

东北典型厚层黑土区坡耕地侵蚀对土壤质量的影响

梁 瑞, 郑粉莉, 王雪松, 莫帅豪, 王 伦, 盛佳盈, 杨新月

(西北农林科技大学水土保持研究所, 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的] 阐明东北黑土区土壤侵蚀-沉积对坡耕地土壤质量的影响, 可为黑土资源保护和可持续利用提供重要科学依据。[方法] 选取黑龙江省克山县的两块厚层黑土区的坡耕地, 采用 ^{137}Cs 示踪技术估算土壤侵蚀速率, 基于最小数据集方法构建土壤质量评价指标, 分析典型厚层黑土区土壤侵蚀-沉积对坡耕地土壤质量的影响。[结果] 1) 研究区坡耕地土壤侵蚀-沉积速率为 $-1\ 563.2 \sim 7\ 916.1\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 平均侵蚀速率为 $2\ 669.0\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。且土壤侵蚀速率在坡面空间分布上均表现为坡中下部侵蚀强烈, 坡顶和坡中上部为轻度-中度侵蚀, 坡底 50 m 坡段出现沉积, 坡面土壤侵蚀最严重部位分布在 120~170 m 坡段。2) 构建包含土壤黏粒 (Clay)、土壤有机碳 (SOC)、全磷 (TP)、有效氮 (AN)、微生物量碳 (MBC) 和 β -1, 4-葡萄糖苷酶 (BG) 的土壤质量评价最小数据集, 且最小数据集可以替代全数据集, 较真实地反映研究区耕地的土壤质量状况。3) 研究区在侵蚀区的 SQI 与土壤侵蚀速率呈显著负相关 ($p < 0.01$), 而在沉积区的 SQI 与沉积速率呈不显著正相关, 2 块样地侵蚀区的 SQI 较沉积区平均减少 13.3%, 且 SQI 的空间分布与土壤侵蚀速率的空间分布呈相反变化趋势。[结论] 研究区土壤侵蚀是导致坡耕地土壤质量退化的关键驱动力。

关键词: 厚层黑土区; 土壤侵蚀-沉积; 最小数据集; 土壤质量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0147-11

Effects of Soil Erosion on Soil Quality of Slope Croplands in Typical Thick-Layer Black Soil Region of Northeast China

LIANG Rui, ZHENG Fenli, WANG Xuesong, MO Shuaihao, WANG Lun, SHENG Jiaying, YANG Xinyue

(State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Elucidating the effects of soil erosion-deposition on the soil quality of slope croplands in the black soil region of northeast China can provide an important scientific basis for the conservation and sustainable utilization of black soil resources. [Methods] Two slope croplands in the thick-layer black soil areas of Keshan County, Heilongjiang Province, were selected. The ^{137}Cs tracer technique was employed to estimate soil erosion rates. Based on the minimum data set (MDS) method, soil quality evaluation indicators were constructed to analyze the effects of soil erosion-deposition on soil quality in slope croplands of typical thick-layer black soil regions. [Results] 1) The soil erosion-deposition rates of slope cropland in the study area ranged from $-1\ 563.2$ to $7\ 916.1\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, with an average erosion rate of $2\ 669.0\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. Moreover, in terms of spatial distribution, severe erosion occurred in the middle and lower parts of the slope, and mild-moderate erosion occurred at the slope top and in the middle and upper parts. Sediments were deposited in the 50 m section at the slope bottom, and the most severely eroded areas were located in the 120—170 m slope section. 2) MDS for soil quality evaluation was constructed, encompassing soil clay (Clay), soil organic carbon (SOC), total phosphorus (TP), available

收稿日期: 2025-04-18

修回日期: 2025-05-16

录用日期: 2025-05-26

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-07-09

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1500102, 2024YFD1501104)

第一作者: 梁瑞 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀对土壤生产力的影响研究。E-mail: 2022051534@nwfau.edu.cn

