

1990—2020年中国东北地区土地利用 变化对SOC储量的影响

秦祝元¹, 刘焕军², 孟祥添², 王翔², 于云飞¹

(1. 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 长春 130118; 2. 中国科学院东北地理与
农业生态研究所黑土保护与利用国家重点实验室, 长春 130102)

摘要: [目的] 旨在探讨土地利用和覆盖变化(Land Use and Cover Change, LUCC)对东北地区特定土壤类型碳储量的影响。[方法] 依据获取的土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)储量数据和1990—2020土地覆盖数据,采用ArcGis进行空间分析,提取长期耕地和地类转化期,分析LUCC动态及其对SOC储量的影响机制。[结果] 1)1990—2020年,研究区总体为碳源状态,SOC储量减少0.046 Pg。具体来看,耕地和湿地的SOC储量分别减少0.111、0.007 Pg,其他土地利用类型的SOC储量下降0.313 Pg,而草地和林地的SOC储量分别增加0.102、0.283 Pg。2)长期耕作导致SOC储量损失0.341 Pg;天然土地(林地和草地)开垦使得SOC分别损失5.79%和4.32%。3)土地利用变化主要表现为耕地面积减少(11 917 km²),林地和草地面积增加(1 535~4 213 km²);湿地面积减少(1 185 km²),且主要分布在内蒙古和黑龙江(89%)。4)耕地面积的减少主要转化为草地(64%)和其他用地(29%),其中草甸土、暗棕壤和黑钙土是主要的土壤类型。湿地减少的区域主要分布在黑土和草甸土地区,其他土地利用类型转化为林地和草地时,主要涉及的土壤类型为暗棕壤(15%~41%)和草甸土。[结论] 东北地区SOC的储量变化主要由天然土地开垦及长期耕作驱动,受退耕还林还草政策和生态修复需求推动。未来应加强黑龙江地区的耕地与湿地恢复及林地、草地保护,以提升SOC储量。

关键词: 土壤有机碳; 土地利用变化; 黑土区土壤类型; 耕地转化

中图分类号: X825

文献标识码: A

Impact of Land-Use Changes on SOC Stocks in Northeast China from 1990 to 2020

QIN Zhuyuan¹, LIU Huanjun², MENG Xiangtian², WANG Xiang², YU Yunfei¹

(1. School of Geomatics and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China;

2. State Key Laboratory of Black Soils Conservation and Utilization, Northeast Institute of
Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of land use and cover change (LUCC) on carbon stocks of specific soil types in northeast China. [Methods] Based on the obtained soil organic carbon (SOC) stock data and land cover data from 1990 to 2020, ArcGis was used for spatial analysis to extract long-term cropland and land type conversion periods. LUCC dynamics and their influencing mechanism on SOC stocks were analyzed. [Results] 1) From 1990 to 2020, the study area generally maintained as a carbon source, with SOC stocks decreasing by 0.046 Pg. Specifically, SOC stocks in croplands and wetlands decreased by 0.111 Pg and 0.007 Pg, respectively, while those of other land-use types declined by 0.313 Pg. In contrast, SOC stocks in grasslands and forests increased by 0.102 and 0.283 Pg, respectively. 2) Long-term cultivation resulted in a loss of 0.341 Pg of SOC stocks. Reclamation of natural lands (forests and grasslands) led to SOC losses of 5.79% and 4.32%,

收稿日期: 2025-04-07

修回日期: 2025-05-16

录用日期: 2025-05-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500100)

第一作者: 秦祝元(1999—),男,硕士研究生,主要从事土地利用与土壤有机碳相互作用研究。E-mail: zhuyuanqing@myyahoo.com

通信作者: 刘焕军(1981—),男,研究员,博士生导师,主要从事耕地质量评测、智慧农业研究。E-mail: huanjunliu@yeah.net

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

respectively. 3) Land-use changes were mainly reflected in a decrease in cropland area ($11\,917\text{ km}^2$) and an increase in forest and grassland areas ($1\,535\text{--}4\,213\text{ km}^2$). Wetlands decreased by $1\,185\text{ km}^2$, primarily occurring in Inner Mongolia and Heilongjiang (89%). 4) The decreased cropland area was mainly converted into grasslands (64%) and other land types (29%), with meadow soil, dark brown soil, and chernozem being the main soil types. Wetland loss mainly occurred in black soil and meadow soil regions, while the conversion of other land-use types into forests and grasslands primarily involved dark brown soil (15%–41%) and meadow soil. [Conclusion] Changes in SOC stocks in northeast China are mainly driven by natural land reclamation and long-term cultivation, as well as the policies of returning croplands to forests and grasslands and the demand for ecological restoration. In the future, efforts should be strengthened to restore croplands and wetlands and to protect forests and grasslands in Heilongjiang, so as to enhance SOC stocks.

