

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.011

佟亚宁, 王彬, 王文刚, 等. 东北典型黑土区土壤侵蚀对有机碳时空变化特征的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 59-70.

TONG Yaning, WANG Bin, WANG Wengang, et al. Impact of soil erosion on the temporal and spatial dynamics of organic carbon in the typical black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 59-70.

东北典型黑土区土壤侵蚀对有机碳时空变化特征的影响

佟亚宁¹, 王彬^{1,2}, 王文刚¹, 周笑¹, 李力国¹, IFTIKHAR Farhan¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持学院
重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083)

摘要: [目的] 探明土壤有机碳流失时空分布变化对土壤侵蚀强度的响应机制, 以为侵蚀环境下土壤碳循环机制研究提供基础数据, 并为解决黑土“变薄变瘦”问题提供科学依据。[方法] 选取松嫩平原典型黑土区的北安市、克山县、克东县、拜泉县等 14 个市(区、县)为研究对象, 采用 RUSLE 模型并结合 GIS 空间分析技术分析东北典型黑土区 2000—2019 年土壤侵蚀与土壤有机碳流失的时空变化特征。[结果] 研究区土壤侵蚀强度整体呈北高南低的分布格局, 并以微度侵蚀为主; 2000—2019 年典型黑土区微度侵蚀面积占比上升趋势不显著, 轻度及以上程度的侵蚀面积占比则整体表现为降低态势, 其中 87.91% 的区域侵蚀强度等级未发生明显变化, 仅有 3.74% 的区域侵蚀强度等级升高; 土壤有机碳流失空间分布差异明显, 总体呈北高南低的分布特征, 研究期间土壤有机碳年平均流失强度为 4.74 t/(km² · a); 2010—2019 年, 土壤有机碳流失总量呈增大趋势, 其中北安市流失量最大, 为研究区总流失量的 37.00%; 2015—2019 年, 土壤有机碳流失强度 < 5 t/(km² · a) 的区域面积占比下降, 而流失强度 > 5 t/(km² · a) 的区域面积占比上升, 导致年平均流失强度增大; 研究区北部土壤侵蚀强度高的地区由于有机碳丰富, 使得其在遭受侵蚀作用时损失的有机碳总量相对较大, 形成土壤有机碳流失总量的地域性差异特征。[结论] 侵蚀作用下土壤有机碳流失的时空变化特征, 表明严重的土壤侵蚀是坡面土壤有机碳流失的重要驱动因素。

关键词: 土壤侵蚀; 土壤有机碳; RUSLE 模型; 时空变化; 东北黑土区

中图分类号: 152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0059-12

Impact of Soil Erosion on the Temporal and Spatial Dynamics of Organic Carbon in the Typical Black Soil Region of Northeast China

TONG Yaning¹, WANG Bin^{1,2}, WANG Wengang¹, ZHOU Xiao¹, LI Liguang¹, IFTIKHAR Farhan¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forestry Ecosystem Research Station, School
of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To investigate the response mechanism of temporal and spatial distribution of soil organic carbon (SOC) loss to soil erosion intensity, in order to provide basic data for the study of soil carbon cycling mechanism under erosion environment, and provide scientific basis for solving the problem of “thinning and thinning” of black soil. [Methods] This study selected 14 cities (districts or counties) such as Bei'an, Keshan, Kedong and Baiquan counties in the typical black soil area of Songnen Plain as the research objects, and employed the RUSLE model in conjunction with the spatial analysis techniques of GIS to explore the characteristics of temporal and spatial variations in soil erosion and SOC loss in the typical black soil region of Northeast China from 2000 to 2019. [Results] Soil erosion intensity in the study area exhibits a high-north and low-south distribution pattern, predominantly characterized by slight erosion. From 2000 to 2019, the proportion of slight erosion area in typical black soil area showed a inapparent upward trend, while the

收稿日期: 2024-04-02

修回日期: 2024-05-13

录用日期: 2024-06-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-08-29

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41977060)

第一作者: 佟亚宁 (1999—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 1341976097@qq.com

通信作者: 王彬 (1983—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wangbin1836@bjfu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

proportion of slight erosion area and above showed a decreasing trend. Notably, 87.91% of the area did not undergo significant changes in the degree of erosion intensity, with only 3.74% of the area experiencing an escalation in erosion severity. SOC loss exhibited significant spatial distribution differences, generally following a high-north and low-south distribution pattern, with an average annual loss intensity of SOC at $4.74 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. From 2010 to 2019, the total SOC loss showed an increasing trend, with the highest loss occurring in Bei'an, accounting for 37.00% of the total loss in the study area. Between 2015 and 2019, the proportion of areas with soil organic carbon loss intensity less than $5 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ has decreased, while the proportion of areas with loss intensity greater than $5 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ has increased, leading to an increase in the annual average loss intensity. In the northern part of the study area, where soil erosion intensity is high, the abundant SOC content resulted in relatively larger total organic carbon loss upon erosion, giving rise to a distinct regional variation in SOC loss totals. [Conclusion] The temporal and spatial characteristics of SOC loss under the action of erosion, indicating that severe soil erosion is an important driving factor of SOC loss on slope.

Keywords: soil erosion; soil organic carbon; RUSLE model; spatio-temporal change; black soil region in NE China

Received: 2024-04-02

Revised: 2024-05-13

Accepted: 2024-06-10

Online(www.cnki.net): 2024-08-29

土壤侵蚀已成为世界性环境问题,水土流失过程导致土壤有机质等养分大量迁移,对生态环境产生巨大影响^[1]。东北黑土区作为我国重要的商品粮基地,是国家粮食安全的“稳定器”和“压舱石”^[2]。由于其特殊的气候条件、侵蚀环境和人类不合理开发利用等因素影响,黑土区水土流失面积达 20.89 万 km^2 ^[3]。土壤有机碳是有机质的重要组成部分,也是土壤肥力和土地生产力的重要指标,在全球碳循环中起着至关重要的作用^[4-5]。土壤有机碳的流失程度与土壤侵蚀的强度紧密相关。阎百兴等^[6]利用¹³⁷Cs示踪法研究东北黑土区坡面土壤侵蚀对土壤有机质的影响表明,侵蚀坡面和沉积坡脚耕层土壤中的有机质都较未开垦的黑土低,有机质损失明显;贾松伟等^[7]通过野外径流小区观测和室内分析发现,土壤有机碳流失主要伴随泥沙流失,最高可达到 95%以上,且侵蚀强度与土壤有机碳流失程度呈明显的线性关系;郭太龙等^[8]采用室内人工模拟降雨的方法发现,土壤有机碳的流失主要以侵蚀泥沙为载体,土壤有机碳流失强度与侵蚀强度呈明显的线性正相关。然而,由于土壤有机碳流失影响因素复杂多样,目前陆地碳源-汇循环中土壤侵蚀过程的作用影响仍不明晰^[9]。

东北典型黑土区是我国土壤有机碳不断流失的区域之一。已有研究^[10]表明,因侵蚀导致的黑土层变薄和有机质下降是造成黑土质量下降的主要因素。本研究以东北典型黑土区为研究对象,采用修正通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)和土壤有机碳流失方程并结合 GIS 空间分析技术,分析 2000—2019 年东北典型黑土区土壤侵

