



## 辽宁西部沿海地区土壤碳库构成及变化规律研究

王诚煜, 李玉超, 关旭, 王毅, 韩岩宏, 于跃, 杨兵兵

辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032

**摘要:** 基于辽宁西部沿海地区多目标地球化学调查获得的表层和深层土壤碳含量数据, 计算了研究区表层(0~20 cm)、中层(0~100 cm)和深层(0~180 cm)的土壤碳密度及储量, 探讨了不同分类单元的土壤碳库构成特征及固碳潜力, 并对近 40 年来土壤有机碳变化规律进行研究. 结果显示: 1) 研究区土壤碳库构成以有机碳为主, 无机碳储量随深度增加有所增大. 表层、中层和深层土壤有机碳密度分别为 2.14、7.59 和 11.27 kg/m<sup>2</sup>, 低于全国多目标调查区平均值和环渤海地区. 2) 不同分类单元土壤碳库构成具有一定差异: 表层土壤元古宇和中生界单元的碳密度较大, 而中层和深层表现为古生界土壤碳密度较大; 山地土壤碳密度大于丘陵和平原; 褐土土壤碳密度最高, 潮土最低; 林草地土壤碳密度最高, 耕地和园地较低. 3) 研究区表层、中层和深层固碳潜力分别为 33.91、103.32 和 129.37 Mt, 其中有机碳的固碳潜力大于无机碳. 4) 近 40 年间, 土壤有机碳总体呈增加态势, 其中, 耕地和园地的表层土壤总体表现为碳源效应, 释放有机碳量 0.29 Mt. 棕壤分布区和林地分布区对土壤有机碳的输入贡献最大.

**关键词:** 土壤碳库; 土壤碳储量; 土壤碳密度; 固碳潜力; 沿海地区; 辽宁省

## COMPOSITIONS AND VARIATION RULE OF SOIL CARBON POOL IN THE COASTAL AREA OF WESTERN LIAONING PROVINCE

WANG Cheng-yu, LI Yu-chao, GUAN Xu, WANG Yi, HAN Yan-hong, YU Yue, YANG Bing-bing

Liaoning Institute of Geology and Mineral Survey Co., Ltd., Shenyang 110032, China

**Abstract:** Based on the surface and deep soil carbon content data obtained from multi-objective geochemical survey in the coastal area of western Liaoning Province, the paper calculates the soil carbon density and storage in surface (0–20 cm), middle (0–100 cm) and deep (0–180 cm) layers of the study area, and discusses the compositions of soil carbon pool (SCP) and carbon sequestration potential (CSP) in terms of classification, as well as the variation rule of soil organic carbon (SOC) in the last 40 years. The results show that the SCP is dominated by organic carbon, while the inorganic carbon storage increases with depth, with the soil organic carbon density (SOCD) of 2.14, 7.59 and 11.27 kg/m<sup>2</sup> for surface, middle and deep layers respectively, lower than the average of national multi-objective survey areas and circum-Bohai Sea area. The compositions of SCP vary in different classifications as follows: The carbon density of Proterozoic and Mesozoic units is high in surface layer, while that of Paleozoic unit is high in middle and deep layers; The soil carbon density of mountain is higher than that of hills and plain by landforms, the highest in cinnamon soil and the lowest in moisture soil by soil types, the highest in forest and grass lands and lower in cultivated land and garden by land use types. The CSPs of surface, middle and deep soils are 33.91, 103.32 and 129.37 Mt, respectively, with CSP of

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-10-23. 编辑: 张哲.

基金项目: 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, 博士, 高级工程师, 主要从事土地质量地球化学调查与评价工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区宁山中路 42 号, E-mail//kingback28@163.com

organic carbon higher than that of inorganic carbon. The SOC was increasing generally in the last 40 years, among which the surface soil of cultivated land and garden showed carbon source effect, releasing 0.29 Mt of SOC. The distribution of brown soil and forest land contributes the most to the input of SOC.

**Key words:** soil carbon pool; soil carbon storage; soil carbon density; carbon sequestration potential; coastal area; Liaoning Province

## 0 引言

土壤碳库因其巨大的碳储量,对全球气候变化和陆地生态系统具有深刻影响,因此长期成为关注的热点<sup>[1-2]</sup>.土壤中碳的赋存形态包括有机碳和无机碳.在表生环境下,受人类活动、土壤特性和自然环境的共同影响,土壤碳库是动态变化的,不断发生着“源”“汇”相互转化<sup>[3-4]</sup>.因此,近年来许多研究致力于土壤碳库在空间上和时间的变化规律<sup>[5-10]</sup>.

奚小环等<sup>[5]</sup>通过总结我国中东部地区多目标区域地球化学调查数据,发现由高纬度带至低纬度带土壤碳密度呈现高一低—高一低的规律性变化.王文俊<sup>[6]</sup>研究显示,福建土壤平均有机碳密度呈现出随海拔高度增高而变大,内陆地区高于沿海地区的区域空间变化规律.代杰瑞等<sup>[7]</sup>研究显示,山东陆域表层土壤整体表现为“碳汇”效应,尚有 505.23 Mt 的固碳潜力.张秀芝等<sup>[8]</sup>根据不同土类有机碳含量最大值估算,河北平原尚有 188.6 Mt 的固碳潜力.

多目标区域地球化学调查是 21 世纪初中国地质调查局组织开展的全国范围内的基础地质调查,至今已获得了大量高精度土壤碳含量数据,为系统计算不同深度的土壤碳密度及碳储量提供了基础条件.提出的“单位土壤碳量”计算方法<sup>[11]</sup>,已精确计算了我国典型地区的土壤碳储量<sup>[12-15]</sup>.

辽宁西部沿海地区是环渤海区域的重要组成部分,本文利用已开展的多目标区域地球化学调查数据,旨在分析土壤碳库构成特征及固碳潜力,研究 20 世纪 80 年代至今近 40 年间土壤有机碳变化规律.

## 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,地理坐标介于东经 120°05′~121°05′,北纬 40°25′~41°15′,总面积 6364 km<sup>2</sup> (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



图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

1—市 (city); 2—县 (county); 3—水系 (river); 4—行政区界线 (administrative boundary); 5—研究区范围 (study area)

山脉的东延部分,地势自西北向东南逐渐降低,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.该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 °C,年平均降水量为 600~652.5 mm,年平均蒸发量为 1714.6 mm,无霜期 175 d 左右,年均日照 2544.2 h,日照率为 57%.

## 2 材料与方法

### 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”<sup>[16]</sup>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,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<sup>[17-18]</sup>,表层(0~20 cm)土壤样品采样密度为1个点/km<sup>2</sup>,深层(0~180 cm)土壤样品采样密度为1个点/4 km<sup>2</sup>。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 km<sup>2</sup>,深层土壤分析单元为1个点/16 km<sup>2</sup>。

## 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(1:250000)》<sup>[18]</sup>执行,测试分析质量参数见表1。

表1 测试分析质量参数表

Table 1 Quality parameters of sample test and analysis

测试项目	分析准确度		分析精密度		内检合格/率/%	报出合格/率/%
	RSD/%	合格率/%	$\Delta\lg C$	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

## 2.3 数据处理

数据处理基于Microsoft Excel 2007、SPSS 23和ArcGIS 10.2完成。

辽宁西部沿海地区多目标地球化学调查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。土壤固碳潜力图在ArcGIS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、0~100、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文献[11,19]的计算方法为基础加以修正的。土壤表层和深层容重、砾石体积百分比等基本参数来源于世界和谐土壤数据库(HWSD)。

### 2.4.1 土壤有机碳密度

土壤有机碳密度(SOCD),单位kg/m<sup>2</sup>,计算公式如下:

1)表层土壤有机碳密度

$$SOCD_{表} = TOC_{表} \times \rho_{表} \times \frac{100 - G_{表}}{100} \times \Delta D \div 10 \quad (1)$$

式中,TOC<sub>表</sub>为表层土壤有机碳含量(%); $\Delta D$ 为表层土壤深度,取20 cm; $\rho_{表}$ 为表层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);G<sub>表</sub>为表层土壤砾石含量百分比(%)。

2)中层土壤有机碳密度,如公式(2)。式中,TOC<sub>深</sub>为深层土壤有机碳含量(%); $\Delta D$ 为中层土壤深度,取100 cm; $\rho_{深}$ 为深层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);G<sub>深</sub>为深层土壤砾石含量百分比(%); $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 分别为表层、深层、中层土壤含量对应的深度值,分别取10、180、100 cm。

