



黑龙江省逊克平原土壤有机碳分布与变化特征

张哲寰^{1,2,3}, 刘 凯^{1,2,3}, 赵 君⁴, 梁 帅^{1,2,3}, 宋运红^{1,2,3}, 魏明辉^{1,2,3}

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
2. 自然资源部黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034;
3. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034;
4. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054

摘 要: 根据 1:25 万土地质量地球化学调查取得的有机碳数据, 采用单位土壤碳量法计算土壤碳储量, 结果显示: 逊克平原土壤表层(0~0.2 m)有机碳储量为 87.43 Mt, 中层(0~1.0 m)为 332.70 Mt, 深层(0~1.8 m)为 457.62 Mt。土壤表层有机碳密度为 6.52 kg/m², 中层为 24.82 kg/m², 深层为 34.14 kg/m²。按地貌、土壤、土地利用和生态系统类型分别计算了土壤有机碳储量和碳密度, 并与 1986 年第二次土壤普查成果比较, 显示逊克平原土壤有机碳变化呈碳源效应, 全区土壤有机碳减少了 8.48 Mt, 有机碳密度下降了 8.94%。
关键词: 单位土壤碳量; 有机碳密度; 有机碳储量; 逊克平原; 黑龙江省

DISTRIBUTION AND VARIATION CHARACTERISTICS OF SOIL ORGANIC CARBON IN XUNKE PLAIN, HEILONGJIANG PROVINCE

ZHANG Zhe-huan^{1,2,3}, LIU Kai^{1,2,3}, ZHAO Jun⁴, LIANG Shuai^{1,2,3}, SONG Yun-hong^{1,2,3}, WEI Ming-hui^{1,2,3}

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect, Ministry of Natural Resources, Shenyang 110034, China; 3. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effect of Liaoning Province, Shenyang 110034, China; 4. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China

Abstract: Based on the organic carbon data obtained from the 1:250 000 land quality geochemical survey, the soil carbon storage is calculated with unit soil carbon amount method. The results show that the organic carbon storage in Xunke Plain is 87.43 Mt in the surface soil (0–0.2 m), 332.70 Mt in the middle soil (0–1.0 m), and 457.62 Mt in the deep soil (0–1.8 m), with the organic carbon density of 6.52, 24.82 and 34.14 kg/m², respectively. The soil organic carbon storage and density are calculated in terms of landform, soil, land use and ecosystem types. Compared with the second national soil survey results in 1986, the soil organic carbon change in Xunke Plain shows a carbon source effect, with the soil organic carbon in the whole region decreased by 8.48 Mt and organic carbon density decreased by 8.94%.

Key words: unit soil carbon; organic carbon density; organic carbon storage; Xunke Plain; Heilongjiang Province

收稿日期:2022-11-02;修回日期:2023-02-09. 编辑:黄欣.

基金项目:中国地质调查局“东北黑土地 1:25 万土地质量地球化学调查”(121201007000161312);“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(DD20190520).

作者简介:张哲寰(1968—),女,高级工程师,主要从事环境地质调查与研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//601984163@qq.com

通信作者:魏明辉(1981—),男,硕士,高级工程师,从事地球化学调查与评价工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//wakes123@163.com

0 引言

土壤是陆地生态系统的基础,同时又是陆地生态系统中最大的碳库,对全球气候变化和人类生存环境有着重要的影响。碳在土壤系统中以有机碳和无机碳的形式赋存,由于无机碳库的更新周期较长,因此,土壤中的有机碳库在全球变化中的作用显得更为重要^[1]。据估计,全球陆地土壤有机碳含量为1 400~1 500 Pg (1 Pg=10¹⁵ g),是陆地生物总碳量的2~3倍,是全球大气碳库的2倍多^[2]。土壤碳含量及其变化已成为当前全球陆地表层碳循环研究的热点领域之一^[3-15]。本文以东北黑土地质量地球化学调查获得的土壤有机碳数据为依据,研究逊克平原不同地貌、土壤、土地利用、生态系统等类型的土壤有机碳储量和碳密度分布特征,以及土壤有机碳储量的变化。

1 研究区概况

逊克平原是我国纬度最高的平原,位于黑龙江右岸,隔黑龙江与俄罗斯相望。平原面积13 404 km²,地形西南高、东北低,南部为小兴安岭剥蚀丘陵,北部为黑龙江河谷,中部为岗状山前台地(图1),海拔70~755 m。区内有黑龙江、逊河、沾河、库尔滨河、乌云河及结烈河等河流。气候属温带-寒温带大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季短暂炎热,昼夜温差大。年平均气温0.9℃,年降水量450~600 mm。主要经济活动为农业,主要农作物有水稻、玉米、大豆等。

