

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.024

马瑞, 田芷源, 赵艳, 等. 东北黑土典型水蚀区农田侵蚀与退化特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 71-81.

MA Rui, TIAN Zhiyuan, ZHAO Yan, et al. Characteristics of erosion and degradation for farmlands in the typical water erosion area of the black soil region, Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 71-81.

东北黑土典型水蚀区农田侵蚀与退化特征

马瑞^{1,2}, 田芷源¹, 赵艳^{1,2}, 武逸杭^{1,2}, 梁音¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展重点实验室, 南京 211135; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 量化评价东北黑土区土壤侵蚀退化程度, 有助于不同地区因地制宜地布设阻控措施。[方法] 以东北黑土典型水蚀区农田为研究对象, 采用铯-137 (¹³⁷Cs) 示踪技术量化不同样点的土壤侵蚀速率 (SER)。基于黑土退化“变薄”“变瘦”“变硬”3 大类问题, 分别选择 SER、pH、有机质 (SOM)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK) 和容重 (BD) 等 7 个代表性指标, 采用全数据集 (TDS) 和模糊隶属度函数构建土壤退化指数 (SDI)。[结果] (1) 不同样点的平均 SER 表现为宾县 [BX, 8 417.86 t/(km² · a)] > 海伦 [HL, 7 083.96 t/(km² · a)] > 公主岭 [GZL, 3 168.71 t/(km² · a)] > 北安 [BA, 2 786.09 t/(km² · a)] > 龙江 [LJ, 2 722.46 t/(km² · a)], 其中 BX 和 HL 属于强烈侵蚀, GZL、BA 和 LJ 属于中度侵蚀; (2) SER 与 SOM、TN、TP 呈显著负幂函数关系, 而与 BD 呈显著正对数关系 ($p < 0.05$), R^2 为 0.222~0.532, 表明土壤侵蚀显著加剧黑土养分流失和土层硬化; (3) 黑土农田“变薄”“变瘦”“变硬”之间存在相互影响, SDI 表现为 BX (0.44) > HL (0.36) > LJ (0.21) > GZL (0.10) > BA (0.05)。[结论] 研究结果可为东北黑土区侵蚀退化诊断评价和精准防治提供科学支撑。

关键词: 黑土; 土壤退化; ¹³⁷Cs; 土壤质量; 全数据集

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0071-11

Characteristics of Erosion and Degradation for Farmlands in the Typical Water Erosion Area of the Black Soil Region, Northeast China

MA Rui^{1,2}, TIAN Zhiyuan¹, ZHAO Yan^{1,2}, WU Yihang^{1,2}, LIANG Yin¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Quantitatively evaluating the magnitude of soil erosion and degradation in the black soil region of Northeast China, can deliver benefits to accurately implement conservation practices in different areas. [Methods] The farmlands in the typical water erosion area of the black soil region of Northeast China were taken as the research objects, and the caesium-137 (¹³⁷Cs) tracing method was applied to quantify soil erosion rate (SER) for different sampling sites. Based on the three categories of black soil degradation, i.e., thinner, poorer, and harder, seven representative indicators were selected, including SER, pH, soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), and bulk density (BD). A soil degradation index (SDI) was developed by using total dataset (TDS) and fuzzy membership function methods. [Results] (1) The average SER for different sites displayed an order of Bin County [BX, 8 417.86 t/(km² · a)] > Hailun [HL, 7 083.96 t/(km² · a)] > Gongzhuling [GZL, 3 168.71 t/(km² · a)] > Beian [BA, 2 786.09 t/(km² · a)] > Longjiang [LJ, 2 722.46 t/(km² · a)]. According to the SER, BX and HL were classified as the intense erosion degree, whereas GZL, BA and LJ were classified as the moderate erosion degree; (2) There were significant and negative power function relationships between SER and SOM, TN, TP, but a significant and positive logarithmic relationship between SER and BD ($p < 0.05$), with R^2

收稿日期: 2024-04-01 修回日期: 2024-06-11 录用日期: 2024-06-19 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-03

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500801); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA28010202)

第一作者: 马瑞 (1996—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀退化研究。E-mail: marui@issas.ac.cn

通信作者: 田芷源 (1991—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀退化与制图研究。E-mail: tianzhiyuan@issas.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

ranging from 0.222 to 0.532, which indicated that soil erosion substantially exacerbates nutrient loss and soil hardening in black soils; (3) The processes of thinner, poorer, and harder showed significant interactions in the farmlands of black soils. The SDI for different sites followed an order of BX (0.44) > HL (0.36) > LJ (0.21) > GZL (0.10) > BA (0.05). [Conclusion] The findings can provide scientific support for the diagnosis, evaluation and accurate mitigation of soil erosion and degradation in the black soil region of Northeast China.

Keywords: black soils; soil degradation; ^{137}Cs ; soil quality; total dataset

Received: 2024-04-01

Revised: 2024-06-11

Accepted: 2024-06-19

Online(www.cnki.net): 2024-09-03

东北黑土区是全球四大黑土区之一^[1],是我国重要的商品粮生产基地^[2]。然而受多种自然和人为因素的综合影响,黑土区水土流失严重,2022年水土流失面积高达21.15万 km^2 ^[3]。黑土区地处我国高纬度冷凉区,侵蚀环境相对独特,区域内存在水力、风力和冻融等多种侵蚀营力。其中水力侵蚀分布广、强度高、影响大,是黑土区的主要侵蚀类型^[4]。

土壤退化是水土流失的必然结果^[5]。前人将黑土区的退化问题总结为“变薄、变瘦、变硬”3个方面^[6]。“变薄”是指黑土层在土壤侵蚀的作用下逐渐消失。据调查^[5],黑土正以3~10 mm/a 的速率流失,一些地区的黑土层甚至已流失殆尽,黄土状母质出露,呈现“破皮黄”^[7]。“变瘦”是指黑土有机质质量分数减少,养分供应能力下降。自上世纪大规模开垦以来,长期的“重用轻养”式管理导致黑土有机质质量分数显著降低^[8]。东北黑土区86%的旱地为坡耕地,均存在不同程度的水土流失,侵蚀剥离表土的同时也造成有机质和养分流失,因此,土壤侵蚀也是黑土“变瘦”的关键驱动因素^[9]。“变硬”是指黑土体积质量增加,孔隙减少,通透性和蓄水保肥能力变差。农机的长期压实是造成黑土“变硬”的主要因素^[10]。土壤侵蚀导致表层松软的黑土层流失,质地黏重的底土层上移,也加剧黑土“变硬”^[11]。可见,土壤侵蚀不仅主导黑土“变薄”,也驱动黑土“变瘦”和“变硬”,从而加速黑土退化。

目前,针对黑土退化已开展大量研究^[7,12-14]。纵观前人^[7,12]研究成果,大多采用模糊隶属度函数,通过构建土壤质量指数(SQI)来评价黑土退化程度。这些研究综合考虑黑土退化的“变瘦”和“变硬”指标,但鲜有纳入“变薄”指标,可能导致评价结果相对局限。针对“变薄”指标,最直接的方法是采用黑土层厚度来确定“变薄”程度。现有鉴定黑土层厚度的方法,通常采用黑土层和母质层的颜色分界来判断^[7],但此方法过于主观。有学者^[15-16]采用美国土壤系统分类中对暗沃表层(mollic epipedon)的定义来确定黑土层厚度,但该方法费时费力,成本较高。因此亟须一种可快速获取的界定黑土“变薄”的指标。铯-137(^{137}Cs)是