Keywords: soil organic carbon; land-use change; soil types in black soil regions; cropland conversion

Received: 2025-04-07

Revised: 2025-05-16

Accepted: 2025-05-30

土壤作为陆地生态系统的核心,在维持全球碳循环及粮食安全中发挥关键作用^[1-2]。全球表层SOC储量是大气中有机碳储量的2.8倍^[3]。因此,土壤碳库及其变化被视为影响大气二氧化碳浓度的关键生态过程。土地作为陆地生态系统的自然空间载体和人类生产活动的社会经济载体,LUCC直接影响区域的自然碳循环过程,改变区域的碳排放水平^[4]。在全球气候变化与人类活动加剧的背景下,不同时空尺度上的LUCC经历剧烈变化^[5]。研究^[6]表明,由人类活动引发的LUCC已导致全球SOC储量累计损失达116 Pg C,而SOC的稳定性特征与土地利用方式和土壤类型间存在显著相关性^[7]。因此,整合遥感技术评估土地利用格局演变与土壤类型对SOC的交互作用及其调控机制,对全球碳循环研究和确保国家粮食安全具有重要意义。

关于SOC动态与土地利用变化关系的研究,我国学者开展大量的实证研究。SONG等^[8]研究发现,在东北松嫩平原,由于植被收割和水土流失等人为干扰,草地转为耕地直接导致SOC的显著流失。研究^[9]普遍表明,耕地恢复为草地或林地则是一个碳储存的过程。虽然一些研究^[10]对比我国温带与亚热带农田转变为林地对SOC的影响指出,耕地向林地转变也可能导致SOC下降,但这种现象通常仅在短期尺度内出现。目前,关于土地利用转变对SOC的影响的研究,主要集中在特定地区和生态群落。例如,在典型的生态脆弱带—黄土丘陵沟壑区,研究者^[11]发现,林草地转为耕地导致SOC下降,而耕地转为林草地则使SOC增加。但在东部平原区,耕地转为林地和草地却使SOC短暂降低^[12]。SOC还受到气候、土壤、生物及土地管理措施等多重因素的影响。LI等^[13]在关于塔里木河流域SOC的研究表明,不同土

壤类型对土地利用变化的响应存在显著差异:在有机碳本底值较高的肥沃土壤(如Fluvisols)上,草地开垦为耕地导致显著的SOC净损失;而在原本碳储量较低的贫瘠土壤(如Arenosols)上,类似的土地利用变化对SOC储量的影响则相对有限。因此,在分析这一复杂的影响机制时,不仅需要考虑SOC时空差异性,还应充分考虑区域土壤类型的特征^[14]。东北地区作为中国粮食生产的关键区域,其黑土以其高有机质、深腐殖质层闻名,研究该地区不同土地利用结构和土壤类型对SOC变化和储量的影响,对于维持农业生产力 and 生态平衡至关重要。

本研究通过分析区域土地利用数据,识别研究区土地利用变化动态,结合土壤类型等数据,深入探讨不同土地利用变化类型对SOC储量的影响机制,研究精确估计研究区在土地利用变化下的SOC源汇动态变化,对该区域的土地管理策略和土壤碳储量研究有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国东北($38^{\circ}40'\sim53^{\circ}34'N$, $115^{\circ}05'\sim135^{\circ}02'E$),主要包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古东四盟市。东北地区拥有世界四大黑土区的松辽流域和三江平原,其中耕地面积约为 $4.17\times10^5\text{ km}^2$,占全国耕地的1/6,是中国最重要的商品粮生产基地。该地区地形以平原山地为主,海拔 $-84\sim2\,602\text{ m}$,区域气候类型主要是温带季风气候,四季分明,夏季温暖多雨,年平均气温 $3\sim7^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 数据来源

使用中国科学院东北地理与农业生态研究所的全球黑土区SOC分布数据(空间分辨率 30 m)^[15]。土地覆盖数据采用YU等^[16]提供的1990—2020年数据,原数

据10类一级分类简化为6类:湿地、其他用地、草地、林地、耕地(图1a)。为与SOC数据的时间间隔一致,将土地利用数据设置6个时间节点(从1990—2020年,每5a为1个时间节点)。土壤类型数据来源于土壤信息服务平台(<http://www.soilinfo.cn/map/index.aspx>),基于世界土壤资源参考数据库(WRB)分类系统提取覆盖研究区总面积90%以上的6类典型黑土区土壤:黑土、黑钙土、风沙土、白浆土、草甸土、暗棕壤进行研究(图1b)。

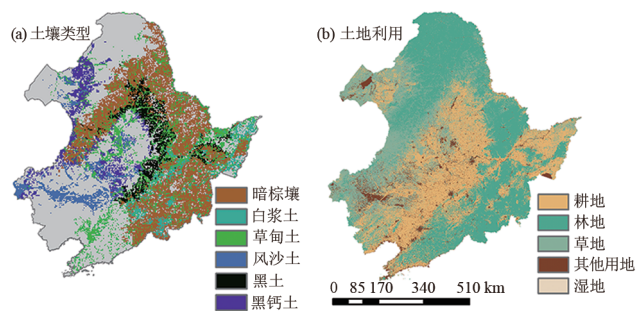


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.3 SOC密度、碳储量计算

基于研究区SOC数据,对研究区不同土地利用类型转化和耕地长期耕作的SOC储量进行估算。表层土深度为20 cm。利用SOC和体积质量计算SOC密度^[17];SOC体积质量通过公式(2)计算,SOC储量等于SOC密度与对应面积相乘^[18]。