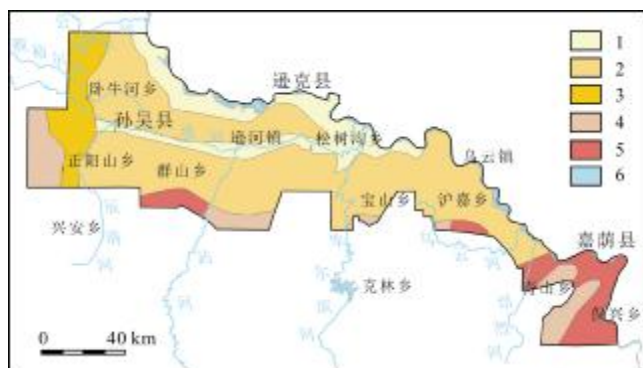


图1 逊克平原地貌图

Fig. 1 Geomorphologic map of Xunke Plain

1—低平原(low plain); 2—高平原(high plain); 3—丘陵(hills); 4—熔岩台地(lava platform); 5—低中山(low and middle mountains); 6—水体(water body)

2 材料和方法

2.1 样品采集与数据来源

依据中国地质调查局《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T0258—2014),2020年在逊克平原按1 km × 1 km 网格均布采集土壤表层(0~20 cm)样品,共采集土样12 258件。按照2 km × 2 km 的格网,将每个网格的4个土样混合成一个分析样品进行分析测试,共组合土壤表层分析样品3 351件。深层土壤采样深度150~200 cm,按每4 km²采集一个土样,共采集土样2 792件,按照4 km × 4 km 的格网,将每个网格的4个深层土样混合成一个分析样品进行分析测试,共组合土壤深层分析样品892件。土壤样品分析测试由具有MA认证资质的自然资源部沈阳矿产资源检测中心承担。

土壤有机碳变化研究是利用2020年的调查数据与1986年全国第二次土壤普查数据进行对比研究。第二次土壤普查数据来源于中国科学院南京土壤研究所,利用ArcGIS软件将两次资料进行空间叠加分析和处理,提取有机质含量数据,将有机质含量除以转换系数1.724换算为有机碳含量,进而分析34年间土壤有机碳的变化特征。

2.2 单位土壤碳含量与碳储量计算方法

土壤有机碳储量指一定面积内一定深度土壤的有机碳含量。土壤碳含量由土壤表层至深层主要存在两类分布模式,即指数分布模式和直线分布模式,其中有机碳含量分布为指数模式,无机碳含量分布为直线模式^[16]。依据有机碳分布模式,以表层土壤分析样品所代表的单元(2×2 km²)为计算单位,按照多目标区域地球化学调查所采用的网格化双层采样模式,分别计算表层(0~0.2 m)、中层(0~1.0 m)和深层(0~1.8 m)单位土壤碳含量,然后再对单位土壤碳含量进行累加获得全区土壤表层、中层和深层3个深度的有机碳储量(SCRTOC)和平均碳密度(SOCD)。

1) 表层单位土壤有机碳量计算

$$USCA_{TOC,0-0.2m} = TOC_{表} \times D \times \rho \times 4 \times 10^4 \quad (1)$$

式中, $USCA_{TOC,0-0.2m}$ 为表层单位土壤碳量(t); $TOC_{表}$ 为表层土壤有机碳含量(%); D 为表层土壤取样深度(0.2 m); ρ 为表层土壤容重^[17](t/m³),见表1; 4 为单位土壤面积(km²),10⁴ 为换算系数。

表 1 逊克平原不同类型土壤容重
Table 1 Bulk density of different types of soil in Xunke Plain

土壤类型	暗棕壤	草甸土	沼泽土	湖泊水库土	白浆土	新积土
表层土壤容重/(t/m ³)	1.13	1.18	1.11	0.17	1.18	1.22
深层土壤容重/(t/m ³)	1.38	1.45	1.36	0.34	1.46	1.43