一种放射性核素,由于其性质稳定,能与土壤颗粒同步迁移,因此能反映土壤再分布状况^[17]。近年来, ^{137}Cs 示踪技术在黑土区应用广泛,在坡面尺度^[9,18-20]、流域尺度^[21-24]、区域尺度^[25-26]上均能较准确地量化土壤侵蚀-沉积情况及分布。并且基于 ^{137}Cs 推算的土壤侵蚀速率与黑土层厚度呈显著负相关关系^[20,27],即土壤中的 ^{137}Cs 容量越低,侵蚀越严重,黑土层越薄。因此,基于 ^{137}Cs 推算的土壤侵蚀速率可作为黑土“变薄”指标,以阐明黑土侵蚀与退化状况。然而目前,鲜有研究将土壤侵蚀速率纳入黑土退化评价体系中。鉴于此,本研究以东北黑土典型水蚀区的5个代表性样点为研究对象,采用 ^{137}Cs 技术量化土壤侵蚀强度,阐明侵蚀对土壤质量评价指标的影响,系统性评价不同样点的土壤退化状况,以期在黑土区侵蚀退化防治提供科学支撑。

1 材料与方法

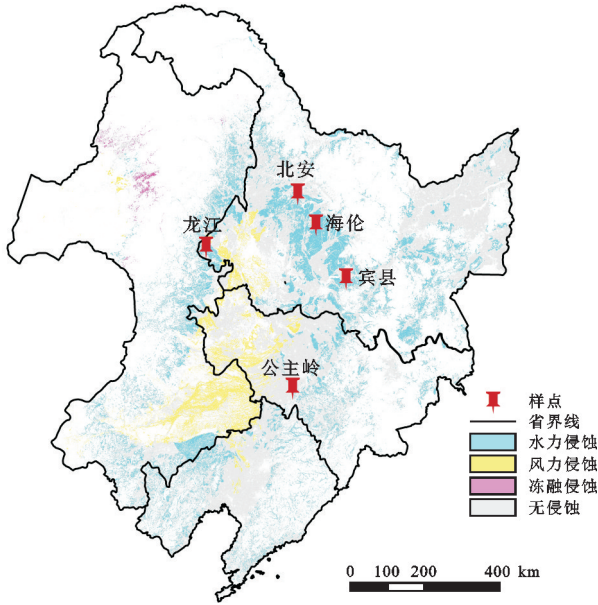
1.1 研究区概况

东北黑土区位于我国高纬度的冷凉区^[2],气候类型属于温带大陆性季风气候,自北向南气温逐渐增加,年平均气温-6~8 $^{\circ}\text{C}$;降水自西向东逐渐增加,年降水量350~700 mm ,其中约60%的降水集中在夏季^[25]。本研究基于全国第二次水土流失遥感调查的1:10万土壤侵蚀强度分级图,通过叠加欧洲航天局2020年发布的10 m 分辨率土地利用类型分布图(<https://esa-worldcover.org/>),划定出发生水蚀的农田分布范围,并根据实地调查情况和样点代表性原则,最终选取黑龙江省北安市(BA)、海门市(HL)、宾县(BX)、龙江县(LJ)和吉林省公主岭市(GZL)开展样点调查(图1),各样点的土壤类型为黑土和黑钙土,均属于典型黑土范畴^[28],基本信息见表1。

1.2 土样采集与测试分析

为明确典型水蚀区的农田侵蚀与退化特征,在每个地区选取3~5个景观相似、耕作制度相同的坡耕地,同时在坡耕地附近,通过询问当地农民或技术人员,选择1块未受侵蚀和耕作扰动的林地作为对

照。为使样点具有代表性,每个耕地样点均布设在坡中位置。



注:图中的图斑为农田分布范围。

图 1 研究区样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the study area

于 2022 年 9 月和 2023 年 9 月开展土壤样品采集工作。在各采样位置,按照“三角布点法”布设 3 个 10 m×10 m 的样方。在每个样方中心位置,采用不锈钢土钻采集 0—20 cm 土层散土样,置于自封袋中均匀混合制成散土样,用于土壤有机质和养分测定。

在采样点相邻位置,采用 100 cm³ 不锈钢环刀采集 0—20 cm 土层的原状土样,带回室内测定土壤体积质量。为测定土壤¹³⁷Cs 容量,在每个样点中心位置采用不锈钢土钻,按 10 cm 的间隔分别采集 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 土层的土样,相同土层样品置于自封袋中混合均匀。由于林地的¹³⁷Cs 相对丰富^[9],因此在林地分别采集 0—5, 5—10, 10—15, 15—20, 20—30, 30—40 cm 土层的土样。根据前人^[29]在东北黑土区的研究成果,¹³⁷Cs 集中分布在 0—30 cm 的土层中。因此,本研究设置的采样深度能较准确地反映各样点的¹³⁷Cs 容量。

散土样带回室内自然风干后分成 2 部分:一部分过 2 mm 筛,按 1 : 2.5 的土水比混合后采用 pH 计测定土壤 pH;另一部分过 0.149 mm 筛,采用重铬酸钾—外加加热法测定土壤有机质(soil organic matter, SOM),采用凯氏定氮法测定全氮(total nitrogen, TN),采用钼锑抗比色法测定全磷(total phosphorus, TP),采用火焰光度计法测定全钾(total potassium, TK)^[30]。环刀原状土样在 105 °C 下烘干至恒重获取土壤体积质量(bulk density, BD)。分层土样带回室内自然风干并过 2 mm 筛,然后置于特制样品盒中(约 300 g),采用 ORTEC 公司生产的低本底高纯锗伽马谱仪(GEM-S8530-LB-C),在 661.67 keV 处测定¹³⁷Cs 峰面积,测定时间设置为 43 200 s^[17]。

表 1 采样地基本概况

Table 1 Basic information of sampling sites

采样地点	经度(E)	纬度(N)	高程/m	年降水量/mm	年平均气温/°C	土壤类型
BA	126°27'24"	48°15'58"	278.8	522.6	1.0	黑土
HL	126°49'05"	47°21'56"	227.3	543.0	1.5	黑土
BX	127°28'55"	45°53'47"	150.2	548.5	3.9	黑土
GZL	124°49'49"	43°34'09"	225.0	572.0	4.5	黑土
LJ	123°05'50"	47°20'23"	242.3	400.0	2.4	黑钙土