通信作者: 郑粉莉 (1960—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

nitrogen (AN), microbial biomass carbon (MBC), and β -1,4-glucosidase (BG). Moreover, the MDS could serve as a substitute for total data set (TDS) and more accurately reflect the soil quality status of croplands in the study area. 3) In the erosion zones of the study area, the soil quality index (SQI) was significantly negatively correlated with soil erosion rates ($p < 0.01$). In the deposition zones, the SQI showed an insignificantly positive correlation with deposition rates. In the two sample plots, the SQI in the erosion zones reduced by 13.3% on average compared to the deposition zones, and the spatial distribution of SQI showed an opposite trend to that of soil erosion rates. [Conclusion] Soil erosion is the key driving force for soil quality degradation of slope croplands in the study area.

Keywords: thick-layer black soil region; soil erosion-deposition; minimum data set; soil quality

Received: 2025-04-18

Revised: 2025-05-16

Accepted: 2025-05-26

Online(www.cnki.net): 2025-07-09

中国东北黑土区是国家最大的商品粮生产基地和国家粮食安全的压舱石^[1-2]。由于近百年高强度垦殖使黑土侵蚀退化严重,当前黑土层厚度正以 0.1~0.5 cm/a 的速率降低^[3],且因土壤侵蚀减少的粮食产量占区域总产量的 14.1%^[4],严重威胁国家粮食安全。

已有研究^[5-6]表明,土壤侵蚀是导致土壤质量退化的关键驱动力,土壤侵蚀直接破坏土壤物理结构,导致土壤有机质和养分流失,进而降低土壤生产力。当前在东北黑土区,耕地侵蚀对土壤物理和化学性质的影响研究取得明显进展^[7-9],但有关耕地坡面侵蚀对土壤生物学性质的影响研究相对较少,尤其是耕地坡面侵蚀对土壤质量退化的影响研究还相对较弱。现有土壤质量评价采用的最普遍方法是土壤质量指数法,其选取的评价指标也主要集中在土壤物理和化学性质方面^[10],鲜有涉及生物学性质指标,尤其在耕地坡面侵蚀对土壤质量退化评价研究中,更少涉及生物学性质指标,在一定程度上不能全面反映耕地土壤侵蚀对土壤质量的影响。当前耕地土壤质量与土壤侵蚀强度的定量关系研究较少,尤其是沉积速率对耕地土壤质量的影响研究鲜有报道,进而限制对耕地土壤退化阻控的精准施策。本研究选取位于典型厚层黑土区的黑龙江省齐齐哈尔市克山县 2 块面积约为 4 hm² 的坡耕地,基于 ¹³⁷Cs 示踪技术估算坡面土壤侵蚀-沉积速率,采用最小数据集的方法(MDS)评价土壤质量,并构建耕地土壤质量与土壤侵蚀的定量关系,阐明土壤侵蚀对耕地土壤质量的影响,助力黑土资源保护和可持续利用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于典型厚层黑土区的黑龙江省齐齐哈尔市克山县(47°50′51″~48°33′47″N, 125°10′57″~126°08′18″E)(图 1),地处小兴安岭西南边缘,松嫩平原腹地,气候类型为寒温带大陆性季风气候,年平

均气温 3.0℃,年平均降水量为 514.9 mm,且集中在 6—8 月。根据当地耕作方式和具有代表性的开垦年限,选取 2 块开垦百年的具有典型性和代表性的坡耕地。研究样地的地势总体呈东北高、西南低的走向,地貌类型以平缓起伏的丘陵为主,地面坡度为 2°~7°。土壤侵蚀强度为 -1 517.3~7 187.4 t/(km²·a)^[11]。农地土壤类型以黑土为主,平均土层厚度 > 60 cm,土壤质地为粉壤土,当地的种植模式多为玉米-大豆轮作,施肥量为 525 kg/hm²,其中,氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的施肥比例为 6:4:3。

