

# 空间分异视角下典型黑土区耕地利用类型变化对土壤有机碳储量的影响

盖兆雪, 姜丹, 白文佳, 王洪彦, 杜国明

(东北农业大学 公共管理与法学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** [目的] 确定耕地利用类型变化对耕地土壤有机碳储量的驱动因素, 探究其空间异质性特征, 为制定提升耕地固碳增汇管理实践提供新视角和新思路。[方法] 以典型黑土区——哈尔滨市为研究区, 采用地理加权回归模型揭示 1999—2019 年研究区耕地利用类型变化和土壤有机碳储量在时空尺度上的动态变化, 并利用重心分析和冷热点分析方法探索耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响的空间分布特征, 在此基础上借助对数平均迪氏分析方法识别研究区耕地利用类型变化对土壤有机碳储量的影响程度。[结果] (1) 1999—2019 年研究区土壤有机碳储量呈下降趋势; (2) 20 年间研究区耕地利用类型变化与土壤有机碳储量的减少主要呈正相关关系, 回归系数为  $-49.2 \sim 14.4$ ; (3) 20 年间研究区耕地利用类型变化对土壤有机碳储量的影响高值区主要分布在北部和南部地区, 且呈缩小趋势, 而低值区主要分布在西部和中部地区, 呈扩大趋势; (4) 20 年间耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响的重心向东北方向迁移, 移动距离为 2.1 km, 可见西南方向土壤有机碳储量减少更明显。(5) 耕地灭失是促进土壤有机碳储量下降的最强效应, 导致土壤有机碳储量损失了  $1.47 \times 10^{10}$  t。[结论] 1999—2019 年黑土区耕地利用类型变化导致土壤有机碳储量流失, 尤其是耕地灭失对土壤有机碳储量造成了极大冲击, 同时土壤有机碳储量变化存在显著的空间异质性和迁移特征, 未来应强化西南地区的土壤保护与碳管理, 优化耕地利用结构。

**关键词:** 土壤有机碳储量; 耕地利用类型变化; 时空分布特征; 影响强度; 黑土区

中图分类号: X144

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0139-11

## Impact of cultivated land use type changes on soil organic carbon storage in a typical black soil region from a spatial differentiation perspective

Gai Zhaoxue, Jiang Dan, Bai Wenjia, Wang Hongyan, Du Guoming

(School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to determine the factors that drive the impact of cultivated land use type changes on soil organic carbon storage (SOCS), explore their spatial heterogeneity, and provide new perspectives and insights for designing management practices to enhance carbon sequestration and sink enhancement in cultivated land. [Methods] Taking Harbin, a typical black soil region, as the research area, this study adopted the geographically weighted regression (GWR) model to reveal the spatiotemporal dynamics of cultivated land use type changes and SOCS (1999—2019). Gravity center analysis and cold and hot spot analysis were used to characterize the spatial distribution of the impact of land use change on SOCS. On that basis, the logarithmic mean Divisia index (LMDI) method was used to quantify the influence degree of cultivated land use type changes on SOCS variations. [Results] (1) SOCS in the study area showed a downward trend (1999—2019). (2) During the 20 years, changes in cultivated land use types were mainly positively correlated with reductions in SOCS, with regression coefficients ranging from  $-49.2$  to  $14.4$ . (3) During the 20 years, high-value areas of the impact of

收稿日期: 2025-07-21

修回日期: 2025-08-11

接受日期: 2025-08-22

资助项目: 黑龙江省哲学社会科学规划项目“农业经营主体行为对黑土区耕地土壤有机碳的影响机制及调控路径研究”(24GLE002)

第一作者: 盖兆雪(1990—), 女, 黑龙江省哈尔滨市人, 讲师, 博士, 主要从事耕地资源利用与保护。E-mail: gaizhaoxue@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

cultivated land use type change on SOCS were mainly distributed in the northern and southern parts of the region and showed a shrinking trend, while the low-value areas were mainly distributed in the western and central parts and showed an expanding trend. (4) During the 20 years, the gravity center of the impact of cultivated land use type changes on SOCS migrated to the northeast, with a moving distance of 2.1 km, indicating more pronounced SOCS loss in the southwest. (5) Cultivated land loss was identified as the dominant factor driving SOCS decline, resulting in a total loss of  $1.47 \times 10^{10}$  t of SOCS. [Conclusion] In 1999—2019, changes in cultivated land use types in the black soil region led to SOC losses, with cultivated land loss causing a substantial shock to SOCS. At the same time, SOCS changes exhibited significant spatial heterogeneity and migration. Future efforts should strengthen soil protection and carbon management in the southwestern areas and optimize the structure of cultivated land use.

**Keywords:** soil organic carbon storage; changes in cultivated land use types; spatiotemporal distribution characteristics; influence degree; black soil region

土壤有机碳作为陆地生态系统最大的碳库以及全球碳循环的关键组分,在维持生态系统平衡与稳定以及调节全球碳循环等方面具有重要意义<sup>[1]</sup>。据统计,全球陆地生态系统碳的总储量约为 2 030~2 538 Pg (1 Pg=1 015 g)<sup>[2]</sup>,其中土壤有机碳库最大,远高于大气和生物碳库的总和<sup>[3]</sup>,因此其微小的变化都会引发大气 CO<sub>2</sub>浓度发生百万分之一的巨大改变,进而加剧全球气候的变化<sup>[4]</sup>。耕地作为重要的固碳单元,其土壤碳库不仅是全球碳库的重要组成部分<sup>[5]</sup>,也是整个土壤碳库中最活跃的部分,是唯一能在较短时间尺度上被自然和人为因素调节和干扰的碳库<sup>[6]</sup>。然而,近年来随着人类活动对耕地资源利用程度的不断加深,耕地利用类型变化显著,不仅对土壤的肥力及作物生产力产生影响<sup>[7]</sup>,而且改变了土壤有机质的输入和分布状况<sup>[8]</sup>,最终导致土壤有机碳储量(Soil Organic Carbon Storage, SOCS)发生变化。《东北黑土地白皮书(2019)》及相关研究表明,近60年东北黑土耕作层土壤有机碳含量整体下降了1/3,部分地区降幅达50%,严重威胁着我国的粮食安全和生态环境<sup>[9]</sup>,致使全球气候变暖恶化。因此,基于耕地利用类型变化视角开展SOCS空间异质性研究对于优化区域耕地资源结构和调节全球气候变化有着重要意义。

近年来,国内外学者围绕土地利用变化对SOCS影响开展了大量系统性研究,并在研究方法的创新与多尺度融合方面取得显著进展,由此形成了宏观—中观—微观多维度的尺度框架。从宏观尺度来看,主要围绕机器学习方法以及各类模型模拟方法来研究SOCS和土地利用变化等影响因子的贡献关系<sup>[10]</sup>,其中机器学习法能够实现大尺度土壤有机碳储量测算,具有较强的非线性建模能力和数据适应能力,但预测结果存在一定的不确定性,模型精度有待进一步提升;模型模拟方法主要以经验模型<sup>[11]</sup>和