3)深层土壤有机碳密度,如公式(3)。式中 $\Delta D$ 为深层土壤深度,取180 cm。

### 2.4.2 土壤无机碳密度

土壤无机碳密度(SICD),单位kg/m<sup>2</sup>,计算公式如下:

1)表层土壤无机碳密度

$$SICD_{表} = TIC_{表} \times \rho_{表} \times \frac{100 - G_{表}}{100} \times \Delta D \div 10 \quad (4)$$

式中,TIC<sub>表</sub>为表层土壤无机碳含量(%); $\Delta D$ 为表层土壤深度,取20 cm。

2)中层土壤无机碳密度,如公式(5)。式中,TIC<sub>深</sub>为深层土壤无机碳含量(%); $\Delta D$ 为中层土壤深度,取100 cm。

SOCD<sub>中</sub>=

$$\left\{ \frac{\left( \text{TOC}_{\text{表}} \times \rho_{\text{表}} \times \frac{100-G_{\text{表}}}{100} - \text{TOC}_{\text{深}} \times \rho_{\text{深}} \times \frac{100-G_{\text{深}}}{100} \right) \times [(d_1-d_3)+d_3 \times (\ln d_3 - \ln d_2)]}{d_3 \times (\ln d_1 - \ln d_2)} + \text{TOC}_{\text{深}} \times \rho_{\text{深}} \times \frac{100-G_{\text{深}}}{100} \right\} \times \Delta D \div 10 \quad (2)$$

$$\text{SOCD}_{\text{深}} = \left[ \frac{\left( \text{TOC}_{\text{表}} \times \rho_{\text{表}} \times \frac{100-G_{\text{表}}}{100} - \text{TOC}_{\text{深}} \times \rho_{\text{深}} \times \frac{100-G_{\text{深}}}{100} \right) \times (d_1-d_2)}{d_2 \times (\ln d_1 - \ln d_2)} + \text{TOC}_{\text{深}} \times \rho_{\text{深}} \times \frac{100-G_{\text{深}}}{100} \right] \times \Delta D \div 10 \quad (3)$$

$$\text{SICD}_{\text{表}} = \frac{1}{2} \times \left[ \frac{\left( \text{TIC}_{\text{表}} \times \rho_{\text{表}} \times \frac{100-G_{\text{表}}}{100} - \text{TIC}_{\text{深}} \times \rho_{\text{深}} \times \frac{100-G_{\text{深}}}{100} \right) \times (d_1-d_3)}{d_2-d_1} + 2\text{TIC}_{\text{表}} \times \rho_{\text{表}} \times \frac{100-G_{\text{表}}}{100} \right] \times \Delta D \div 10 \quad (5)$$

3) 深层土壤无机碳密度

$$\text{SICD}_{\text{深}} = \frac{1}{2} \times \left[ \text{TIC}_{\text{表}} \times \rho_{\text{表}} \times \frac{100-G_{\text{表}}}{100} + \text{TIC}_{\text{深}} \times \rho_{\text{深}} \times \frac{100-G_{\text{深}}}{100} \right] \times \Delta D \div 10 \quad (6)$$

$$\text{SCR}_{\text{TC}} = \sum_{i=1}^n \text{USCA}_i \quad (12)$$

式中,  $n$  为土壤无机碳储量统计范围内, 单位土壤碳量加和的个数.

土壤碳储量(SCR, 单位 t):

$$\text{SCR} = \text{SCR}_{\text{TOC}} + \text{SCR}_{\text{TC}} \quad (13)$$

式中  $\Delta D$  为深层土壤深度, 取 180 cm.

### 2.4.3 其他参数

土壤碳密度(SCD, 单位 kg/m<sup>2</sup>):

$$\text{SCD} = \text{SOCD} + \text{SICD} \quad (7)$$

单位土壤有机碳量(USCA<sub>TOC</sub>, 单位 t):

$$\text{USCA}_{\text{TOC}} = \text{SOCD} \times 4 \times 10^3 \quad (8)$$

单位土壤无机碳量(USCA<sub>TC</sub>, 单位 t):

$$\text{USCA}_{\text{TC}} = \text{SICD} \times 4 \times 10^3 \quad (9)$$

单位土壤碳量(USCA<sub>TC</sub>, 单位 t):

$$\text{USCA}_{\text{TC}} = \text{USCA}_{\text{TOC}} + \text{USCA}_{\text{TC}} \quad (10)$$

土壤有机碳储量(SCR<sub>TOC</sub>, 单位 t):

$$\text{SCR}_{\text{TOC}} = \sum_{i=1}^n \text{USCA}_i \quad (11)$$

式中,  $n$  为土壤有机碳储量统计范围内, 单位土壤碳量加和的个数.

土壤无机碳储量(SCR<sub>TC</sub>, 单位 t):

## 3 分析结果与讨论

### 3.1 不同深度土壤碳库构成特征

辽宁西部沿海地区土壤不同深度的碳储量和碳密度见表 2. 土壤碳库构成比例显示, 有机碳储量在表层占比最高, 为 82.87%, 其次为中层(78.85%)和深层(76.95%), 而无机碳储量则相反. 反映出土壤中碳赋存形式以有机碳为主, 同时无机碳储量随深度增加有所增大. 图 2 显示, 土壤碳储量主要集中在 0~100 cm, 有机碳储量、无机碳储量和全碳储量占比分别为 67.33%、60.29%和 65.71%. 与全国典型地区相比, 有机碳储量占比与成都平原(70.84%)、洞庭湖地区(70.54%)、江苏(69.48%)、华北平原(69.79%)、渭河平原(68.63%)等<sup>[20]</sup>相当, 高于山东(55.70%)<sup>[7]</sup>, 但低于松辽平原(95.72%)<sup>[20]</sup>.

表 2 不同深度土壤碳储量与碳密度统计表

Table 2 Statistics of soil carbon storage and carbon density by depths

深度/cm	碳密度/(kg/m <sup>2</sup> )			碳储量/Mt			碳储量占比/%	
	SOCD	SICD	SCD	SOCR	SICR	SCR	SOCR/SCR	SICR/SCR
0-20	2.14	0.44	2.58	13.62	2.82	16.43	82.87	17.13
0-100	7.59	2.04	9.62	48.30	12.95	61.25	78.85	21.15
0-180	11.27	3.38	14.65	71.73	21.49	93.21	76.95	23.05

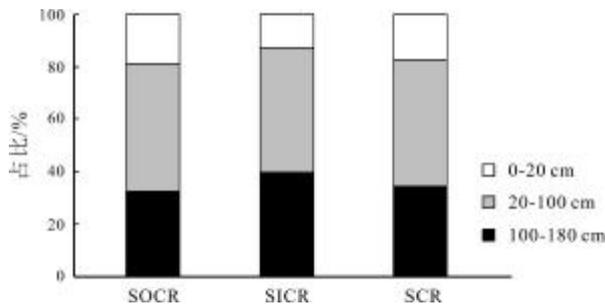


图2 不同深度土壤碳储量比例

Fig. 2 Percentage of soil carbon reservoir by depths

土壤有机碳密度在表层、中层和深层分别为 2.14、7.59 和 11.27 kg/m<sup>2</sup>, 低于全国多目标调查区平均值(表层 3.19 kg/m<sup>2</sup>, 中层 11.64 kg/m<sup>2</sup>, 深层 15.34 kg/m<sup>2</sup>)<sup>[20]</sup> 和环渤海地区(表层 2.88 kg/m<sup>2</sup>, 中层 8.94 kg/m<sup>2</sup>)<sup>[21]</sup>. 我国由高纬度带至低纬度带地区表层土壤有机碳密度呈现高一低—高一低的空间分布特征. 研究区地理位置处于由北向南的第一个低值区, 低于黑龙江(3.86 kg/m<sup>2</sup>)、吉林(3.44 kg/m<sup>2</sup>), 与河北(2.21 kg/m<sup>2</sup>)、河南(2.42 kg/m<sup>2</sup>)相当<sup>[5]</sup>.

### 3.2 不同分类单元土壤碳库特征

土壤碳库构成在区域上主要受控于自然因素, 包括地质背景、地貌类型、土壤类型等. 但研究表明, 人为因素对其影响作用日渐增大, 具有显著的相关性<sup>[19, 22]</sup>. 因此, 了解研究区不同分类单元的土壤碳储量及碳密度分布特征具有重要意义.