蚀强度时空分布特征,探明土壤有机碳流失时空分布变化对土壤侵蚀强度的响应机制,以期对侵蚀环境下土壤碳循环机制研究提供基础数据,并为我国东北黑土地保护和土壤质量提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于松嫩平原典型黑土区,覆盖黑龙江省北安市、克山县、克东县、拜泉县等 14 个市(区、县),地理坐标为 $45^{\circ}35'37''$ — $48^{\circ}33'03''\text{N}$, $124^{\circ}49'48''$ — $127^{\circ}57'20''\text{E}$,面积 4.11 万 km^2 ,为东北典型黑土区的 3 个亚区之一,是黑土和黑钙土集中分布区域,土壤肥沃,有机质质量分数高;位于漫川漫岗区,地势波状起伏,长缓坡地形明显,坡度 $3^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 为主,坡长多在 200 m 以上;属温带大陆性季风气候,多年平均气温 $2\sim 6^{\circ}\text{C}$,降水集中分布在 7—9 月,年平均降水量 $450\sim 650 \text{ mm}$,约占全年降水量的 70%。土地利用类型以耕地为主,是我国玉米、大豆等商品粮的高质量产区。

1.2 样品采集与测定

本研究采样路线及样点布设是基于 2019 年前期研究区内已有的调查点进行的加密补充采样^[11]。补充采样时间为 2023 年 7 月,研究区位置及采样点布设见图 1,共计 37 个样点,覆盖研究区黑土、白浆土、草甸土等 8 种代表性土壤类型。选用五点采样法和环刀法,分别采集表层农耕地土壤(0—20 cm)混合样品和原状土样待测。采用重铬酸钾外加热法、激光粒度分析法、环刀法等分别测定土壤有机碳、土壤机械组成、土壤体积质量等理化性质指标。

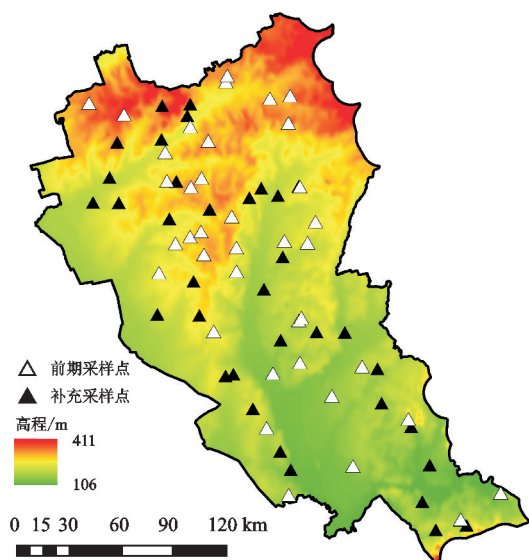


图1 研究区位置及采样点分布

Fig. 1 Study area location and distribution of sampling points

表1 典型黑土区基础数据信息与来源

Table 1 Basic data information and sources of typical black soil areas

数据名称	数据信息	数据来源
降雨	29个国家气象站点 2000—2019 年逐日降雨数据	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/site/index.html)
DEM	30 m 分辨率	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
土地利用	2000 年、2005 年、2010 年、2019 年 1 km 分辨率 (重采样至 30 m 分辨率)	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
遥感数据	Terre-MODIS NDVI、GIMMS NDVI 产品数据 250 m 分辨率(重采样至 30 m 分辨率)	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
土壤	土壤有机质含量数据 90 m 分辨率(重采样至 30 m 分辨率)文本数据土壤类型数据 30 m 分辨率	土壤有机质含量数据来源于《中国土系志·黑龙江卷》 ^[12] 、课题组前期研究 ^[13] 和国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/);土壤类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
统计数据	2019 年文本数据	《黑龙江省水土保持公报》(http://slt.hlj.gov.cn/) 《黑龙江省统计年鉴》(http://tjj.hlj.gov.cn/)

1.4.2 土壤侵蚀因子获取及计算

(1) 降雨侵蚀力因子(R)

采用 XIE 等^[14]提出的半月侵蚀力模型计算降雨侵蚀力 R 值:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^n P_j \beta$$

$$\beta = 0.836 \cdot 3 + 18.144 / P_{d12} + 24.455 / P_d$$

$$\alpha = 21.586 \beta^{-7.1891} \quad (2)$$

式中: R_i 为第 i 个半月时段的侵蚀力值 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{km}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$; n 为半月时段的天数; P_j 为半月时段内第 j 天的侵蚀性日降雨量(侵蚀性降雨阈值为 12 mm), 否则以 0 计算(mm); 半月时段的划分以每月第 15 日为界, 将全年依次划分为 24 个时段; α 、 β 为模型参数; P_{d12} 为日降雨量 ≥ 12 mm 的日平均降雨量(mm); P_d 为日降雨量(mm)。

1.3 数据来源

依据全国水土流失动态监测和全国水利普查结果, 本研究选取 2000—2019 年为研究时段, 开展水力侵蚀为主要驱动作用的土壤有机碳流失时空分异特征研究。收集的相关基础数据信息见表 1。

1.4 土壤侵蚀模型及参数

1.4.1 修正通用土壤流失方程(RUSLE) 本研究采用被广泛认可的修正通用土壤流失方程(RUSLE)计算土壤侵蚀模数, 其表达式为:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数 $[\text{t} / (\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; R 为降雨侵蚀力因子 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{km}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$; K 为土壤可蚀性因子 $[(\text{t} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{h}) / (\text{km}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$; L 和 S 分别为坡长和坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。

选取研究区内及其周边共 29 个气象站点, 对 2000 年、2010 年、2015 年、2019 年的降雨量数据进行统计分析得到, 4 期各降雨观测点的降雨侵蚀力值, 并选用普通克里金插值方法获取研究区降雨侵蚀力空间分布图(图 2)。

(2) 土壤可蚀性因子(K)

在课题组前期研究的基础上, 基于中国土壤可蚀性数据库、中国土壤信息系统和第一次全国水利普查成果, 获取研究区土壤可蚀性 K 因子图(图 3 a)。土壤可蚀性 K 因子的计算公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025 \cdot 6 S_a \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{S_i}{C_i + S_i} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25 C_s}{C_s + \exp(3.72 - 2.95 C_s)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7 S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9 S_n)} \right] \quad (3)$$

式中: K 为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot km^2 \cdot h)/(km^2 \cdot MJ \cdot mm)]$; S_a 为土壤砂粒质量分数(%); S_i 为土壤粉粒质量分数(%); C_l 为土壤黏粒质量分数(%); C_s 为土壤有机碳质量分数(%); $S_n = 1 - S_a/100$ 。

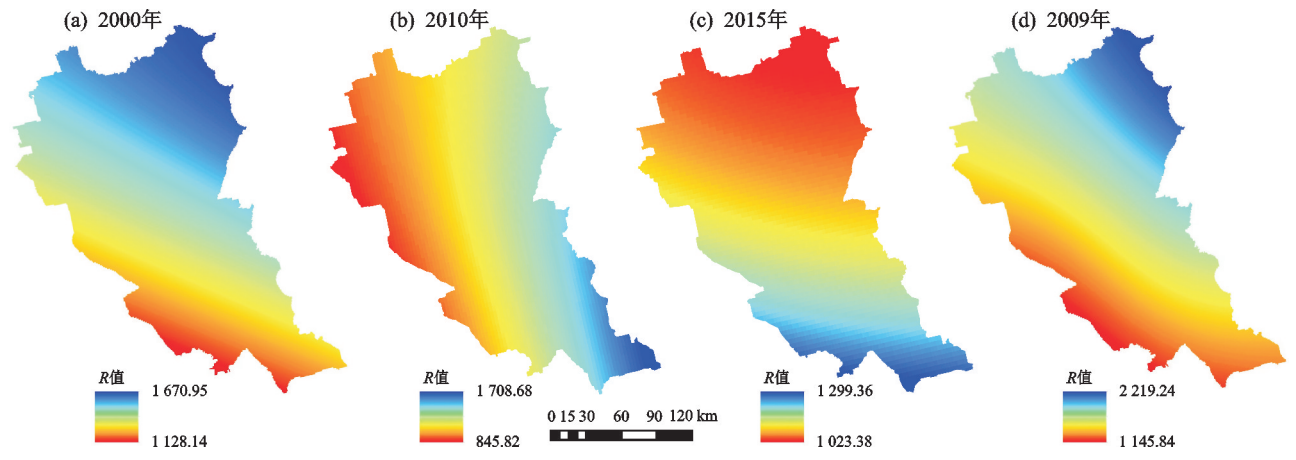


图 2 2000—2019 年典型黑土区降雨侵蚀力空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of rainfall erosivity in typical black soil areas from 2000 to 2019