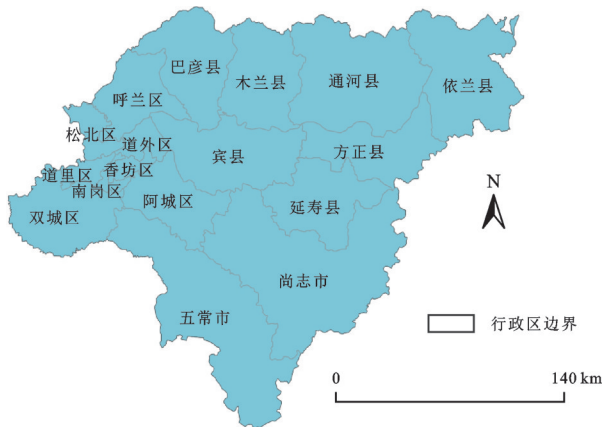
过程模型(RothC模型<sup>[12]</sup>、DNDC模型<sup>[13]</sup>)为主,经验模型主要依据广泛的气候、土壤和管理等数据来对土壤有机碳进行模拟预测,适合国家尺度土壤有机碳储量的评估,过程模型的关键在于模型的验证和校准,能够较为准确地模拟土壤有机碳在不同管理情境和自然条件下的时空变化;就中观尺度而言,主要以土壤剖面采样数据为主,采用区域定点试验测定方法来揭示土地利用类型变化或土地利用转型对SOCS的影响<sup>[14-15]</sup>,该方法可较为准确地测算土壤有机碳储量,但耗时费力,其中基于重铬酸钾容量测定法因其简单快捷、经济实用被学者广泛使用,但结果可能受校正系数影响;在微观尺度研究中,学者们主要采用试验测定方法研究土壤有机碳组分动态变化<sup>[16]</sup>。另外,已有研究主要聚焦于耕地利用变化对SOCS在短期—中期时间尺度上的影响<sup>[17]</sup>,且相关研究中耕地利用类型划分方式相对单一,常集中于“耕地—林地”“草地—耕地”等地类的转换,同时影响机制分析多以SOCS在变化前后的数量对比为主<sup>[18]</sup>。

纵观已有文献可知:①耕地利用类型变化对SOCS的影响研究缺乏空间异质性分析,且长时间序列的研究较少。②缺乏耕地利用类型多角度划分对SOCS时空异质性的影响。③从空间尺度上深入揭示二者的影响程度研究有待加强,尤其缺乏运用系统的计量分析方法定量识别二者作用强度。④以黑土区为研究区揭示耕地利用类型变化对SOCS影响的时空异质性研究鲜有涉及。本文以典型黑土区为研究对象,选取1999年、2009年和2019年3期土地利用数据和SOCS数据,借助地理加权回归、重心分析以及冷热点分析方法揭示耕地利用类型变化对SOCS影响的时空变化特征,并运用对数平均迪氏法剖析耕地利用类型变化对SOCS的作用程度,以为黑土区低碳农业和固碳减排政策的制定提供科学支持。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

哈尔滨市作为东北地区主要中心城市,是我国粮食重要生产基地,处于 $125^{\circ}42'—130^{\circ}10'E$ , $44^{\circ}04'—46^{\circ}40'N$ ,市辖9个市辖区、7个县,代管2个县级市(图1)。地处中温带大陆性季风气候区,季节性特征明显,年均气温约为 $4.6^{\circ}C$ ,年均降水量约 $582.9\text{ mm}$ ,地区总体地势较为平坦,中心城区地势低平,东部县(市)以山地和丘陵为主。据统计,2019年研究区土地面积为 $5.31\text{ 万 km}^2$ ,其中耕地面积较大,为 $23\ 497.77\text{ km}^2$ ,占全部土地类型的 $44.25\%$ ;研究区土壤类型以黑土和褐土为主,土壤有机质含量丰富,其中2019年土壤有机碳储量为 $2.11\times 10^9\text{ t}$ 。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

## 1.2 数据来源及处理

土地利用数据来源于1999年、2009年、2019年3期Landsat TM/OLI遥感影像数据,空间分辨率均为 $30\text{ m}$ 。选取月份区间为6—9月云覆盖率小于 $10\%$ 的遥感影像。通过几何纠正、图像增强等预处理,进行监督分类、人工目视解译及野外调查,确定研究区土地利用类型,并采用二级分类体系,同时对分类结果进行精度检验(Kappa系数均超过 $0.91$ )。为与土壤有机碳数据进行空间匹配,采用最近邻法对土地利用分类结果进行重采样至 $1\text{ km}$ ,最大限度保持原始数据的一致性,分类精度达到 $95\%$ ,满足研究需求,构建哈尔滨市土地利用数据库。1999年、2009年、2019年土壤有机碳密度数据均来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)的全球 $1\text{ km}$ 表层土壤有机碳库产品( $0—30\text{ cm}$ ),将模拟值与研究区实测值的精度对比,得出 $R^2$ 在 $0.63—0.75$ , $RRMSE=27\%$ , $MRE=26\%<30\%$ (临

界值),可见虽然模型对土壤有机碳密度值的预测存在一定误差,但模拟值与实测值间具有较好的线性相关关系,模拟效果良好;本研究选取 $0—30\text{ cm}$ 的土层深度进行研究,主要是由于 $0—30\text{ cm}$ 土层是土壤最活跃的有机碳储存和转换层,因此选取该深度范围有助于准确评估土壤有机碳的时空变化特征及其对耕地利用变化的响应。本研究所有数据均采用统一的地理坐标系统GCS\_WGS\_1984,地理坐标基准D\_WGS\_1984,投影坐标系统WGS\_1984\_World\_Mercator。

## 1.3 研究方法

1.3.1 耕地利用类型变化划分 耕地利用类型变化为扩张、存续、类型转换和灭失4类基本过程,其中耕地扩张由旱地新增(非耕地转为旱地)和水田新增(非耕地转为水田)构成;耕地存续是指研究期内未发生变化的类型区;耕地类型转换包括旱地转为水田和水田转为旱地,耕地灭失分为旱地灭失(旱地转为非耕地)和水田灭失(水田转为非耕地)2类,以上构成完整的耕地利用类型变化系统过程<sup>[19]</sup>。

1.3.2 土壤有机碳储量估算 土壤有机碳储量(SOCS)是指区域范围内某一土层中所包含的土壤有机碳的总量,可由土层中各层土壤有机碳密度与其面积的乘积之和求得。计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$SOCS = S_i \times SOCD \quad (1)$$

式中: $S_i$ 为某一土地利用类型面积( $\text{m}^2$ ); $SOCD$ 为某一土地利用类型土壤在 $0.3\text{ m}$ 土层深度的土壤有机碳密度( $\text{kg}/\text{m}^2$ )。

1.3.3 地理加权回归分析 以研究区SOCS变化为研究对象,选取耕地利用类型变化作为影响因素,采用地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)模型,揭示耕地利用类型变化与SOCS变化的空间关联<sup>[21]</sup>,分析耕地利用类型变化对SOCS影响时空尺度上的动态变化,揭示其在不同地理位置上的作用强度和方向差异,其模型结构为:

$$y = \beta_0(u_i + v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \epsilon_i \quad (2)$$

式中: $y_i$ 为有机碳储量变化; $x_{ik}$ 为第 $i$ 个区域的第 $k$ 个影响因素; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为影响因素 $k$ 在回归点 $i$ 的回归系数; $(u_i, v_i)$ 为第 $i$ 个观察点的空间位置; $\epsilon$ 为 $n \times 1$ 维向量。

1.3.4 对数平均迪氏法 本文采用对数平均迪氏法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)探究耕地扩张,类型转换、存续以及灭失4种类型变化对SOCS的影响贡献,定量识别各类耕地利用调整在不同阶段对SOCS增减的驱动作用<sup>[22]</sup>。该方法可以避免线性假设带来的偏差,且支持动态演化研究,并能够准确量化单位耕地类型面积变化对SOCS的影响,便于政策和管理措施的针对性制定,同时能较好地

