



三江平原表层土壤碳库时空分布特征分析

肖红叶^{1,2,3}, 房娜娜^{1,2,3}, 王 溪⁴, 刘 凯^{1,2,3}, 戴慧敏^{1,2,3}, 杨 泽^{1,2,3}, 刘国栋^{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. 鞍山市技术创新与研发服务中心, 辽宁 鞍山 114001

摘 要: 三江平原作为东北黑土区最重要的粮食生产区和土壤碳库之一, 其耕层土壤碳含量、分布特征及变化趋势一直是土壤学及生态学领域的研究热点。基于 1:25 万土地质量调查数据及全国第二次土壤普查数据, 利用土地质量地球化学评价方法、土壤碳密度计算公式等, 借助 ArcGIS、SPSS 等软件处理数据并绘制相关图表, 研究三江平原土壤有机碳分布特征及其时空变化规律。结果显示: 研究区表层(0~0.2 m)土壤有机质整体丰富, 全区表层土壤有机碳、全碳含量平均值分别为 2.49%、2.67%, 空间分布总体呈现“中东高-西低”的分布态势, 表土有机碳密度均值为 6.06 kg/m², 表层土壤全碳储量为 581.3 Tg。与第二次全国土壤普查成果相比, 研究区 65.7% 的表层土壤有机质呈现下降趋势, 表层土壤有机碳储量减少 523.1 Tg, 碳密度减少 5.84 kg/m²。近 40 年来三江平原研究区土壤有机质平均含量降低, 但仍高于东北平原平均水平, 是东北黑土区土壤碳储最为丰富的地区之一。

关键词: 土壤; 有机碳; 碳库; 碳密度; 三江平原

Spatiotemporal distribution characteristics of surface soil carbon pool in Sanjiang Plain

XIAO Hong-ye^{1,2,3}, FANG Na-na^{1,2,3}, WANG Xi⁴, LIU Kai^{1,2,3}, DAI Hui-min^{1,2,3}, YANG Ze^{1,2,3}, LIU Guo-dong^{1,2,3}

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effects, MNR, Shenyang 110034, China; 3. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effects of Liaoning Province, Shenyang 110034, China;
4. Anshan Technology Innovation and R&D Service Center, Anshan 114001, Liaoning Province, China

Abstract: Sanjiang Plain, as one of the most important grain production areas and soil carbon pools in the black soil region of Northeast China, has consistently been a research focus in soil science and ecology regarding the content, distribution characteristics, and variation trends of soil carbon in cultivated layer. Based on the data of 1:250 000 land quality survey and the Second National Soil Survey, this paper studies the distribution characteristics and spatiotemporal variation patterns of soil organic carbon (SOC) in Sanjiang Plain through geochemical assessment methods for land quality, soil carbon density calculation, and data processing and mapping with ArcGIS and SPSS. The

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-06-05. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家重点研发计划课题“土壤有机碳时空特征、固碳潜力及其驱动机制”(2023YFD1500801); 中国地质调查局项目“黑土地重点区生态地质调查”(DD20230089); 东北地质科技创新中心 2022 年度区创基金项目“三江平原土壤及生态系统碳储量研究”(QCJJ2022-41).

作者简介: 肖红叶(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事土地生态及湿地生态研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//kaolakaola1987@163.com

通信作者: 房娜娜(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事土壤肥力与修复研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//fangnana0373@163.com

引用格式: 肖红叶, 房娜娜, 王溪, 刘凯, 戴慧敏, 杨泽, 刘国栋. 三江平原表层土壤碳库时空分布特征分析 [J]. 地质与资源, 2025, 34 (2): 217-224, 245.

Xiao H Y, Fang N N, Wang X, Liu K, Dai H M, Yang Z, Liu G D. Spatiotemporal distribution characteristics of surface soil carbon pool in Sanjiang Plain [J]. *Geology and Resources*, 2025, 34(2): 217-224, 245.

results indicate that the organic matter in the surface soil (0–0.2 m) of the study area is generally abundant, with the average SOC content of 2.49% and total carbon content of 2.67%, displaying a pattern of high in central-eastern areas and low in west spatially, with the average organic carbon density of 6.06 kg/m² and the total carbon storage of 581.3 Tg in surface soil. The comparative analysis with the Second National Soil Survey reveals that 65.7% of surface soil organic matter shows decreasing trends, with the SOC storage decreasing by 523.1 Tg, accompanied by carbon density reduction of 5.84 kg/m². Despite the decline in average content of soil organic matter over the past 40 years, Sanjiang Plain maintains higher SOC levels than the average of Northeast China Plain, remaining one of the areas with the richest soil carbon storage in the black soil region of Northeast China.

Key words: soil; organic carbon; carbon pool; carbon density; Sanjiang Plain

0 引言

黑土吸水性和保水性良好,土壤养分丰富,特别适合农作物生长^[1],是世界上最肥沃的土壤之一,因此被称为“土中之王”^[2].中国东北黑土区是全球最适宜耕作的地区之一,也是我国最大的商品粮生产基地^[3],素有“中国粮仓”和粮食安全“稳压器”的美誉^[4].我国历来高度关注黑土地的保护和利用,将黑土地保护上升为国家战略.黑土有机质含量的变化也越来越受到社会关注.