(3)坡度坡长因子(LS)

基于研究区 30 m 分辨率 DEM 数据,采用符素华等^[15]提出的算法计算 LS :

$$S = \begin{cases} 10.8\sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 14^\circ \\ 21.9\sin \theta - 0.96 & \theta \geq 14^\circ \end{cases}$$
$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m, m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度($^\circ$); L 为坡长因子; λ

为坡长(m); m 为坡长指数。

利用 ArcGIS 的栅格计算功能将坡长因子 L 和坡度因子 S 进行叠加得到研究区坡长坡度因子 LS 的空间分布图(图 3b)。

(4)植被覆盖与管理因子(C)

采用蔡崇法等^[16]提出的 C 值计算方法,通过植被覆盖度(c)获得 C 值:

$$C = \begin{cases} 1 & c < 0.1 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg c & 0.1 \leq c < 0.783 \\ 0 & c \geq 0.783 \end{cases} \quad (5)$$

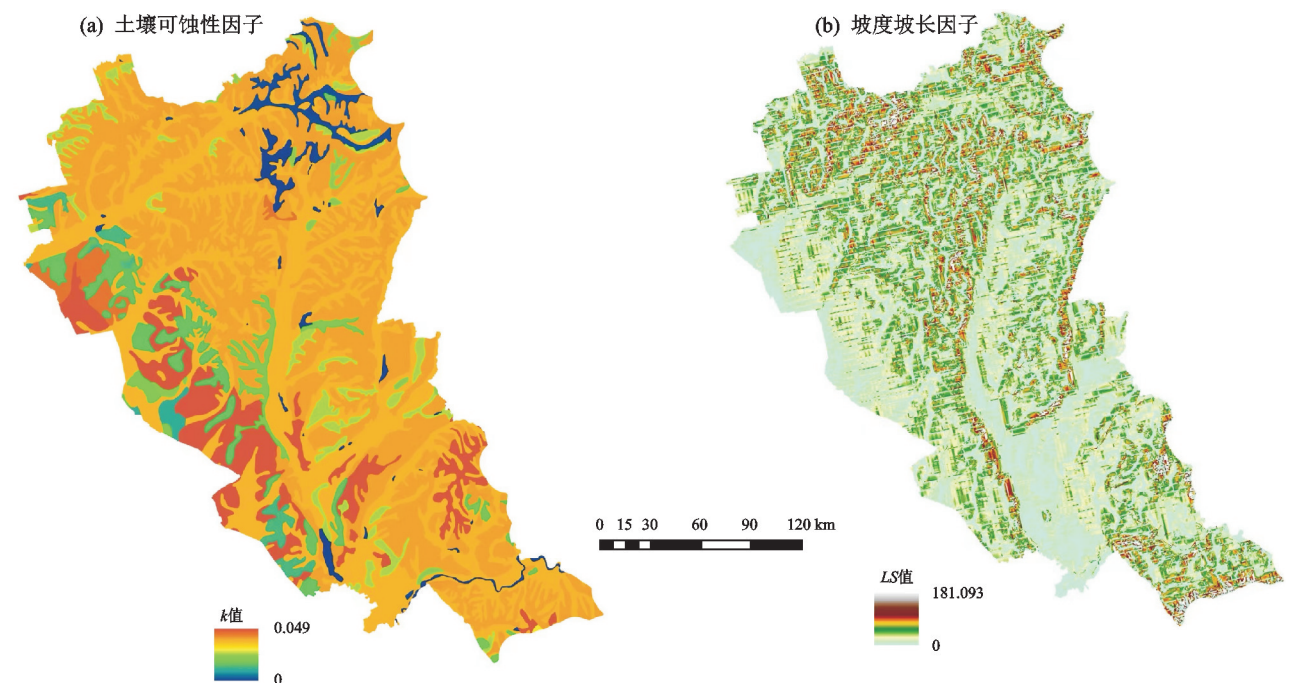


图 3 典型黑土区土壤可蚀性因子和坡度坡长因子空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil erodibility factor and topographic factor in typical black soil areas

根据象元二分模型计算植被覆盖度,图像中每个象元的 NDVI 值可视为有植被覆盖部分与无植被覆

盖部分 NDVI 的加权平均值,随后利用年 NDVI 计算植被覆盖度:

$$c = (N - N_{\text{soil}}) / (N_{\text{veg}} - N_{\text{soil}}) \quad (6)$$

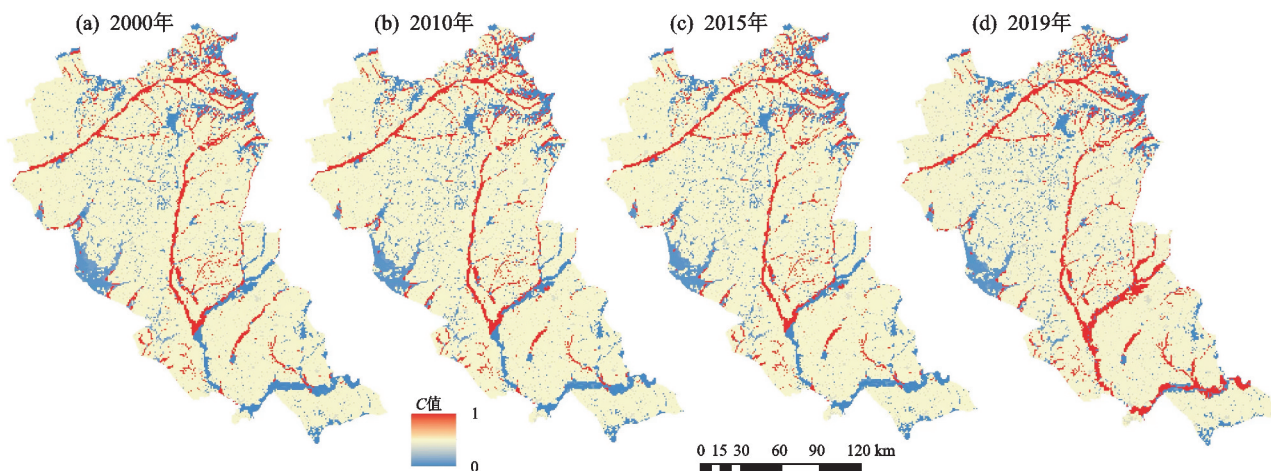


图4 2000—2019年典型黑土区植被覆盖与管理因子空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of vegetation cover and management factor in typical black soil areas from 2000 to 2019

(5)水土保持措施因子(P)

区域尺度的 P 值一般采用赋值法,参考已有研究^[17]成果,将林地、草地的 P 因子赋值为 0.10,水田

式中: N_{soil} 为裸土或无植被覆盖区的 NDVI 值; N_{veg} 为植被覆盖区的 NDVI 值。基于上述公式利用 ArcGIS 计算得到研究区 C 值空间分布图(图 4)。