2)中层单位土壤有机碳量计算

$$USCA_{TOC,0-1.0\text{ m}}=TOC\times D\times\rho\times4\times10^4\tag{2}$$

式中, $USCA_{TOC,0-1.0\text{ m}}$ 表示采样深度为 1.8 m 时计算 0~1.0 m 深度有机碳量(t); D 取 1.0 m; TOC 为有机碳含量(%),计算如式(3).

$$TOC=\frac{(TOC_{表}-TOC_{深})[(d_1-d_2)+d_2(\ln d_2-\ln d_3)]}{d_2(\ln d_1-\ln d_3)}+TOC_{深}\tag{3}$$

式中, $TOC_{表}$ 为表层土壤有机碳含量(%); $TOC_{深}$ 为深层土壤有机碳含量(%); d_1 取表层土壤中间深度 0.1 m, d_2 取 1.0 m, d_3 取 1.8 m.

3)深层单位土壤有机碳量计算

$$USCA_{TOC,0-1.8\text{ m}}=TOC\times D\times\rho\times4\times10^4\tag{4}$$

式中, $USCA_{TOC,0-1.8\text{ m}}$ 表示 0~1.8 m 深层单位土壤有机碳量(t); D 为采样深度(1.8 m); TOC 按式(5)计算.

$$TOC=\frac{(TOC_{表}-TOC_{深})(d_1-d_3)}{d_3(\ln d_1-\ln d_3)}+TOC_{深}\tag{5}$$

4)全区土壤碳储量计算

土壤有机碳储量计算公式:
$$SCR=\sum_{i=1}^n USCA_i\tag{6}$$

式中, SCR 为不同深度全区土壤有机碳储量(t); n 为单位土壤个数.

3 结果与讨论

3.1 土壤有机碳分布特征

利用逊克平原 1:25 万土地质量地球化学调查获得的有机碳数据,按式(1)—(6)计算全区不同深度和不同的地貌单元、土壤类型、土地利用类型及不同生态系统土壤有机碳分布特征.

3.1.1 土壤表层和深层有机碳分布

逊克平原表层和深层土壤有机碳含量分布均呈南高北低、西高东低的特征. 由西南的丘陵、台地向东北的平原,随地势降低,人类活动逐渐增强,土壤有机碳密度逐渐减小(图 2、3). 表层土壤有机碳含量变化范围在 0.07%~12.18%, 平均为 2.86%. 深层土壤有机碳

含量变化范围在 0.03%~7.86%,平均为 0.63%. 表层、中层和深层土壤有机碳储量分别为 87.44 Mt、332.70 Mt 和 457.62 Mt. 表层土壤有机碳占中层土壤有机碳的 26.3%,占深层土壤有机碳的 19.1%. 表层、中层、深层土壤平均有机碳密度分别为 6.52 kg/m²、24.82 kg/m²、34.14 kg/m², 高于东北平原土壤有机碳密度(表层 3.33 kg/m²、中层 12.90 kg/m²、深层 16.16 kg/m²)^[18] 和我国典型地区土壤平均碳密度(表层 3.19 kg/m²、中层 11.65 kg/m²、深层 15.34 kg/m²)^[19]. 这与部分学者的研究结果——高纬度土壤有机碳含量高于低纬度有机碳含量——一致^[20].