#### 3.2.1 不同地质单元土壤碳储量及碳密度

辽宁西部沿海地区 7 类地质单元的土壤碳储量和碳密度统计结果见表 3. 中生界和变质岩为土壤碳储量最高的两个单元, 分别为: 表层 5.34 和 4.26 Mt, 中层 18.98 和 16.34 Mt, 深层 26.04 和 26.25 Mt. 二者分布面积共占全区的 57.71%, 其土壤碳储量也达到全区一半以上, 共计占比为: 表层 58.42%、中层 57.66%、深层 56.10%. 其次为新生界、元古宇和侵入岩区, 共计占比为: 表层 33.20%、中层 33.84%、深层 35.49%. 古生界和潜火山岩最低, 共计占比为: 表层 8.38%、中层 8.49%、深层 8.41%.

各类地质单元的土壤碳密度构成见图 3, 元古宇(3.76 kg/m<sup>2</sup>)和 中生界(3.73 kg/m<sup>2</sup>) 在表层相对较高, 而中层和深层为古生界, 分别为 14.19 kg/m<sup>2</sup> 和 21.47 kg/m<sup>2</sup>. 变质岩的碳密度在各层位均较低. 从碳库构成

来看, 有机碳分布特征与全碳类似, 但无机碳有所区别. 随着深度增加, 元古宇和古生界的无机碳密度增加明显, 在各类地质单元中, 中层和深层表现最高, 这与地层岩性为白云岩、灰岩等碳酸盐岩密切相关, 表明深层土壤无机碳库更多受控于地质背景. 此外, 变质岩、侵入岩、新生界 3 类碳密度相对较低, 可以看出, 各类土壤碳密度分布特征与碳储量有所区别, 变质岩虽然碳储量较高, 但碳密度截然相反, 表明不同分类单元的土壤碳储量更多受控于所在单元的土壤面积, 而碳密度更能反映该类土壤的固碳能力.

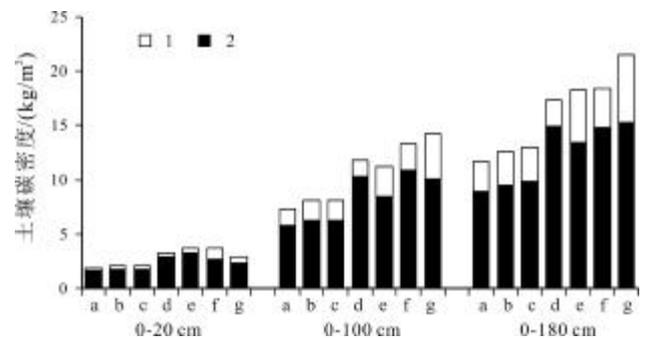


图3 不同地质单元土壤碳密度构成

Fig. 3 Soil carbon density composition by geological units

1—无机碳(inorganic carbon); 2—有机碳(organic carbon); a—变质岩(metamorphic rock); b—侵入岩(intrusive rock); c—新生界(Cenozoic); d—潜火山岩(cryptovolcanic rock); e—元古宇(Proterozoic); f—中生界(Mesozoic); g—古生界(Paleozoic)

#### 3.2.2 不同地貌类型土壤碳储量及碳密度

辽宁西部沿海地区 4 种地貌类型的土壤碳储量和碳密度统计结果见表 4. 剥蚀隆褶低山和剥蚀丘陵是研究区面积分布最广的两类地貌, 共占全区的 97.42%, 土壤碳储量分别为: 表层 10.40 和 5.75 Mt, 中层 38.45 和 21.68 Mt, 深层 56.65 和 34.71 Mt. 二者面积比例约为 6:5, 但土壤碳储量相差近 1 倍, 剥蚀隆褶低山表现出更大的土壤固存能力. 剥蚀隆褶中低山和山前坡洪积倾斜平原两类地貌因面积分布较小, 土壤碳储量也相对较低, 共计占比为: 表层 1.73%、中层 1.83%、深层 1.99%.

各类地貌单元的土壤碳密度构成见图 4, 各深度土壤碳密度均表现为: 剥蚀隆褶中低山>剥蚀隆褶低山>剥蚀丘陵>山前坡洪积倾斜平原, 可以看出山区的土壤碳密度要高于丘陵和平原. 山区植被丰富, 林草地有利于土壤中碳的积累, 同时海拔增加对于土壤有

表 3 不同地质单元土壤碳储量和碳密度统计表  
**Table 3 Statistics of soil carbon storage and carbon density by geological units**

地质单元	面积/ km <sup>2</sup>	有机碳						无机碳						全碳						
		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm		
		SOCR/ Mt	SOCD/ (kg/m <sup>2</sup> )																	
新生界	第四系	892	1.58	1.77	5.62	6.30	8.82	9.88	0.35	0.39	1.61	1.81	2.80	3.14	1.93	2.16	7.24	8.11	11.62	13.02
	白垩系	1168	3.98	3.41	13.43	11.50	17.75	15.20	0.58	0.50	2.65	2.27	3.79	3.25	4.56	3.91	16.08	13.77	21.54	18.44
中生界	侏罗系	204	0.46	2.27	1.69	8.31	2.67	13.06	0.14	0.67	0.58	2.87	0.91	4.44	0.60	2.94	2.28	11.17	3.57	17.51
	三叠系	48	0.12	2.50	0.42	8.66	0.64	13.33	0.05	1.10	0.21	4.34	0.29	6.02	0.17	3.60	0.62	13.00	0.93	19.34
	小计	1420	4.57	3.22	15.54	10.95	21.06	14.83	0.77	0.54	3.44	2.42	4.99	3.51	5.34	3.76	18.98	13.37	26.04	18.34
	二叠系	68	0.19	2.80	0.68	10.00	1.01	14.90	0.08	1.15	0.31	4.55	0.43	6.27	0.27	3.95	0.99	14.56	1.44	21.17
古生界	奥陶系	72	0.21	2.97	0.75	10.37	1.11	15.41	0.09	1.29	0.39	5.37	0.57	7.90	0.31	4.26	1.13	15.74	1.68	23.31
	寒武系	180	0.48	2.64	1.79	9.95	2.77	15.41	0.14	0.79	0.63	3.49	0.98	5.44	0.62	3.43	2.42	13.44	3.75	20.85
	小计	320	0.88	2.75	3.22	10.06	4.90	15.30	0.31	0.98	1.32	4.14	1.97	6.17	1.19	3.73	4.54	14.19	6.87	21.47
	青白口系	12	0.03	2.58	0.11	9.17	0.18	14.87	0.01	1.00	0.05	3.92	0.06	5.40	0.04	3.58	0.16	13.09	0.24	20.26
元古宇	蓟县系	460	1.09	2.37	4.01	8.71	6.34	13.79	0.27	0.59	1.29	2.81	2.34	5.09	1.36	2.96	5.30	11.53	8.68	18.88
	长城系	124	0.26	2.13	0.94	7.59	1.48	11.91	0.06	0.47	0.27	2.18	0.46	3.69	0.32	2.60	1.21	9.77	1.93	15.60
	小计	1.39	2.33	5.06	8.49	8.00	13.42	0.34	0.57	1.61	2.70	2.86	4.80	1.73	2.90	6.67	11.19	10.86	18.22	1.39
	白垩纪	4	0.01	1.88	0.03	7.21	0.05	12.41	0.00	0.40	0.01	2.87	0.03	7.65	0.01	2.28	0.04	10.08	0.08	20.05
侵入岩	侏罗纪	440	0.91	2.06	3.28	7.46	4.93	11.20	0.23	0.53	0.98	2.24	1.49	3.40	1.14	2.59	4.27	9.69	6.42	14.60
	三叠纪	396	0.54	1.36	1.95	4.92	3.03	7.66	0.11	0.28	0.57	1.43	1.07	2.70	0.65	1.64	2.52	6.36	4.10	10.36
	小计	840	1.45	1.73	5.26	6.26	8.01	9.54	0.34	0.41	1.56	1.86	2.60	3.09	1.80	2.14	6.82	8.12	10.61	12.63
	变质岩	2240	3.59	1.60	13.01	5.81	20.12	8.98	0.68	0.30	3.32	1.48	6.13	2.74	4.26	1.90	16.34	7.29	26.25	11.72
	潜火山岩	56	0.17	2.97	0.58	10.33	0.83	14.88	0.02	0.30	0.08	1.46	0.14	2.44	0.18	3.27	0.66	11.79	0.97	17.32
	总计	6364	13.62	2.14	48.30	7.59	71.73	11.27	2.82	0.44	12.95	2.04	21.49	3.38	16.43	2.58	61.25	9.62	93.21	14.65

机碳积累具有促进作用<sup>[6]</sup>,而丘陵和平原主要为农耕区,受人类活动影响较大,会造成土壤碳的流失.从碳库构成来看,各深度土壤有机碳密度最高为剥蚀隆褶低山,而土壤无机碳密度分布特征与全碳一致.随着深度增加,剥蚀隆褶中低山的土壤无机碳密度增加明显,其中深层土壤无机碳密度分别是剥蚀隆褶低山、剥蚀丘陵、山前坡洪积倾斜平原的1.73倍、2.02倍、3.44倍,这也解释了低山土壤有机碳密度最高而全碳密度低于中低山的原因.