1.3 指标计算

铯-137(¹³⁷Cs)是经核试验产生的放射性核素,半衰期为 30.17 年,其通过大气沉降作用进入土壤,能紧密吸附在土壤细颗粒表面,并与土壤颗粒进行同步迁移。因此,通过比较某一点的土壤¹³⁷Cs 容量与该区域¹³⁷Cs 背景值,可推算出该点在中期时间尺度(50~70 年)的平均土壤再分布(侵蚀/沉积)速率^[25]。鉴于此,本文采用¹³⁷Cs 示踪法来估算不同样点的土壤侵蚀速率,土壤¹³⁷Cs 容量的计算公式为:

$$A = \sum_i^n 10C_i BD_i d_i \quad (1)$$

式中:A 为¹³⁷Cs 容量(Bq/m²);n 为土层数量;C_i、BD_i、d_i分别为第 i 层的¹³⁷Cs 活度(Bq/kg)、体积质量

(g/cm³)和深度(cm)。

土壤侵蚀速率(soil erosion rate, SER)基于 ZHANG 等^[31]提出的质量平衡模型进行计算,公式为:

$$R = P \left[1 - \left(\frac{A}{A_0} \right)^{\frac{1}{Y-1963}} \right] \quad (2)$$

$$SER = R \times BD \times 10^4 \quad (3)$$

式中:R 为年均土壤流失厚度(cm/a);P 为耕层厚度(20 cm);A 和 A₀分别为样点的¹³⁷Cs 容量和¹³⁷Cs 背景值(Bq/m²);Y 为采样年份;SER 为土壤侵蚀速率[t/(km²·a)];BD 为土壤体积质量(g/cm³)。

1.4 土壤退化指数

本文从黑土地退化的“变薄”“变瘦”“变硬”3 个

方面综合考虑,分别选取 SER、pH、SOM、TN、TP、TK 和 BD 等 3 大类 7 个指标构建土壤退化指数(soil degradation index, SDI),评价黑土水蚀农田土壤退化程度。其中, SER 指示黑土“变薄”特征, SER 越大,表明土壤侵蚀越严重,黑土层越“薄”。pH、SOM、TN、TP、TK 表征黑土“变瘦”,当 pH 超出适宜区间,或 SOM、TN、TP、TK 越低,表明黑土越来越“瘦”。BD 代表黑土“变硬”特征, BD 越大,表明压实越严重,土壤越“硬”。

SDI 的构建采用全数据集法(total dataset, TDS)^[32],首先采用主成分分析(principal component analysis, PCA)对因子进行降维处理,然后采用模糊隶属度函数计算各样点的土壤质量指数(soil quality index, SQI):

$$SQI = \sum_{i=1}^n m(x_i)w_i \quad (4)$$

式中: n 为指标数量($n=7$); w_i 为第 i 个指标的权重系数,通过 PCA 确定; $m(x_i)$ 为第 i 个指标的标准得分,是 0~1 的无量纲标准化系数,根据评价指标与土壤质量的关系,将与土壤质量呈正相关、负相关和最适区间关系的评价指标分别带入“S”形函数(公式 5)、反“S”形函数(公式 6)和梯形函数(公式 7)计算,计算公式为:

$$m(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \leq a \end{cases} \quad (5)$$

$$m(x) = \begin{cases} 0 & x \geq b \\ \frac{b-x}{b-a} & a < x < b \\ 1 & x \leq a \end{cases} \quad (6)$$

$$m(x) = \begin{cases} 0 & x \geq b \\ \frac{b-x}{b-b_1} & b_1 < x < b \\ 1 & a_1 \leq x \leq b_1 \\ \frac{x-a}{a_1-a} & a < x < a_1 \\ 0 & x \leq a \end{cases} \quad (7)$$

式中: $m(x)$ 为隶属度得分; a 、 b 、 a_1 和 b_1 均为对应指标的临界值。土壤退化指数(SDI)是不同地区无扰动对照林地的 SQI_{ref} 与各样点 SQI_i 的差值,计算公式为:

$$SDI = SQI_{ref} - SQI_i \quad (8)$$

式中:SDI 越大,表明对应样点的退化程度越严重。

1.5 数据处理

统计分析采用 SPSS 22.0 和 R studio 4.2.2 软

件,分别采用 Shapiro-Wilk 法和 Levene's 法进行正态分布检验和方差齐质性检验。采用单因素方差分析(ANOVA)和 Kruskal-Wallis 非参数检验分别对正态分布和非正态分布指标进行差异显著性检验($p < 0.05$)。回归分析和 PCA 采用 SPSS 22.0 软件,结构方程模型(structural equation model, SEM)采用 R studio 4.2.2,附图制作采用 Origin 2024SR1 和 ArcGIS 10.8 软件。

2 结果与分析

2.1 东北黑土典型水蚀区农田侵蚀特征

由表 2 可知,不同样点的平均¹³⁷Cs 活度以 GZL 最高, LJ、HL 和 BA 次之, BX 最低。土壤¹³⁷Cs 容量为 LJ>GZL>BA>HL>BX,其中 BX 的¹³⁷Cs 容量显著低于 GZL 和 LJ($p < 0.05$)。根据 WALLING 等^[33]提出的质量平衡理论,本研究将各样点所在地区的未扰动林地的¹³⁷Cs 容量作为背景值,以计算 SER。经分析测定,各样点的¹³⁷Cs 背景值为 1 611.63~2 372.69 Bq/m²。不同样点的 SER 由高到低为 BX、HL、GZL、BA、LJ。根据 Kruskal-Wallis 非参数检验发现 BX 的 SER 显著高于 LJ($p < 0.05$),且分别是 BA、HL、GZL 和 LJ 的 3.02, 1.19, 2.66, 3.09 倍。根据《土壤侵蚀分类分级标准 SL 190—2007》^[34], BA、GZL 和 LJ 均属中度侵蚀, HL 和 BX 均属于强烈侵蚀,表明 BX 和 HL 的土壤侵蚀状况最严重, BA 和 LJ 的土壤侵蚀程度相对较轻。

2.2 东北黑土典型水蚀区农田土壤理化性质

由表 3 可知,土壤 pH、SOM、TN、TP、TK 和 BD 的平均值分别为 5.68, 27.28 g/kg, 1.37 g/kg, 0.58 g/kg, 21.03 g/kg 和 1.27 g/cm³。本研究采用变异系数(coefficient of variation, CV)来反映样点间的空间变异程度^[35],并将变异程度分为 3 类:弱($CV \leq 15\%$)、中等($15\% < CV \leq 35\%$)、强($CV > 35\%$)。根据上述规则, pH、TK 和 BD 为弱空间变异, TP 为中等空间变异, SOM 和 TN 为强空间变异。表明 SOM 和 TN 对不同地区环境响应敏感,但 pH、TK 和 BD 的响应不敏感。

不同样点间的土壤理化性质见图 2。土壤 pH 为 4.85~6.62,从高到低分别为 HL、BA、LJ、GZL、BX。SOM 为 BA>LJ>HL>GZL>BX 的趋势,且差异显著($p < 0.05$)。其中, BA 的 SOM 分别是 HL、BX、GZL、LJ 的 1.80, 2.62, 1.80, 1.29 倍。TN 呈现出与 SOM 相似的变化趋势,并且 BA 和 LJ 显著高于 BX ($p < 0.05$)。TP 的分布趋势与 SOM 相同且显著($p <$

0.05), BA 的 TP 分别是 HL、BX、GZL、LJ 的 1.35, 1.57, 1.49, 1.17 倍。此外, HL 和 LJ 的 TK 显著高于 BA ($p < 0.05$)。就养分状况而言, BA 具有更丰富的有机质和氮磷质量分数, 养分状况较好, BX 的养分状况最差。

BD 表现出与 SOM 完全相反的趋势, BX 的 BD 显著高于 HL、LJ、BA ($p < 0.05$)。相较于 BX, BA、HL、GZL、LJ 的 BD 分别降低 26.30%, 14.28%, 6.09%, 22.05%。结果表明, BA 土壤结构相对较疏松, 其次是 LJ、HL 和 GZL, BX 土壤“变硬”最严重。