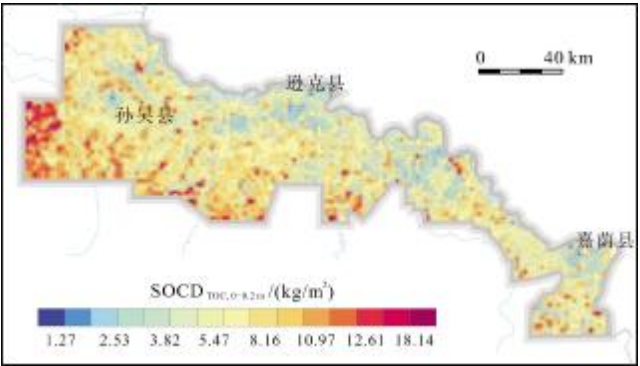


图 2 表层土壤有机碳密度分布图

Fig. 2 Distribution map of organic carbon density in surface soil

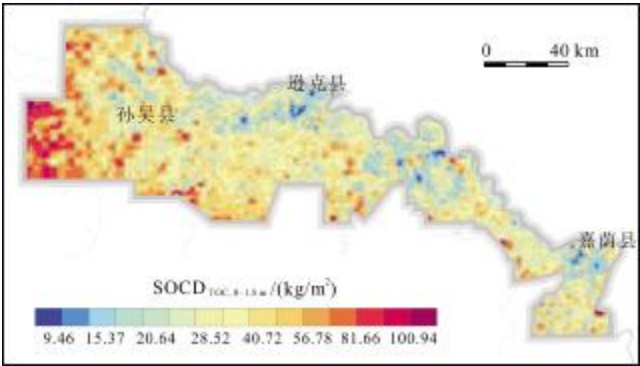


图 3 深层土壤有机碳密度分布图

Fig. 3 Distribution map of organic carbon density in deep soil

3.1.2 不同地貌单元有机碳分布

逊克平原地处黑龙江右岸,主要地貌类型为高平原、低平原和熔岩台地,三者面积占全区面积的 82.75%. 三者土壤表层、中层和深层有机碳储量之和分别占全区有机碳储量的 81.37%、80.65%和 80.05%. 土壤表层、中层、深层有机碳密度较高的地貌单元分别是丘陵和熔岩台地(见表 2). 土地利用类型以林地和

草地为主,植被茂盛,开垦程度低,土壤有机碳易于累积,呈现相对较高的碳密度.低密度区则是农用地分布较多的低平原和高平原区,长期的开垦耕种,消耗土壤有机质,进而导致有机碳含量降低.

表 2 不同地貌单元有机碳分布
Table 2 Distribution of organic carbon by geomorphic units

地貌单元	面积/ km ²	占比/ %	表层(0~0.2 m)		中层(0~1.0 m)		深层(0~1.8 m)	
			SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)	SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)	SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)
高平原	7548	56.31	47.60	6.31	176.44	23.38	237.43	31.46
低平原	2200	16.41	11.78	5.35	45.67	20.76	63.69	28.95
熔岩台地	1344	10.03	11.77	8.76	46.22	34.39	65.21	48.52
丘陵	1020	8.61	7.66	7.51	34.00	33.33	50.13	49.15
低中山	1292	9.64	8.12	6.28	30.37	23.51	41.15	31.85
合计/平均	13404	100	87.44	6.52	332.70	24.82	457.62	34.14

3.1.3 不同类型土壤有机碳分布

逊克平原土壤类型有暗棕壤、草甸土、沼泽土、白浆土、湖泊水库土和新积土.受分布面积控制,有机碳储量主要集中在分布面积较大的暗棕壤、草甸土、沼泽土 3 类土壤中.3 种类型土壤表层、中层和深层有机碳储量之和占全区有机碳储量的比例分别为 96.75%、96.96%和 97.14%.有机碳密度最高的是沼泽土,最低的是湖泊水库土.不同类型土壤表层、中层有机碳密度由高到低的顺序为沼泽土>白浆土>暗棕壤>草甸土>新积土>湖泊水库土;深层土壤有机碳密度由高到低的顺序为沼泽土>暗棕壤>白浆土>草甸土>新积土>湖泊水库土(见表 3).

表 3 不同土壤类型有机碳分布
Table 3 Distribution of organic carbon by soil types

土壤类型	面积/ km ²	占比/ %	表层(0~0.2 m)		中层(0~1.0 m)		深层(0~1.8 m)	
			SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)	SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)	SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)
暗棕壤	7156	52.6	46.71	6.53	178.21	24.90	246.16	34.40
草甸土	3948	27.02	24.00	6.08	90.93	23.03	124.27	31.48
沼泽土	1884	17.18	13.89	7.37	53.43	28.36	74.12	39.34
白浆土	376	3.1	2.75	7.31	9.75	25.93	12.56	33.40
新积土	12	0.08	0.07	5.83	0.26	21.67	0.36	30.00
湖泊水库土	28	0.02	0.02	0.71	0.10	3.57	0.15	5.36
合计/平均	13404	100	87.44	6.52	332.70	24.82	457.62	34.14

3.1.4 不同利用类型土壤有机碳分布

逊克平原土壤利用类型以林地、耕地和草地为主,3 种利用类型土壤表层、中层和深层有机碳储量之和占全区有机碳储量的比例分别为 89.73%、89.76%和 89.82%.不同利用类型土壤碳储量大小依次为:林地>耕地>草地>未利用土地>水域>城乡建设用地(见表 4).不同利用类型土壤表层、中层、深层有机碳密度大小顺序一致,均为未利用土地>草地>建设用地>林地>耕地>水域.耕地长期种植,导致土壤有机质消耗和流失,降低了有机碳含量水平.