三江平原是我国面积最大的沼泽化低平原和沼泽湿地集中区,也是东北黑土区重要的商品粮生产基地和重要的碳库^[5].近年来,随着全球气候变化、经济社会发展以及大量湿地被开垦^[6]等因素,三江平原土地利用变化剧烈^[7],部分区域天然湿地面积不断萎缩,湿地退化现象日益严峻,导致包括土壤有机质下降在内的多项湿地生态功能退化^[8].土壤碳库变化对于土壤肥力固持、大气 CO₂ 浓度^[9]及区域碳收支平衡都具有重要影响^[10],摸清三江平原地区表土碳含量、碳密度及其 40 年间变化特征对东北黑土区生态安全和粮食安全有重要作用.

1 研究区概况

三江平原位于东北平原的东北部,北起黑龙江,南抵兴凯湖,东临乌苏里江,西至小兴安岭南余脉^[11],由完达山北侧的乌苏里江、黑龙江和松花江冲积形成的低平原和完达山南侧兴凯湖、乌苏里江及其支流形成的冲湖积平原组成^[12].三江平原属断陷盆地,地表沉积呈现“东黏西砂”的特征^[13],地势较为平坦,区域内分布大量广阔的冲积低平原、河漫滩和阶地,土地广袤,土壤肥沃,农业生产条件优越^[14],是我国大豆、玉

米、水稻等重要商品粮生产基地.该区属于温带湿润、半湿润大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,春季时间短、升温快、大风天气较多,秋季降温迅速^[15-16].三江平原成土母质多为河湖冲积物、坡积物和残积物,在土壤形成过程中广泛发育了暗棕壤、黑土、草甸土、泥炭土、沼泽土、白浆土和水稻土等^[11,17].本研究以三江平原内低平原区为主要研究区域,研究区面积为 8.96×10⁴ km²(图 1).



图 1 三江平原及研究区位置图

Fig. 1 Location map of Sanjiang Plain with the study area

1—三江平原(Sanjiang Plain); 2—研究区(study area)

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究所需的土壤有机碳及全碳数据来源于中国

地质调查局实施的“东北黑土地 1:25 万土地质量调查”项目,依据《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T0258—2014)和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0259—2016),在研究区网格化部署采样点,表层土壤样品采样密度为 1 个点/1 km²。取样点避开了局部低洼地和高岗地、明显点状污染地段、新近搬运的堆积土、垃圾土、水土流失严重地段、田埂等处,采样时除去地表枯枝、落叶等杂物,主要采集耕层土,利用刻槽法垂直采集地表至 20 cm 深土壤,保证上下均匀采集,4 km² 组合成一个样品进行分析测试。样品分析过程中采用国家一级标准土样监控分析测试的准确度,采用重复样监控分析测试的精密度,测试分析方法为容量法。全碳及有机碳为实测数据,无机碳用差减法计算得出。

全国第二次土壤普查数据由中国科学院南京土壤研究所提供。该数据为东北地区表层土壤属性 2 km × 2 km 栅格数据集,包含土壤有机质含量、土壤容重等属性。文中将其作为 20 世纪 80 年代土壤有机碳含量水平,作为土壤碳库变化的基期数据进行对比研究。根据多目标地球化学调查土壤采样点的空间位置与栅格数据的空间关系,利用 ArcGIS 软件将栅格属性提取至土壤采样点。因土地质量地球化学调查项目未测算土壤容重,本文中计算土壤有机碳及无机碳密度均采用二普数据的容重。

土壤类型数据来源于中国科学院南京土壤研究所,原数据来自全国土壤普查办公室组织完成的《1:100 万中华人民共和国土壤图》,由中国科学院南京土壤研究所完成数据库建设。

土地利用/覆盖数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<http://www.resdc.cn>)。本研究根据《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017),结合研究区具体情况以及湿地定义^[18],划分为水田、旱田、林地、草地、湿地、建设用地及未利用地共 7 种土地利用类型。

2.2 数据处理

在分析研究区土壤碳分布及储量计算时,评价单元均为土地质量地球化学评价的最小空间单元,等同于网格化的采样单元,即 4 km² 为 1 个单元。地球化学图绘制按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016),图应用 ArcGIS、CorelDRAW 绘制,数据分析应用 SPSS 软件处理。

表层土壤有机碳密度(SOCD)、无机碳密度(SICD)及总碳密度(TCD)计算公式为^[19]:

SOCD=TOC×D×10×1×ρ

SICD=TIC×D×10×1×ρ

TCD=SOCD+SICD

式中:SOCD、SICD 及 TCD 分别为表层土壤有机碳密度、无机碳密度及总碳密度,单位为 kg/m²; TOC、TIC 分别为表层土壤有机碳及无机碳含量,单位为%; D 为土壤厚度,0~20 cm 取 0.2 m; ρ 为土壤容重,单位为 g/cm³; 10 为单位换算系数。

3 结果与讨论

计算结果显示,研究区表层(0~0.2 m)土壤碳以有机碳为主,全区表层土壤有机碳含量(Soil Organic Carbon, SOC)平均值为 2.49%,无机碳含量(Soil Inorganic Carbon, SIC)平均值为 0.18%,全碳含量(Total Carbon, TC)平均值为 2.67%(表 1)。土壤有机碳含量与我国新疆、渝西北、广西等地区相比,明显偏高^[15];而与第二次普查时研究区历史相比,远低于其历史含量。相关研究认为其原因与该区土地利用变化、湿地开垦有关^[20-22]。研究区土壤表层全碳和有机碳空间分布基本一致,呈现“中东高-西低”的分布态势。高值区主要分布在富锦市、宝清县、虎林市、挠力河中下游、七星河流域、七虎林河及穆棱河流域等地;低值区主要分布在三江平原西部松花江流域,具体位于绥滨县、桦川县、萝北县、依兰县及穆棱市北部等地区(见图 2、3)。