表 3 东北黑土典型水蚀区农田土壤理化性质的描述性统计分析

Table 3 Descriptive statistical analysis of soil physicochemical properties for farmlands in the typical water erosion area of the black soil region, Northeast China

指标	最小值	最大值	中位数	平均值	标准差	CV/%	偏度	峰度	S-W 值	正态分布
pH	4.85	6.62	5.68	5.68	0.45	7.87	0.01	0.11	0.95	T
SOM	15.01	47.47	25.08	27.28	10.32	37.83	0.74	-0.59	0.06	T
TN	0.78	2.57	1.16	1.37	0.57	41.81	0.97	-0.30	0.01	F
TP	0.45	0.86	0.54	0.58	0.12	19.99	0.93	0.39	0.06	T
TK	19.34	22.81	20.99	21.03	1.10	5.24	0.30	-1.14	0.24	T
BD	1.05	1.53	1.28	1.27	0.13	10.29	0.14	-0.75	0.89	T

注: CV 为变异系数; S-W 值为 Shapiro-wilk 正态性检验; T、F 分别表示正态分布和非正态分布; SOM、TN、TP、TK 和 BD 分别为土壤有机质(g/kg)、全氮(g/kg)、全磷(g/kg)、全钾(g/kg)和体积质量(g/cm³)。

2.3 侵蚀对土壤理化性质的影响

由图 3 可知, SOM、TN、TP、BD 受到土壤侵蚀的显著影响, 但 pH 和 TK 对土壤侵蚀的响应不明显。其中, SER 与 SOM、TN、TP 均呈显著幂函数关系 ($p < 0.05$), 随 SER 增大, SOM、TN、TP 先急剧下降后缓慢下降。结果表明侵蚀扰动后, 黑土有机质和氮磷出现陡降现象, 但随着侵蚀不断发展, 侵蚀强度不断提升, 有机质和养分的降幅反而减小并逐渐趋于平缓。SER 与 BD 呈显著对数关系 ($p < 0.05$), 随着 SER 的增大, BD 先急剧增加后缓慢增加, 表明侵蚀加剧黑土坡耕地的“变硬”。

基于上述回归关系发现, SER 与 SOM、TN、TP、BD 呈显著幂函数或对数函数关系, 但 SER 与 pH 和 TK 的关系不明显, 这部分质量退化可能并非由侵蚀主导。因此, 本文将 SER、SOM、TN、TP、BD 作为显变量, 分别生成了指示“变薄”“变瘦”“变硬”的潜变量并构建 SEM(图 4)。模型中, SER 指示“变薄”变量, SOM、TN、TP 指示“变瘦”变量, BD 指示“变硬”变量。模型的 p 值 > 0.05 , 拟合指数(GFI)和相对拟合指数(CFI)分别为 0.893 和 0.980, 表明构建的模型相对可靠^[36]。“变薄”与“变瘦”“变硬”变量均呈显著正向影响 ($p < 0.01$), 表明土壤侵蚀增强和黑土层变薄

表 2 东北黑土典型水蚀区农田¹³⁷Cs 活度、容量和土壤侵蚀速率
Table 2 The activity, inventory of ¹³⁷Cs and the soil erosion rate for farmlands in the typical water erosion area of the black soil region, Northeast China

采样地点	¹³⁷ Cs 活度/ (Bq · kg ⁻¹)	¹³⁷ Cs 容量/ (Bq · m ⁻²)	¹³⁷ Cs 背景值/ (Bq · m ⁻²)	SER/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)
BA	7.33a	820.37abc	1 735.42	2 786.09ab
HL	8.01a	514.03bc	1 611.63	7 083.96ab
BX	4.46a	330.77c	1 969.20	8 417.86a
GZL	11.82a	1 074.49ab	2 266.00	3 168.71ab
LJ	10.11a	1158.00a	2 372.69	2 722.46b

注: SER 为土壤侵蚀速率; 同列不同小写字母表示不同采用地点差异显著 ($p < 0.05$)。

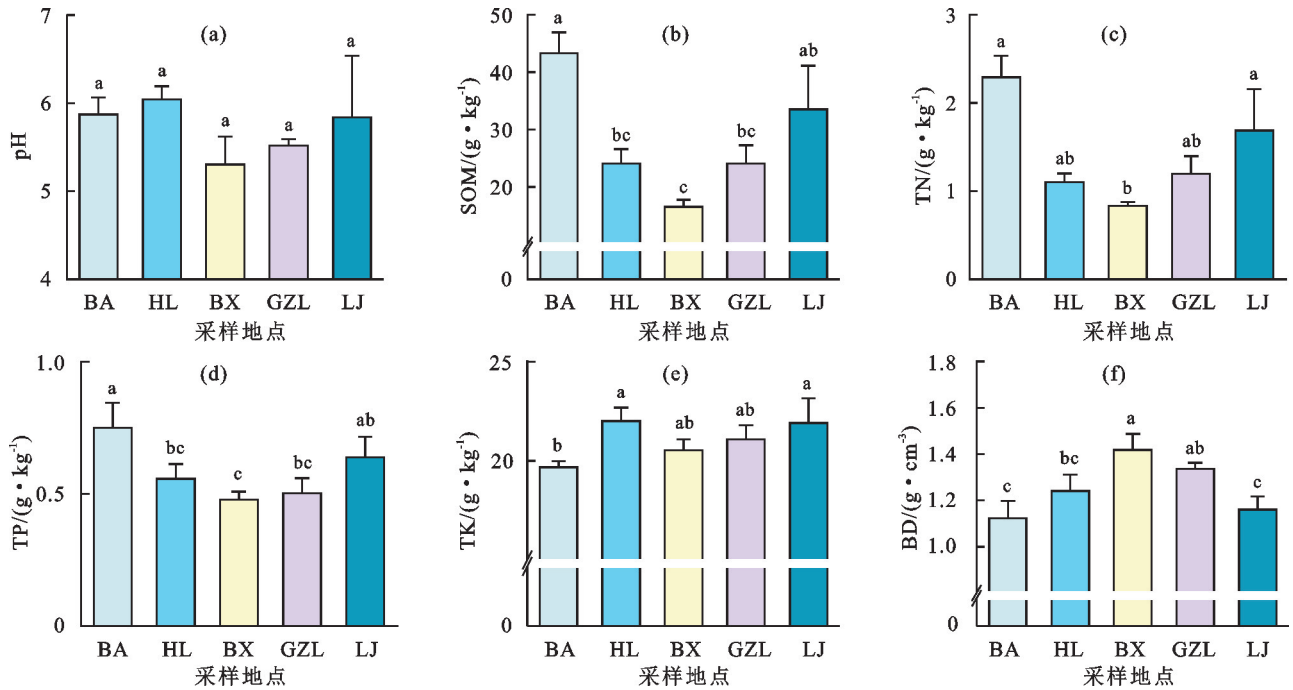
加剧 SOM 和养分流失, 且促进底土出露和土层硬化。反过来, 黑土“变瘦”和“变硬”也加速土壤侵蚀, 从而加速黑土层的流失。“变瘦”与“变硬”变量呈显著正向影响 ($p < 0.01$), 表明黑土养分流失和土层变硬也存在正反馈关系。总体而言, 黑土农田“变薄”“变瘦”“变硬”过程之间存在相互影响, 土壤侵蚀驱动黑土“变薄”过程, 也显著影响黑土“变瘦”和“变硬”过程, 而“变瘦”和“变硬”反过来也显著加速土壤侵蚀, 加剧黑土“变薄”, 使得黑土进一步退化。