避免零值和负值带来的计算问题,使得分析过程更加稳定和可靠。当分解效应为正值时,表征该分量的变化对土壤有机碳总量下降具有促进作用,反之亦然。基于对数平均迪氏分解(LMDI)方法,在区域和空间格网尺度下评估耕地面积变化对土壤有机碳总储量变化的影响。表达式如下:

$$\Delta\text{SOC} = \Delta\text{SOC}_{\text{耕地扩张}} + \Delta\text{SOC}_{\text{耕地类型转换}} + \Delta\text{SOC}_{\text{耕地存续}} + \Delta\text{SOC}_{\text{耕地灭失}} \quad (3)$$

$$\Delta\text{SOC}_{\text{耕地扩张}} = \frac{\text{SOC}_{2019} - \text{SOC}_{1999}}{\ln \frac{\text{SOC}_{2019}}{\text{SOC}_{1999}}} \times \ln \frac{\text{SOC}_{\text{耕地扩张}2019}}{\text{SOC}_{\text{耕地扩张}1999}} \quad (4)$$

$$\Delta\text{SOC}_{\text{类型转换}} = \frac{\text{SOC}_{2019} - \text{SOC}_{1999}}{\ln \frac{\text{SOC}_{2019}}{\text{SOC}_{1999}}} \times \ln \frac{\text{SOC}_{\text{类型转换}2019}}{\text{SOC}_{\text{类型转换}1999}} \quad (5)$$

$$\Delta\text{SOC}_{\text{耕地灭失}} = \frac{\text{SOC}_{2019} - \text{SOC}_{1999}}{\ln \frac{\text{SOC}_{2019}}{\text{SOC}_{1999}}} \times \ln \frac{\text{SOC}_{\text{耕地灭失}2019}}{\text{SOC}_{\text{耕地灭失}1999}} \quad (6)$$

$$\Delta\text{SOC}_{\text{耕地存续}} = \frac{\text{SOC}_{2019} - \text{SOC}_{1999}}{\ln \frac{\text{SOC}_{2019}}{\text{SOC}_{1999}}} \times \ln \frac{\text{SOC}_{\text{耕地存续}2019}}{\text{SOC}_{\text{耕地存续}1999}} \quad (7)$$

式中: $\Delta\text{SOC}$ 为区域农田SOCS的总变化量(kg); $\Delta\text{SOC}_{\text{耕地扩张}}$ 为相应单元内耕地扩张在研究时段SOCS的变化(kg); $\Delta\text{SOC}_{\text{类型转换}}$ 为相应单元内耕地类型转换在研究时段SOCS的变化(kg); $\Delta\text{SOC}_{\text{耕地灭失}}$ 为相应单元内耕地灭失在研究时段SOCS的变化(kg); $\Delta\text{SOC}_{\text{耕地存续}}$ 为相应单元内耕地存续在研究时段SOCS的变化(kg)。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕地利用类型变化特征

1999—2019年研究区耕地面积总体呈下降趋势,从1999年的23 650.93 km<sup>2</sup>下降至2019年的23 497.77 km<sup>2</sup>,共减少153.16 km<sup>2</sup>,年均减少7.66 km<sup>2</sup>。从耕地利用类型变化过程来看(表1),耕地灭失类型面积变化最为显著,共减少963.46 km<sup>2</sup>,其中旱地灭失的面积为723.36 km<sup>2</sup>,占总灭失面积的75.1%,主要转变为建设用地和草地,水田灭失的数量为240.11 km<sup>2</sup>,主要转为未利用地和建设用地;耕地扩张类型次之,扩张810.3 km<sup>2</sup>,其中旱地扩张542.48 km<sup>2</sup>,主要扩张来源于建设用地,水田扩张267.82 km<sup>2</sup>;面积变化最小的则是耕地类型的转换,为727.98 km<sup>2</sup>,其中旱地转水田和水田转旱地的面积分别为346.78 km<sup>2</sup>,381.2 km<sup>2</sup>。

表1 研究区耕地利用变化类型转换面积

类型	1999—2009年	2009—2019年	1999—2019年	
耕地扩张	旱地扩张	2269.57	1847.94	542.48
	水田扩张	553.11	652.97	267.82
耕地灭失	旱地灭失	2063.30	2257.83	723.36
	水田灭失	600.18	555.29	240.11
耕地类型转换	旱地—水田	842.98	1325.82	346.78
	水田—旱地	1498.10	727.77	381.20
耕地存续	旱地—旱地	15101.02	15284.57	16936.42
	水田—水田	3546.31	3658.97	5023.07

### 2.2 基于耕地利用类型变化的土壤有机碳储量演化特征

本研究在分析耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响时,考虑耕地存续类型,以确保系统过程的完整性。尽管进行了相关计算,但由于未纳入气候变化及人为干扰等关键因子,耕地存续对土壤有机碳储量的影响尚未进行系统而深入的分析。为系统揭示不同时期耕地利用类型变化对SOCS的影响,本研究时段划分为两个相邻阶段(1999—2009年和2009—2019年)及一个全周期阶段(1999—2019年),分别进行独立分析,该处理方式能够增强时序变化研究的系统性与可比性,有助于识别不同时期耕地利用类型变化对SOCS的阶段性响应规律(表2)。

表2 基于耕地利用类型变化的SOCS变化特征

类型	1999—2009年	2009—2019年	1999—2019年	
耕地扩张	旱地扩张	18.14	11.07	8.75
	水田扩张	6.39	5.15	7.47
耕地灭失	旱地灭失	-23.26	-23.65	-26.45
	水田灭失	-0.43	-0.88	-1.76
耕地类型转换	旱地—水田	4.18	3.03	2.30
	水田—旱地	-5.47	-5.12	-5.68
耕地存续	旱地—旱地	-0.45	-1.50	-1.95
	水田—水田	-0.58	-0.17	-0.75

1999—2009年、2009—2019年研究区基于耕地利用类型变化的SOCS变化量分别为1.48亿t, 1.21×10<sup>9</sup>t, 后一阶段比前一阶段SOCS下降显著,而全周期阶段SOCS变化量达到1.81×10<sup>9</sup>t,可见研究区基于耕地利用类型变化的SOCS呈明显下降态势。1999—2019年耕地扩张类型的SOCS变化量为1.62×10<sup>9</sup>t,其中旱地扩张类型与水田扩张类型的SOCS分别增加8.75亿t,7.47亿t;1999—2019年水田

和旱地的相互转换致使SOCS发生流失现象,共流失3.38亿t,其中旱地转水田SOCS呈增加趋势,增加2.3亿t,水田转旱地SOCS则呈下降趋势,下降5.68亿t;1999—2019年因耕地灭失流失的SOCS共 $2.82 \times 10^9$ t,其中因旱地灭失而流失的SOCS高达 $2.65 \times 10^9$ t,因水田灭失而流失的SOCS仅为1.76亿t。

### 2.3 耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响的空间异质性

2.3.1 地理加权回归分析 运用普通最小二乘法模型(Ordinary Least Squares,OLS)检验研究区耕地利用类型变化在统计学意义上是否对SOCS具有全局影响,结果表明,Koener大于700, $p < 0.01$ ,适合进行地理加权回归分析。1999—2009年耕地变化面积因子OLS残差在 $-3.35 \sim 5.35$ ,地理加权回归(GWR)残差在 $-3.31 \sim 4.93$ ;2009—2019年耕地变化面积因子OLS残差在 $-3.75 \sim 3.72$ ,地理加权回归(GWR)残差在 $-3.69 \sim 2.81$ ;1999—2019年耕地变化面积因子OLS残差在 $-4.87 \sim 6.58$ ,地理加权回归(GWR)残差在 $-3.72 \sim 5.69$ ,说明GWR模型拟合效果优于OLS模型(图2和图3)。