表 1 研究区土壤表层(0~0.2 m)碳含量统计
Table 1 Statistics of carbon content in the surface soil (0~0.2 m) of the study area

分类	样品数/件	平均值/%	最小值/%	最大值/%	标准差
全碳	20 397	2.67	0.3	39.11	1.36
有机碳	20 397	2.49	0.11	35.27	1.24
无机碳	20 397	0.18	0	11.09	0.3

统计三江平原研究区不同土壤类型的表层(0~0.2 m)土壤全碳、土壤有机碳及土壤无机碳含量(图 4),可以看出,不同土壤类型碳含量有明显差异:沼泽土全碳及有机碳含量最高,其次是泥炭土、白浆土、暗棕壤及草甸土,水稻土、黑土及新积土全碳及有机碳含

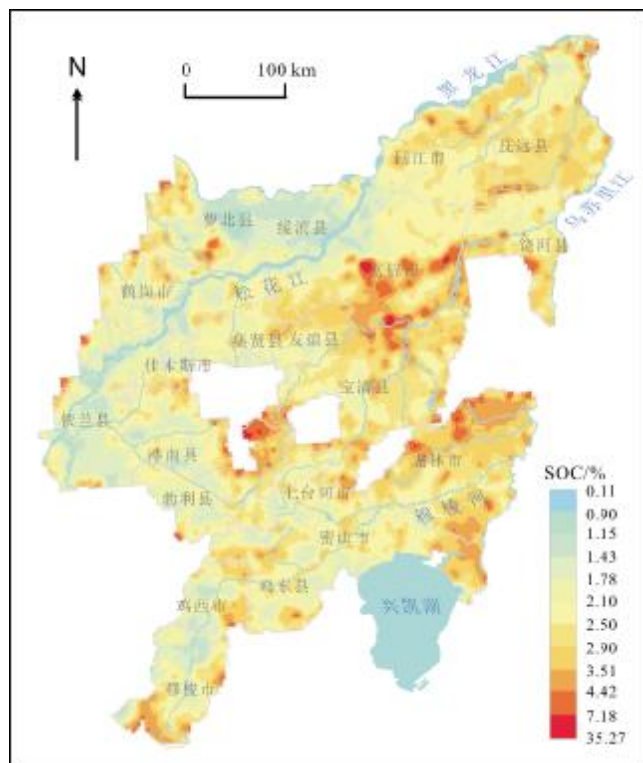


图2 研究区表层(0~0.2 m)土壤有机碳地球化学图

Fig. 2 Geochemical map of surface soil (0–0.2 m) organic carbon in the study area