(c) 2015年

(d) 2019年

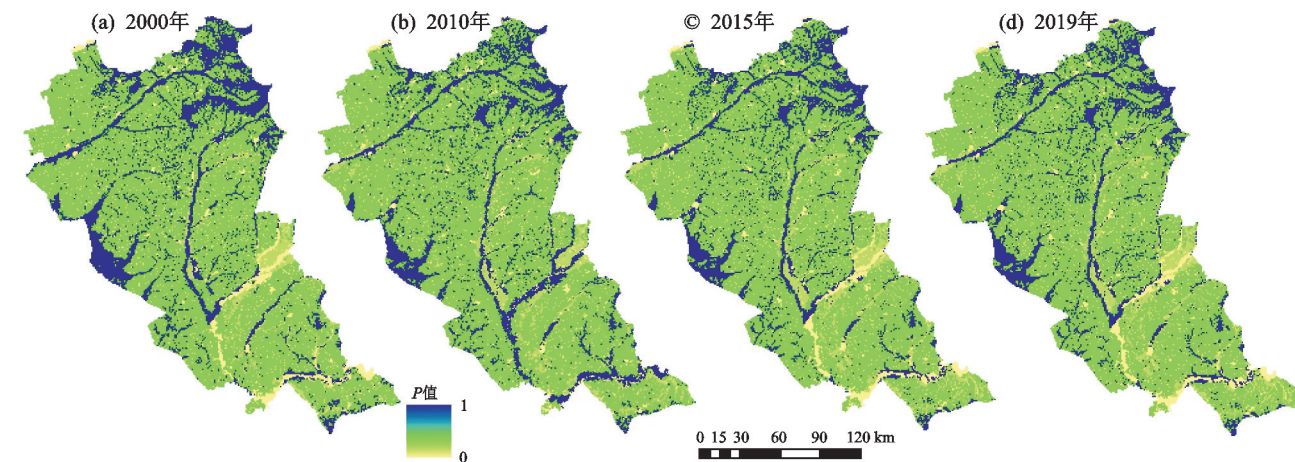


图5 2000—2019年典型黑土区水土保持措施因子空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of soil and water conservation measures factor in typical black soil areas from 2000 to 2019

1.5 土壤有机碳流失的估算

本研究采用线性关系式法估算土壤有机碳流失量^[17],公式为:

$$N = \frac{A \times C_o \times E_r}{1\ 000} \quad (7)$$

式中: N 为土壤有机碳流失量 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; C_o 为表层土壤的土壤有机碳质量分数 (g/kg) ; E_r 为侵蚀泥沙富集系数。

研究^[18]表明,侵蚀泥沙富集系数(E_r)与土壤侵蚀强度密切相关。参考 CAO 等^[19]对黑土侵蚀泥沙富集系数(E_r)的研究成果,建立 E_r 与土壤总侵蚀量之间的关系,土壤总侵蚀量(E)与黑土 E_r 表现为负指数函数,关系式为:

为 0.18,旱地为 0.35,其他土地类型均赋值为 0。根据土地利用数据利用 ArcGIS 的栅格计算功能进行赋值得到研究区的 P 值空间分布图(图 5)。

(c) 2015年

(d) 2019年

$$E_r = 1.237 \times e^{-0.183 \times E} \quad (8)$$

式中: E 为土壤总侵蚀量 (kg/m^2) 。

2 结果与分析

2.1 典型黑土区土壤侵蚀时空分布特征

2.1.1 RUSLE 模型的适用性 以第一次全国水利普查^[20]和 2019 年黑龙江省水土保持公报数据^[21]为参照,对本研究结果适用性进行分析;选取侵蚀现象明显的克东县和拜泉县为模型验证区域,对基于 RUSLE 模型计算的侵蚀强度结果进行验证分析(表 2)。结果表明,相较于实测值 RUSLE 整体低估轻度侵蚀面积,分别低估 13.6%(克东县)和 4.46%(拜泉县);模型模拟值低估克东县中度侵蚀面积 15.23%,高估拜泉县中度侵蚀面积 8.21%;整体低估强烈侵蚀面

积占比,分别低估 8.61%(克东县)和 14.92%(拜泉县);高估克东县极强烈侵蚀面积16.13%,低估拜泉县极强烈侵蚀面积 11.54%。

T 检验显示,RUSLE 模型估算结果与实测值间

不存在显著性差异(克东县 $p=0.38$,拜泉县 $p=0.41$),各等级侵蚀面积估算值相对误差满足相应分析精度要求,表明 RUSLE 模型适用于研究区土壤侵蚀强度估算^[22]。

表 2 基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀强度相对误差分析

Table 2 Relative error analysis of soil erosion intensity based on RUSLE model

侵蚀强度	实测值/km ²		模拟值/km ²		相对误差/%	
	克东	拜泉	克东	拜泉	克东	拜泉
轻度	1 135.20	1 761.33	980.83	1 682.86	-13.60	-4.46
中度	23.77	29.96	20.15	32.42	-15.23	+8.21
强烈	1.51	2.48	1.38	2.11	-8.61	-14.92
极强烈	0.62	0.26	0.72	0.23	+16.13	-11.54

2.1.2 土壤侵蚀强度时空分布特征

(1)土壤侵蚀强度时间演变特征

2000—2019 年典型黑土区微度侵蚀面积占比上升趋势不显著,轻度及以上程度的侵蚀面积占比则整体表现出降低态势(图 6)。其中,微度侵蚀面积占比在 2000—2015 年平均上升速率为 0.81%,整体呈上升趋势;轻度侵蚀区域面积占比下降趋势不显著,由 2000 年的 31.77%降至 2010 年的 22.94%和 2015 年的 21.31%;中度及以上程度侵蚀面积占比较小,其中 2000 年占比最高为 2.02%。研究结果与黑龙江省同期水土流失动态监测数据所反映的趋势高度吻合,进一步表明区域水土流失防治措施在减轻土壤侵蚀方面取得的积极成效。

土壤侵蚀强度等级的动态变化度分析可见,不同时段土壤侵蚀强度等级的动态度变化存在明显差异(表 3)。2000—2015 年不同侵蚀等级变化趋势基本一致,微度侵蚀动态度均>0,呈正向变化趋势;轻度及以上侵蚀程度呈降低趋势,仅 2000—2010 年的强

烈侵蚀动态度>0;2015—2019 年轻度、中度、强烈和极强烈 4 个侵蚀强度等级动态度均>0,表明研究区土壤侵蚀状况在研究期内整体呈改善态势,尤其强烈及以上等级更为明显。

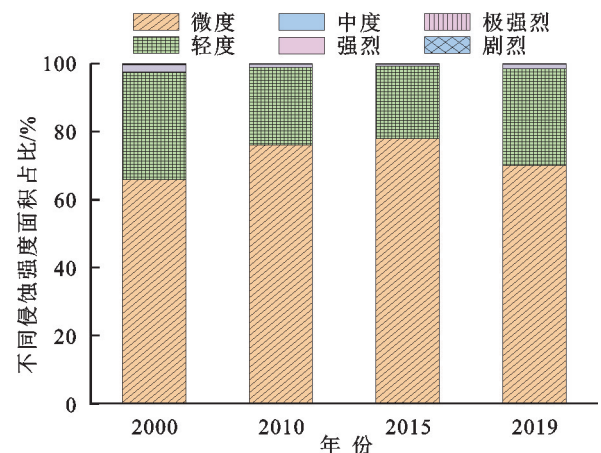


图 6 典型黑土区 2010—2019 年不同侵蚀强度面积占比

Fig. 6 Area proportion of different erosion intensities in typical black soil areas from 2010 to 2019

表 3 典型黑土区土壤侵蚀强度等级动态度

Table 3 Hierarchical dynamic attitude of soil erosion intensity in typical black soil areas

