Liaoning province and its influencing factors

WANG Cheng-yu, LI Yu-chao, YU Cheng-guang, WANG Cheng-long, WANG Da-peng

(*Geological Survey Institute of Liaoning Province Co., Ltd, Shenyang 110031, China*)

Abstract: The change of soil carbon pool in coastal areas is of special significance to the global carbon cycle. Taking areas covered by the multi-purposes regional geochemical survey (MPRGS) in the western coast of Liaoning province as an example, the soil carbon reserve and density were calculated, and the spatial distribution characteristics, soil carbon pool changes in the past 40 years and influencing factors were studied also. It aims to provide data support for future land use planning and ecological environment protection. The results showed that the spatial distribution of carbon density are basically the same in top, middle and deep soil. Since the 1980s, the organic carbon reserves and carbon density in the top and the middle soil have increased significantly. The organic carbon reserves in the top and the middle soil increased by 1.93 Mt and 9.88 Mt respectively. According to the analysis of the influencing factors, high altitude, low temperature and rainfall are conducive to the accumulation of soil organic carbon, while increased precipitation and soil acidification are not conducive to the accumulation of soil inorganic carbon. In addition, soil type, land use, geomorphic and geological unit are all significantly correlated with soil carbon density, among which land use has the most profound influence.

Key words: soil carbon density; soil carbon reserve; coastal area; temporal and spatial change

Geological characteristics and prospecting prospects of Chenjiawu lead-zinc deposits in Chun'an county, Zhejiang province

CHAI Chong-yang¹, MA Hao¹, CHAI Yin-hong², HE Zhen¹

(1.*Henan Institute of Geological Sciences, Zhengzhou 450001, China;*

2.*Henan Province Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Zhengzhou 450001, China*)

Abstract: The Chenjiawu lead-zinc deposit of Chun'an county is located in the Huangshitan W-Sn-Pb-Zn-Ag ore prospecting area which boasts superior metallogenic geological background. In order to find out the geological mineralization conditions and mineralization characteristics in the work area, this work completed the large-scale geophysical and geochemical exploration comprehensive profile measurement based on commercial cooperation. Based on the geological achievements of Pb, Zn, Cu main ore-forming elements and comprehensive geochemical anomalies in the analysis area, systematic exploration work was carried out from shallow and deep, and several lead-zinc ore bodies were newly discovered, and the ore bodies showed a layered production. The ore-bearing horizon is the second section of the Hetang Formation, and the characteristics of layer control and structural ore-control are more obvious.

Key words: prospecting prospect; Huangshitan rock mass; Lead-zinc mine; Chen Jiawu ditch