$$\text{SOCD} = \text{SOC} \times \text{BD} \times D \quad (1)$$

式中:SOCD为SOC密度, Mg/hm^2 ;SOC为SOC质量分数,%;BD为体积质量, g/cm^3 ;D为土壤取样深度,cm。

$$\text{BD} = 1.377e^{-0.0048 \times \text{SOC}} \quad (2)$$

式中:SOC为SOC质量分数, g/kg 。

1.4 长期耕地和地类转化期提取

本研究基于1990—2020年每5a1个时间点的土地利用数据,共设定6个连续的时间跨度:1990—1995年(1~5a)、1990—2000年(5~10a)、1990—2005年(10~15a)、1990—2010年(15~20a)、1990—2015年(20~25a)和1990—2020年(25~30a)。在数据处理过程中,首先利用ArcGIS 10.8软件提取耕地和非耕地2种土地利用类型。为确保数据准确性,将1990年土地覆盖类别为非耕地且1995年转变为耕地的区域提取为1990—1995年(1~5a)耕作期。同理,将1990—1995年为耕地而2000年转变为非耕地的区域定义为1990—2000年(5~10a)耕作期。后续各耕作期与土地类型转化(如草地转为耕地)期的提取均采用上述方法,通过栅格计算器进行空间分析,确保数据提取的一致性和可比性。

2 结果与分析

2.1 东北地区土地利用变化与土壤类型关系

1990—2020年,中国东北黑土区的耕地和湿地面积总体呈减少趋势,而林地、其他用地和草地面积则有所增加(图2)。耕地面积从422 723 km^2 减少到410 803 km^2 ,减少2.8%,其中31 700 km^2 耕地转变为天然土地,同时从天然土地开垦19 800 km^2 为耕地。湿地总面积减少1 185 km^2 ,而草地面积从307 959 km^2 增至312 170 km^2 。随着退耕还林的政策实行,林地从耕地退耕1 844 km^2 ,使得林地总面积达到468 491 km^2 ,是研究区面积最大的土地覆盖类别(表1)。