1999—2019年研究区耕地利用类型变化与SOCS减少主要呈正相关关系,回归系数在 $0 \sim 14.4$ ,以带状和块状形式交替分布,主要集中在研究区的中西部地区,部分地区二者呈负相关关系,回归系数主要集中在 $-26.9 \sim -15.3$ 和 $-6.8 \sim 0.0$ ,以散点的形式分布在研究区内。1999—2009年呈正相关的回归系数主要在 $0 \sim 8.1$ ,主要呈小块状及散点状的分布形式,呈负相关的回归系数分布区间为 $-20 \sim 0.0$ ,除最高值零星分布在研究区各处外,其余系数主要集中在 $-8.8 \sim 4.1$ 的区间范围内,分布在中西部地区;2009—2019年呈正相关关系的回归系数多集中在 $0.0 \sim 6.5$ ,主要以片状的形式分布在研究区的西部,以双城区、呼兰区和巴彦县最具代表性,北部和中部地区也多有涉及,呈负相关关系的回归系数主要分布区间为 $-5.3 \sim 0$ ,多以小块状和短带状的形式存在于研究区各处,此外,最高值的区间范围为 $-13.7 \sim -5.3$ ,以散点的形式零星分布在研究区中部和北部地区。前一阶段与后一阶段相比,相关系数高值分布较广,说明1999—2009年耕地利用类型变化对SOCS影响程度的空间差异性更为显著(图4)。

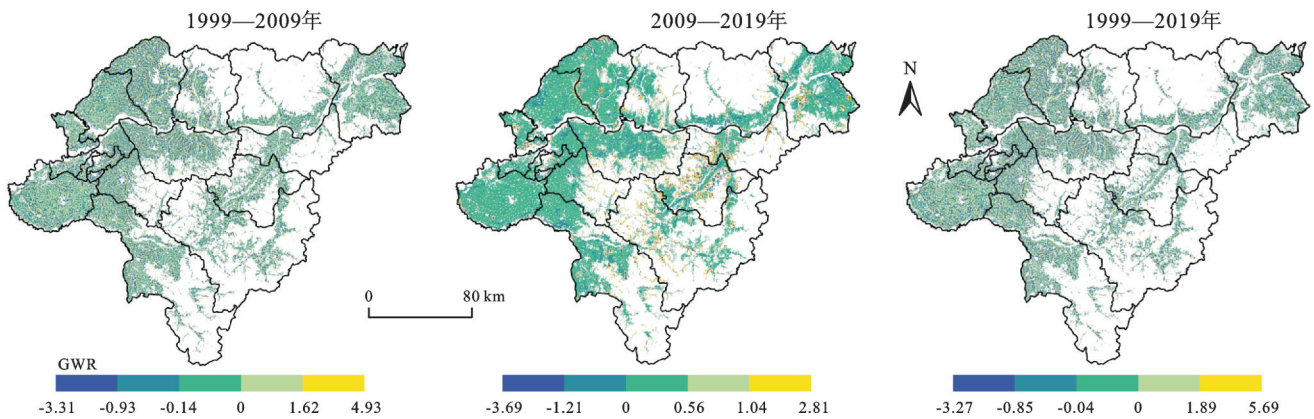


图2 耕地利用类型变化与土壤有机碳储量变化GWR残差

Fig. 2 GWR residuals of changes in cultivated land use type and SOCS

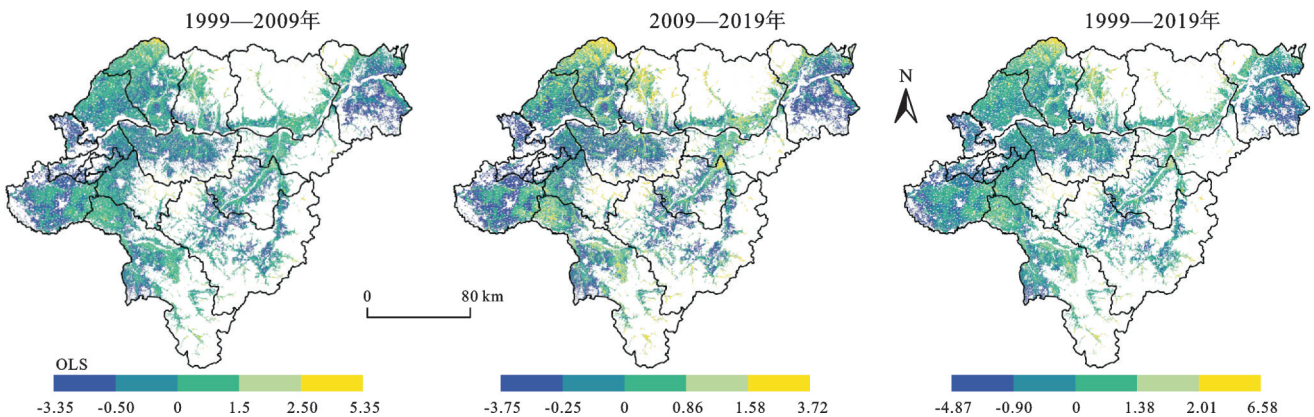


图3 耕地利用类型变化与土壤有机碳储量变化OLS残差

Fig. 3 OLS residuals of changes in cultivated land use type and SOCS

2.3.2 耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响的重心分析 利用ArcGIS 10.8.1的重心分析模型探究

耕地利用类型变化与土壤有机碳储量的空间聚集中心及其迁移轨迹(图5)。1999—2019年研究区耕地及其

SOCS重心位置基本保持稳定,均在宾县地域内移动,分别分布在(127°37'59"—127°39'57"E,45°43'24"—45°43'45"N)和(127°38'18"—127°39'21"E,45°43'42"—45°44'74"N),变化程度较为平缓。1999—2019年耕地重心向东北方向迁移,迁移距离为2.27 km,经历“东北—西南”的迁移过程,其所对应的SOCS重心同样向东北方向迁移,迁移距离为2.1

km,经历“东北—东南”的迁移过程,二者迁移重心均位于“三宝乡”区域。其中,1999—2019年水田SOCS重心向东南方向迁移,迁移距离为2.27 km,经历“东南—西北”的迁移过程,迁移重心位于“宁远镇”区域;旱地SOCS重心向东北方向迁移,迁移距离为2.96 km,经历“东北—西南”方向的迁移过程,迁移轨迹为“宾州镇—经建乡—宾州镇”。