表 4 不同土地利用类型有机碳分布
Table 4 Distribution of organic carbon by land use types

土地类型	面积/ km ²	占 比/%	表层(0~0.2 m)		中层(0~1.0 m)		深层(0~1.8 m)	
			SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)	SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)	SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)
耕地	4300	30.1	26.34	6.13	99.53	23.15	136.05	31.64
林地	6560	49.4	43.26	6.59	165.38	25.21	228.57	34.84
草地	1236	10.2	8.86	7.17	33.73	27.29	46.40	37.54
建设用地	108	0.8	0.72	6.67	2.73	25.28	3.77	34.91
水域	404	1.9	1.67	4.13	6.76	16.73	9.58	23.73
未利用土地	796	7.6	6.58	8.27	24.57	30.87	33.25	41.71
合计/平均	13404	100	87.44	6.52	332.70	24.82	457.62	34.14

3.1.5 不同生态系统土壤有机碳分布

逊克平原主要的生态系统类型为森林生态系统和农田生态系统,二者面积占全区面积的 90.24%,其土壤表层、中层和深层有机碳储量占全区有机碳储量比例分别为 89.70%、89.76%和 89.82%(见表 5).不同生态系统土壤表层、中层、深层有机碳密度由高到低均为河流生态系统>城市生态系统>森林生态系统>农田生态系统.

3.2 土壤表层有机碳变化特征

3.2.1 土壤表层有机碳总体变化

土壤有机质是在不断地分解和形成的动态变化过程中,土壤有机碳变化受多种自然与人为活动因素影响.对比 1986 年全国第二次土壤普查有机碳数据,在过去 30 多年间逊克平原土壤有机碳变化总体呈碳源效应,有机碳含量下降了 8.94%,有机碳密度平均减少 0.64 kg/m²,下降幅度小于松辽平原土壤有机碳下降幅度(12.8%)^[21].

表 5 不同生态系统有机碳分布

Table 5 Distribution of organic carbon in different ecosystems

生态类型	面积/ km ²	占比/ %	表层(0~0.2 m)		中层(0~1.0 m)		深层(0~1.8 m)	
			SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)	SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)	SCR _{TOC} / Mt	SOCD/ (kg/m ²)
森林生态系统	6560	48.94	43.23	6.59	165.38	25.21	228.56	34.84
农田生态系统	5536	41.30	35.20	6.36	133.26	24.07	182.46	32.96
河流生态系统	1200	8.95	8.28	6.90	31.32	26.10	42.83	35.69
城市生态系统	108	0.81	0.07	6.65	2.73	25.28	3.77	34.91
合计/平均	13404	100	87.44	6.52	332.70	24.82	457.62	34.14

3.2.2 不同地貌单元土壤表层有机碳变化

在过去 30 多年间逊克平原土壤表层有机碳总计

减少了 8.48 Mt。其中,高平原区减少 1.43 Mt,占减少总量的 16.86%;低平原区减少 3.45 Mt,占 40.68%;低中山区减少 2.07 Mt,占 24.41%;台地减少 2.24 Mt,占 26.42%。丘陵区有机碳储量增加 0.70 Mt,增加比例为 8.25%。碳密度减少比例由大到小为低平原>低中山>台地>高平原,见表 6。

3.2.3 不同类型土壤表层有机碳变化

从有机碳储量变化看,沼泽土有机碳储量减少最多,为 5.04 Mt,占减少总量的 59.43%;草甸土减少 2.43 Mt,占减少总量的 28.66%;暗棕壤减少了 1.65 Mt,占减少总量的 19.46%;白浆土增加 0.69 Mt,增加幅度为 8.14%。从有机碳密度看,湖泊水库土有机碳密度下降幅度最大,达 41.84%;其次是新积土,下降了 31.78%;沼泽土下降了 26.67%;而白浆土碳密度增加了 33.75%(表 7)。

表 6 不同地貌单元表层土壤有机碳变化

Table 6 Changes of surface soil organic carbon by geomorphic units

地貌类型	面积/km ²	土地质量地球化学调查		第二次土壤普查		碳储量变化量/	碳密度变化量/	碳密度变化
		有机碳储量/Mt	碳密度/(kg/m ²)	有机碳储量/Mt	碳密度/(kg/m ²)	%	%	比例/%
高平原	7548	47.60	6.31	49.03	6.50	-1.43	-0.19	-2.92
低平原	2200	11.78	5.35	15.23	6.92	-3.45	-1.57	-22.69
台地	1344	11.77	8.76	14.01	10.42	-2.24	-1.67	-16.01
丘陵	1020	8.16	8.00	7.46	7.31	0.70	0.69	9.44
低中山	1292	8.12	6.28	10.19	7.89	-2.07	-1.59	-20.18
合计/平均	13404	87.44	6.52	95.92	7.16	-8.48	-0.64	-8.94