2.4 东北黑土典型水蚀区农田侵蚀退化评价

经 PCA 后 7 个指标简化为 2 个主成分(PC), PC1 和 PC2 的累积方差贡献率达到 80.397%, 且特征根均 > 1 , 能反映评价指标的大部分信息(表 4)。其中, PC1 的方差贡献率为 57.451%, 主要包含 SOM、TN、TP、BD 和 SER 的信息。PC2 的方差贡献率为 22.946%, 主要包含 TK 和 pH 的信息。

根据不同指标与土壤质量的关系, SOM、TN、TP 和 TK 选择“S”形函数, SER 选择反“S”形函数, pH 和 BD 选择梯型函数, 分别计算各指标的隶属度得分(表 5)。其中, SER 的上下限参数根据《土壤侵蚀分类分级标准 SL 190—2007》^[34] 分别设置为 200, 5 000 t/(km² · a)。土壤 pH、SOM、TN、TP、TK、

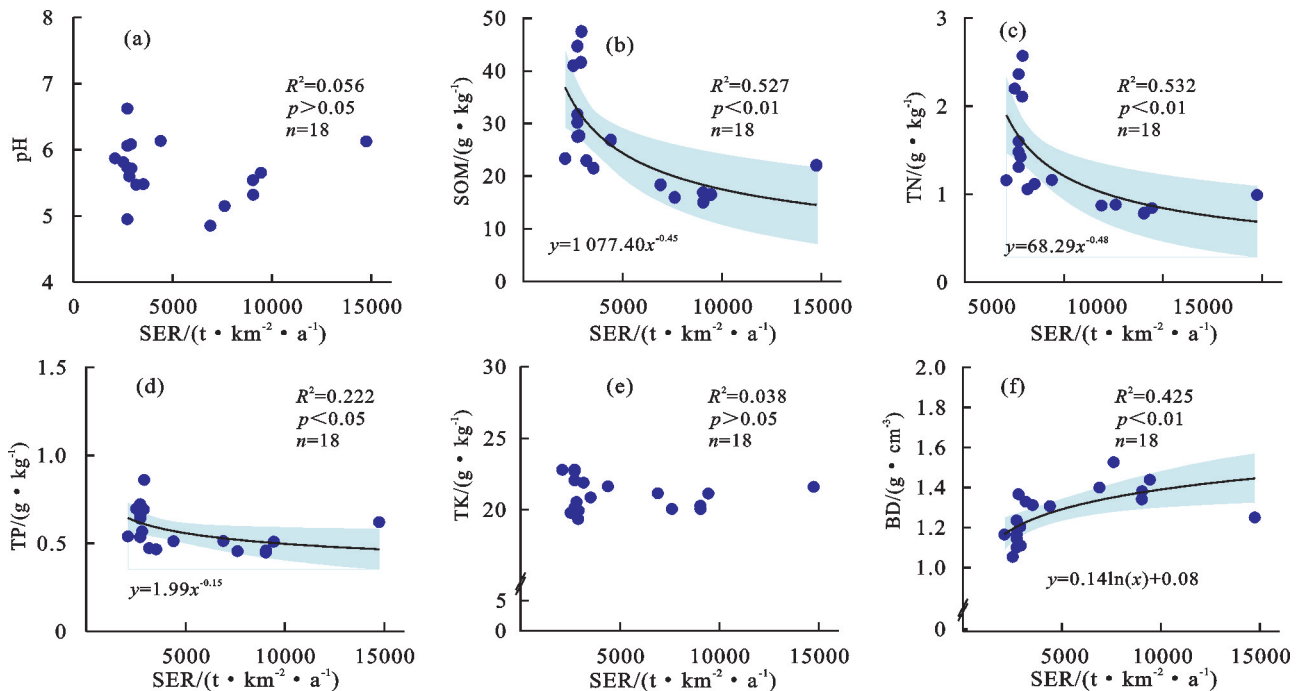
BD 的上下限参数参考前人^[37-38]研究成果和第二次 全国土壤普查标准^[39]。



注：图中不同小写字母表示地区间差异显著($p < 0.05$)；SOM、TN、TP、TK 和 BD 分别为土壤有机质、全氮、全磷、全钾和体积质量(平均值±标准差)。下同。

图 2 东北黑土典型水蚀区农田土壤理化性质的变化特征

Fig. 2 Variations of soil physicochemical properties for farmlands in the typical water erosion area of the black soil region, Northeast China



注：SER、SOM、TN、TP、TK 和 BD 分别表示土壤侵蚀速率、有机质、全氮、全磷、全钾和体积质量。

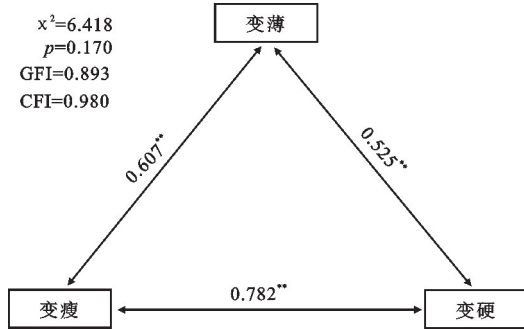
图 3 东北黑土典型水蚀区农田土壤侵蚀速率与土壤理化性质的回归分析

Fig. 3 Regression between soil erosion rate and soil physicochemical properties for farmlands in the typical water erosion area of the black soil region, Northeast China

就权重而言,从高到低为 BD、SOM、TN、pH、TP、SER、TK。

将上述指标的隶属度得分和权重代入公式(4)计算出各样点农田的 SQI,并与对照林地的 SQI_{ref}进行

差减获取 SDI。从图 5 可以看出,不同样点的 SDI 表现为 BX (0.44) > HL (0.36) > LJ (0.21) > GZL (0.10) > BA (0.05)。其中, BX、HL 的 SDI 显著高于 LJ、GZL 和 BA,且 BA 显著低于 LJ ($p < 0.05$)。结果表明, BX 和 HL 的退化程度最高, LJ 仅次于前两者, GZL 和 BA 的退化程度较低。



注:图中 χ^2 、GFI、CFI 分别表示模型卡方值、拟合指数、相对拟合指数; * * 表示因子间影响显著 ($p < 0.01$)。

图 4 采用结构方程模型 (SEM) 分析黑土农田“变薄”“变瘦”“变硬”之间的影响路径

Fig. 4 Influencing path analysis for soil thinner, poorer, and harder in farmlands of black soils using the structural equation model (SEM)

3 讨论

3.1 放射性核素 ¹³⁷Cs 侵蚀示踪法

获取可靠的 ¹³⁷Cs 背景值是准确评估土壤侵蚀的

表 5 土壤质量评价指标的隶属度函数模型、参数和权重

Table 5 The membership function models, critical parameters and weights of soil quality evaluation indicators

评价指标	模型	a	a ₁	b ₁	b	w _i
SER	反“S”形	200.0	—	—	5 000.0	0.14
pH	梯形	5.0	6.5	7.5	9.0	0.15
SOM	“S”形	10.0	—	—	40.0	0.16
TN	“S”形	0.8	—	—	2.0	0.15
TP	“S”形	0.2	—	—	1.0	0.14
TK	“S”形	10.0	—	—	30.0	0.08
BD	梯形	0.7	1.0	1.25	1.55	0.19