### 3.2.3 不同土壤类型土壤碳储量及碳密度

辽宁西部沿海地区4种土壤类型的土壤碳储量和碳密度统计结果见表5.棕壤和潮土面积占比分别为53.30%和31.03%,是研究区主要的土壤类型,土壤碳储量分别为:表层9.59和4.10 Mt,中层35.17和15.71 Mt,深层51.77和25.51 Mt.其次为粗骨土,表层2.53 Mt,中层9.55 Mt,深层14.48 Mt.褐土和滨海盐土最低,共计占比为:表层1.24%、中层1.35%、深层1.56%.

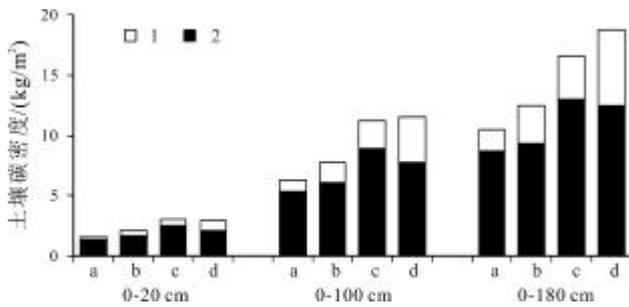


图 4 不同地貌类型土壤碳密度构成

Fig. 4 Soil carbon density composition by landforms

1—无机碳(inorganic carbon); 2—有机碳(organic carbon); a—山前平原(piedmont plain); b—剥蚀丘陵(eroded hills); c—剥蚀隆褶低山(eroded upfold low hill); d—剥蚀隆褶中低山(eroded upfold low-middle hill)

各类土壤类型的土壤碳密度构成见图 5, 褐土的土壤碳密度最高, 表层、中层和深层分别为 2.65、8.63 和 12.83 kg/m<sup>2</sup>, 其次为粗骨土和棕壤, 潮土最低. 这与其地貌类型分布特征较为一致, 潮土主要分布在丘陵和平原区, 而粗骨土和棕壤主要分布在山区. 从碳库构成来看, 土壤有机碳和无机碳分布特征均与全碳类似, 但值得注意的是, 褐土深层的土壤无机碳密度明显增大(9.66 kg/m<sup>2</sup>), 是其他土壤类型的近 3 倍, 这与褐土的成土母质为碳酸盐密切相关. 尽管研究区内褐土分布面积较小, 但辽宁西部地区分布广泛, 对土壤碳储存具有重要作用.

表 4 不同地貌类型土壤碳储量和碳密度统计表

Table 4 Statistics of soil carbon storage and carbon density by landforms

地貌类型	面积/km <sup>2</sup>	有机碳						无机碳						全碳					
		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm	
		SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )
剥蚀隆褶低山	3416	8.65	2.53	30.56	8.95	44.23	12.95	1.75	0.51	7.89	2.31	12.42	3.63	10.40	3.04	38.45	11.26	56.65	16.58
剥蚀丘陵	2784	4.73	1.70	16.83	6.04	26.01	9.34	1.03	0.37	4.86	1.74	8.70	3.12	5.75	2.07	21.68	7.79	34.71	12.47
山前坡洪积倾斜平原	148	0.21	1.41	0.79	5.34	1.28	8.68	0.03	0.19	0.15	0.98	0.27	1.83	0.24	1.60	0.93	6.32	1.56	10.51
剥蚀隆褶中低山	16	0.03	2.13	0.12	7.78	0.20	12.46	0.01	0.85	0.06	3.77	0.10	6.29	0.05	2.98	0.18	11.55	0.30	18.76
总计	6364	13.62	2.14	48.30	7.59	71.73	11.27	2.82	0.44	12.95	2.04	21.49	3.38	16.43	2.58	61.25	9.62	93.21	14.65

表 5 不同土壤类型土壤碳储量和碳密度统计表

Table 5 Statistics of soil carbon storage and carbon density by soil types

土壤类型	面积/km <sup>2</sup>	有机碳						无机碳						全碳					
		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm	
		SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )
棕壤	3392	8.08	2.38	28.17	8.30	40.49	11.94	1.51	0.45	7.00	2.06	11.28	3.32	9.59	2.83	35.17	10.37	51.77	15.26
潮土	1975	3.33	1.69	12.11	6.13	19.08	9.66	0.77	0.39	3.60	1.82	6.43	3.25	4.10	2.08	15.71	7.95	25.51	12.92
粗骨土	921	2.04	2.22	7.42	8.05	11.18	12.14	0.49	0.53	2.13	2.31	3.30	3.58	2.53	2.75	9.55	10.36	14.48	15.72
滨海盐土	40	0.07	1.68	0.29	7.29	0.51	12.77	0.02	0.53	0.09	2.23	0.13	3.37	0.09	2.21	0.38	9.52	0.65	16.14
褐土	36	0.10	2.65	0.31	8.63	0.46	12.83	0.02	0.55	0.14	3.80	0.35	9.66	0.12	3.21	0.45	12.43	0.81	22.49
总计	6364	13.62	2.14	48.30	7.59	71.73	11.27	2.82	0.44	12.95	2.04	21.49	3.38	16.43	2.58	61.25	9.62	93.21	14.65

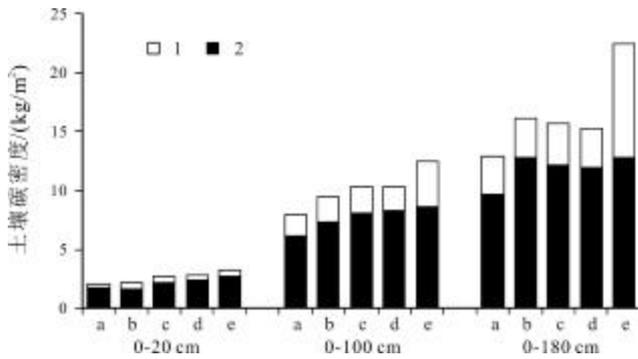


图5 不同土壤类型土壤碳密度构成

Fig. 5 Soil carbon density composition by soil types

1—无机碳 (inorganic carbon); 2—有机碳 (organic carbon); a—潮土 (moisture soil); b—滨海盐土 (seashore saline soil); c—粗骨土 (skeletal soil); d—棕壤 (brown soil); e—褐土 (cinnamon soil)

### 3.2.4 不同土地利用类型土壤碳储量及碳密度

辽宁西部沿海地区8种土地利用类型的土壤碳储量和碳密度统计结果见表6。耕地是研究区面积分布最广的土地利用类型,占比51.52%。土壤碳储量分别为:表层6.60 Mt,中层25.23 Mt,深层41.19 Mt。其次为林地和草地,土壤碳储量分别为:表层5.28和2.91 Mt,中层18.70和11.05 Mt,深层25.76和16.66 Mt。园地、住宅用地、其他建设用地、水域、滩涂相对较低,共计占比为:表层10.03%、中层10.23%、深层10.31%。

各类土地利用类型的土壤碳密度构成见图6。林地土壤有机碳密度最大,表层、中层和深层分别为3.11、10.48和14.14 kg/m<sup>2</sup>。各深度土壤有机碳密度分布特征均表现为:林地>草地>住宅用地>其他建设用地>水域>园地>耕地>滩涂。土壤全碳密度与有机碳类似,仅住宅用地高于林草地。由此看出,林草地对于土壤碳的固持起积极促进作用,而耕地固碳能力较差。

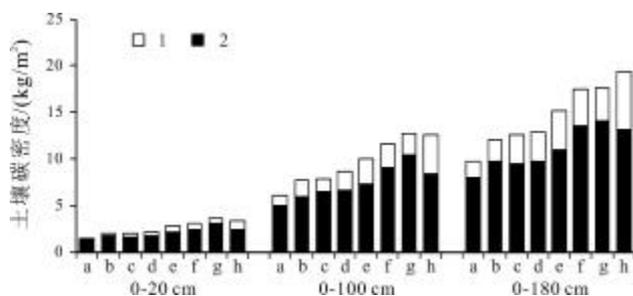


图6 不同土地利用类型土壤碳密度构成

Fig. 6 Soil carbon density composition by land use types

1—无机碳 (inorganic carbon); 2—有机碳 (organic carbon); a—滩涂 (low beach); b—园地 (garden); c—耕地 (cultivated land); d—水域 (water area); e—其他建设用地 (other construction land); f—草地 (grassland); g—林地 (forest land); h—住宅用地 (residential land)