表 7 不同土壤类型表层土壤有机碳变化

Table 7 Changes of surface soil organic carbon by soil types

土壤类型	面积/km ²	土地质量地球化学调查		第二次土壤普查		碳储量变化量/	碳密度变化量/	碳密度变化
		有机碳储量/Mt	碳密度/(kg/m ²)	有机碳储量/Mt	碳密度/(kg/m ²)	%	%	比例/%
暗棕壤	7156	46.71	6.53	48.36	6.76	-1.65	-0.23	-3.40
草甸土	3948	24.00	6.08	26.43	6.69	-2.43	-0.61	-9.12
沼泽土	1884	13.89	7.37	18.93	10.05	-5.04	-2.68	-26.67
白浆土	376	2.75	7.31	2.06	5.48	0.69	1.85	33.75
湖泊水库土	28	0.02	0.71	0.03	1.07	-0.01	-0.41	-41.84
新积土	12	0.07	5.83	0.10	8.33	-0.03	-2.72	-31.78
合计/平均	13404	87.44	6.52	95.92	7.16	-8.48	-0.64	-8.94

3.2.4 不同利用类型土壤表层有机碳变化

受面积影响,林地有机碳储量减少最多,为 3.05 Mt,占减少总量的 35.97%;其次是耕地减少 2.82 Mt,占减少总量的 33.37%;未利用土地减少了 1.69 Mt,占减少总量的 19.93%。从有机碳密度看,水域土壤有机碳密度下降幅度最大,与 1986 年相比下降了 28.50%;其次是建设用地和未利用土地,有机碳密度分别下降了 20.69%和 20.40%;耕地有机碳密度下降了 9.59%;林地、草地有机碳密度下降比率小于全区平均值(见表8)。

3.2.5 不同生态系统土壤表层有机碳变化

从有机碳储量变化看,森林生态系统有机碳储量减少最多,其次是农田生态系统和河流生态系统。河流生态系统碳密度下降最大,减少了 22.12%;其次是城市生态系统,碳密度下降了 20.69%;森林生态系统和农田系统碳密度下降幅度低于全区平均值。可见农

业活动并不是土壤有机碳下降的主要原因(见表 9)。

4 结 论

1)逊克平原有机碳密度分布呈由丘陵、台地向平原区逐渐降低的趋势,主要固碳系统为森林和农田生态系统,主要固碳土地类型为林地、耕地和草地,主要固碳土壤类型为暗棕壤和草甸土。

2)逊克平原土壤表层、中层和深层有机碳储量分别为 87.44 Mt、332.70 Mt 和 457.62 Mt,平均有机碳密度分别为 6.52 kg/m²、24.82 kg/m² 和 34.14 kg/m²,高于东北平原土壤有机碳密度和我国典型地区土壤平均碳密度。

3)与 1986 年第二次土壤普查有机碳含量比较,逊克平原土壤有机碳变化呈碳源效应,在过去 34 年间,全区有机碳减少 8.48 Mt,有机碳密度下降 8.94%。有机碳储量减小最多的是林地和耕地,有机碳密度减少

表 8 不同土地利用类型表层土壤有机碳变化
Table 8 Changes of surface soil organic carbon by land use types

土地利用类型	面积/km ²	土地质量地球化学调查		第二次土壤普查		碳储量变化量/	碳密度变化量/	碳密度变化比例/%
		有机碳储量/Mt	碳密度/(kg/m ²)	有机碳储量/Mt	碳密度/(kg/m ²)	%	%	
耕地	4300	26.34	6.13	29.17	6.78	-2.82	-0.65	-9.59
林地	6560	43.26	6.59	46.31	7.06	-3.05	-0.47	-6.66
草地	1236	8.86	7.17	8.93	7.22	-0.07	-0.05	-0.69
建设用地	108	0.72	6.67	0.90	8.33	-0.18	-1.73	-20.69
水域	404	1.67	4.13	2.34	5.79	-0.67	-1.65	-28.50
未利用土地	796	6.58	8.27	8.27	10.39	-1.69	-2.12	-20.40
合计/平均	13404	87.44	6.52	95.92	7.16	-8.48	-0.64	-8.94