年份	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
2000—2019	+0.34	-0.55	-1.92	-3.52	-3.66	-3.52
2000—2010	+1.44	-2.82	-5.72	+8.33	-7.32	-9.02
2010—2015	+0.50	-1.44	-4.27	-11.45	-14.09	-20.00
2015—2019	-2.30	+8.56	+22.20	+12.91	+3.99	0

注: +表示相应侵蚀等级面积相对于基期侵蚀等级面积增加; -表示相应侵蚀等级面积相对于基期侵蚀等级面积减少。

(2)土壤侵蚀空间演变特征

依据《黑土区水土流失综合防治技术标准》(SL 446—2009)^[23]进行分级制图,得到研究区土壤侵蚀强度分级图(图 7)。研究区土壤侵蚀强度以微度侵蚀为主,侵蚀强度等级分布特征整体呈北高南低分布格局,土壤侵蚀强度等级较高地区主要分布在克山县、克东县、拜泉县和北安市。土壤侵蚀空间分布格

局与地形特征表现出明显一致性:微度侵蚀主要分布在低海拔、地形平缓的南部和中部地区;强度侵蚀主要分布在地形起伏较大的北部地区,地形主导着研究区土壤侵蚀的空间分布。

2000—2019 年研究区各侵蚀强度等级面积占比呈不显著变化趋势,其中 87.91%的区域侵蚀强度等级未发生明显变化(图 8)。研究期间,微度侵蚀面积

的新增部分及转移部分的面积分别为 2 929.12, 1 213.95 km², 分别占微度侵蚀面积的 11.43% 和 4.73%, 表明研究区土壤侵蚀强度表现出明显的向微

度侵蚀转变的趋势, 轻度及以上的侵蚀现象总体上有所缓解, 进一步明确继续加强微度侵蚀控制及针对性预防土壤侵蚀加剧的重要性。

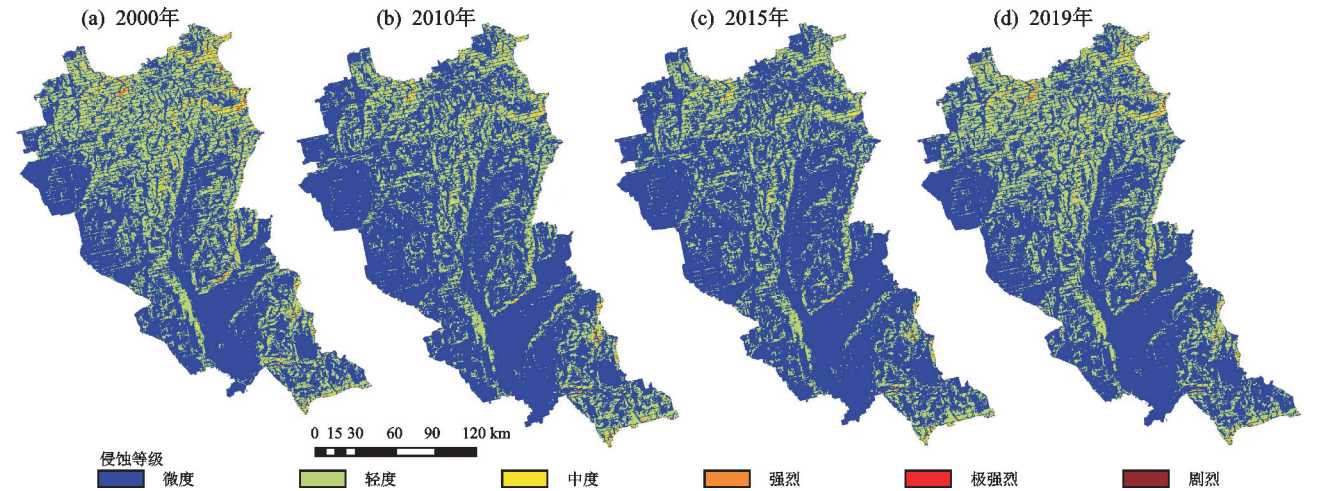


图 7 2000—2019 年典型黑土区土壤侵蚀强度等级分布

Fig. 7 Grade distribution of soil erosion intensity in typical black soil areas from 2000 to 2019

2.2 土壤有机碳流失时空分布特征

2.2.1 土壤有机碳流失时间演变特征 2010—2019 年研究区域内土壤有机碳流失强度整体呈增大趋势 (表 4)。2010 年、2015 年和 2019 年平均土壤有机碳流失强度分别为 4.61、4.33、5.29 t/(km² · a), 集中分布在 4.74 t/(km² · a); 2010—2019 年整个研究时段内, 土壤有机碳流失强度 < 5 t/(km² · a) 的区域面积占比波动下降, 2010—2015 年时间段内面积占比由 75.60% 上升至 77.70%, 2015—2019 年时间段内面积占比下降为 71.65%; 土壤有机碳流失强度 > 5 t/(km² · a) 的区域面积占比波动上升, 2010—2015 年时间段内面积占比由 24.40% 下降至 22.30%, 2015—2019 年时间段内面积占比上升为 28.35%。结果表明, 2015—2019 年土壤有机碳流失强度 < 5 t/(km² · a) 的区域面积占比下降, 而流失强度 > 5 t/(km² · a) 的区域面

积占比上升, 导致年平均流失强度增大, 凸显出研究区域在 2015—2019 年土壤有机碳流失问题加剧。

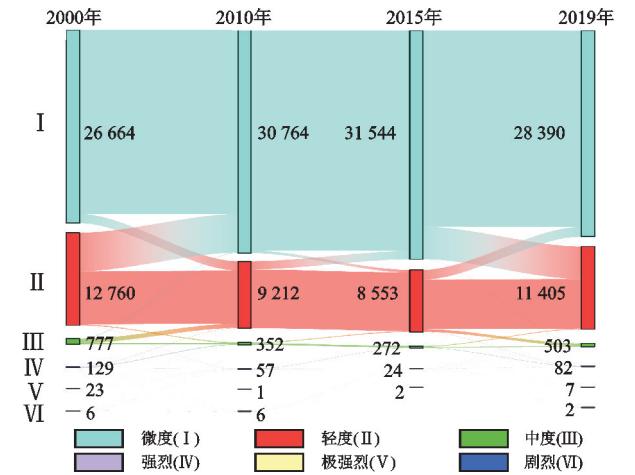


图 8 2000—2019 年典型黑土区土壤侵蚀强度等级转移矩阵
Fig. 8 Transition matrix of soil erosion intensity in typical black soil areas from 2000 to 2019

表 4 2010—2019 年典型黑土区土壤有机碳流失强度面积占比

Table 4 Area proportion of soil organic carbon loss intensity in typical black soil areas from 2010 to 2019						%
年份	<5 t/(km ² · a)	[5,10) t/(km ² · a)	[10,20) t/(km ² · a)	[20,50) t/(km ² · a)	[50,100) t/(km ² · a)	>100 t/(km ² · a)
2010	75.60	13.67	6.15	3.94	0.59	0.04
2015	77.70	12.40	5.60	3.68	0.57	0.03
2019	71.65	15.61	7.48	4.19	0.93	0.14

土壤侵蚀作用下, 2010—2019 年土壤有机碳流失总量整体呈上升趋势。2010 年、2015 年和 2019 年研究区不同区域土壤有机碳流失量存在显著差异, 其中北安市流失量最大, 占研究区总流失量 37.00%; 呼兰区流失量最小, 占总流失量 1.64% (表 5)。侵蚀量

较大, 使得富含有机碳的表层土壤在遭受侵蚀作用时释放的有机碳总量相对较大, 从而形成土壤有机碳流失量的地域性差异特征。研究区土壤侵蚀强度及土壤有机碳含量的空间分布格局整体一致, 均为北高南低, 北部土壤有机碳流失量较大 (图 9)。