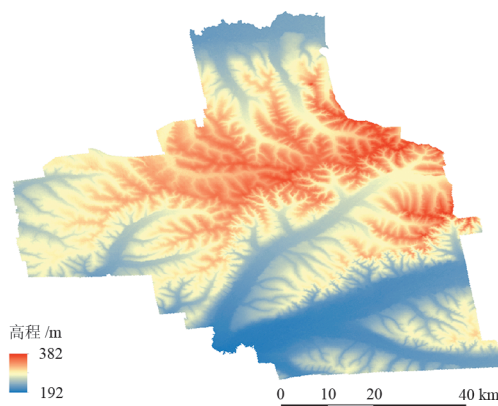


图 1 研究区 DEM

Fig. 1 DEM of study area

1.2 土壤样品采集与测定

1.2.1 土壤样品的采集 选取的 2 块样地面积分别为 4.0 hm²(A 样地)和 4.1 hm²(B 样地)(图 2),其中, A 样地的采样面积为长 200 m×宽 200 m,地势为北高南低; B 样地的采样面积为长 275 m×宽 150 m,地势为西高东低。土壤样品采集于 2022 年 10 月(作物收获后),当年的作物种类均为大豆,施肥量为 525 kg/hm²,其中,尿素 242 kg/hm²、磷酸二氢铵 162 kg/hm²、硫酸钾 121 kg/hm²。根据 2 个样地面积,沿坡面主方向设置 4~5 个样带,每个样带间隔 30~40 m 设置 1 个采样点,采样深度为 20 cm。样地 A 和 B 的采样点分别有 35、30 个,共有 65 个采样点。