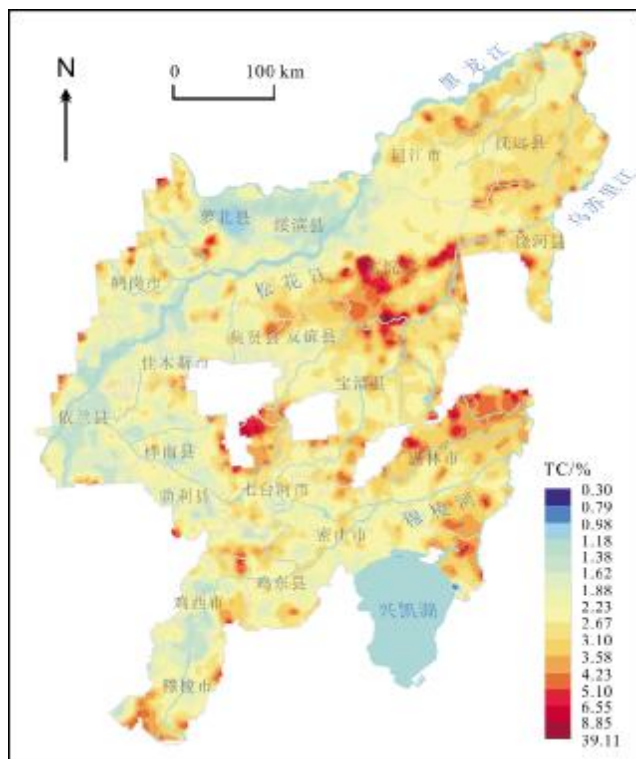


图3 研究区表层(0~0.2 m)土壤全碳地球化学图

Fig. 3 Geochemical map of surface soil (0–0.2 m)
total carbon in study area

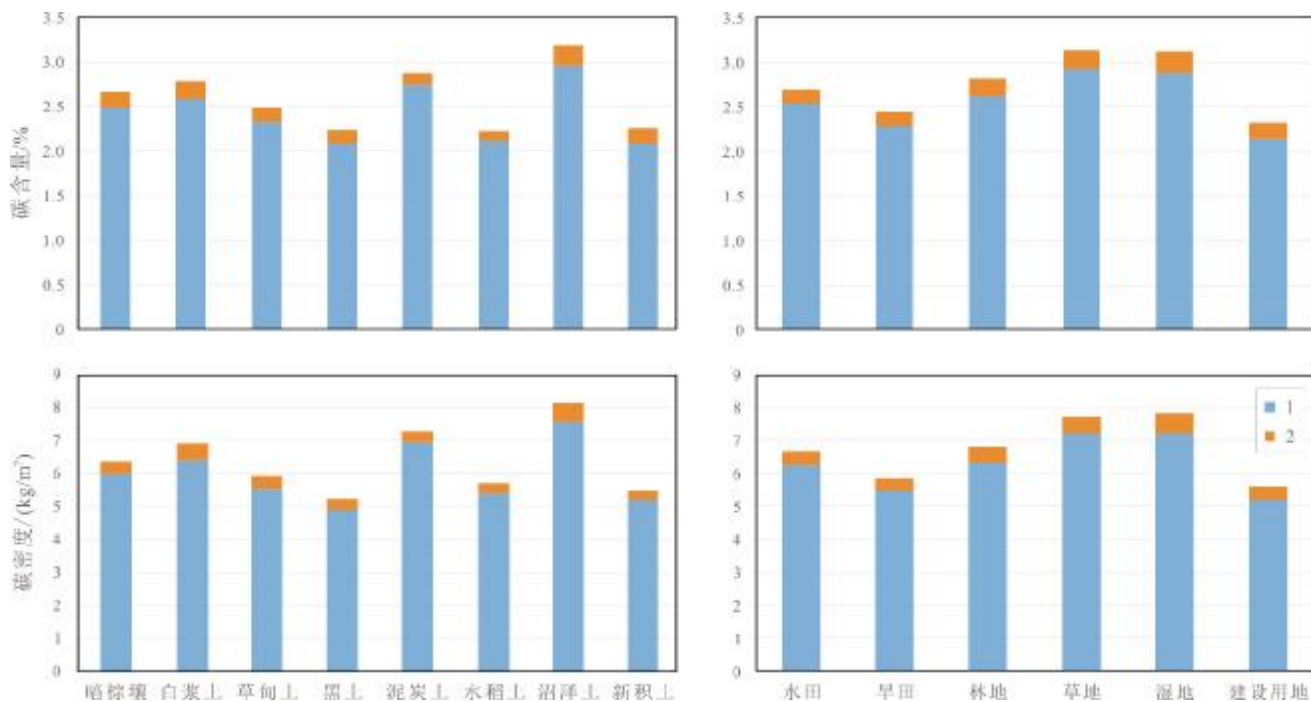


图4 研究区表土(0~0.2 m)碳含量和密度统计

Fig. 4 Statistics of carbon content and density in surface soil (0–0.2 m) of the study area

1—有机碳(organic carbon); 2—无机碳(inorganic carbon)

量在该区较低. 沼泽土、泥炭土土壤无机碳含量较高, 均大于 0.2%; 水稻土土壤无机碳含量最低, 仅为 0.11%. 按照土地利用方式统计(此处仅统计样点数大于 100 的土地利用类型), 研究区表土有机碳及全碳含量均为草地最高, 其次是湿地和林地, 再次是水田和旱田, 建设用地均为最低; 湿地、草地和林地的表土无机碳含量相对较高, 建设用地、水田和旱田均小于 0.2%, 其中水田和旱田同为最低. 综合以上结果与其他已有的研究成果, 土壤类型、土地利用类型、植被类型、地形地貌等因素可造成研究区表土有机碳含量和密度的空间分布差异^[11, 15, 23].

研究区表层(0~0.2 m)土壤有机质含量范围为 0.186%~60.81%, 平均值为 4.33%. 按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295—2016)有机质不同等级的分布面积和比例, 结合三江平原土壤有机质地球化学评价图(图 5), 可以看出, 研究区土壤有机质呈现“整体丰富、极少数缺乏”的分布特征. 全区有机质主要处于三级以上水平, 属于丰富-较丰富-中等状态的土地面积 $8.48\times 10^4\text{ km}^2$, 占总面积的 94.7%(表 2). 可见, 研究区土壤有机质丰富, 其中宝清县-富锦县-友谊县和虎林县-密山县一带土壤有机质含量最为丰富, 萝北县等地为较缺乏地区, 区内为数不多的有机质缺乏地区零星分布于兴凯湖沿岸等地.

与第二次全国土壤普查成果相比, 40 年来三江平原土壤有机质含量变化较大, 其中研究区 65.7% 的表层土壤有机质呈现下降趋势, 33.72% 的表层土壤有机质呈现上升趋势(见图 6). 研究区土壤有机质下降较大的区域主要分布于富锦市、宝清县、鹤岗市、七台河及虎林市等区域, 这些地区同时也是自 20 世纪 80 年代以来三江平原由沼泽湿地转变为耕地最为集中的地区. 据刘汝海等^[24]在三江平原洪河农场的研究认为, 湿地开垦后土壤结构和性质发生了巨大变化, 耕作层土壤有机质含量在开垦初期迅速降低, 随后降速减缓, 开垦 12~22 a 微微回升, 犁底层初期小幅上升, 随后缓慢降低, 在开垦 12 a 后趋于平衡.