表 5 2010—2019 年典型黑土区不同区域土壤有机碳流失统计
Table 5 Soil organic carbon loss statistics in different regions of typical black soil areas from 2010 to 2019

区域	平均流失强度/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)			总流失量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)			
	2010 年	2015 年	2019 年	2010 年	2015 年	2019 年	总量
克山县	5.19	4.86	5.69	1.65	1.55	1.81	5.01
克东县	7.74	7.04	9.02	1.61	1.46	1.88	4.95
北安市	11.58	11.01	13.38	8.33	7.92	9.62	25.87
拜泉县	4.77	3.01	7.73	1.72	1.09	2.78	5.59
海伦市	4.54	4.33	4.80	2.12	2.02	2.24	6.38
依安县	1.79	1.60	2.30	0.66	0.59	0.85	2.10
明水县	3.25	3.21	3.37	0.75	0.74	0.78	2.27
青冈县	3.32	3.21	3.68	0.89	0.86	0.99	2.74
望奎县	4.20	4.09	4.25	0.97	0.94	0.98	2.89
北林区	1.69	1.58	1.79	0.47	0.44	0.49	1.40
兰西县	1.61	1.57	1.76	0.40	0.39	0.44	1.23
呼兰区	1.64	1.59	1.89	0.37	0.36	0.42	1.15
巴彦县	3.88	3.34	4.10	1.22	1.05	1.29	3.56
宾县	4.02	3.87	4.52	1.55	1.49	1.74	4.78
总计	59.22	54.08	67.39	22.70	20.90	26.31	69.91

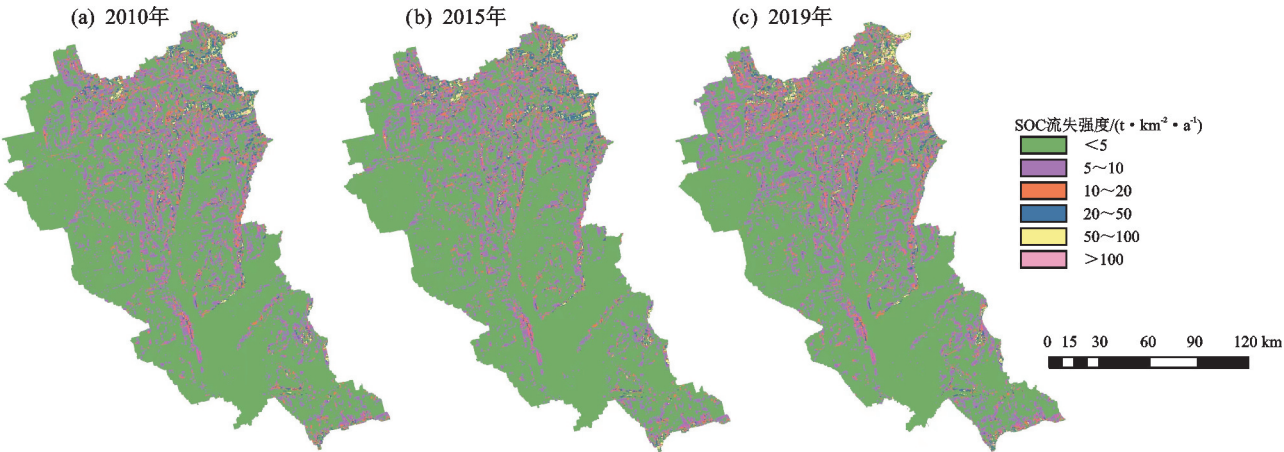


图 9 2010—2019 年典型黑土区土壤有机碳流失空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of soil organic carbon loss in typical black soil areas from 2010 to 2019

2.2.2 土壤有机碳流失空间变化特征 土壤有机碳流失空间分布呈明显的差异性分布特征,整体表现为北高南低的分布格局。土壤有机碳流失量明显的区域主要分布于克山县、克东县、北安市和海伦市一带。2010—2015 年有 5.28% 的区域土壤有机碳流失程度减轻,主要位于研究区中部和东部,覆盖拜泉县、海伦市和望奎县等地(图 10a);有 2.03% 的区域有机碳流失加剧,集中在克山县、克东县及依安县等地。2015—2019 年有 5.85% 的区域土壤有机碳流失程度减轻,主要分布在北安市及海伦市一带,有 14.77% 的区域流失程度加重,主要分布在研究区的北部(图 10b);2010—2019 年间有 12.2% 的区域流失程度加重,主要分布

在研究区的北部,其中克山县土壤有机碳流失程度加重最严重(图 10c)。土壤有机碳流失空间分布格局均与土壤侵蚀空间格局整体一致,研究区土壤有机碳流失强度的加剧趋势在北部区域更为显著。

3 讨论

3.1 土地利用变化对土壤侵蚀的影响

土地利用变化改变原有地表植被类型及其覆盖度、地表径流及土壤的理化性质,进而影响土壤侵蚀的动力和抗侵蚀阻力系统,成为诱发土壤发生侵蚀的关键因素。分析可知,2000—2019 年研究区土地利用空间结构总体态势较为稳定,耕地面积变化不显著,由 2000 年的 31 571.99 km²增加至 2019 年的 31 736.83 km²;建设用地

面积在 2015—2019 年时段内增量较大,为 1 792.48 ~ 1 897.52 km²;未利用地面积呈显著减少的趋势,由 2000 年的 2 883.61 km² 减少至 2019 年的 2 674.90 km²;林地、草地和水域面积呈不同程度的减少趋势(图 11)。结合对黑龙江省近 40 年的土地利用类型变化方面的研究^[24],耕地和建设用地面积有上升的情况,林地、草地、水域、未利用地面积有持续下降的趋势,变化的总趋势与本文基本相符。根据 2019 年《黑龙江省统计年鉴》^[25]可知,黑龙江省城镇化进程加剧,人口聚集促使建设用地需求增大。2000—2019 年耕地的土壤

侵蚀面积占比较大,分别占研究区侵蚀总面积的 76.59%,77.44%,77.47%和 77.99%,说明耕地是区域侵蚀产沙的主要来源(表 6)。东北典型黑土区耕地主要为坡耕地,耕地土地利用方式的改变导致土壤侵蚀强度的显著变化^[26]。草地、林地的地表覆盖度相对较高,且人为扰动相对较小,因此坡面发生土壤侵蚀的程度较低^[27]。在土地规划和管理策略中,有必要加强对耕地土壤保护措施的实施,同时合理控制建设用地扩展速度,维护并提升林地和草地资源,减轻土壤侵蚀所带来的环境问题。