注:SER、SOM、TN、TP、TK 和 BD 分别表示土壤侵蚀速率、有机质、全氮、全磷、全钾和体积质量; a、a₁、b₁、b 表示隶属度函数模型参数; w_i 表示指标权重; “—”表示无数值。

经过质量平衡模型计算的东北黑土典型水蚀区农田的 SER 为 2 105.86 ~ 14 750.89 t/(km² · a), 与前人 [9,19,21-23,29,41-42] 计算的 SER 范围相近 (表 6)。其中 BX 和 HL 侵蚀最严重, 平均 SER 分别达到 8 417.86, 7 083.96 t/(km² · a), 属强烈侵蚀。AN 等 [23] 在 BX 某小流域采用 ¹³⁷Cs 示踪法发现, 坡中平均 SER 为 2 853.26 t/(km² · a); 杨育红等 [43] 计算得出, HL 坡耕地坡中平均 SER 约为 7 558.2 t/(km² · a)。本研究在 BX 地区计算的 SER 高于 AN 等 [23] 研究结果, 但在 HL 地区与前人 [43] 研究结果相似, 是由于 AN

关键 [40]。本研究所选取的对照点均是位于坡顶 (BA、LJ) 或平地 (HL、BX、GZL) 的林地, 且通过现场调查和询问当地人员, 所选的林地均长期未受人为扰动, 植被盖度高, 不易发生土壤侵蚀, 因此可以作为 ¹³⁷Cs 背景值采样地。本研究在黑土水蚀区测定的 ¹³⁷Cs 背景值为 1 611.63 ~ 2 372.69 Bq/m²。

表 4 土壤质量评价指标的因子载荷量矩阵

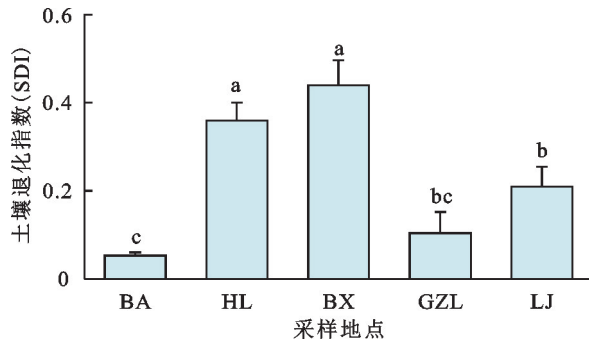
Table 4 Factor loading matrix of soil quality evaluation indicators

评价指标	PC1	PC2
SER	-0.652	-0.162
pH	0.338	0.751
SOM	0.980	-0.150
TN	0.968	-0.218
TP	0.896	-0.172
TK	-0.142	0.901
BD	-0.873	-0.322
特征根	4.022	1.606
方差贡献率/%	57.451	22.946
累积贡献率/%	57.451	80.397

注: PC1 和 PC2 分别为第 1, 第 2 主成分; SER、SOM、TN、TP、TK 和 BD 分别表示土壤侵蚀速率、有机质、全氮、全磷、全钾和体积质量。

等 [23] 研究的小流域内不仅包含耕地, 还有林地等土地利用类型, 由于林地扰动少、盖度高, SER 相对较小, 因此降低小流域尺度的 SER。通过实地调查, BX 样点的黑土层已基本流失, 黄土状母质层出露, 呈现出明显的“破皮黄”现象, 证实 BX 的土壤侵蚀十分严重。BA、GZL 和 LJ 地区的坡耕地均属中度侵蚀 (表 2), 实地调查发现, BA 样点的黑土层相对较厚, 侵蚀状况相对较轻, 因此土壤侵蚀强度属于中度偏轻, 与 ¹³⁷Cs 推算的 SER 结果相近; GZL 样点的平均 SER 约为 3 168.71 t/(km² · a), 与阎百兴等 [42] 在该地区测算的

结果[3 713.60 t/(km² · a)]相似,但略高于 WANG 等^[25]的研究结果[1 704.00 t/(km² · a)];LJ 样点的平均 SER 约为 2 722.46 t/(km² · a),这与莫帅豪^[44]在相邻区域测算的结果[2 432.80~2 871.40 t/(km² · a)]相近。总体而言,采用¹³⁷Cs 示踪法能较准确地反映东北黑土区水蚀农田的侵蚀状况。



注:图柱上方不同小写字母表示地区间差异显著($p < 0.05$);SDI 表示土壤退化指数(平均值±标准差)。

图 5 东北黑土典型水蚀区农田土壤退化指数(SDI)

Fig. 5 Soil degradation index (SDI) for farmlands in the typical water erosion area of the black soil region, Northeast China

3.2 侵蚀对土壤质量的影响

根据漫川漫岗黑土区调查结果显示,土壤侵蚀已成为黑土农田退化的主要驱动因素,是地区农业生产和生态环境最严重的危害^[45]。本研究结果表明,土壤侵蚀显著影响 SOM、TN、TP 和 BD(图 3),加剧黑土质量退化。其中,SOM、TN、TP 均与 SER 呈负幂函数关系,与 SU 等^[17]研究结果相似。土壤侵蚀一

方面破坏土壤结构,削弱土壤物理保护作用,使原本被团聚体包裹的有机质和养分被释放出来,加速其分解和流失;另一方面,由于侵蚀具有选择性,优先剥离土壤细颗粒或微团聚体迁移,从而造成与颗粒结合的有机质和养分流失,最终导致 SOM、TN、TP 减少^[11,46]。HOLZ 等^[47]研究表明,土壤活性 C、N 组分富集在侵蚀泥沙中并优先迁移,导致侵蚀位的活性 C、N 组分减少,而惰性组分相对占比逐渐升高;LI 等^[11]研究发现,黑土 SOM、TN、TP 在扰动发生后的短时间内急剧下降,但长期条件下逐渐趋于稳定,印证了 SOM、TN、TP 随 SER 增大先急剧下降后缓慢下降的现象。在低 SER 环境下,土壤侵蚀选择性明显,SOM 及其活性组分相对丰富,“背景值”较好,因此,SOM、TN、TP 对侵蚀响应敏感,侵蚀增强加剧前者流失。在高 SER 环境中,土壤侵蚀选择性减弱,且 SOM 及其活性组分较少,惰性组分占比上升,“背景值”较差,因此对侵蚀增强的响应相对较弱。SER 与 BD 呈正对数函数关系(图 3f),表明土壤侵蚀促进黑土的变硬,与前人^[11]研究结果一致。土壤侵蚀造成表土流失,质地黏重的底土层出露,进而恶化表层土壤结构,促进 BD 增大。在低 SER 环境下,土层深厚,表土流失较少,BD“背景值”较好,因此对侵蚀增强响应敏感。然而在高 SER 环境下,表土已流失殆尽,底土出露,BD“背景值”较差,因此,侵蚀增强不会造成 BD 继续剧烈上升。土壤 pH、TK 与 SER 关系不显著,可能与人为管理施肥等因素有关。

表 6 东北黑土区发表文献报道¹³⁷Cs 背景值和土壤侵蚀速率(SER)