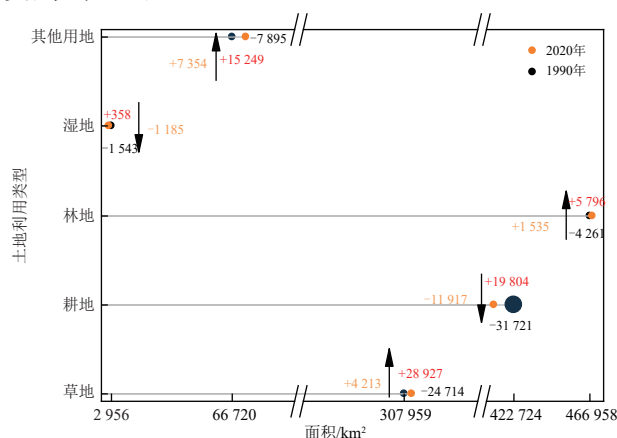


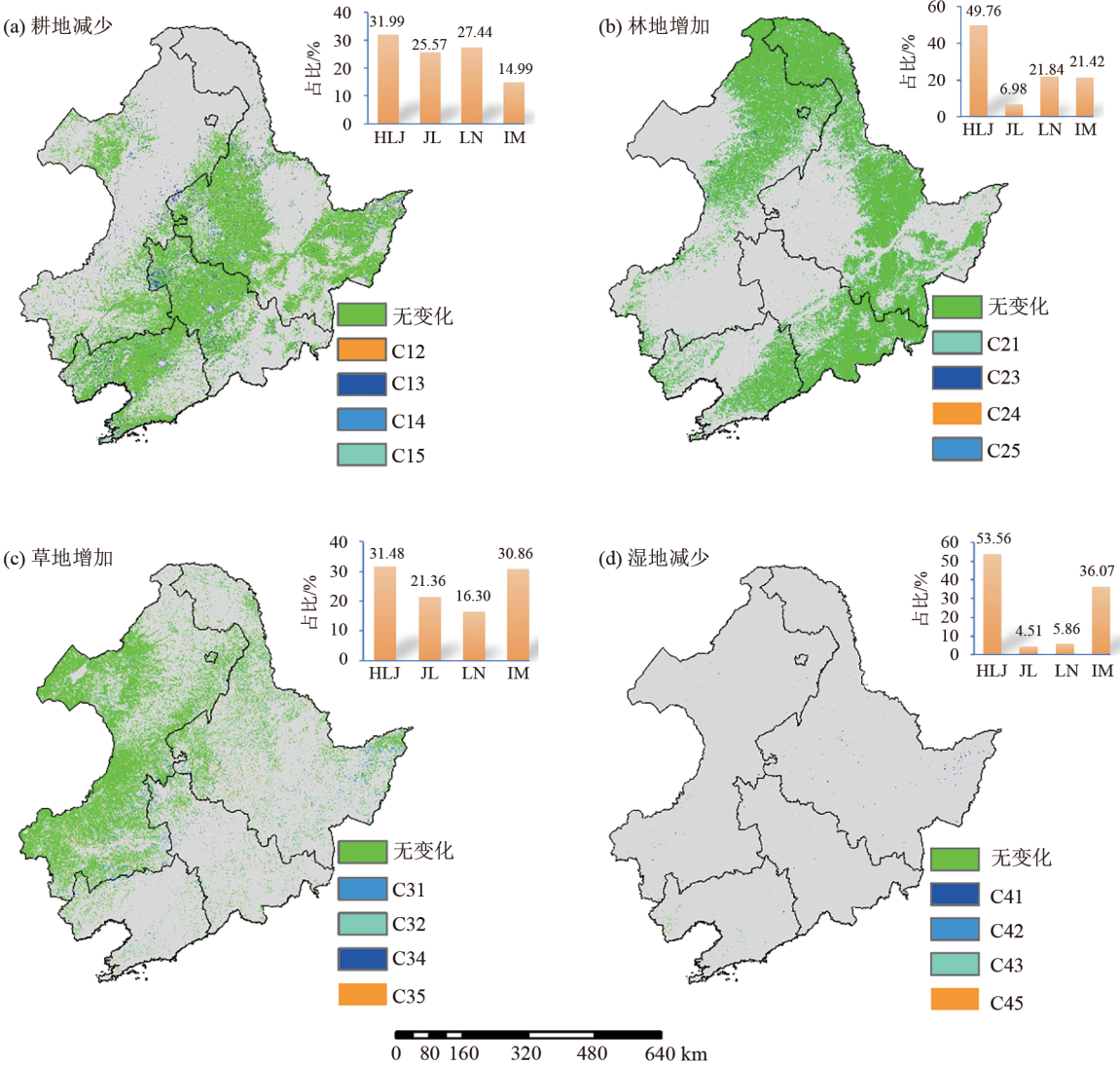
图2 研究区1990—2020年各地类面积变化

Fig. 2 Area changes of different land types in study area from 1990 to 2020

1990—2020年东北区域主要LUCC分布见图3。耕地面积减少,其面积转变为草地(64%)、其他用地(29%)、林地(6%)与湿地(1%)(图3a)。草甸土、黑钙土和暗棕壤是耕地减少的主要土壤类型,占38%(图4a)。湿地面积在内蒙古和黑龙江减少1 382 km^2 (89%),面积转化为草地(44%)、耕地(38%)、其他用地(16%)和林地(2%)(图3d)。湿地面积减少区域的主要土壤类型为黑土、黑钙土和草甸土(图4d)。到2020年,由于人类活动强度增加,东北黑土区域草地面积显著增加,其面积来源于耕地(71%)、其他用地(17%)、林地(10%)和湿地(2%),且大部分分布于黑龙江地区(31%)(图3c)。增加的土壤类型主要为暗棕壤(15%)、草甸土(14%)、风沙土(10%)(图4c)。林地面积增加来源于1990年的草地(65%)、耕地(32%)和其他用地(3%)(图3b)。涉及的土壤类型有暗棕壤(41%)、草甸土(14%)、白浆土(4%)、风沙土(3%)、黑土(2%)、黑钙土(1%)(图4b)。1990—2020年长期耕作涉及的主要土壤类型为草甸土、风沙土、白浆土(33%)(图4e)。

表 1 东北地区 1990—2020 年土地利用转移矩阵
Table 1 Land use transition matrix in northeast China from 1990 to 2020

1990—2020 年	草地	耕地	林地	湿地	其他用地	总计
草地	283 245	15 344	3 817	88	5 464	307 959
耕地	20 431	391 001	1 844	189	9 256	422 723
林地	2 984	988	462 696	9	278	466 958
湿地	674	591	27	1 412	249	2 955
其他用地	4 836	2 879	107	71	58 825	66 719
总计	312 170	410 803	468 491	1 778	74 072	1 267 314



注:HLJ、JL、LN、IM分别为黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古;C12为耕地向林地的变化;1~5分别为耕地、林地、草地、湿地、其他土地;C为变化。

图 3 1990—2020 年东北主要土地利用变化来源及分布比例

Fig. 3 Sources and proportional distributions of major land-use changes in northeast China from 1990 to 2020

2.2 土地利用变化和长期耕地的土壤属性

1990—2020 年,研究区所有土地利用类型的 SOC 储量变化强烈,平均减少 0.046 Pg(草地+0.102,林地+0.283,耕地-0.111,湿地-0.007,其他-0.313)(图 5)。耕地 SOC 储量减少源为林地(0.000 5 Pg)、草地(0.002 0 Pg)、湿地(0.000 1 Pg)、其他(0.108 4 Pg)。根据土地覆盖等数据,分析地类变化对 SOC 的影响(表 2)。在耕

地退耕为天然土地(林地、草地、湿地)后的 30 a 内,SOC 在 1~5 a 至 25~30 a 逐渐增加,其中林地在 25~30 a 达到最高值 25.39 g/kg。相反,除湿地外,天然土地开垦的耕地普遍降低 SOC,其中林地和草地开垦的耕地区域对 SOC 影响显著,分别下降 5.79% 和 4.32%。

试验计算 SOC 每 5 a 的变化及其变化率。在耕地退耕区域中,草地的 SOC 变化及变化率最小,湿地

的变化率最高(6.88%),林地次之。可能是由于湿地条件下微生物分解作用受抑制,因此耕地退耕湿地后积累大量的有机物质。值得注意的是,在本研究中,湿地开垦意外地导致 SOC 略微增加。1990—