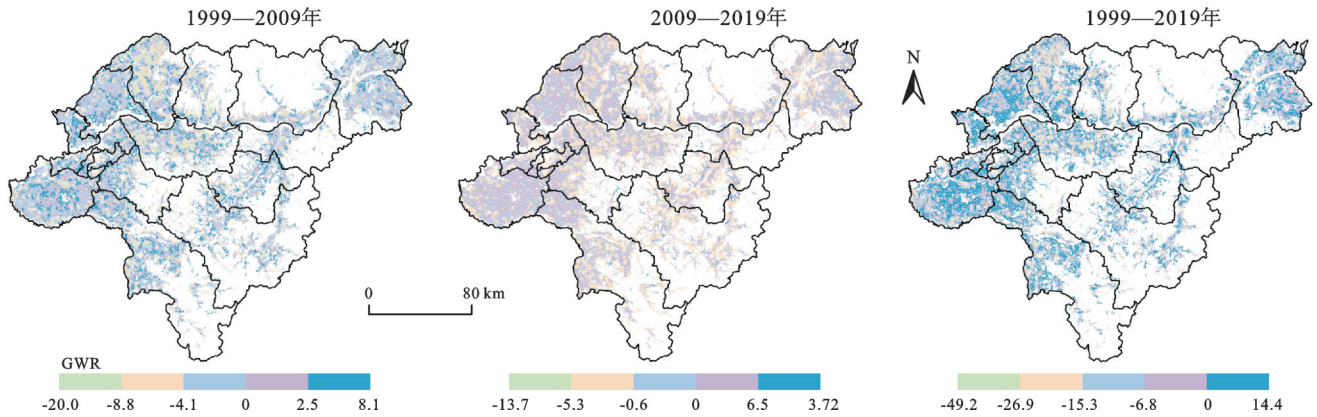


图 4 耕地利用类型变化与土壤有机碳储量变化 GWR 系数

Fig. 4 GWR coefficients of changes in cultivated land use type and SOCS

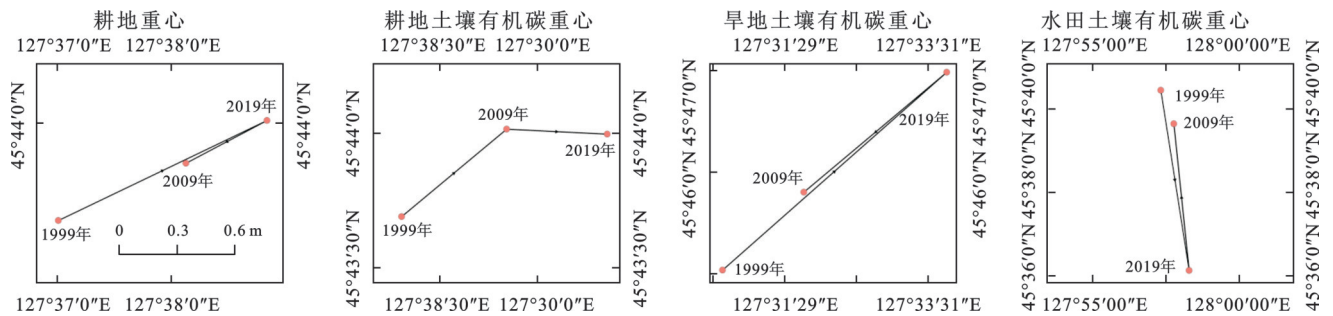


图 5 研究区土壤有机碳储量重心转移轨迹

Fig. 5 Gravity center migration trajectories of SOCS in study area

2.3.3 耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响的冷热点分析 利用 ArcGIS 10.8.1 中的冷热点分析方法进一步探究研究区耕地利用类型变化对 SOCS 下降影响的集聚特征(图 6)。

对于热点区而言,研究区 1999—2019 年、1999—2009 年和 2009—2019 年的耕地 SOCS 变化均呈片状和带状分布格局,其中片状热点区主要集聚在研究区的北部和南部地区,如双城区、巴彦县、呼兰区以及双城区等地,带状热点区贯穿于研究区的依兰县、通河县、方正县以及延寿县等东部地区,但由于各时期的耕地利用类型变化程度有所差异,因而其热点范围也有所不同。相较于其他时期,1999—2009 年热点区范围更大,呈现出向东南部扩散态势,如尚志市等地的土壤有机碳变化值均显著高于周围区域的空间聚集区;冷点区呈片状分布格局,地区分布较为集中,主要分布在研究区西部地区以及部分中部地区,如双城区、宾县、道外区、道里区、香坊区、松北

区、延寿县以及依兰县等地,这些地区的 SOCS 变化值显著低于周围区域的空间聚集区,相较于 1999—2009 年 2009—2019 年冷点区范围逐渐替代次冷点区域范围,呈扩大趋势。

2.4 耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响程度时空差异性分析

2.4.1 耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响程度的时间差异性分析 1999—2019 年耕地灭失效应和耕地类型转换效应对 SOCS 下降产生促进作用;而耕地扩张效应则对 SOCS 下降产生抑制作用(表 3)。1999—2009 年、2009—2019 年以及 1999—2019 年耕地扩张对 SOCS 下降的贡献值分别为  $-4.05 \times 10^9$  t,  $-8.46 \times 10^9$  t 和  $-8.55 \times 10^9$  t, 整体均表现为抑制作用且水田扩张的抑制作用强于旱地扩张的作用。在促进因素中,耕地灭失效应和耕地类型转换效应均存在双向驱动现象,但总体而言耕地灭失效应为效果最强的促进因素。1999—2009, 2009—2019 以及

1999—2019年耕地灭失的贡献值分别为 $2.49 \times 10^9$  t,  $1.23 \times 10^{10}$  t和 $1.47 \times 10^{10}$  t,高于耕地类型转换效应的贡献值。在具体的变化过程中,耕地转林地、耕地转草地以及耕地转水域均为抑制作用,且1999—2009年耕地转林地的贡献值最大,主要是由于1999—

2009年耕地转林地的面积远高于其他时期的转换面积,促进因素中1999—2019年耕地转为建设用地类型的贡献值最大;在耕地类型转换进程中,旱地转水田类型对SOCS的下降产生抑制作用,水田转旱地则呈促进作用,且促进作用强于抑制作用。

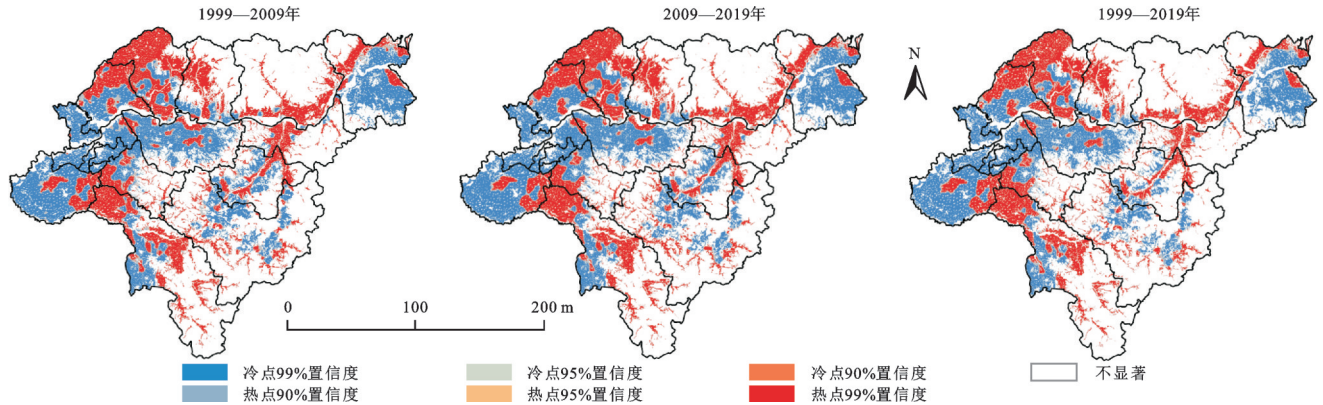


图6 研究区土壤有机碳储量变化热点分析

Fig. 6 Hot spot analysis of changes in SOCS in study area

表3 研究区耕地利用类型变化对SOCS影响的贡献值

Table 3 Contribution values of cultivated land use type changes to SOCS in study area  $10^9$  t

类型		1999—2009年	2009—2019年	1999—2019年
耕地扩张	旱地扩张	-0.51	-6.18	-6.35
	水田扩张	-3.54	-2.28	-2.20
耕地灭失	旱地灭失	0.21	8.56	9.47
	水田灭失	2.28	3.77	5.22
耕地类型转换	旱地—水田	-0.88	-0.70	-0.51
	水田—旱地	1.22	1.04	1.17
耕地存续	旱地—旱地	0.06	0.21	0.27
	水田—水田	0.22	0.06	0.26

2.4.2 耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响的空间差异性分析 耕地扩张、耕地灭失以及耕地类型转换效应在影响研究区SOCS变化过程中所表现的作用存在着明显的空间差异(图7和图8)。在耕地扩张效应中,1999—2019年研究区林地转耕地对SOCS下降的促进效应最强,其中1999—2009年主要分布于中部地区,方正县、延寿县和尚志市最为突出,而2009—2019年较上一阶段分布更为广泛,多集中在依兰县、方正县、尚志市等中部和东部地区;对于SOCS下降的抑制因素,1999—2009年建设用地转耕地的贡献值最大,主要分布于北部和西部地区,如依兰县、通河县和巴彦县等地。在耕地灭失效应中,耕地转林地、草地、水域、未利用地均表现为抑制作用,1999—2009年耕地转林地主要呈“散点式”分布特征,其中东部地区抑制作用强于西部地区;2009—2019年耕地转水域、草地表现最为突出,其分布特征