## 3.3 表层土壤碳库变化趋势分析

### 3.3.1 土壤固碳潜力

土壤固碳潜力是指土壤碳达到饱和水平时所容纳碳的最大能力,受区域气候、土壤类型、土地利用类型和农业管理措施等因素的综合影响<sup>[7]</sup>。本文以不同土壤类型的土壤碳含量为基础,采用累积频率97.5%对应的含量值作为该土壤类型的碳含量最大值,用该值减去本类土壤点位碳含量,差值作为固碳潜力<sup>[23]</sup>。

研究区表层、中层和深层固碳潜力分别为33.91、103.32和129.37 Mt。其中有机碳固碳潜力大于无机碳,各深度分别为:表层25.73和8.17 Mt,中层71.76和31.57 Mt,深层83.53和45.83 Mt。不同深度土壤固碳潜力图(图7—9)显示,表层、中层和深层分布特征大体类似,基本表现为绥中县地区相对较高,兴城市以北地区相对较低。土壤有机碳和全碳在沿海地区固碳潜力较低,而在绥中县北部地区相对较高。土壤无机碳在绥中县整个地区表现出较大的固碳潜力。

各类土壤类型固碳潜力(表7)显示,棕壤最大,表层、中层和深层占比分别为76.26%、72.13%和65.29%,其次为潮土和粗骨土,褐土和滨海盐土最低。平均固碳量显示:棕壤>粗骨土>潮土>滨海盐土>褐土。其中,棕壤的有机碳平均固碳量是潮土和粗骨土近3倍。各类土地利用类型固碳潜力(表8)显示,耕地最大,表层、中层和深层占比分别为52.28%、53.51%和53.29%,其次为林地和草地,其他用地类型相对较低。同时发现,果园的平均固碳量最高,其次为耕地、林地和草地。综合考虑土壤类型和土地利用类型的固碳潜力,加大植树造林、退耕还林还草,以及科学耕种管理均是未来提高土壤碳储量的重要方式。

### 3.3.2 不同时期土壤有机碳变化特征

研究区现阶段和20世纪80年代的表层、中层土壤有机碳变化特征见表9、10。结果显示,近40年间,表层土壤有机碳输出量为1.38 Mt,输入量为3.28 Mt;中层土壤有机碳输出量为2.62 Mt,输入量为12.39 Mt。可以看出,土壤有机碳总体呈增加态势。前期研究显示<sup>[24]</sup>,区内土壤碳汇区主要分布在低山丘陵区的林草地,而碳源区主要分布在耕地集中区。

进一步分析发现,各土壤类型的土壤有机碳的碳汇效应均大于碳源效应(表9),其中棕壤的表层和中层土壤有机碳输入量最高,分别为2.35和8.81 Mt,贡

表 6 不同土地利用类型土壤碳储量和碳密度统计表  
**Table 6 Statistics of soil carbon storage and carbon density by land use types**

土地利用类型	面积/ km <sup>2</sup>	有机碳						无机碳						全碳						
		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm		0~20 cm		0~100 cm		0~180 cm		
		SOCR/ Mt	SOCD/ (kg/m <sup>2</sup> )	SOGR/ Mt	SOGD/ (kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/ Mt	SOCD/ (kg/m <sup>2</sup> )	SOGR/ Mt	SOGD/ (kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/ Mt	SOCD/ (kg/m <sup>2</sup> )	SOGR/ Mt	SOGD/ (kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/ Mt	SOCD/ (kg/m <sup>2</sup> )	SOGR/ Mt	SOGD/ (kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/ Mt	SOCD/ (kg/m <sup>2</sup> )	SOGR/ Mt
耕地	旱地	3239	5.37	1.66	19.43	6.00	30.62	9.45	1.15	0.35	5.53	1.71	10.15	3.13	6.52	2.01	24.95	7.70	40.77	12.59
	水田	32	0.06	1.81	0.21	6.41	0.31	9.62	0.01	0.25	0.03	0.98	0.04	1.39	0.07	2.06	0.24	7.39	0.35	11.01
	水浇地	8	0.01	1.27	0.04	4.88	0.06	7.38	0.00	0.12	0.01	0.70	0.01	1.19	0.01	1.39	0.04	5.58	0.07	8.58
	小计	3279	5.44	1.66	19.67	6.00	30.99	9.45	1.16	0.35	5.56	1.70	10.20	3.11	6.60	2.01	25.23	7.70	41.19	12.56
园地	果园	297	0.51	1.70	1.93	6.50	2.89	9.73	0.09	0.31	0.42	1.41	0.69	2.32	0.60	2.01	2.35	7.91	3.58	12.05
林地	有林地	910	2.21	2.42	7.73	8.49	10.94	12.03	0.49	0.54	2.13	2.34	3.20	3.52	2.69	2.96	9.85	10.83	14.15	15.55
	灌木林地	506	2.22	4.39	7.17	14.16	9.10	17.98	0.21	0.42	1.10	2.18	1.67	3.31	2.43	4.80	8.27	16.34	10.77	21.29
	其他林地	48	0.13	2.69	0.45	9.43	0.66	13.69	0.03	0.55	0.12	2.47	0.19	3.91	0.16	3.24	0.57	11.89	0.84	17.59
	小计	1464	4.55	3.11	15.35	10.48	20.70	14.14	0.72	0.49	3.35	2.29	5.06	3.46	5.28	3.61	18.70	12.77	25.76	17.60
草地	其他草地	952	2.35	2.46	8.60	9.04	12.89	13.54	0.56	0.59	2.45	2.57	3.77	3.96	2.91	3.06	11.05	11.61	16.66	17.50
住宅用地	城市	140	0.31	2.23	1.12	7.97	1.78	12.73	0.15	1.05	0.60	4.32	0.90	6.42	0.46	3.28	1.72	12.28	2.68	19.14
	建制镇	40	0.11	2.86	0.38	9.52	0.57	14.29	0.04	1.02	0.17	4.21	0.25	6.29	0.16	3.88	0.55	13.73	0.82	20.58
	村庄	8	0.02	2.56	0.07	9.20	0.12	14.84	0.01	0.81	0.03	3.18	0.03	4.37	0.03	3.38	0.10	12.39	0.15	19.21
	小计	188	0.45	2.38	1.57	8.35	2.47	13.15	0.19	1.04	0.80	4.25	1.18	6.30	0.64	3.41	2.37	12.60	3.66	19.45
其他建设用地	设施农用地	8	0.02	2.05	0.06	7.27	0.09	10.86	0.01	0.74	0.02	2.89	0.03	3.88	0.02	2.79	0.08	10.16	0.12	14.73
	采矿用地	24	0.05	2.16	0.17	7.00	0.24	9.85	0.03	1.09	0.10	4.37	0.15	6.13	0.08	3.24	0.27	11.37	0.38	15.99
	风景名胜及特殊用地	40	0.08	2.11	0.30	7.40	0.47	11.70	0.01	0.37	0.07	1.74	0.12	3.09	0.10	2.48	0.37	9.13	0.59	14.79
	小计	72	0.15	2.12	0.52	7.25	0.79	10.99	0.05	0.65	0.20	2.74	0.30	4.19	0.20	2.77	0.72	9.99	1.09	15.18
水域	水库水面	44	0.09	1.99	0.33	7.48	0.47	10.75	0.01	0.32	0.07	1.62	0.12	2.64	0.10	2.31	0.40	9.10	0.59	13.38
	坑塘水面	16	0.02	0.99	0.07	4.24	0.11	6.88	0.01	0.85	0.05	3.27	0.07	4.33	0.03	1.85	0.12	7.51	0.18	11.21
	小计	60	0.10	1.73	0.40	6.62	0.58	9.72	0.03	0.46	0.12	2.06	0.19	3.09	0.13	2.18	0.52	8.68	0.77	12.80
滩涂	沿海滩涂	52	0.07	1.29	0.26	4.95	0.41	7.97	0.01	0.22	0.06	1.06	0.09	1.82	0.08	1.51	0.31	6.01	0.51	9.79
总计		6364	13.62	2.14	48.30	7.59	71.73	11.27	2.82	0.44	12.95	2.04	21.49	3.38	16.43	2.58	61.25	9.62	93.21	14.65