2020 年,东北地区耕地长期耕作导致 SOC 大量损失。在耕作的初期(1~5 a),SOC 相对较高(21.35 g/kg),但随后因耕作活动加速有机物分解,使得 SOC 逐年下降,在 25~30 a 总共减少 3.84 g/kg。

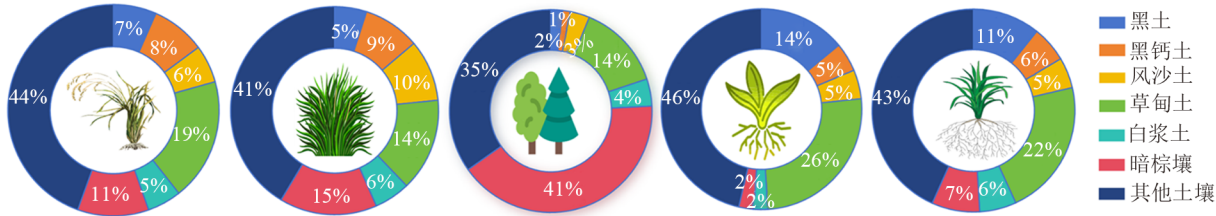


图 4 土地利用变化下的土壤类型比例
Fig. 4 Proportions of soil types under different land-use changes

表 2 不同土地利用变化和长期耕地 SOC
Table 2 SOC content under different land-use changes and long-term cultivation

变化类型	耕地 SOC 质量分数/(g·kg ⁻¹)						每 5 a 变化/ (g·kg ⁻¹)	变化率/%
	1~5 a	5~10 a	10~15 a	15~20 a	20~25 a	25~30 a		
林地(开垦)	22.50	21.01	20.91	21.25	21.69	21.27	-0.25	-5.79
草地(开垦)	21.03	21.13	20.67	20.21	20.14	20.16	-0.17	-4.32
湿地(开垦)	25.03	25.46	25.21	24.32	25.07	25.10	0.01	0.28
林地(退耕)	24.11	24.18	24.18	24.05	24.44	25.39	0.26	5.03
草地(退耕)	18.61	18.53	18.02	17.78	17.51	19.03	0.09	2.25
湿地(退耕)	20.45	20.97	19.76	22.46	22.68	21.96	0.30	6.88
耕地(耕作)	21.35	19.44	20.50	19.16	18.59	17.51	-0.77	-21.91

2.3 土壤类型 SOC 与分布

东北地区土壤侵蚀或长期耕作导致 SOC 的流失。黑钙土、风沙土、草甸土和白浆土的 SOC 均出现下降,其中风沙土变化最大(-14.1%)(表 3)。与此不同,黑土和暗棕壤的 SOC 分别增加 4.61% 和 3.84%,表明黑土和暗棕壤有助于提高 SOC 的积累和具有一定的可持续性。研究区不同土壤类型之间的 SOC(本

底值)有显著差异。低 SOC 风沙土(10.67 g/kg)和高 SOC 黑土(24.95 g/kg)差异达到数倍。暗棕壤是研究区分布最广(292 000 km²)和含量较高(23.64 g/kg)的土壤,维持着该区域的高生产力。但在 1990—2020 年土地利用变化中,草甸土占领主要位置(18.22%),该类土壤分布于冲积平原区域,往往受到成土过程和沉积差异的影响,进而影响到 SOC 与分布。

表 3 不同土壤类型 SOC
Table 3 SOC content of different soil types

土壤类型	土壤 SOC/(g·kg ⁻¹)						变化率/%
	1~5 a	5~10 a	10~15 a	15~20 a	20~25 a	25~30 a	
黑土	23.80	24.01	23.56	22.97	23.51	24.95	4.61
黑钙土	17.95	17.70	16.67	16.42	16.37	17.60	-1.99
风沙土	12.18	11.75	10.79	10.74	10.73	10.67	-14.10
草甸土	21.88	21.74	20.94	20.85	20.85	21.48	-1.84
白浆土	21.58	21.44	20.92	20.23	20.10	20.56	-4.96
暗棕壤	22.73	22.40	21.24	20.70	20.68	23.64	3.84

3 讨论

3.1 东北地区土地利用、土壤类型与 SOC 储量的关系

LUCC 是陆地碳循环的主要因素。然而,土地利用转换引起的植被生物量和土壤固碳变化,使得土地利用在全球陆地生态系统碳储量时空分布和变化机制中变得不明确^[19]。1990—2020 年东北地区由于土地利用变化和长期耕作共同的影响,造成研究区 SOC

总储量减少。耕地和湿地在过去面积减少且含有较多的草甸土,SOC 储量出现微弱下降。虽然研究区有大量的耕地与自然土地转化为草地,但草地 SOC 储量少量增长,是由于在增加草地面积中,草甸土、风沙土、暗棕壤是主要土壤类型(39%)。草甸土 SOC 逐年下降,风沙土的 SOC 本底值(10.67 g/kg)与稳定性(-14.1%)在所选土壤类型中最低(表 3)。相比之下,