表 9 不同生态系统表层土壤有机碳分布变化
Table 9 Changes of surface soil organic carbon in different ecosystems

生态系统	面积/km ²	土地质量地球化学调查		第二次土壤普查		碳储量变化量/	碳密度变化量/	碳密度变化比例/%
		有机碳储量/Mt	碳密度/(kg/m ²)	有机碳储量/Mt	碳密度/(kg/m ²)	%	%	
城市生态系统	108	0.72	6.67	0.90	8.33	-0.18	-1.73	-20.69
河流生态系统	1200	8.28	6.90	10.63	8.86	-2.35	-1.96	-22.12
农田生态系统	5536	35.20	6.36	38.11	6.88	-2.91	-0.53	-7.69
森林生态系统	6560	43.23	6.59	46.27	7.05	-3.04	-0.47	-6.66
合计/平均	13404	87.44	6.52	95.92	7.16	-8.48	-0.64	-8.94

最多的是河流、水域。

参考文献(Reference):

- [1]陈怀满. 环境土壤学[M]. 2 版. 北京:科学出版社, 2010: 81-82.
Chen H M. Environmental soil science[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010: 81-82.
- [2]耿增超, 戴伟. 土壤学[M]. 北京:科学出版社, 2011: 52-53.
Geng Z C, Dai W. Pedology[M]. Beijing: Science Press, 2011: 52-53. (in Chinese)
- [3]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 oil organic carbon reserves in the southern plain of Hebei Province[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 525-529.
- [4]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.
- [5]奚小环, 张建新, 廖启林, 等. 多目标区域地球化学调查与土壤碳储量问题——以江苏、湖南、四川、吉林、内蒙古为例[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 58-67.
Xi X H, Zhang J X, Liao Q L, et al. Multi-purpose regional geochemical survey and soil carbon reserves problem: Examples of Jiangsu, Henan, Sichuan, Jilin provinces and Inner Mongolia[J]. Quaternary Science, 2008, 28(1): 58-67.
- [6]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.
- [7]陈桀, 雷学成, 罗桑扎西. 土壤有机碳储量估算与土地利用的关系研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 42-45.
Chen C, Lei X C, Lobsangtashi. Relationship of soil organic carbon storage estimation with land use types [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(1): 42-45.
- [8]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.
- [9]刘国栋, 李禄军, 戴慧敏, 等. 松辽平原土壤碳库变化及其原因分析[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1109-1120.
Liu G D, Li L J, Dai H M, et al. Change in soil carbon pool in Songliao Plain and its cause analysis[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1109-1120.
- [10]吴乐知, 蔡祖聪. 农业开垦对中国土壤有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 118-121, 134.
WU L Z, Cai Z C. Effect of agricultural cultivation on soil organic carbon in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6): 118-121, 134.
- [11]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.
- [12]迟光宇, 王俊, 陈欣, 等. 三江平原不同土地利用方式下土壤有机碳的动态变化[J]. 土壤, 2006, 38(6): 755-761.
Chi G Y, Wang J, Chen X, et al. Dynamic changes of soil organic carbon (SOC) of different land use types in Sanjiang Plain[J]. Soils, 2006, 38(6): 755-761.
- [13]周涛, 史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响[J]. 地球科学进展, 2006, 21(2): 138-143.
Zhou T, Shi P J. Impacts of land use change on soil organic carbon change in China[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(2): 138-143.
- [14]张一鹤, 杨泽, 戴慧敏, 等. 穆棱河-兴凯湖平原土壤有机碳、全氮的时空变异特征[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1050-1055.
Zhang Y H, Yang Z, Dai H M, et al. Spatio-temporal variations in the soil organic carbon and total nitrogen contents in the Muling River-Xingkai Lake Plain [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1050-1055.
- [15]杨泽, 张一鹤, 戴慧敏, 等. 兴凯湖平原表层土壤有机碳空间变异的主控因素[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1076-1086.
Yang Z, Zhang Y H, Dai H M, et al. Control factor of the spatial variations in the soil organic carbon content in the topsoil of the Xingkai Lake Plain [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1076-1086.
- [16]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.