以“散点式”为主;对促进因素而言,1999—2019年研究区SOCS下降的促进效应为耕地转建设用地,其中1999—2009年西部地区的促进作用明显强于东部地区,以“散点”或“短带”状分布特征为主;2009—2019年较上一阶段空间分布较为集中,主要分布在中部地区,其中延寿县的促进作用最为强烈。在耕地类型转换效应中,1999—2019年空间上呈现出明显的差异特征,其中1999—2009年旱地转水田的抑制效应呈带状分布特征,主要分布在延寿县、五常市和尚志市等东南部地带,与之相反,水田转旱地的促进效应主要分布在中部和北部地区,集中分布在宾县和依兰县等地;而2009—2019年旱地转水田向西北移动,水田转旱地则向南扩张。

### 3 讨论

#### 3.1 耕地利用类型变化与土壤有机碳储量的关系

耕地利用类型变化会对SOCS造成不同程度的影响。本研究表明1999—2019年研究区耕地利用类型变化导致SOCS呈下降趋势,减少幅度为 $1.81 \times 10^9$  t,这一结果与张廷<sup>[23]</sup>、盖兆雪<sup>[24]</sup>等的研究结果保持一致,表明耕地利用类型变化会加剧土壤的扰动,削弱土壤的碳汇功能,从而使得区域土壤有机碳储量显著下降。在耕地利用类型变化过程中,耕地灭失导致土壤有机碳储量下降最为显著,累计流失 $2.82 \times 10^9$  t,主要归因于大规模耕地转为建设用地导致原有土壤表层结构破坏,植被覆盖度下降,降低土壤的碳固存能力,最终致使土壤有机碳储量大量流失。这一趋势也与田多松<sup>[25]</sup>、揣小伟<sup>[26]</sup>等的研究结果高度吻合,进一步印证在城市化进程加速推进的背

景下,耕地转建设用地对土壤碳储量产生负向影响。另外,本研究为提升模型分析的适配性与结果的可解释性,采用最近邻法对土地利用数据进行重采样至 1 km,并将其与元数据的分类精度进行对比,精度达到 95%,但土地利用数据的精度降低,可能在一定程度上影响土地利用类型的边界精度和分类结果,从而影响 SOCS 的变化值;同时 SOC 数据来源于前人基于 RothC 模型的模拟结果,该模型适合大尺度土

壤有机碳的模拟,结果可靠性较高,在此基础上,本研究将模拟数据与研究区实测数据进行拟合,得出  $R^2$  为 0.63~0.75,  $RRMSE=27\%$ ,  $MRE=26\% < 30\%$  (临界值),说明模拟值和实测值之间的拟合效果好,数据具有一定的可靠性,但由于未实地进行每一个地块的 SOCS 的试验测定,因此可能导致 SOCS 值偏高,存在一定的误差,因此未来研究中将进一步优化数据处理方法以降低此类不确定性。

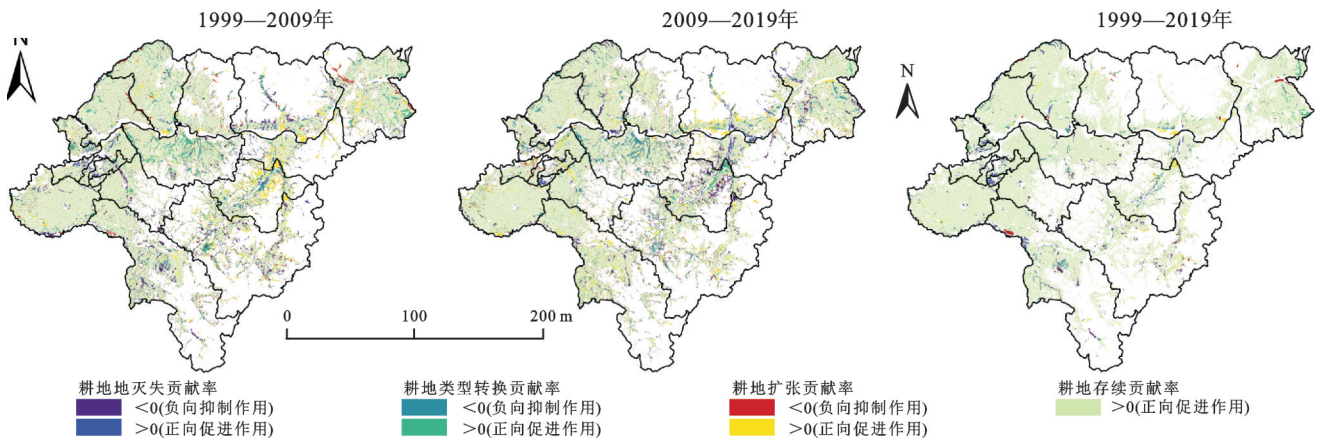


图 7 研究区耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响程度的空间分布特征

Fig. 7 Spatial distribution characteristics of influence degree of cultivated land use type changes on SOCS in study area

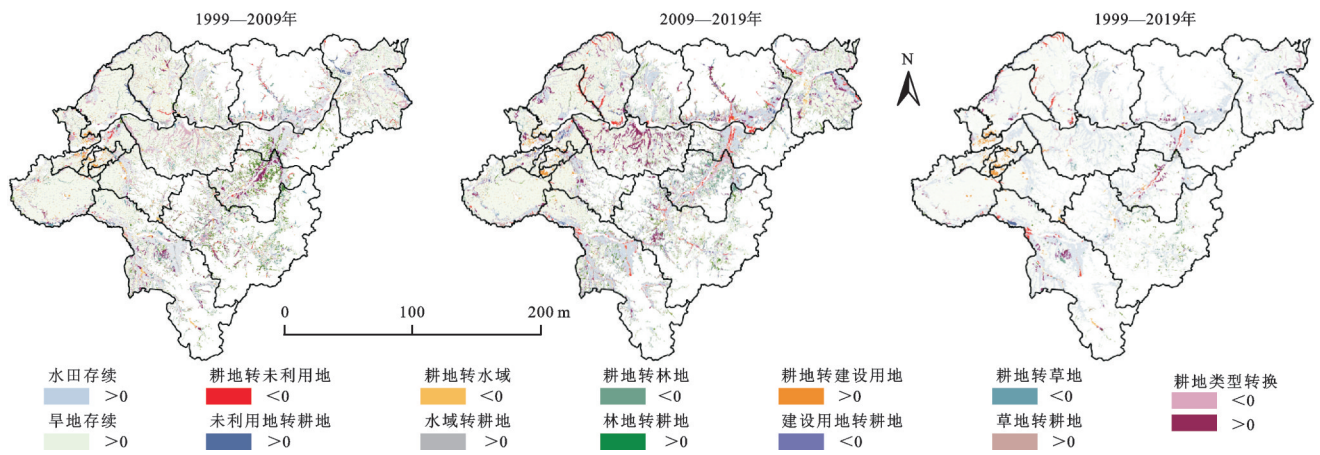


图 8 研究区不同变化类型对土壤有机碳储量影响程度的空间分布特征

Fig. 8 Spatial distribution characteristics of influence degree of different conversion types on SOCS in study area

### 3.2 耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响的空间异质性

本研究以长时间序列的 SOCS 为研究对象,利用地理加权回归模型对其变化的时空异质性进行研究,不仅弥补了样点试验小尺度研究的弊端,而且从空间上更进一步解释二者的相关关系。与传统的 OLS 回归模型以及空间误差模型相比,该模型不仅能够像元尺度上识别耕地利用类型变化与 SOCS 关系的空间非平稳性,而且能够输出每个解释变量在不同空间位置的局部回归系数,从而更为深入地揭示区域内部影响机制的差异性与空间分布特征,尤其适用于耕地类型转换等具有明显地理差异的土