在新增加林地的土壤类型中暗棕壤占主要部分(41%),暗棕壤具有较高的本底值(23.64 g/kg)和具有一定的可持续性。因此,使得新林地获得较大的SOC储量上升(0.283 Pg)。在所有土地覆盖类别中湿地的面积最小(295 500 hm²),1990—2020年,湿地的面积经过土地利用变化进一步缩小(177 000 hm²),湿地的碳储量最小(0.009 Pg)(图5)。

农业政策和管理实践的实施提升作物生产力和产量。作物产量数据反映根系碳的投入,从而促进SOC增加^[20]。自19世纪末起,中国政府制定天然林保护计划(NFPP)和坡耕地改造计划(SLCP)2项关键森林可持续发展政策,以应对严重的生态问题。NFPP通过限制伐木和大规模造林来对抗森林砍伐及其导致的土壤侵蚀;SLCP,即“退耕还林”计划,旨在将退化的农业土地转化为森林或草地,从而防止土壤侵蚀^[21]。研究^[22]表明,造林有助于增加SOC,因为造林不仅能防止土壤侵蚀,还能保持土壤水分。这些政策与LUCC密切相关,是东北地区森林和草地面积增加、耕地面积减少的重要因素,从而对该区域的SOC储量产生积极影响。

3.2 土地利用变化对SOC影响

现有的研究^[9]表明,自然土地覆盖的开垦和耕地的长期使用对SOC有负面影响。主要是由于人类活动,特别是为拓展农业用地而进行的自然土地开垦,使得大量SOC释放到大气中。1990—2000年,华北农区草地生态系统向耕地的土地利用转型,共引发30.53 Tg的土壤碳释放^[23]。WANG等^[24]研究发现,耕地的长期使用将导致SOC和密度分别减少3.07 g/kg和6.71 Mg/hm²,SOC储量减少0.32 Pg。试验表明,天然土地林地和草地的开垦使东北区域SOC发生显著变化,SOC分别下降5.79%和4.32%,耕地长期耕作导致SOC和储量分别下降3.84 g/kg和0.341 Pg。在本次试验中湿地开垦使SOC微弱增加(0.069 g/kg),与大部分研究结果相反,很有可能是湿地初始SOC<30 g/kg(23.30 g/kg)和开垦区域主要土壤类型是黑土、草甸土引发的(40%)。通常湿地耕作导致SOC的降低,但在以下情况下,湿地耕作使SOC增加:原始湿地为潮滩或盐渍湿地,初始SOC<30 g/kg^[25]。尽管有研究^[26]报道湿地开垦后有机碳的减少,且农业实践对湿地的碳损失估计可超过89%,但在一些特定条件下(如初始SOC、土壤类型特征等),湿地开垦有时也能导致SOC的增加。例如,中国滨海地区湿地转变为农田的过程中,虽然大部分情况下有机碳显著减少,但在某些区域,SOC储量有所回升^[27]。表明湿地开垦对SOC的影响是多样的,具体效果取决于开垦

前的湿地特性和后续的土地利用方式。在全球范围内,无论是从耕地还是森林转变为草地,都导致SOC的积累;相反的转变则显示出净SOC的损失^[11],与试验的研究结果一致。在耕地退耕为天然土地后的30 a中,SOC从退耕1~5 a增加到25~30 a,而退耕湿地后的SOC变化最明显(6.88%),林地次之。

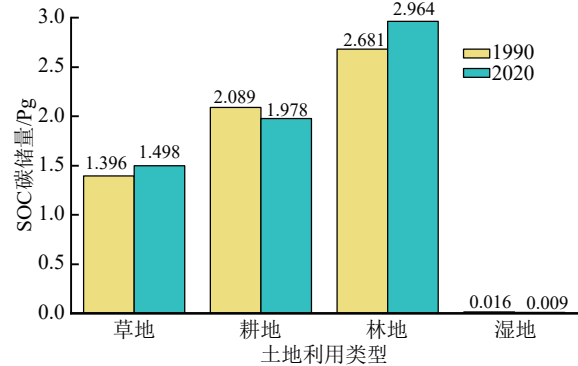


图5 研究区碳储量变化

Fig. 5 Carbon stock changes in study area

3.3 土地利用变化下的SOC源与汇

试验结果表明,研究区1990—2020年处于碳源的状态,土地利用使得1990—2020年SOC减少0.046 Pg(草地+0.102,林地+0.283,耕地-0.111,湿地-0.007,其他-0.313)。其中草地SOC储量从1.396 Pg增至1.498 Pg。林地面积是研究区覆盖面最广的地类,增加5 796 km²,其中4 261 km²转化为其他地类,主要为固碳能力较强的草地(70.04%),且增加区域的主要土壤为暗棕壤(41%),其SOC较高,具有一定持续性(表3)。因此,林地SOC储量增加0.283 Pg,是SOC总储量最高的地类(2.964 Pg)。表明1990—2010年中国政府实施的天然林保护计划(NFPP)和坡耕地改造计划(SLCP)取得显著成功。湿地的SOC储量逐渐下降,降低0.007 Pg。耕地的SOC储量下降严重,减少源为林地(0.000 5 Pg)、草地(0.002 0 Pg)、湿地(0.000 1 Pg)、其他(0.108 4 Pg)。在本次试验中,天然土地开垦为耕地(0.003 2 Pg)和耕地的长期耕作(0.341 Pg)都损失SOC储量。尽管耕地退耕为其他地类微弱的补偿一部分碳储量(0.111 Pg),但结果证明土地利用变化(天然土地开垦耕地)和耕地长期耕作整体上导致大量的碳储量损失。