据测算, 三江平原研究区(面积为 $8.96\times 10^4\text{ km}^2$)表层(0~0.2 m)土壤全碳储量为 581.3 Tg, 有机碳、无机碳和全碳密度均值分别为 6.06、0.43 和 6.49 kg/m²(见表 3). 从三江平原表层土壤全碳密度分布图(图 7)可知, 全区整体呈现“东高西低”的分布格局. 表土全

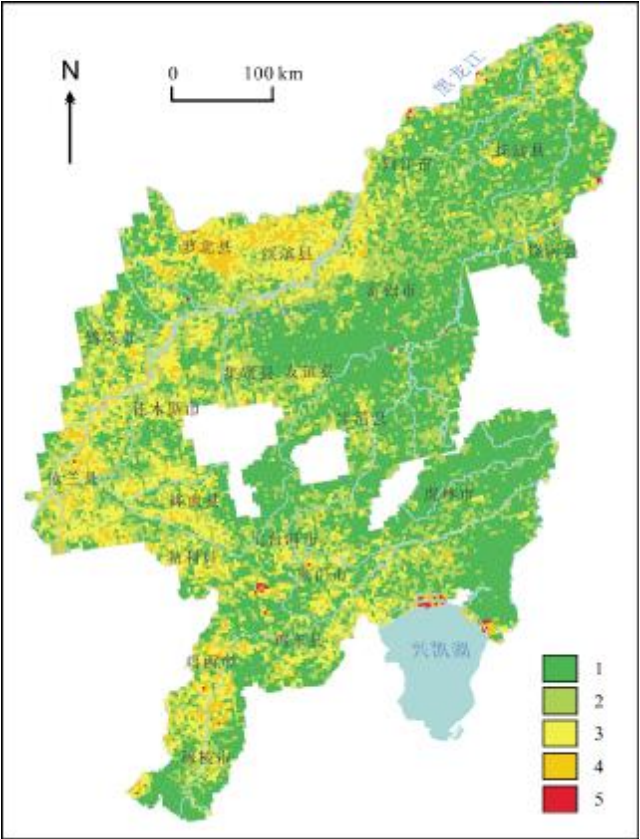


图 5 研究区表层(0~0.2 m)土壤有机质地球化学评价图
Fig. 5 Geochemical evaluation map of surface soil (0~0.2 m) organic matter in the study area

1—丰富 (abundant, >4%); 2—较丰富 (relatively abundant, 3%~4%);
3—中等 (moderate, 2%~3%); 4—较缺乏 (relatively deficient, 1%~2%); 5—缺乏 (deficient, ≤1%)

表 2 三江平原土壤有机质评价等级分布面积及比例
Table 2 Distribution area and proportion of soil organic matter evaluation grades in Sanjiang Plain

等级	一等 (丰富)	二等 (较丰富)	三等 (中等)	四等 (较缺乏)	五等 (缺乏)
面积/km ²	44 402.67	24 416.98	16 008.52	4 457.43	285.79
占比/%	49.57	27.26	17.87	4.98	0.32

碳密度高值区主要分布在富锦市、宝清县、同江市及虎林市等地, 其他地方亦有零散分布; 低值区主要分布在松花江及倭肯河流域, 绥滨县、萝北县及依兰县等地. 三江平原研究区土壤碳密度空间分布存在较大的差异性, 有研究表明, 土地利用类型、土壤质地(尤其是其中土壤黏粒)、年均气温和年均累积降雨量是影响三江平原土壤碳密度空间分布特征的重要环境因子^[12, 25-26].

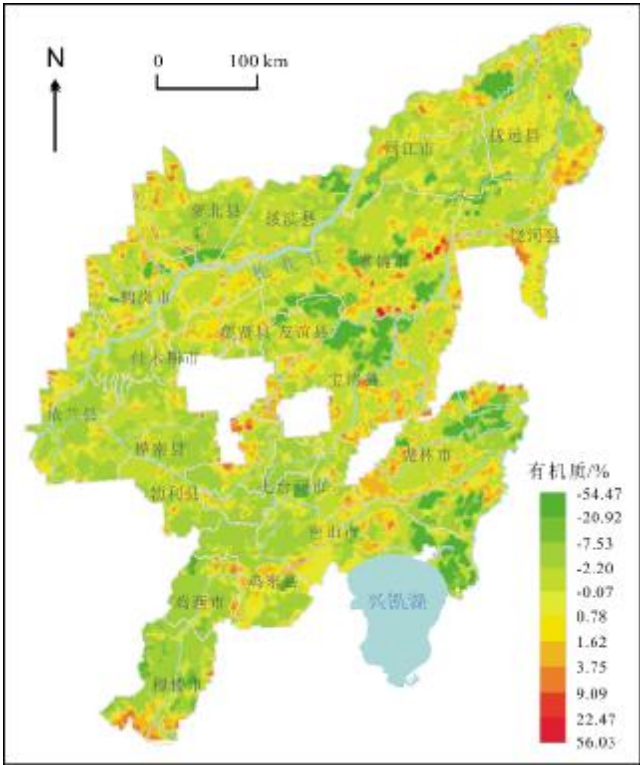


图 6 三江平原有机质含量变化图

Fig. 6 Changes of organic matter content in Sanjiang Plain

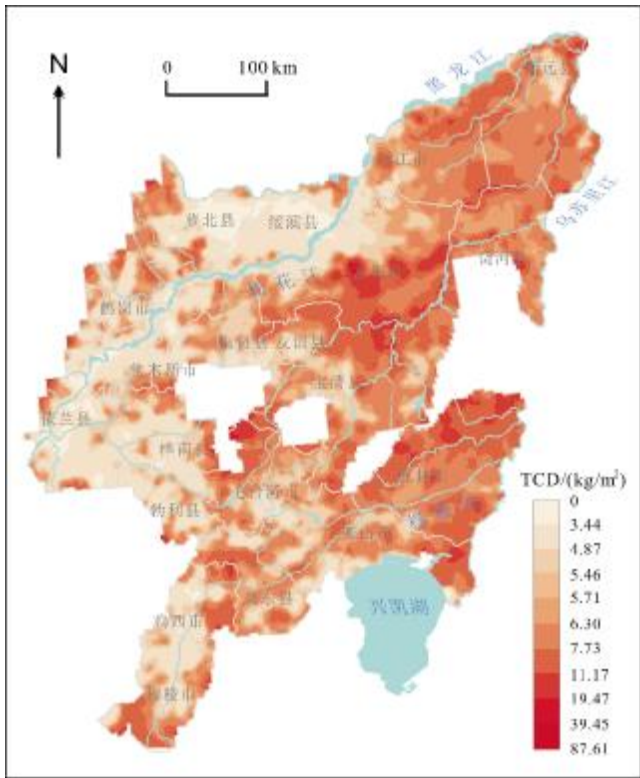


图 7 三江平原表层土壤全碳密度分布图

Fig. 7 Distribution map of total carbon density of surface soil in Sanjiang Plain