献占比为 71.80%和 71.11%。各土地利用类型表现则略有不同(表 10),耕地和园地的表层土壤有机碳的碳源效应均大于碳汇效应,总体呈减少态势,滩涂表层和 中层土壤呈相同规律。表明近 40 年间,人类农耕活动

对表层土壤有机碳具有深刻影响,释放有机碳量为 0.29 Mt。同时发现,林地的表层和中层土壤有机碳输入量最高,分别为 1.93 和 6.70 Mt,贡献占比为 58.77% 和 54.04%。表明林地对增加土壤碳库是最为有效的一

表 7 不同土壤类型的土壤固碳量统计表

Table 7 Statistics of soil carbon sequestration amount by soil types

土壤类型	面积/ km <sup>2</sup>	0-20 cm						0-100 cm						0-180 cm					
		固碳量/Mt			平均固碳量/(kg/m <sup>2</sup> )			固碳量/Mt			平均固碳量/(kg/m <sup>2</sup> )			固碳量/Mt			平均固碳量/(kg/m <sup>2</sup> )		
		有机碳	无机碳	全碳	有机碳	无机碳	全碳	有机碳	无机碳	全碳	有机碳	无机碳	全碳	有机碳	无机碳	全碳	有机碳	无机碳	全碳
棕壤	3392	21.56	4.30	25.86	6.36	1.27	7.62	59.29	15.23	74.52	17.48	4.49	21.97	62.26	22.21	84.47	18.36	6.55	24.90
潮土	1975	2.45	2.38	4.83	1.24	1.20	2.45	7.01	11.11	18.12	3.55	5.63	9.18	11.31	16.81	28.12	5.72	8.51	14.24
粗骨土	921	1.67	1.46	3.13	1.82	1.59	3.40	5.18	5.08	10.26	5.63	5.51	11.14	9.35	6.56	15.91	10.15	7.13	17.28
滨海盐土	40	0.03	0.02	0.06	0.87	0.51	1.38	0.22	0.08	0.30	5.53	1.89	7.41	0.52	0.09	0.61	12.88	2.37	15.25
褐土	36	0.01	0.02	0.03	0.37	0.45	0.82	0.05	0.07	0.13	1.52	2.05	3.57	0.10	0.16	0.26	2.80	4.38	7.18
总计	6364	25.73	8.17	33.91	4.04	1.28	5.33	71.76	31.57	103.32	11.28	4.96	16.24	83.53	45.83	129.37	13.13	7.20	20.33

表 8 不同土地利用类型的土壤固碳量统计表

Table 8 Statistics of soil carbon sequestration amount by land use types

土地利用类型	面积/ km <sup>2</sup>	0-20 cm						0-100 cm						0-180 cm					
		固碳量/Mt			平均固碳量/(kg/m <sup>2</sup> )			固碳量/Mt			平均固碳量/(kg/m <sup>2</sup> )			固碳量/Mt			平均固碳量/(kg/m <sup>2</sup> )		
		有机碳	无机碳	全碳	有机碳	无机碳	全碳	有机碳	无机碳	全碳	有机碳	无机碳	全碳	有机碳	无机碳	全碳	有机碳	无机碳	全碳
耕地	3279	13.51	4.22	17.73	4.12	1.29	5.41	38.14	17.14	55.29	11.63	5.23	16.86	43.85	25.08	68.94	13.37	7.65	21.02
园地	297	1.57	0.42	1.98	5.27	1.41	6.68	4.32	1.59	5.91	14.54	5.36	19.90	4.90	2.33	7.23	16.49	7.84	24.33
林地	1464	5.68	1.97	7.66	3.88	1.35	5.23	15.68	6.98	22.67	10.71	4.77	15.48	19.09	10.02	29.11	13.04	6.85	19.88
草地	952	4.16	1.18	5.34	4.37	1.24	5.61	11.21	4.23	15.44	11.77	4.45	16.22	12.47	6.01	18.48	13.10	6.32	19.41
住宅用地	188	0.42	0.16	0.58	2.23	0.87	3.10	1.18	0.70	1.88	6.27	3.71	9.98	1.38	1.02	2.40	7.31	5.45	12.76
其他建设用地	72	0.16	0.07	0.24	2.26	1.04	3.30	0.51	0.32	0.83	7.11	4.39	11.50	0.73	0.46	1.20	10.15	6.45	16.60
水域	60	0.13	0.08	0.21	2.16	1.26	3.42	0.37	0.31	0.68	6.21	5.15	11.36	0.59	0.45	1.04	9.75	7.58	17.33
滩涂	52	0.11	0.07	0.17	2.02	1.26	3.28	0.34	0.29	0.63	6.50	5.66	12.15	0.54	0.45	0.98	10.30	8.58	18.87
总计	6364	25.73	8.17	33.91	4.04	1.28	5.33	71.76	31.57	103.32	11.28	4.96	16.24	83.53	45.83	129.37	13.13	7.20	20.33

种土地利用方式。

#### 4 结论

1) 辽宁西部沿海地区土壤碳库构成以有机碳为主, 表层、中层和深层碳储量占比分别为 82.87%、78.85%和 76.95%, 同时无机碳储量随深度增加有所增大。表层、中层和深层土壤有机碳密度分别为 2.14、7.59 和 11.27 kg/m<sup>2</sup>, 低于全国多目标调查区平均值和环渤海地区。

2) 不同分类单元土壤碳库构成具有一定差异: 中

生界和变质岩两个地质单元土壤碳储量较高, 而碳密度在不同深度各异, 表层较高为元古宇和中生界, 中层和深层为古生界; 剥蚀隆褶低山和剥蚀丘陵土壤碳储量较高, 山地区土壤碳密度大于丘陵和平原; 棕壤、潮土、粗骨土是碳赋存的主要土壤类型, 褐土土壤碳密度最高, 其次为粗骨土和棕壤, 潮土最低; 耕地、林地和草地土壤碳储量较高, 各深度土壤有机碳密度分布特征均表现为林地>草地>住宅用地>其他建设用地>水域>园地>耕地>滩涂。

3) 研究区表层、中层和深层固碳潜力分别为

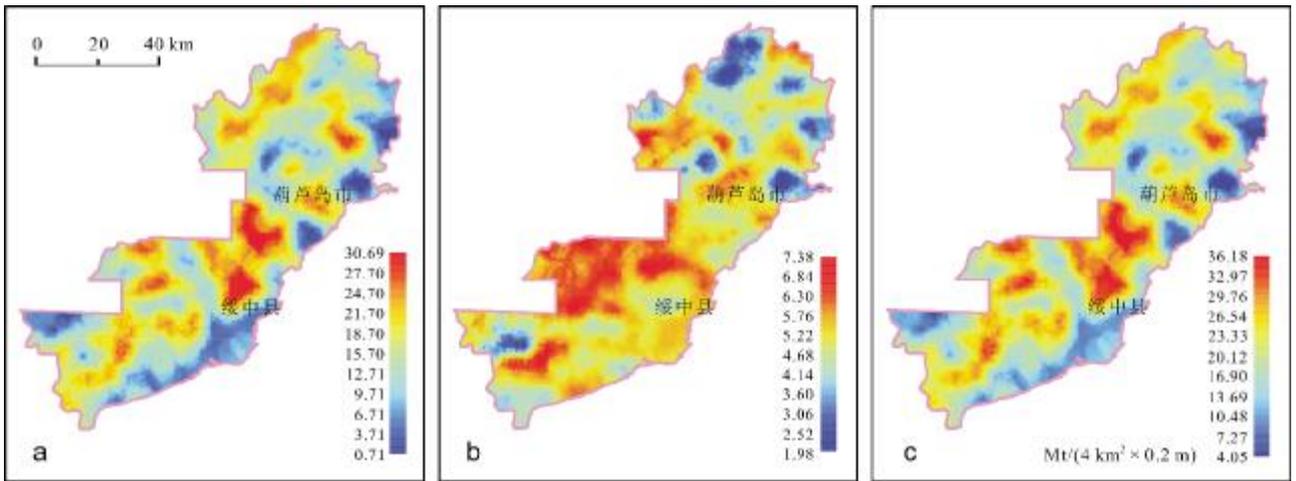


图 7 表层土壤固碳潜力图

Fig. 7 Carbon sequestration potential map of surface soil

a—有机碳(organic carbon); b—无机碳(inorganic carbon); c—全碳(total carbon)