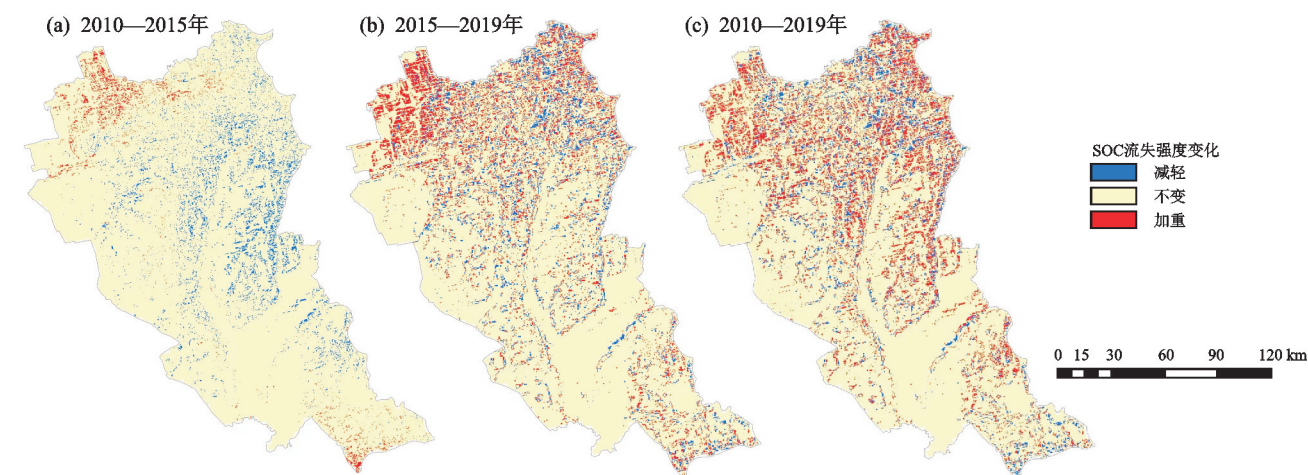


图 10 2010—2019 年典型黑土区土壤有机碳流失强度变化

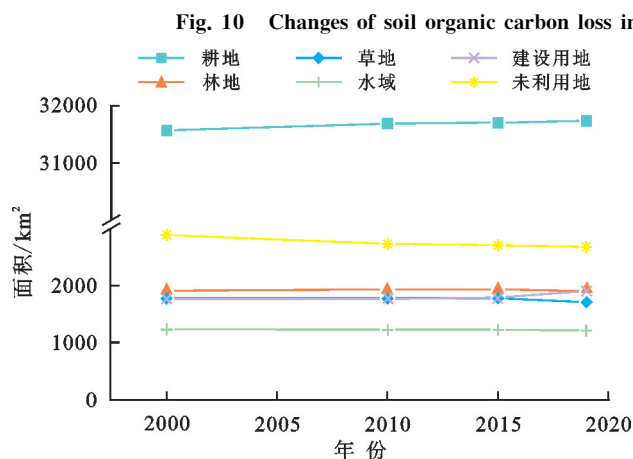


图 11 2010—2019 年典型黑土区土地利用面积变化

Fig. 11 Changes of land use area in typical black soil areas from 2010 to 2019

3.2 土壤有机碳对土壤侵蚀的响应

坡面侵蚀区以土壤侵蚀-搬运过程为主,土壤有机质主要是以有机无机体紧密结合的方式存在于土壤团聚体中,耕地表层肥沃土壤颗粒在侵蚀-搬运过程中大量流失,土壤有机质通过径流泥沙携带发生流失^[28],导致侵蚀性土壤有机碳流失严重。结果表明,典型黑土区土壤有机碳流失强度与土壤侵蚀强度存在显著的正相关($R^2 = 0.95$, $p = 0.02$),与以往的研究

结果相同。强烈的降雨侵蚀力导致土壤大团聚体(粒径 >0.25 mm)被物理破碎,促使土壤微团聚体数量增加,这一过程释放更多被保护在大颗粒内部的有机碳,使有机质更易被分解并流失^[30]。已有研究^[31]表明,极端降水事件发生频率的增加将显著加剧土壤水力侵蚀程度,本研究印证了此判断,同样发现降雨侵蚀力 R 因子与土壤侵蚀强度呈显著正相关($R^2 = 0.92$, $p = 0.02$),且造成有机碳流失程度加剧。研究区土壤侵蚀导致年平均土壤有机碳损失量为 0.25 Mt,过去 20 年内,占近 20 年全国年均土壤有机碳损失量的 0.14%~0.25%^[32];研究区多年平均流失强度为 4.74 t/(km²·a),占全国年平均侵蚀性有机碳损失约 25.30%^[32],是全球平均值的 1.23 倍^[33]。研究区侵蚀性有机碳的流失虽低于我国平均水平,但高于全球水平,且流失强度有增大的趋势。因此,东北黑土区日益严峻的土壤侵蚀环境下土壤有机碳流失过程机制研究亟待加强。采取针对性的水土保持措施、减缓或避免土壤侵蚀过程所导致的土壤有机碳损失,对稳固和提高黑土区的碳汇能力、缓解全球气候变化具有重要意义。

表 6 2000—2019 年不同土地利用类型侵蚀强度面积占比
Table 6 Area proportion of erosion intensity of different land use types during 2000—2019

年份	侵蚀类型	侵蚀强度面积占比/%					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000	微度	52.69	1.93	2.88	2.02	3.11	3.46
	轻度	23.49	1.74	1.32	0.82	1.18	2.99
	中度	0.70	0.70	0.07	0.08	0.02	0.41
	强烈	0.10	0.13	0.02	0.01	0	0.06
	极强烈	0.01	0.03	0	0	0	0.01
	剧烈	0.01	0.01	0	0	0	0
2010	微度	60.33	2.14	3.24	2.58	3.51	3.82
	轻度	16.15	1.96	0.97	0.23	0.78	2.55
	中度	0.34	0.34	0.03	0.02	0.01	0.11
	强烈	0.05	0.06	0.01	0.01	0	0.01
	极强烈	0.01	0.01	0	0	0	0
	剧烈	0	0	0	0	0	0
2015	微度	61.92	2.22	3.21	2.59	3.64	3.93
	轻度	14.71	1.97	0.99	0.21	0.72	2.41
	中度	0.25	0.29	0.03	0.02	0.01	0.08
	强烈	0.02	0.02	0	0	0	0.01
	极强烈	0	0	0	0	0	0
	剧烈	0	0	0	0	0	0
2019	微度	55.41	1.93	2.93	0.87	3.49	5.42
	轻度	20.86	1.84	1.37	0.10	1.13	3.15
	中度	0.44	0.49	0.07	0.01	0.01	0.26
	强烈	0.06	0.09	0.02	0	0	0.03
	极强烈	0.01	0.01	0	0	0	0
	剧烈	0	0	0	0	0	0

4 结 论

(1)研究区土壤侵蚀强度整体呈北高南低的分布格局,并以微度侵蚀为主;2000—2019 年典型黑土区微度侵蚀面积占比上升趋势不显著,轻度及以上程度的侵蚀面积占比则整体表现出降低态势;研究期间有 87.91%的区域侵蚀强度等级未发生明显变化,仅有 3.74%的区域侵蚀强度等级升高。

(2)研究区 2015—2019 年土壤有机碳流失问题加剧,土壤有机碳流失强度 $\leq 5\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的区域面积占比下降,而流失强度 $\geq 5\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的区域面积占比上升,导致土壤有机碳年平均流失强度增大。研究区土壤侵蚀强度及土壤有机碳的空间分布格局整体均为北高南低,北部地区富含有机碳的表层土壤在遭受侵蚀作用时释放的有机碳总量相对较大。

(3)土壤有机碳流失空间分布差异明显,总体呈北高南低的分布特征。研究期间平均土壤有机碳流

失强度为 $4.74\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$;2010—2019 年土壤有机碳流失总量呈增大趋势,其中北安市流失量最大,占研究区总流失量的 37.00%;土壤有机碳流失强度的加剧趋势在北部区域更为显著。

(4)典型黑土区土壤有机碳流失强度与土壤侵蚀强度存在显著的正相关($R^2=0.95,p=0.02$);研究区侵蚀性有机碳的流失虽低于我国平均水平,但高于全球水平,且流失强度有增大的趋势。

参考文献:

[1] STARR G C, LAL R, MALONE R, et al. Modeling soil carbon transported by water erosion processes[J]. Land Degradation and Development, 2000, 11(1): 83-91.

[2] 韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学, 2018, 38(7): 1032-1041.

HAN X Z, LI N. Research progress of black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1032-1041.