Table 6 The ¹³⁷Cs inventory and the range of soil erosion rate (SER) reported in published references for the black soil region, Northeast China

研究地区	采样年份	¹³⁷ Cs 背景值/(Bq · m ⁻²)	SER/(t · km ⁻² · a ⁻¹)	参考文献
黑龙江省,克山	2007	2 500.00	-1 517.30~17 131.99	[19]
黑龙江省,嫩江	2010	2 506.00	-17 100~5 680	[22]
黑龙江省,宾县	2014	2 378.40	-3 589~5 107	[23]
黑龙江省,拜泉	2016	1 221.96	-1 849.55~3 668.05	[9]
黑龙江省,嫩江	2022	1 879.70	151~1 575	[29]
吉林省,德惠	2002	2 232.75	-10 606~6 202	[40]
吉林省,九台	2002	2 463.64	3 033.6~3 940.3	[41]
吉林省,长春	2008	2 918.00	453~3 758	[21]

注:表中 SER<0 表示沉积,SER>0 表示侵蚀。

3.3 东北黑土典型水蚀区农田土壤退化分布

本研究采用¹³⁷Cs 侵蚀示踪技术,不仅量化不同样点的土壤侵蚀状况,还基于¹³⁷Cs 技术推算 SER 以表征黑土“变薄”特征。结果表明,SER 能较准确地指示黑土“变薄”特征,且与“变瘦”“变硬”指标之间存在显著影响(图 4)。通过 TDS 和模糊隶属度函数构

建的 SDI 包含“变薄”“变瘦”“变硬”3 类指标的信息,能综合全面地反映黑土退化特征。本研究结果表明,不同样点的 SDI 由高到低为 BX、HL、LJ、GZL、BA(图 5)。与本文作者前期构建的东北黑土区农田侵蚀退化类型空间分布图呈相似分布规律(图 6)。BX、HL、LJ 均位于水蚀退化严重区,BA、GZL 位于

水蚀退化轻微区。其中, BX 和 HL 的土壤退化程度最高, 表现为 SER、BD 较高, SOM、TN、TP 较低。

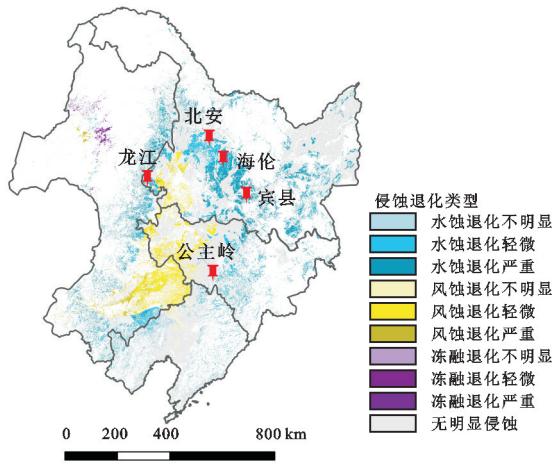


图6 东北黑土区农田侵蚀退化类型空间分布图与样点分布
Fig.6 Spatial distribution of soil erosion-degradation types for farmlands and the distribution of sampling sites in the black soil region, Northeast China

前文提到 BX 的水土流失十分严重, 已表现出明显的“破皮黄”。土壤侵蚀造成黑土层流失, 黄土状母质层出露, 土壤有机质和养分也随之减少, 因此土壤质量发生明显退化^[23]。HL 样点的 SER 略低于 BX, 土壤退化程度也较 BX 相对较低, 与 LIU 等^[20]研究结果一致。对于 LJ, 其 SDI 仅次于 HL 和 BX, 土壤退化也较为严重。虽然 LJ 的土壤侵蚀程度相对较轻, 但由于 LJ 的对照林地土壤质量好 ($SQI_{ref} = 0.89$), SDI 相对较高。通过调查发现, LJ 的开垦历史是所有样点中最长的 (>150 年)。前人^[11,19]研究表明, 土地利用转变主导黑土质量退化, 特别是在轻度侵蚀地区。因此, 长期的开垦导致 LJ 地区的农田发生明显退化。BA 和 GZL 的土壤退化程度显著低于其他地区, 一方面是由于 2 个地区的 SER 较低, 属中度侵蚀; 另一方面, 是因为 BA 和 GZL 的农田样点土壤理化性质与对照林地差异较小, 土壤质量退化程度较低。此外, 调查发现 2 个地区样点均实施保护性耕作措施 (BA 顺坡大垄; GZL 免耕), 这可能进一步阻控土壤侵蚀, 减缓黑土退化^[48]。

在东北黑土区, 应加强保护性耕作措施的实施, 增加有机物料投入, 增加地表覆盖, 同时结合深耕措施, 打破压实土层, 以阻控坡耕地土壤侵蚀, 减缓黑土退化。

4 结论

(1) 采用¹³⁷Cs 示踪法明确东北黑土区典型水蚀农田的土壤侵蚀速率 (SER) 为 2 722.46~8 417.86 t/

($\text{km}^2 \cdot \text{a}$), 其中以宾县 (BX) 和海伦 (HL) 最高, 属强烈侵蚀, 公主岭 (GZL)、北安 (BA) 和龙江 (LJ) 次之, 属中度侵蚀。

(2) 土壤侵蚀显著影响土壤有机质 (SOM)、全氮 (TN)、全磷 (TP) 和体积质量 (BD) ($p < 0.05$), 但对 pH 和全钾影响不显著。随 SER 增大, SOM、TN、TP 先急剧下降后缓慢下降, BD 则呈相反趋势。土壤侵蚀加剧养分流失和土层硬化, 进而加速黑土退化。

(3) 黑土农田“变薄”“变瘦”“变硬”之间存在相互影响, 通过全数据集法和模糊隶属度函数构建土壤退化指数 (SDI) 量化不同样点的土壤退化程度, 表现为 BX 和 HL 的土壤退化程度相对较高, LJ 次之, GZL 和 BA 退化程度相对较低。

参考文献:

- [1] LIU X B, LEE BURRAS C, KRAVCHENKO Y S, et al. Overview of Mollisols in the world: Distribution, land use and management[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(3): 383-402.
- [2] 张兴义, 刘晓冰. 中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 340-344.
ZHANG X Y, LIU X B. Key issues of mollisols research and soil erosion control strategies in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 340-344.
- [3] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报 (2022 年) [R]. 北京, 2023.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Gazette of soil and water conservation (2022) [R]. Beijing, 2023.
- [4] WANG L, ZHENG F L, LIU G, et al. Seasonal changes of soil erosion and its spatial distribution on a long gentle hillslope in the Chinese Mollisol Region[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(3): 394-404.
- [5] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 1-12.
ZHANG G H, YANG Y, LIU Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 1-12.
- [6] 中国科学院. 东北黑土地白皮书 (2020) [R]. 北京, 2021.
Chinese Academy of Sciences. White paper on northeast black land [R]. Beijing, 2021.
- [7] FANG W, ZHONG X M, PENG X H, et al. Soil quality mediates the corn yield in a thin-layer mollisol in Northeast China[J]. Land, 2023, 12(6): e1187.
- [8] WANG X, LI S J, WANG L P, et al. Effects of crop-