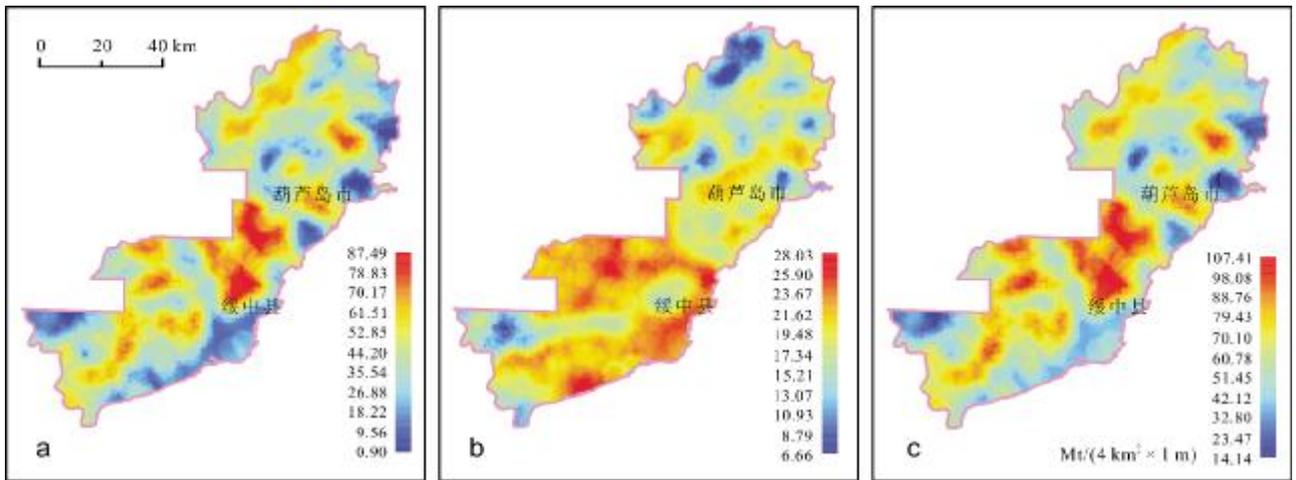


图 8 中层土壤固碳潜力图

Fig. 8 Carbon sequestration potential map of middle soil layer

a—有机碳(organic carbon); b—无机碳(inorganic carbon); c—全碳(total carbon)

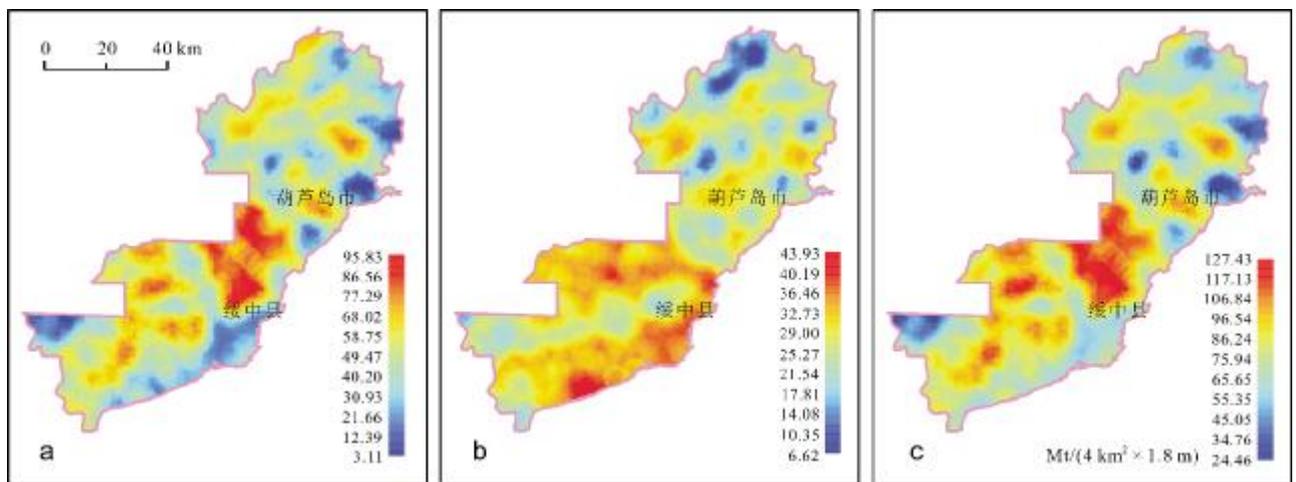


图 9 深层土壤固碳潜力图

Fig. 9 Carbon sequestration potential map of deep soil

a—有机碳(organic carbon); b—无机碳(inorganic carbon); c—全碳(total carbon)

表 9 20 世纪 80 年代至今各土壤类型有机碳变化特征表  
**Table 9 Variation characteristics of organic carbon by soil types since 1980s**

土壤类型	面积/km <sup>2</sup>	0-20 cm				0-100 cm			
		碳源效应		碳汇效应		碳源效应		碳汇效应	
		SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )
滨海盐土	40	-0.01	-0.50	0.01	0.54	-0.02	-1.17	0.08	3.87
潮土	1975	-0.27	-0.32	0.51	0.46	-0.85	-0.94	1.55	1.46
粗骨土	921	-0.28	-0.60	0.37	0.81	-0.33	-1.22	1.86	2.87
褐土	36	-	-	0.03	0.89	-	-	0.08	2.34
棕壤	3392	-0.83	-0.46	2.35	1.53	-1.41	-1.09	8.81	4.20
总计	6364	-1.38	-0.22	3.28	0.51	-2.62	-0.41	12.39	1.95

表 10 20 世纪 80 年代至今土壤各土地利用类型有机碳变化特征表  
**Table 10 Variation characteristics of organic carbon by land use types since 1980s**

土地利用类型	面积/km <sup>2</sup>	0-20 cm				0-100 cm			
		碳源效应		碳汇效应		碳源效应		碳汇效应	
		SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )	SOCR/Mt	SOCD/(kg/m <sup>2</sup> )
耕地	3279	-0.79	-0.43	0.56	0.40	-1.81	-1.02	2.05	1.36
园地	297	-0.09	-0.46	0.04	0.41	-0.12	-0.88	0.23	1.42
林地	1464	-0.33	-0.51	1.93	2.36	-0.48	-1.15	6.70	6.38
草地	952	-0.12	-0.39	0.53	0.86	-0.06	-1.01	2.68	3.02
住宅用地	188	-0.01	-0.44	0.17	1.07	-0.03	-1.39	0.51	3.12
其他建设用地	72	-0.01	-0.31	0.04	0.81	-0.02	-0.93	0.12	2.51
水域	60	-0.01	-0.56	0.02	0.47	-0.04	-1.46	0.08	2.34
滩涂	52	-0.02	-0.48	0.01	0.77	-0.06	-1.50	0.02	1.35
总计	6364	-1.38	-0.22	3.28	0.51	-2.62	-0.04	12.39	1.95

33.91、103.32 和 129.37 Mt, 其中有机碳固碳潜力大于无机碳。同时, 棕壤分布区和耕地分布区土壤固碳潜力最大。

4) 近 40 年间, 表层土壤有机碳输出量为 1.38 Mt, 输入量为 3.28 Mt; 中层土壤有机碳输出量为 2.62 Mt, 输入量为 12.39 Mt, 土壤有机碳总体呈增加态势。其中, 棕壤的土壤有机碳输入量最高, 耕地和园地的表层土壤总体表现为碳源效应, 释放有机碳量为 0.29 Mt。同时, 林地对表层和中层土壤有机碳的输入贡献最大。

#### 参考文献(References):

- [1] Lai R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(11): 1623-1627.
- [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.  
Su Y Z, Zhao H L. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(3): 220-228.
- [3] 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.