表 3 研究区表层(0~0.2 m)土壤有机碳储量和密度变化特征表

Table 3 Variation of organic carbon storage and density in surface soil (0~0.2 m) of the study area

有机碳储量/Tg			有机碳密度/(kg/m ²)		
2010 年代	1980 年代	变化	2010 年代	1980 年代	变化
542.8	1065.9	-523.1	6.06	11.9	-5.84

研究区碳密度按不同土壤类型统计(仅统计样点数>100 土壤类型),结果显示,表土有机碳密度和全碳密度最高的土壤类型为沼泽土,其次为泥炭土,随后是白浆土、暗棕壤、草甸土、水稻土和新积土,含量最低为黑土;表土无机碳密度最高的土壤类型为沼泽土,其次为白浆土和暗棕壤,随后是草甸土、黑土和泥炭土,水稻土和新积土无机碳密度最低(图 4)。区内土地利用类型以耕地、草地和林地为主,按不同土地利用类型统计(此处仅统计样点数>100 土地利用类型),结果显示:表土有机碳密度和全碳密度最高的土地利用类型为湿地,其次为草地,随后是林地、水田、旱田,含量最低为城乡用地;表土无机碳密度最高的土地利用类型为湿地,其次为草地,随后是林地和建设用地,水田及旱田无机碳密度最低(图 4)。表明研究区表土碳密度与人类活动的干扰有关,受人类影响较小的自然生态系统表土碳密度较高。

与第二次全国土壤普查成果相比,研究区表层(0~0.2 m)土壤有机碳储量减少 523.1 Tg,碳密度减少 5.84 kg/m²。根据三江平原 40 年间土地利用变化图(图 8),发现 20 世纪 80 年代以来,研究区土地利用发生急剧变化,耕地面积显著增加,而湿地、林地和草地等生态用地均存在不同程度的萎缩。其中湿地萎缩面积最大,增加的耕地主要由湿地、林地、草地的围垦产生。对比分析研究区 40 年间土地利用变化与土壤表层有机碳密度变化图(图 9),可以发现湿地变农田区域与土壤有机碳密度降低区域大面积重合。参考刘子刚等^[27]的研究观点,湿地被开垦后富含有机质的土层厚度变薄,有机质分解速率加快,土壤碳密度逐渐减低。人类活动导致的湿地丧失和退化、水土流失和不合理的耕作是三江平原土壤碳储量减少的主要原因。

4 结论

本研究初步分析了三江平原研究区表层(0~0.2 m)

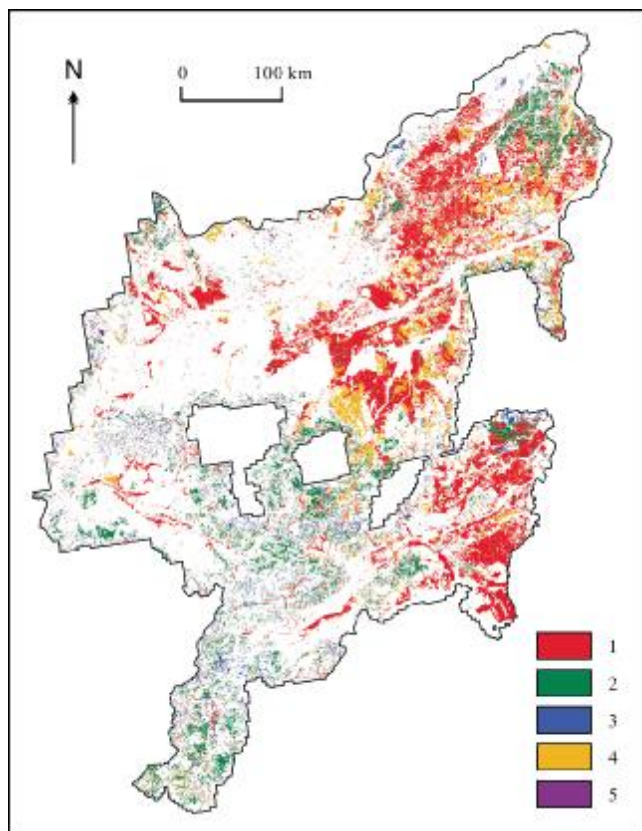


图8 研究区40年间土地利用变化

Fig. 8 Land use change in the study area over 40 years

1—湿地变农田 (conversion of wetland to farmland); 2—林地变农田 (conversion of forest to farmland); 3—林地变草地 (conversion of forest to grassland); 4—草地变农田 (conversion of grassland to farmland); 5—农田变林地 (conversion of farmland to forest)

土壤有机碳时空分布特征, 并计算其碳密度及碳储量变化. 结果如下:

(1)研究区表层土壤全碳和有机碳空间分布基本一致, 总体呈现“中东高-西低”的分布态势, 不同土地利用类型和土壤类型差异明显.