地利用过程的研究。

本研究通过引入地理加权回归模型来对耕地利用类型变化和 SOCS 的相关关系进行分析,发现 1999—2019 年研究区耕地利用类型变化与 SOCS 的下降回归系数在  $-49.2 \sim 14.4$ ,可见二者存在显著相关性,该结果与高建峰等<sup>[27]</sup>通过传统一般线性模型证明不同土地利用类型变化对 SOCS 变化有着显著影响的结论相一致。与之相比,本研究从空间维度揭示耕地利用类型变化影响 SOCS 的区域性规律,验证相关结论的科学性与适用性。其中 1999—2009 年、2009—2019 年的回归系数分别为  $-20 \sim 8.1$ ,  $-13.7 \sim 3.72$ ,说明 1999—2009 年耕地利用类型变化对 SOCS

的影响较2009—2019年显著增强。

1999—2019年研究区耕地及早地SOCS重心总体均向东北方向迁移,说明研究区西南地区的SOCS损失明显,归因于研究区西南地区耕地灭失严峻,从而加剧SOCS的流失;1999—2019年研究区耕地利用类型变化对土壤有机碳储量下降的影响高值区主要分布在北部和南部地区,且呈缩小趋势,原因是1999—2019年研究区巴彦县、五常市等呈高值的北部和南部地区建设用地扩张较为频繁;而低值区主要分布在西部和中部地区,呈扩大趋势。

### 3.3 耕地利用类型变化对土壤有机碳储量影响程度时空差异性分析

现有的研究表明,耕地利用类型转化对SOCS的变化产生剧烈影响,如Wang等<sup>[28]</sup>研究发现,1985—2020年东北地区耕地的长期使用对SOCS产生负向影响,土壤有机碳密度和储量分别减少6.71 MgC/hm<sup>2</sup>和0.32 Pg;Bonfanti等<sup>[29]</sup>也在研究中尤其强调林地转农田以及退耕还林等类型变化对SOCS变化影响显著,并指出林地转耕地SOCS呈下降趋势、建设用地转耕地SOCS则呈上升趋势,但并未具体剖析二者空间异质关系。因此本研究在前人研究的基础上,进一步细化耕地类型划分,更加全面地揭示耕地利用类型变化对研究区SOCS时空变化特征的影响;同时,借助对数平均迪氏指数法,深入分析耕地利用类型变化过程中各驱动因素对SOCS变化的影响程度。

从时间维度来看,在正相关关系方面,1999—2019年研究区内耕地灭失类型引发的SOCS减少最为显著,共计减少 $2.82 \times 10^9$  t,贡献值为 $1.47 \times 10^{10}$  t,远高于其他3种类型,其中耕地转为建设用地的促进作用最大,主要原因是1999—2019年耕地灭失中耕地转为建设用地的变化面积最大;对负相关关系而言,耕地扩张是唯一对SOCS下降产生抑制效应的类型,具体而言,林地转耕地对SOCS下降呈促进作用且贡献值最大,因此研究区应加强林地防护体系建设,做好林地砍伐破坏管理,进而在一定程度上提高SOCS。

从空间维度来讲,耕地扩张、耕地灭失以及耕地类型转换效应在影响研究区SOCS变化过程中所表现的作用存在着明显的空间差异,1999—2019年耕地灭失对SOCS的下降表现为促进作用,主要原因是耕地转建设用地效应的贡献率远超过其他抑制因素,如哈尔滨道里区、香坊区等中西部地区、松花江沿线及交通干线周边地区,耕地转化为建设用地会导致土壤扰动加剧及地表覆盖物减少,从而加剧SOCS的下降;1999—2019年耕地扩张效应表现为抑

制土壤有机碳的下降,其中建设用地转耕地的贡献值最大,原因主要是在国家实施“粮食增产工程”“商品粮生产基地扩建”等背景下,相关地区受农业扩张需求和土地利用政策的影响,为保证耕地数量的动态平衡,部分优质建设用地转为耕地,这使得原来土壤有机质贫乏的地块得以重新耕作、培肥与植被覆盖,部分区域还实施有机肥还田、保护性耕作等农业管理措施,从而显著提升有机碳的输入,增强SOC积累能力,如依兰县、通河县等北部和西部地区,尽管耕地扩张效应在一定程度上可以缓解SOCS的流失,但耕地灭失对SOCS的负面影响更为显著,因此在耕地利用类型变化过程中,应在关注地方经济发展的同时,保障粮食与生态安全,并采取多元化的农业管理措施与耕地保护政策,以促进区域土壤碳汇功能的稳定提升;1999—2019年耕地类型转换效应表现出明显的双向驱动效应,旱地转水田效应对SOCS下降起抑制作用,水田转旱地效应则起促进作用,主要原因是水田相比于旱地,拥有更为丰富的土壤有机碳,土壤有机碳固存能力更强,其中旱地转水田效应主要作用于延寿县、五常市和尚志市等地,不仅是由于区域丰富的水资源和良好的自然资源禀赋可以支撑水稻的种植,而且还是“五常大米”等多种水稻品牌共同推动的结果;水田转旱地效应在宾县和依兰县等地表现尤为显著,主要受制于农村劳动力缺失、稻作生产成本偏高以及粮食安全目标与农业经济效益诉求的矛盾,促使农户在种植决策上更倾向于选择投入强度较低、收益相对稳定的旱地作物。

### 3.4 研究不足与展望

本研究为保证完整的耕地利用类型变化系统过程,因此分析耕地存续对SOCS的影响。研究发现“耕地存续”导致SOCS总体呈下降趋势,这一结果可能是由多种因素共同驱动造成的,一方面气候环境变化对SOCS变化有着显著而复杂的影响,其主要通过气温和降水的共同作用来改变土壤有机碳的输入与输出平衡,从而对SOCS产生影响,如许煜麟<sup>[30]</sup>在研究中指出年均气温和降水量与SOCS变化呈显著正相关关系,结合1999—2019年研究区气象数据分析,20年间研究区气温和降水量呈升高趋势,二者均通过改变土壤有机碳的输入与输出过程来影响其储量。气温的升高不仅会改变作物的生长周期,影响光合作用速率和生物量积累,从而影响土壤有机碳的输入量;还会加快土壤有机质的分解,从而导致SOCS的下降。降水的增加则在一定程度上会改善土壤水分条件,有利于植被生长和有机质归还,从而增加碳输入,但过量降水也可能导致SOCS外流;另一方面,不

同耕作措施会通过改变土壤性质和微生物群落结构,从而显著影响土壤有机碳的动态变化,1999—2019年研究区推广的轮作制度、秸秆还田和减少耕作强度等保护性耕作措施,在一定程度上减少土壤扰动、增加土壤有机质输入及优化土壤水分保持,从而改善土壤的结构及稳定性,从而有效缓解土壤有机碳储量的流失。因此下一步将从大尺度角度出发,综合考虑气候、管理措施等多因素对SOCS的影响。

## 4 结论

(1) 相对于已有研究的样点试验法,本文更好地从大尺度角度探讨耕地利用类型变化对SOCS影响的时空异质性以及各变化类型的作用程度,更全面地揭示二者的相关关系。

(2) 从时序变化上来看,1999—2019年研究区耕地利用类型变化与SOCS的减少存在显著相关关系,且主要呈正相关,主要归因于耕地扩张、耕地类型转换以及耕地灭失等利用方式的转变,其中除耕地扩张外,其余三大变化类型均导致SOCS的下降,不同变化类型的影响强度排序为:耕地灭失>耕地扩张>耕地类型转换>耕地存续。耕地灭失作为影响强度最强的效应,贡献值高达 $1.47 \times 10^{10}$ t;耕地扩张是SOCS下降的唯一抑制因素,其中建设用地转耕地类型的贡献值最大;耕地类型转换效应主要是耕地内部类型的调整,因而对SOCS的影响相对较弱。

(3) 从空间格局演变特征来看,1999—2019年研究区耕地利用类型变化对SOCS影响重心向东北方向迁移,其中,高值区呈缩小趋势,而低值区呈扩大趋势,20年间耕地灭失效应抑制作用呈现南部地区总体强于北部地区的趋势,而促进作用则多集中在西部地区;耕地扩张效应的作用程度较为分散,其中抑制作用多以散点状的形式分布在研究区边界;促进作用较抑制作用的分布较为集中,多集中在东部地区;耕地类型转化效应的促进因素主要作用于宾县的西部地区以及依兰县的东部地区,抑制作用则以五常市、延寿县最具代表性。

### 参考文献(References):

[1] 陈思宇,律泽,张仰,等.辽宁省农田土壤有机碳含量特征与影响因素[J].生态学杂志,2024,43(9):2769-2776.  
Chen S Y, Lv Z, Zhang Y, et al. Variation of soil organic carbon and the influencing factors in croplands of Liaoning Province, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(9):2769-2776.