- 论[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(2): 95-102.
- Guo J J, Li H K, Chen Z H. Brief review of the study of Qinling complex, Qinling Orogenic Belt[J]. Geological Survey and Research, 2003, 26(2): 95-102.
- [16]第五春荣, 孙勇, 刘良, 等. 北秦岭宽坪岩群的解体及新元古代 N-MORB[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 2025-2038.
- Diwu C R, Sun Y, Liu L, et al. The disintegration of Kuanping Group in North Qinling orogenic belts and Neo-proterozoic N-MORB [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(7): 2025-2038.
- [17]曹强, 刘家军, 吴杰, 等. 秦岭西部桦厂沟金矿床主矿带原生晕分带特征及深部预测[J]. 地质与资源, 2021, 30(1): 27-36, 98.
- Cao Q, Liu J J, Wu J, et al. Primary halo zoning and deep prediction of the main ore belt in Huachanggou gold deposit, western Qinling Mountains[J]. Geology and Resources, 2021, 30(1): 27-36, 98.
- [18]梁文艺, 孙继东, 姜修道. 活动剪切带的有序叠加与金矿的形成 [M]. 西安: 西北大学出版社, 1993.
- Liang W Y, Sun J D, Jiang X D. Order superposition structure and formation of gold ore in morable shear zone[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1993.
- [19]李晶, 陈衍景, 刘迎新. 华北克拉通若干脉状金矿的黄铁矿标型特征与流体成矿过程[J]. 矿物岩石, 2004, 24(3): 93-102.
- Li J, Chen Y J, Liu Y X. Typomorphic characteristics of pyrite from the lode gold deposits in North China Craton: Implications for fluid mineralization [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24 (3): 93-102.
- [20]付超, 党智财, 李俊建, 等. 华北地区金矿成矿规律及资源潜力 [J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1179-1197.
- Fu C, Dang Z C, Li J J, et al. Regional metallogeny and resource potential of gold deposits in North China[J]. Geology in China, 2022, 49(4): 1179-1197.
- [21]梁文艺, 李金宝, 孙继东, 等. 河南省卢氏县石门金矿区成矿规律及找矿方向研究[M]. 西安: 西安地质学院资源系, 1997.
- Liang W Y, Li J B, Sun J D, et al. Study on metallogenic regularity and prospecting direction of Shimen gold deposit in Lushi County, Henan Province[M]. Xi'an: Department of Resources, Xi'an College of Geology, 1997. (in Chinese)
- [22]何文平, 陈全树, 赵建新. 河南省卢氏县桃花-石门金矿带地质特征及成矿规律[J]. 地质找矿论丛, 2002, 17(3): 180-185.
- He W P, Chen Q S, Zhao J X. Geological features and ore-forming regularity of Taohua-Shimen gold ore belt, Lushi County, Henan Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2002, 17(3): 180-185.
- [23]李金宝, 李荣西, 李伍平. 河南卢氏石门金矿床载金矿物及微量元素特征[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(4): 44-47.
- Li J B, Li R X, Li W P. Trace element characteristics of gold-bearing minerals in the Shimen gold deposit, Lushi, Henan Province [J]. Journal of Chang'an University (Earth Science Edition), 2003, 25 (4): 44-47.

(上接第 208 页/Continued from Page 208)

- [17]黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江省土肥管理站. 黑龙江省耕地质量主要性状数据集[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 3-11.
- Institute of Soil Fertilizer and Environmental Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Heilongjiang Soil and Fertilizer Management Station. The main character data set of cultivated land quality in Heilongjiang Province [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019: 3-11. (in Chinese)
- [18]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.
- Xi X H, Yang Z F, Cui Y J, et al. A study of soil carbon distribution and change in Northeast Plain[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17 (3): 213-221.
- [19]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.
- [20]刘驰, 刘希瑶, 刘澎. 松辽平原典型黑土区有机质的变化及影响因素分析[J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 550-555.
- Liu C, Liu X Y, Liu P. Analysis on the changes of organic matters and their influencing factors of typical black soil areas in Songliao Plain[J]. Geology and Resources, 2020, 29(6): 550-555.
- [21]杨佳佳, 林楠, 于秀秀, 等. 东北典型黑土区有机碳遥感定量反演研究[J]. 地质与资源, 2020, 29(4): 357-362.
- Yang J J, Lin N, Yu X X, et al. Study on quantitative inversion of remote sensing for organic carbon in the typical black soil areas of Northeast China[J]. Geology and Resources, 2020, 29(4): 357-362.