3.4 土地利用变化对当地环境的影响和未来战略

土壤碳库在生态系统碳循环中起着关键作用,而土地利用变化是影响土壤碳库的最重要驱动力之一^[4]。1990—2020年东北黑土区域0~20 cm的SOC储量由于土地利用变化(天然土地开垦耕地)和耕地的长期耕种损失0.344 2 Pg,耕地退耕为其他地类补偿0.111 Pg。面对中国东北区域的碳流失,应重点加强对黑土和暗棕壤等高本底值土壤的保护。这些土壤类型不仅具有较高的初始碳储量,其

特殊的理化性质更有利于SOC的持续积累;可持续管理森林(减少森林向草原的转变);充分提高农田水分利用效率(增加SOC)来防止土壤碳流失^[28-29]。天然草地与林地转化为耕地后,表层和地下土壤的土壤化学养分、物理结构和微生物活动均发生明显变化,并在一定程度上呈现退化趋势^[30-31]。在未来战略中应该减少天然土地的开垦,继续开展天然林保护计划(NFPP)和坡耕地改造计划(SLCP)以维持森林的碳储量。天然土地在开垦17 a后,通过撂荒性耕作缓慢恢复逐渐恢复到初始水平^[32],因此在天然土地被开垦后政府应该立即采取措施,建立防止养分流失等保护性耕作技术,维持碳储量平衡。在本研究中耕地长期耕作是比土地利用造成的碳储量损失更大,与传统耕作时代相比,机械耕作在保持良好的作物生长环境、增加碳输入和提高耕层深度方面具有更高的效率^[33]。耕作措施、秸秆还田和生态保护工程等人为措施引起的碳输入和分解对SOC的变化具有重要影响^[22]。未来耕地长期耕作的区域应该关注这些焦点。

4 结论

1)1990—2020年,东北黑土区土地利用发生显著变化。耕地和湿地面积总体减少,而林地和草地面积分别增长1 535~4 213 km²。耕地的转化主要流向草地(64%)和其他用地(29%),其中草甸土、暗棕壤和黑钙土是主要的变化土壤类型。湿地减少的区域集中在黑土和草甸土地区,反映出人类活动对湿地生态的压迫。

2)在碳循环方面,结果表明长期耕作和天然土地开垦导致显著的SOC下降。具体来说,SOC和储量分别下降3.84 g/kg和0.341 Pg,其中天然土地开垦(包括林地和草地)导致的SOC损失分别为5.79%和4.32%。尽管新增加的林地(特别是暗棕壤地区)带来部分SOC增益(+0.283 Pg),但整体上,研究区的SOC储量在1990—2020年减少0.046 Pg,表明该地区整体呈现碳源特征。

3)研究表明,土地利用变化对碳储量影响深远,尤其在耕地减少和天然土地开垦的背景下,SOC的损失不可忽视。为应对此挑战,继续实施天然林保护计划(NFPP)和坡耕地改造计划(SLCP)至关重要。通过保护现有森林和改造坡耕地,不仅能恢复森林碳储量,还能减轻天然土地开垦的压力,从而缓解碳排放。

为有效提升SOC储量,建议采取更加积极的土壤管理措施,如机械耕作和秸秆还田等方法,这些措施有助于增加碳输入并防止土壤养分流失。通过科学的土壤管理和合理的土地利用政策,可以有效改善土壤质量,增加碳汇潜力,从而减缓气候变化的影响。本研究为理解土地利用变化在气候变化背景下对SOC动态的影响提供科学依据。

参考文献:

- [1] 王雨雪,杨柯,高秉博,等.基于两点机器学习方法的土壤有机质空间分布预测[J].农业工程学报,2022,38(12):65-73.
WANG Y X, YANG K, GAO B B, et al. Prediction of the spatial distribution of soil organic matter based on two-point machine learning method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (12):65-73.
- [2] 林子奇,王培俊,刘旗,等.2005—2020年淮海经济区耕地碳储量时空演变特征及碳汇区识别[J].农业工程学报,2022,38(19):259-268.
LIN Z Q, WANG P J, LIU Q, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of cultivated land carbon storage and identification of carbon sink areas in Huaihai Economic Zone from 2005 to 2020 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (19):259-268.
- [3] LAL R. Soil health and carbon management [J]. Food and Energy Security, 2016, 5(4):212-222.
- [4] FENG H H, WANG S, ZOU B, et al. Land use and cover change (LUCC) impacts on Earth's eco-environments: Research progress and prospects [J]. Advances in Space Research, 2023, 71(3):1418-1435.
- [5] WINKLER K, FUCHS R, ROUNSEVELL M, et al. Global land use changes are four times greater than previously estimated [J]. Nature Communications, 2021, 12:e2501.
- [6] DON A, SCHUMACHER J, FREIBAUER A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: A meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2011, 17 (4):1658-1670.
- [7] MATHIEU J A, HATTÉ C, BALESSENT J, et al. Deep soil carbon dynamics are driven more by soil type than by climate: A worldwide meta-analysis of radiocarbon profiles [J]. Global Change Biology, 2015, 21(11):4278-4292.
- [8] SONG X D, YANG F, JU B, et al. The influence of the conversion of grassland to cropland on changes in soil organic carbon and total nitrogen stocks in the Songnen Plain of Northeast China [J]. Catena, 2018, 171:588-601.
- [9] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].生态学报,2015,35(17):5898-5907.
MA X Z, WANG Z. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17):5898-5907.
- [10] 史利江,郑丽波,梅雪英,等.上海市不同土地利用方式下的土壤碳氮特征[J].应用生态学报,2010,21(9):2279-2287.
SHI L J, ZHENG L B, MEI X Y, et al. Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen under different land use types in Shanghai [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9):2279-2287.
- [11] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J].水土保持学报,2005,19(1):93-96.
GONG J, CHEN L D, FU B J, et al. Effects of vegetation restoration on soil nutrient in a small catchment in