(2)研究区表层土壤有机质整体丰富, 按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295—2016), 94.7%的土壤属于丰富-较丰富-中等状态.

(3)研究区表层土壤全碳储量为 581.3 Tg, 有机碳、无机碳和全碳密度均值分别为 6.06、0.43 和 6.49 kg/m², 其中表层土壤有机碳密度高于东北平原平均含量 (3.33 kg/m²)^[28], 是东北黑土区土壤有机质最为丰富的地区之一, 也是国家具有战略地位的农业经济区.

(4)与第二次全国土壤普查成果相比, 研究区 65.7% 的表层土壤有机质含量呈现下降趋势.

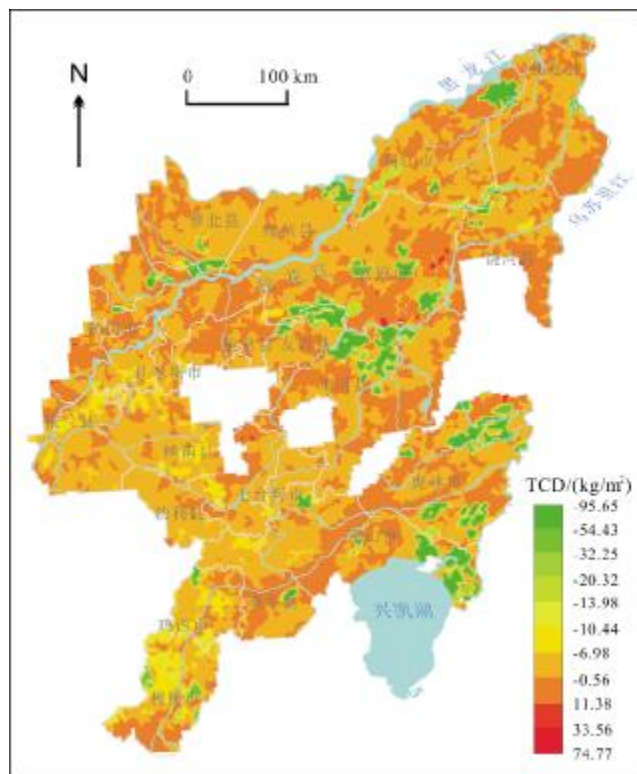


图9 研究区土壤表层(0~0.2 m)有机碳密度变化

Fig. 9 Changes of surface soil (0~0.2 m) organic carbon density in the study area

参考文献(References):

- [1]戴慧敏, 刘凯, 宋运红, 等. 东北地区黑土退化地球化学指示与退化强度[J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 510-517.
Dai H M, Liu K, Song Y H, et al. Black soil degradation and intensity in northeast China: Geochemical indication[J]. Geology and Resources, 2020, 29(6): 510-517.
- [2]韩晓增, 邹文秀. 我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 206-212.
Han X Z, Zou W X. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in Northeast China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 206-212.
- [3]全国农业技术推广服务中心, 农业部耕地质量监测保护中心, 沈阳农业大学. 东北黑土区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017: 1-2.
National Agricultural Technology Extension Service Center, Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC, Shenyang Agricultural University. Evaluation of cultivated land quality in the black soil region of Northeast China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017: 1-2. (in Chinese)
- [4]阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. 中国水土保持, 2008(12): 26-30.