- Liu L H, Xing S H, Gao C F. The research method and influencing factors of soil carbon storage[J]. *Wuyi Science Journal*, 2007, 23(1): 219-226.
- [4] Smith P. An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: Influence of direct human-induced indirect and natural effects [J]. *European Journal of soil science*, 2005, 56(5): 673-680.
- [5] 奚小环, 李敏, 张秀芝, 等. 中国中东部平原及周边地区土壤有机碳分布与变化趋势研究[J]. *地学前缘*, 2013, 20(1): 154-165.
- Xi X H, Li M, Zhang X Z, et al. Research on soil organic carbon distribution and change trend in middle-east plain and its vicinity in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 154-165.
- [6] 王文俊. 福建省土壤有机碳储量估算、时空分布特征及其影响因素[J]. *现代地质*, 2019, 33(6): 1295-1305.
- Wang W J. Reserve estimation, spatiotemporal distribution and its influencing factors of soil organic carbon in Fujian Province, China [J]. *Geoscience*, 2019, 33(6): 1295-1305.
- [7] 代杰瑞, 庞绪贵, 董健, 等. 山东省土壤有机碳库及其时空变化特征[J]. *现代地质*, 2017, 31(2): 386-393.
- Dai J R, Pang X G, Dong J, et al. Soil organic carbon pool and temporal variation characteristics in Shandong province[J]. *Geoscience*, 2017, 31(2): 386-393.
- [8] 张秀芝, 赵相雷, 李宏亮, 等. 河北平原土壤有机碳储量及固碳机制研究[J]. *地学前缘*, 2011, 18(6): 41-55.
- Zhang X Z, Zhao X L, Li H L, et al. Research on organic carbon storage and sequestration mechanism of soils in the Hebei plain[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(6): 41-55.
- [9] 肖红叶, 戴慧敏, 杨泽, 等. 黑龙江省兴凯湖自然保护区生态系统固碳服务功能评价[J]. *地质与资源*, 2020, 29(6): 570-573.
- Xiao H Y, Dai H M, Yang Z, et al. Evaluation on the ecosystem service function of carbon sequestration in Xingkai lake nature reserve, Heilongjiang Province[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 570-573.
- [10] 贺鹏飞, 魏明辉, 李秋燕, 等. 内蒙古鄂伦春旗东部主要农耕地土壤有机碳含量及主要影响因素分析[J]. *地质与资源*, 2020, 29(6): 574-578.
- He P F, Wei M H, Li Q Y, et al. Soil organic carbon in the main cultivated lands of eastern Oroqen Qi, Inner Mongolia: Contents and major influencing factors[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 574-578.
- [11] 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.
- Xi X H, Yang Z F, Xia X Q, et al. Calculation techniques for soil carbon storage of China based on multi-purpose geochemical survey [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1): 194-205.
- [12] 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.
- Yu C G, Yang X B, Liu M H, et al. Density distribution of carbon in soil and reserves of carbon in the Liaohe River Basin[J]. *Geology and Resources*, 2011, 20(4): 272-277.
- [13] 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.
- Zhang S R, Zhang Y, Yang J Q, et al. Distribution characteristics of soil carbon density and carbon reserve estimation in the plain areas of Haihe River Basin [J]. *Geological Survey and Research*, 2015, 38(4): 305-310.
- [14] 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.
- Li S M, Luan W L, Song Z F, et al. An estimation of soil organic carbon reserves in the southern plain of Hebei Province [J]. *Geology in China*, 2010, 37(2): 525-529.
- [15] 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.
- Liu G D, Li Y, Zhang L, et al. The estimation of soil carbon sequestration potential in southern Songnen Plain [J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 658-664.
- [16] Fischer G. 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>.
- Fischer G. Harmonized World Soil Database (HWSD v1.1) (1 km grid, 2009) [EB/OL]. <http://www.geodata.cn>, 2013-06-25.
- [17] 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.
- [18] 中国地质调查局. DZ/T 0258—2014 多目标区域地球化学调查规范(1:250000)[S]. 北京: 中国地质调查局, 2014.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0258—2014 Specification of multi-purpose regional geochemical survey (1:250 000) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [19] 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.
- Xia X Q, Yang Z F, Yu T, et al. Soil carbon source/sink caused by landuse change in the last decades of the last century in Northeast China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(6): 56-63.
- [20] 奚小环, 杨忠芳, 廖启林, 等. 中国典型地区土壤碳储量研究[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(3): 573-583.
- Xi X H, Yang Z F, Liao Q L, et al. Soil organic carbon storage in typical regions of China [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 573-583.

(下转第 135 页/Continued on Page 135)

- Ren J B, Xu J F, Chen J L, et al. Geochemistry and petrogenesis of Pulang porphyries in Sanjiang region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(4): 581-592.
- [20]侯增谦,曲晓明,周继荣,等.三江地区义敦岛弧碰撞造山过程:花岗岩记录[J].*地质学报*, 2001, 75(4): 484-497.
- Hou Z Q, Qu X M, Zhou J R, et al. Collision-orogenic processes of the Yidun arc in the Sanjiang region: record of granites [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(4): 484-497.
- [21]李艳军,魏俊浩,陈华勇,等.义敦岛弧带早白垩世 A 型花岗岩成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素制约[J].*大地构造与成矿学*, 2014, 38(4): 939-953.
- Li Y J, Wei J H, Chen H Y, et al. Petrogenesis of the Xiasai Early Cretaceous A-type granite from the Yidun island arc belt, SW China: constraints from zircon U-Pb age, geochemistry and Hf isotope [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(4): 939-953.
- [22]邓军,王长明,李龚健,等.复合成矿系统理论:揭开西南特提斯成矿之谜的关键[J].*岩石学报*, 2019, 35(5): 1303-1323.
- Deng J, Wang C M, Li G J, et al. The theory of composite metallogenic system: key of recovering metallogenic mystery in the SW Tethys[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(5): 1303-1323.
- [23]曾普胜,李文昌,王海平,等.云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床:岩石学及年代学特征[J].*岩石学报*, 2006, 22(4): 989-1000.
- Zeng P S, Li W C, Wang H P, et al. The indosinian Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China: petrology and chronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 989-1000.
- [24]曾普胜,莫宣学,喻学惠,等.滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[J].*矿床地质*, 2003, 22(4): 393-400.
- Zeng P S, Mo X X, Yu X H, et al. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, Northwestern Yunnan [J]. *Mineral Deposits*, 2003, 22(4): 393-400.
- [25]郭欣,杜杨松,庞振山,等.云南普朗斑岩铜矿蚀变带成矿流体特征及其成矿意义[J].*现代地质*, 2009, 23(3): 465-471.
- Guo X, Du Y S, Pang Z S, et al. Characteristics of the ore-forming fluids in Alteration zones of the Pulang porphyry copper deposit in Yunnan Province and its metallogenic significance [J]. *Geoscience*, 2009, 23(3): 465-471.
- [26]赵文津.大型斑岩铜矿成矿的深部构造岩浆活动背景[J].*中国地质*, 2007, 34(2): 179-205.
- Zhao W J. Deep tectono-magmatic setting for metallogenesis of large porphyry copper deposits [J]. *Geology in China*, 2007, 34(2): 179-205.
- [27]姚春亮,陆建军,郭维民,等.斑岩铜矿若干问题的最新研究进展[J].*矿床地质*, 2007, 26(2): 221-229.
- Yao C L, Lu J J, Guo W M, et al. The latest advances in researches on porphyry copper deposits [J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(2): 221-229.
- [28]申萍,潘鸿迪.中亚成矿域斑岩铜矿床基本特征[J].*岩石学报*, 2015, 31(2): 315-332.
- Shen P, Pan H D. Characteristics of the porphyry Cu deposits in the central Asia metallogenic domain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(2): 315-332.
- [29]尹大胜,方维萱,郭玉乾.云南东川铜矿田面山—四棵成矿带裂隙构造控矿规律[J].*金属矿山*, 2019, 48(5): 117-123.
- Yin D S, Fang W X, Guo Y Q. Metallogenic regularity of fracture structure of Mianshan-Sikeshu metallogenic belt in Dongchuan copper orefield [J]. *Metal Mine*, 2019, 48(5): 117-123.

(上接第 185 页/Continued from Page 185)

- [21]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.
- Liu G H, Fu B J, Wu G, et al. Soil organic carbon pool and its spatial distribution pattern in the circum Bohai region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1489-1493.
- [22]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.
- Guo J J, Xia X Q, Yang Z F, et al. Changes of soil carbon pool in typical areas of Changjiang drainage basin and its influencing factors [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(6): 241-250.
- [23]陈富荣,梁红霞,邢润华,等.安徽省土壤固碳潜力及有机碳汇(源)研究[J].*土壤通报*, 2017, 48(4): 843-851.
- Chen F R, Liang H X, Xing R H, et al. Soil carbon sequestration potential and organic carbon sink/Source in Anhui Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(4): 843-851.
- [24]王诚煜,李玉超,于成广,等.辽宁西部沿海地区土壤碳库时空分布特征及其影响因素[J].*地质调查与研究*, 2019, 42(3): 208-218.
- Wang C Y, Li Y C, Yu C G, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of soil carbon pool in western coast of Liaoning Province and its influencing factors [J]. *Geological Survey and Research*, 2019, 42(3): 208-218.