- land 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.
- [9] HU W, XU J Z, LI J Y, et al. The effect of soil and water conservation measures on soil organic carbon in a typical small watershed in the Mollisol Region of Northeast China[J]. *Catena*, 2022, 208: e105744.
- [10] 汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 东北黑土地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. *土壤通报*, 2021, 52(3):695-701.
- WANG J K, XU X R, PEI J B, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(3):695-701.
- [11] LI H Q, ZHU H S, QIU L P, et al. Response of soil OC, N and P to land-use change and erosion in the black soil region of the Northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 302: e107081.
- [12] 梅楠, 谷岩, 李德忠, 等. 基于最小数据集的吉林省黑土耕层土壤质量评价[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12):91-98.
- MEI N, GU Y, LI D Z, et al. Soil quality evaluation in topsoil layer of black soil in Jilin Province based on minimum data set[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(12):91-98.
- [13] 许文旭, 杨献坤, 崔斌, 等. 东北黑土区典型坡耕地土层厚度及退化程度分析[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(3):28-36.
- XU W X, YANG X K, CUI B, et al. Analysis of the soil thickness and the degradation degree of the typical slope farmland in the black soil region of Northeast China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(3):28-36.
- [14] 龙凌. 典型黑土区农田土壤质量指数构建与空间分布特性[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- LONG L. Construction and spatial distribution characteristics of soil quality index of farmland in typical black soil area[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [15] 谢云, 高燕, 顾治家, 等. 东北黑土区坡耕地水土流失危险程度评价[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2020, 18(6):105-114.
- XIE Y, GAO Y, GU Z J, et al. Potential hazard assessment of slope farmland soil erosion in black soil region of northeastern China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(6):105-114.
- [16] ZHANG S, LIU G, CHEN S L, et al. Assessing soil thickness in a black soil watershed in Northeast China using random forest and field observations[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(1):49-57.
- [17] SU Z A, WANG L J, LIU Y H, et al. ^{137}Cs tracing of the spatial patterns in soil redistribution, organic carbon and total nitrogen in the southeastern Tibetan Plateau[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2023, 11(1):86-96.
- [18] FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Using ^{137}Cs tracer technique to evaluate erosion and deposition of black soil in Northeast China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(2):201-209.
- [19] HE Y X, ZHANG F B, YANG M Y, et al. Insights from size fractions to interpret the erosion-driven variations in soil organic carbon on black soil sloping farmland, Northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 343: e108283.
- [20] LIU C, LIU G, DAN C X, et al. Variability in mollic epipedon thickness in response to soil erosion - deposition rates along slopes in Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 227: e105616.
- [21] YANG Y H, YAN B X, ZHU H. Estimating soil erosion in Northeast China using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6):706-711.
- [22] FANG H Y, LI Q Y, SUN L Y, et al. Using ^{137}Cs to study spatial patterns of soil erosion and soil organic carbon (SOC) in an agricultural catchment of the typical black soil region, Northeast China[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, 112:125-132.
- [23] AN J, ZHENG F L, WANG B. Using ^{137}Cs technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, Northeast China[J]. *Catena*, 2014, 123:243-251.
- [24] ZHANG J Q, ZHENG F L, LI Z, et al. A novel optimal data set approach for erosion-impacted soil quality assessments: A case-study of an agricultural catchment in the Chernozem Region of Northeast China[J]. *Land Degradation and Development*, 2022, 33(7):1062-1075.
- [25] WANG H, YANG S L, WANG Y D, et al. Rates and causes of black soil erosion in Northeast China[J]. *Catena*, 2022, 214: e106250.
- [26] XIE Y, TANG J, GAO Y, et al. Spatial distribution of soil erosion and its impacts on soil productivity in Songnen typical black soil region[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2023, 11(4):649-659.
- [27] MA R, TIAN Z Y, ZHAO Y, et al. Response of soil quality degradation to cultivation and soil erosion: A case study in a Mollisol Region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 242: e106159.
- [28] 刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J]. *科学通报*, 2021, 66(1):96-106.
- LIU B Y, ZHANG G L, XIE Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(1):

- 96-106.
- [29] JIANG H T, LI X J, WANG Y, et al. Investigating the soil wind erosion in the Black Soil Region of Northeast China based on ¹³⁷Cs Tracer method[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2023, 33(1): 211-224.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [31] ZHANG X B, WALLING D E, HE Q. Simplified mass balance models for assessing soil erosion rates on cultivated land using caesium-137 measurements[J]. Hydrological Sciences Journal, 1999, 44(1): 33-45.
- [32] NABIOLLAHI K, GOLMOHAMADI F, TAGHIZADEH-MEHRJARDI R, et al. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate[J]. Geoderma, 2018, 318: 16-28.
- [33] WALLING D E, HE Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(2): 611-622.
- [34] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.
- [35] LIU Z P, MA D H, HU W, et al. Land use dependent variation of soil water infiltration characteristics and their scale-specific controls [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 139-149.
- [36] ZHANG P P, WANG Y Q, XU L, et al. Factors controlling spatial variation in soil aggregate stability in a semi-humid watershed[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 214: e105187.
- [37] 秦焱. 吉林省黑土肥力质量评价及结构退化机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
QIN Y. Study on mechanism of structure degradation and fertility evaluation of black soil in Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [38] 姜宁, 王斌, 谢永刚. 黑龙江省黑土地质量评价指标体系构建[J]. 中国农学通报, 2021, 37(33): 98-104.
JIANG N, WANG B, XIE Y G. Construction of black soil quality evaluation index system in Heilongjiang Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(33): 98-104.
- [39] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
National Land Resources Investigation Office. Soil General Survey Technology in China[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1992.
- [40] KIRCHNER G. Establishing reference inventories of ¹³⁷Cs for soil erosion studies: Methodological aspects[J]. Geoderma, 2013, 211: 107-115.
- [41] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 利用¹³⁷Cs技术研究黑土坡耕地土壤再分布特征[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 464-468.
FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Redistribution patterns of black soil in hillslope landform of Northeast China: A ¹³⁷Cs study[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3): 464-468.
- [42] 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.
- [43] 杨育红, 阎百兴, 沈波, 等. ¹³⁷Cs示踪技术在黑土区农业非点源污染负荷研究中的应用[J]. 地理科学, 2010, 30(1): 124-128.
YANG Y H, YAN B X, SHEN B, et al. Agricultural nonpoint source pollution loads prediction using caesium-137 tracing technique in black soil region, Northeast China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(1): 124-128.
- [44] 莫帅豪. 典型东北黑土区农地侵蚀对土壤质量的影响评价[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
MO S H. Assessing impacts of soil erosion on soil quality in sloping farmland of Chinese Mollisol region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [45] ZHANG X Y, SUI Y Y, ZHANG X D, et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of Northeast China[J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 19-29.
- [46] FANG H Y. Impacts of rainfall and soil conservation measures on soil, SOC, and TN losses on slopes in the black soil region, northeastern China [J]. Ecological Indicators, 2021, 129: e108016.
- [47] HOLZ M, AUGUSTIN J. Erosion effects on soil carbon and nitrogen dynamics on cultivated slopes: A meta-analysis[J]. Geoderma, 2021, 397: e115045.
- [48] 朱勇, 李建业, 张程远, 等. 长期保护性耕作对坡耕地黑土有机碳组分的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 103-111.
ZHU Y, LI J Y, ZHANG C Y, et al. Effects of long-term conservation tillage on black soil organic carbon components in sloping farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(10): 103-111.