- [3] 中华人民共和国水利部.中国水土保持公报(2023年)[R/OL]. [2024-03-31]. <http://www.mwr.gov.cn/zzsc/tjgb/zgstbegb/2023/mobile/index.html>. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (2023) [R/OL]. [2024-03-31]. <http://www.mwr.gov.cn/zzsc/tjgb/zgstbegb/2023/mobile/index.html>.
- [4] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298 (5870):156-159.
- [5] WAN Y F, LIN E D, XIONG W, et al. Modeling the impact of climate change on soil organic carbon stock in upland soils in the 21st century in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 141(1/2):23-31.
- [6] 阎百兴, 汤洁. 黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J]. *地理研究*, 2005, 24(4):499-506.
- YAN B X, TANG J. Study on black soil erosion rate and the transformation of soil quality influenced by erosion[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(4):499-506.
- [7] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4):88-90.
- JIA S W, HE X B, CHEN Y M, et al. Effect of soil erosion on soil organic carbon loss on the loess hilly areas [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4):88-90.
- [8] 郭太龙, 谢金波, 孔朝晖, 等. 华南典型侵蚀区土壤有机碳流失机制模拟研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(8):1266-1273.
- GUO T L, XIE J B, KONG C H, et al. Experimental study on soil organic carbon loss in red soil erosion under different simulated rainfall intensity and slope gradient[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(8):1266-1273.
- [9] BUTMAN D, STACKPOOLE S, STETS E, et al. Aquatic carbon cycling in the conterminous United States and implications for terrestrial carbon accounting [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(1):58-63.
- [10] 梁爱珍, 张延, 陈学文, 等. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. *地理科学*, 2022, 42(8):1325-1335.
- LIANG A Z, ZHANG Y, CHEN X W, et al. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(8):1325-1335.
- [11] 梁春林, 王彬, 张文龙. 东北黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与结构特征[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2020, 18(6):43-52.
- LIANG C L, WANG B, ZHANG W L. Stability and structural characteristics of soil aggregates on sloping farmland in black soil region, Northeast China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(6):43-52.
- [12] 张甘霖, 翟瑞常, 辛刚, 等. 中国土系志—黑龙江卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2020:51-317.
- ZHANG G L, ZHAI R C, XIN G, et al. Soil series of China-Heilongjiang[M]. Beijing: Science Press, 2020:51-317.
- [13] WANG B, ZHENG F L, GUAN Y H. Improved USLE-K factor prediction: A case study on water erosion areas in China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2016, 4(3):168-176.
- [14] XIE Y, YIN S Q, LIU B Y, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535(3):547-558.
- [15] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5):105-110.
- FU S H, LIU B Y, ZHOU G Y, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5):105-110.
- [16] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2):19-24.
- CAI C F, DING S W, SHI Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14(2):19-24.
- [17] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1):28-38.
- ZHAO M S, LI D C, ZHANG G L, et al. Evaluation of soil erosion and soil nutrient loss in Anhui Province based on RUSLE model [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1):28-38.
- [18] HAN J Q, PAN Y W, XIAO P Q, et al. Quantifying the effects of climate change and revegetation on erosion-induced lateral soil organic carbon loss on the Chinese Loess Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(7):e1775.
- [19] CAO Z X, CHEN Z J, GAO J M, et al. Comparisons of soil organic carbon enrichment and loss in sediments among red soil, black soil, and loess in China[J]. *SN Applied Sciences*, 2022, 4(10):1-14.
- [20] 《第一次全国水利普查成果丛书》编委会. 水土保持情况普查报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- Editorial Board of the National First Water Census Series of Publications. Report on the national census of soil and water conservation[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2017.
- [21] 黑龙江省水利厅. 黑龙江省水土保持公报(2019)[EB/OL]. <http://stbcbx.alljournal.com.cn>

- OL].(2020-12-17)[2024-03-20]. http://slt.hlj.gov.cn/slt/c114113/202109/c00_30985822.shtml.
- Heilongjiang Provincial Department of Water Resources. Annual report on soil and water conservation in Heilongjiang Province (2019) [EB/OL]. (2020-12-17) [2024-03-20]. http://slt.hlj.gov.cn/slt/c114113/202109/c00_30985822.shtml.
- [22] 彭双云,杨昆,洪亮,等.基于 USLE 模型的滇池流域土壤侵蚀时空演变分析[J].农业工程学报,2018,34(10):138-146.
- PENG S Y, YANG K, HONG L, et al. Spatio-temporal evolution analysis of soil erosion based on USLE model in Dianchi Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 138-146.
- [23] 中华人民共和国水利部.黑土区水土流失综合防治技术标准: SL 446—2009[S].北京:中国水利水电出版社,2009.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical standard for comprehensive prevention and control of soil erosion in black soil areas: SL 446—2009 [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2009.
- [24] 彭云刚,卢文宇.近 40 年黑龙江省土地利用变化及其驱动力分析[J].城市勘测,2024(1):119-123.
- PENG Y G, LU W Y. Analysis of land use change and its driving forces in Heilongjiang Province in recent 40 years[J]. Urban Geotechnical Investigation and Surveying, 2024(1): 119-123.
- [25] 黑龙江省统计局.2019 黑龙江统计年鉴[EB/OL]. (2020-01-20) [2024-03-22]. https://tjj.hlj.gov.cn/tjj/c106782/202001/c00_30326302.shtml.
- Heilongjiang Bureau of Statics. Heilongjiang statistical yearbook [EB/OL]. (2020-01-20) [2024-03-22]. https://tjj.hlj.gov.cn/tjj/c106782/202001/c00_30326302.shtml.
- [26] 泮雪芹,于兴修,孟晓云.云蒙湖流域土地利用变化对土壤侵蚀的影响[J].土壤通报,2013,44(4):793-798.
- PAN X Q, YU X X, MENG X Y. Effects of structural changes land use on soil erosion in the Yunmeng Lake watershed[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(4): 793-798.
- [27] 陈正发,龚爱民,宁东卫,等.基于 RUSLE 模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J].水土保持学报,2021,35(6):7-14.
- CHEN Z F, GONG A M, NING D W, et al. Characteristics of soil erosion and nutrient loss in Yunnan Province based on RUSLE model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 7-14.
- [28] 张孝存,郑粉莉,安娟,等.典型黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质和氮的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):182-186.
- ZHANG X C, ZHENG F L, AN J, et al. Effects of soil erosion on soil organic matter and nitrogen in sloping farmland in typical black soil region [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 182-186.
- [29] 方海燕,盛美玲,孙莉英,等.¹³⁷Cs 和 ²¹⁰Pb_{ex} 示踪黑土区坡耕地土壤侵蚀对有机碳的影响[J].应用生态学报,2013,24(7):1856-1862.
- FANG H Y, SHENG M L, SUN L Y, et al. Using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} to trace the impact of soil erosion on soil organic carbon at a slope farmland in the black soil region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 1856-1862.
- [30] 裴会敏,许明祥,李强,等.侵蚀条件下土壤有机碳流失研究进展[J].水土保持研究,2012,19(6):269-274.
- PEI H M, XU M X, LI Q, et al. Advances in soil organic carbon losses under erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(6): 269-274.
- [31] MAEDA E E, PELLIKKA P K E, SILJANDER M, et al. Potential impacts of agricultural expansion and climate change on soil erosion in the Eastern Arc Mountains of Kenya[J]. Geomorphology, 2010, 123(3/4): 279-289.
- [32] YUE Y, NI J R, CIAIS P, et al. Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO₂ flux induced by water erosion in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(24): 6617-6622.
- [33] NAIPAL V, CIAIS P, WANG Y L, et al. Global soil organic carbon removal by water erosion under climate change and land use change during AD 1850—2005[J]. Biogeosciences, 2018, 15(14): 4459-4480.