- Yan B X, Yang Y H, Liu X T, et al. Present status of soil erosion and evolution tendency of black soil region of Northeast[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12): 26-30.
- [5]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.
- [6]王宗明, 宋开山, 刘殿伟, 等. 1954~2005 年三江平原沼泽湿地农田化过程研究[J]. 湿地科学, 2009, 7(3): 208-217.
- Wang Z M, Song K S, Liu D W, et al. Process of land conversion from marsh into cropland in the Sanjiang Plain during 1954-2005[J]. Wetland Science, 2009, 7(3): 208-217.
- [7]肖红叶, 刘国栋, 杨泽, 等. 东北黑土区近半世纪土地利用变化时空特征分析[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1037-1049.
- Xiao H Y, Liu G D, Yang Z, et al. Spatio-temporal change in land uses of the black soil area in Northeast China over the past half century[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1037-1049.
- [8]肖红叶, 房娜娜, 戴慧敏, 等. 基于外部性理论的湿地退化成因分析及对策研究[J]. 地质与资源, 2021, 30(5): 617-622.
- Xiao H Y, Fang N N, Dai H M, et al. Externality theory-based analysis on causes and countermeasures of wetland degradation[J]. Geology and Resources, 2021, 30(5): 617-622.
- [9]Lal R, Follett R F, Stewart B A, et al. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security[J]. Soil Science, 2007, 172(12): 943-956.
- [10]李英臣, 宋长春. 氮磷输入对湿地生态系统碳蓄积的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 224-229.
- Li Y C, Song C C. Effects of exogenous nitrogen and phosphorus input on carbon accumulation in wetland system[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(1): 224-229.
- [11]姜柏志. 三江平原水稻主要种植区表层土壤有机碳密度空间分布及储量估算[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- Jiang B Z. Spatial distribution of topsoil organic carbon density and storage estimation in the main rice planting areas of the Sanjiang Plain[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.
- [12]杨安广, 苗正红, 邱发富, 等. 基于 GIS 的三江平原表层土壤有机碳储量估算及空间分布研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 155-158.
- Yang A G, Miao Z H, Qiu F F, et al. A study on storage and distribution of soil organic carbon in Sanjiang Plain based on GIS[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 155-158.
- [13]崔虎群, 吴庭雯, 刘江涛, 等. 三江平原沼泽湿地和农田的演替过程对地下水的影响[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 51-58.
- Cui H Q, Wu T W, Liu J T, et al. Effects of succession processes of marsh wetland and farmland on groundwater in the Sanjiang Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 51-58.
- [14]徐英德, 裴久渤, 李双异, 等. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 495-504.
- Xu Y D, Pei J B, Li S Y, et al. Main characteristics and utilization countermeasures for black soils in different regions of Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 495-504.
- [15]杨亦恂, 姜晓旭, 李名升, 等. 三江平原土壤有机碳含量及其密度的空间变异特征分析[J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1313-1319.
- Yang Y X, Jiang X X, Li M S, et al. Spatial variability of soil organic carbon content and density in the Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6): 1313-1319.
- [16]尹晓梅. 气候变化对三江平原湿地植被生产力影响模拟研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013.
- Yin X M. Simulation study of climate change impacts on wetlands productivity in Sanjiang Plain[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [17]王宗明, 刘殿伟, 宋开山, 等. 土壤类型对三江平原土地利用/覆被变化的影响[J]. 资源科学, 2008, 30(5): 694-701.
- Wang Z M, Liu D W, Song K S, et al. Impact of soil type on land use/cover change in Sanjiang Plain[J]. Resources Science, 2008, 30(5): 694-701.
- [18]陈克林. 《拉姆萨尔公约》——《湿地公约》介绍[J]. 生物多样性, 1995, 3(2): 119-121.
- Chen K L. Introduction to the *Ramsar Convention*: The convention on wetlands[J]. Biodiversity Science, 1995, 3(2): 119-121. (in Chinese)
- [19]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.
- [20]刘国栋, 戴慧敏, 杨泽, 等. 三江平原土壤碳库时空变化和影响因素研究[J]. 现代地质, 2021, 35(2): 443-454.
- Liu G D, Dai H M, Yang Z, et al. Temporal and spatial changes of soil carbon pool and its influencing factors in the Sanjiang Plain[J]. Geoscience, 2021, 35(2): 443-454.
- [21]卜宏凯. 北方典型农业区土壤碳库变化影响因素研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- Bu H K. The influence factors of the soil carbon storage in typical agricultural area of north China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [22]宋长春, 王毅勇, 阎百兴, 等. 沼泽湿地开垦后土壤水热条件变化与碳、氮动态[J]. 环境科学, 2004, 25(3): 150-154.
- Song C C, Wang Y Y, Yan B X, et al. The changes of the soil hydrothermal condition and the dynamics of C, N after the mire tillage[J]. Environmental Science, 2004, 25(3): 150-154.

- (3): 397–409.
- Liu X J, Li X, Liang X, et al. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model [J]. *Tropical Geography*, 2019, 39(3): 397–409.
- [21]高禄年,董会和.城市收缩背景下的资源型城市发展与效率评价:以鞍山市为例[J].*中国矿业*, 2022, 31(3): 42–48.
- Gao L N, Dong H H. Development and efficiency evaluation of resource-based cities under the background of urban shrinkage: A case study of Anshan City [J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(3): 42–48.
- [22]王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].*地理科学进展*, 1999, 18(1): 81–87.
- Wang X L, Bao Y H. Study on the methods of land use dynamic change research [J]. *Progress in Geography*, 1999, 18(1): 81–87.
- [23]Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [24]李琛,高彬,吴映梅,等.基于PLUS模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J].*浙江农林大学学报*, 2022, 39(1): 84–94.
- Li C, Gao B P, Wu Y M, et al. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(1): 84–94.
- [25]曲衍波,王世磊,朱伟亚,等.黄河三角洲国土空间演变的时空分异特征与驱动力分析[J].*农业工程学报*, 2021, 37(6): 252–263.
- Qu Y B, Wang S L, Zhu W Y, et al. Spatial-temporal differentiation characteristics and driving force of territorial space evolution in the Yellow River Delta [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(6): 252–263.
-
- (上接第 224 页/Continued from Page 224)
- [23]王充,于东升,张海东,等.典型黑土区农田土壤碳库及其影响因子显著性变化特征研究[J].*土壤学报*, 2014, 51(4): 845–852.
- Wang C, Yu D S, Zhang H D, et al. Soil carbon stocks and changes in significance of its impact factors in typical black soil region of Northeast China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 845–852.
- [24]刘汝海,王起超,王艳,等.小叶章湿地开垦后汞和有机质的动态变化[J].*农业环境科学学报*, 2003, 22(6): 647–650.
- Liu R H, Wang Q C, Wang Y, et al. Soil carbon stocks and changes in significance of its impact factors in typical black soil region of Northeast China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6): 647–650.
- [25]苗正红.1980–2010年三江平原土壤有机碳储量动态变化[D].长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013.
- Miao Z H. Changes and factors of soil carbon storage in the Sanjiang Plain, Northeast China from 1980s to 2010 [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [26]刘国栋.三江湿地土壤碳库分布规律研究[D].长春:吉林大学, 2012.
- Liu G D. The distribution pattern of soil carbon pool in Sanjiang wetland, northeast of China [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [27]刘子刚,张坤民.黑龙江省三江平原湿地土壤碳储量变化[J].*清华大学学报(自然科学版)*, 2005, 45(6): 788–791.
- Liu Z G, Zhang K M. Wetland soils carbon stock in the Sanjiang Plain [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2005, 45(6): 788–791.
- [28]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.