[2] 张蕊,赵学勇,王瑞雄,等.干旱半干旱区土地利用/覆被类型变化对土壤有机碳动态影响的研究进展[J].生态学杂志,2024,43(7):2222-2230.

Zhang R, Zhao X Y, Wang R X, et al. Review of the effects of land use/cover change on soil organic carbon dynamic in arid and semi-arid areas[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(7):2222-2230.

[3] 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.

[4] Morais T G, Domingos T, Teixeira R F M. A spatially explicit life cycle assessment midpoint indicator for soil quality in the European Union using soil organic carbon[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016,21(8):1076-1091.

[5] 张海星,赵智强,王瑞锋,等.长江中下游地区耕地土壤有机碳密度变化率驱动因素[J].农业工程学报,2023,39(9):112-122.  
Zhang H X, Zhao Z Q, Wang R F, et al. Driving factors of cultivated land soil organic carbon density change rate in Middle-Lower Reaches of the Yangtze River Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(9):112-122.

[6] 段星星,刘小龙,韩宝华,等.黄土高原地区土壤有机碳和无机碳储量及含量特征[J].物探与化探,2025,49(1):239-247.  
Duan X X, Liu X L, Han B H, et al. Stocks and content of organic and inorganic carbon in soil of the Loess Plateau region[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025,49(1):239-247.

[7] 张帅,许明祥,张亚锋,等.黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤有机碳储量的影响[J].环境科学学报,2014,34(12):3094-3101.  
Zhang S, Xu M X, Zhang Y F, et al. Effects of land use change on storage of soil organic carbon in deep soil layers in the hilly Loess Plateau region, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014,34(12):3094-3101.

[8] 谢恩怡,姚东恒,廖宇波,等.粮食主产区耕地土壤有机碳空间分异特征及其影响因素:以河北省为例[J].环境科学,2024,45(10):6002-6011.  
Xie E Y, Yao D H, Liao Y B, et al. Spatial differentiation characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in cultivated land in major grain-producing areas: a case study of Hebei Province[J]. Environmental Science, 2024,45(10):6002-6011.

[9] 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, Lv 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.
- [10] Li Q Q, Yue T X, Wang C Q, et al. Spatially distributed modeling of soil organic matter across China: an application of artificial neural network approach [J]. *Catena*, 2013, 104:210-218.
- [11] Beillouin D, Cardinael R, Berre D, et al. A global overview of studies about land management, land-use change, and climate change effects on soil organic carbon [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(4):1690-1702.
- [12] Wang J, Lu C, Xu M, et al. Soil organic carbon sequestration under different fertilizer regimes in north and northeast China: RothC simulation [J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(2):182-190.
- [13] Jia H X, Wang X, Xiao J J, et al. Simulated soil organic carbon stocks in northern China's cropland under different climate change scenarios [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213:105088.
- [14] 张法伟,李红琴,李文清,等.三江源国家公园表层土壤有机碳和全氮密度的特征评估和等级区划[J].*生态学报*, 2022, 42(14):5593-5602.  
Zhang F W, Li H Q, Li W Q, et al. The spatial pattern and regional classifications of topsoil organic carbon and total nitrogen density based on boosted regression trees in the Sanjiangyuan National Park [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14):5593-5602.
- [15] 黄先飞,周运超,张珍明.喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J].*水土保持学报*, 2017, 31(5):215-221.  
Huang X F, Zhou Y C, Zhang Z M. Distribution characteristics of soil organic carbon under different land uses in a karst rocky desertification area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5):215-221.
- [16] Luo Z K, Viscarra Rossel R A, Zhou S. Distinct controls over the temporal dynamics of soil carbon fractions after land use change [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(8):4614-4625.
- [17] 王宪帅,黄从德,王勇军.岷江上游山地森林-干旱河谷交错带不同土地利用类型土壤有机碳储量[J].*水土保持研究*, 2010, 17(4):148-152.  
Wang X S, Huang C D, Wang Y J. Soil organic carbon storage under different land use types at mountain forest-drought valley ecotone in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(4):148-152.
- [18] 邱乐丰,虞舟鲁.1979—2020年杭州市富阳区土地利用对耕层土壤有机碳储量变化的影响[J].*浙江农业学报*, 2019, 31(2):291-296.  
Qiu L F, Yu Z L. Land use changes induced soil organic carbon stock variations in cropland soils in Fuyang District, Hangzhou City in 1979—2020 [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(2):291-296.
- [19] 周浩,覃湘,王亚星,等.40年来洞庭湖流域耕地利用变化及其水分平衡效应[J].*长江流域资源与环境*, 2024, 33(4):822-832.  
Zhou H, Qin X, Wang Y X, et al. Cultivated land use induced moisture balance effect in Dongting Lake Basin in recent 40 years [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(4):822-832.
- [20] 孙忠祥,李勇,赵云泽,等.旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J].*农业机械学报*, 2019, 50(1):255-262.  
Sun Z X, Li Y, Zhao Y Z, et al. Analysis on spatial distribution characteristics and driving forces of soil organic carbon density in dry farming region [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1):255-262.
- [21] 李姣,汪杰,李朗,等.洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响[J].*生态学杂志*, 2022, 41(6):1156-1165.  
Li J, Wang J, Li L, et al. Impact of land use change on carbon storage in the Dongting Lake Eco-economic Zone [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(6):1156-1165.
- [22] 丁学谦,吴群,文高辉,等.2005—2019年洞庭湖平原耕地面源污染迁移轨迹及空间格局[J].*农业工程学报*, 2021, 37(15):258-266.  
Ding X Q, Wu Q, Wen G H, et al. Migration trajectory and spatial pattern of cultivated land non-point source pollution in Dongting Lake Plain from 2005 to 2019 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(15):258-266.
- [23] 张廷,胡玉柱,胡海辉,等.基于PLUS-InVEST模型的哈尔滨市土地利用及生境质量预测[J].*环境科学*, 2024, 45(8):4709-4721.  
Zhang T, Hu Y Z, Hu H H, et al. Prediction of land use and habitat quality in Harbin City based on the PLUS-InVEST Model [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8):4709-4721.
- [24] 盖兆雪,郑文璐,王洪彦,等.气候变化下黑土区陆地生态系统碳储量时空格局与模拟[J].*农业机械学报*, 2024, 55(6):303-316.  
Gai Z X, Zheng W L, Wang H Y, et al. Spatio-temporal pattern and simulation of terrestrial ecosystem carbon storage in black soil region under climate change [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(6):303-316.
- [25] 田多松,傅碧天,吕永鹏,等.基于SD和CLUE-S模型的区域土地利用变化对土壤有机碳储量影响研究[J].*长江流域资源与环境*, 2016, 25(4):613-620.  
Tian D S, Fu B T, Lv Y P, et al. Effect of regional land-use change on soil organic carbon storage based on SD and CLUE-S Model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(4):613-620.