- hilly loess area[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(1): 93-96.
- [12] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(3): 544-550.
JIANG Y, ZHANG Y G, LIANG W J, et al. Profile distribution and storage of soil organic carbon in an aquic brown soil as affected by land use[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3): 544-550.
- [13] LI W W, JIA S N, HE W, et al. Analysis of the consequences of land-use changes and soil types on organic carbon storage in the Tarim River basin from 2000 to 2020 [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2022, 327: e107824.
- [14] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5358-5371.
CHEN Z, LÜ C H, FAN L, et al. Effects of land use change on soil organic carbon: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5358-5371.
- [15] MENG X T, BAO Y L, LUO C, et al. SOC content of global Mollisols at a 30 m spatial resolution from 1984 to 2021 generated by the novel ML-CNN prediction model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 300: e113911.
- [16] YU L, DU Z R, DONG R M, et al. FROM-GLC Plus: Toward near real-time and multi-resolution land cover mapping[J]. *GIScience and Remote Sensing*, 2022, 59(1): 1026-1047.
- [17] SONG G H, LI L Q, PAN G X, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 74(1): 47-62.
- [18] EDOUARD R A, VAYSSIÈRES J, VERSINI A, et al. 15-year fertilization increased soil organic carbon stock even in systems reputed to be saturated like permanent grassland on andosols[J]. *Geoderma*, 2022, 425: e116025.
- [19] CHANG X Q, XING Y Q, WANG J Q, et al. Effects of land use and cover change (LUCC) on terrestrial carbon stocks in China between 2000 and 2018 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 182: e106333.
- [20] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 612-619.
HAN B, WANG X K, LU F, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 612-619.
- [21] BENNETT M T, XIE C, HOGARTH N J, et al. China's conversion of cropland to forest program for household delivery of ecosystem services: How important is a local implementation regime to survival rate outcomes? [J]. *Forests*, 2014, 5(9): 2345-2376.
- [22] WANG L P, WANG X, WANG D Y, et al. Spatiotemporal changes and driving factors of cultivated soil organic carbon in northern China's typical agro-pastoral ecotone in the last 30 years[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): e3607.
- [23] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 等. 1990—2000年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化[J]. *地理学报*, 2004, 59(4): 483-496.
LIU J Y, WANG S Q, CHEN J M, et al. Storages of soil organic carbon and nitrogen and land use changes in China: 1990—2000 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 483-496.
- [24] WANG X, LI S J, WANG L P, et al. Effects of cropland reclamation on soil organic carbon in China's black soil region over the past 35 years[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(18): 5460-5477.
- [25] XU S Q, LIU X, LI X J, et al. Soil organic carbon changes following wetland cultivation: A global meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2019, 347: 49-58.
- [26] KNOPS J M H, TILMAN D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment[J]. *Ecology*, 2000, 81(1): 88-98.
- [27] TAN L S, GE Z M, LI S H, et al. Impacts of land-use change on carbon dynamics in China's coastal wetlands[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 890: e164206.
- [28] ZHAO X N, HU K L, STAHR K. Simulation of SOC content and storage under different irrigation, fertilization and tillage conditions using EPIC model in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 128-135.
- [29] ZHAO X N, HU K L, LI K J, et al. Effect of optimal irrigation, different fertilization, and reduced tillage on soil organic carbon storage and crop yields in the North China Plain [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176(1): 89-98.
- [30] YU G R, FANG H J, GAO L P, et al. Soil organic carbon budget and fertility variation of black soils in north-east China[J]. *Ecological Research*, 2006, 21(6): 855-867.
- [31] SUN W L, LIU X H. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China [J]. *Forest Ecosystems*, 2020, 7: e4.
- [32] WANG Y, LIU J S, WANG J D, et al. Effects of wetland reclamation on soil nutrient losses and reserves in Sanjiang Plain, northeast China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(3): 512-520.
- [33] HAN D R, WIESMEIER M, CONANT R T, et al. Large soil organic carbon increase due to improved agro-nomic management in the north China Plain from 1980s to 2010s [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 987-1000.