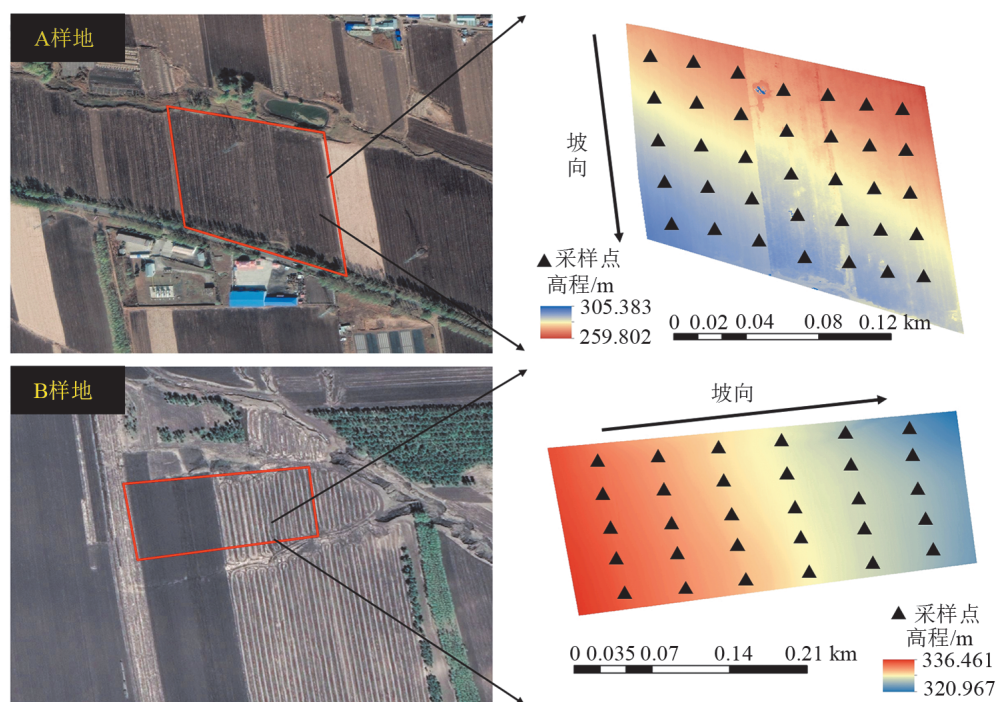


图2 研究样地的土壤采样点分布

Fig. 2 Distribution of soil sampling points in study area

土壤 ^{137}Cs 样品的采集:前人^[12-13]研究表明,东北黑土区土壤中 ^{137}Cs 分布最深不超过50 cm,主要分布范围为30 cm。本研究分别在2块样地的不同坡位(上、中、下)选择2~3个样点,按5 cm深度间隔,分层采集50 cm土壤剖面样品,然后利用 γ 能谱分析仪测定不同深度的土壤 ^{137}Cs 活度。测定结果显示,坡中土壤 ^{137}Cs 分布在30 cm土层深度内,坡上和坡下土壤 ^{137}Cs 分布在40 cm土层深度内,因而确定的坡中样品采集深度为30 cm,坡上和坡下样品采集深度为40 cm。采用网格法采样,在每个网格内按照“Z”形或“S”形取样法采集至少3~4个重复样,并将该网格点的重复样混合均匀装入自封袋。

土壤性质样品的采集:在土壤 ^{137}Cs 采集样点附近,采用“S”形采样法采集3~4个重复样品,采集深度为0~20 cm(耕层)。将采集的重复样品充分混合均匀后,分装到2个自封袋中,一部分放到室外自然风干,一部分则作为土壤鲜样,放置于-20℃冰箱中冷冻保存。

1.2.2 土壤样品的处理与测定 土壤 ^{137}Cs 样品的处理与测定:土壤样品经过风干、去除杂质后,过2 mm筛,称取300 g装入特制样品盒中封存30 d,之后使用ORTEC GMX-50220型高纯锗 γ 能谱分析仪(美国ORTEC公司)测定(误差 $\pm 5\%$,置信度为95%)。

土壤风干样品的处理:样品经自然风干、剔除杂质后,分别过0.25、1、2 mm筛进行研磨,用于测定土

壤颗粒组成和养分质量分数。其中,土壤颗粒组成使用Malvern Mastersizer 2000型激光粒度仪进行测定,土壤有机碳(SOC)采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法测定,土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定,土壤全磷(TP)采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消煮-钼锑抗比色法测定,土壤速效磷(AP)采用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定^[14]。

土壤鲜样品的处理:土壤鲜样过2 mm筛后,放入4℃冰箱进行冷藏,用于检测部分土壤有效态养分、微生物学性质和胞外酶。其中,土壤有效氮(AN,包括铵态氮和硝态氮)采用KCl浸提法测定,土壤微生物生物量碳氮磷(MBC、MBN、MBP)采用氯仿熏蒸法^[15]测定。土壤胞外酶包括 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)、 β -D-纤维素酶(CBH)、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)和酸性磷酸酶(ACP),使用 $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 缓冲液-96微孔酶标板荧光法进行检测,其活性以干土所含每克有机质为单位进行计算。

1.3 土壤侵蚀速率计算

研究区土壤 ^{137}Cs 背景值采用课题组在黑龙江省克山县的研究成果^[16],其值为1 974.6 Bq/m²。土壤 ^{137}Cs 的面积活度和土壤侵蚀速率根据ZHANG等^[17-18]的耕地质量平衡模型计算。在此模型中,若采样点的 ^{137}Cs 浓度小于背景值参考量,则认为该采样点为侵蚀点,反之为沉积点^[19]。

样品的质量活度的计算公式为:

$$a = \frac{AMT}{S} \times \frac{s}{tm} \quad (1)$$

式中: a 为土样质量比活度, Bq/kg; A 为标准源质量比活度, Bq/kg; M 为标准源重量, kg; T 为标准源测量时间; S 为标准源测量净峰面积; s 为土样测量净峰面积; t 为土样测量时间; m 为每盒土样重量, kg。

采样地土壤的面积活度计算公式为:

$$A = a \times \frac{m}{q} \quad (2)$$

式中: A 为土壤面积活度, Bq/m²; a 同公式(1); m 为土样 < 2 mm 重量, kg; q 为采样仪器面积, m²。

采样地土壤流失厚度的计算公式为:

$$R = P \left(1 - \frac{A}{A_0} \right)^{\frac{1}{n-1963}} \quad (3)$$

式中: R 为年土壤流失厚度, m; P 为耕作深度, 20 cm; A 为采样点 ¹³⁷Cs 面积活度, Bq/m²; A_0 为背景值采样点 ¹³⁷Cs 面积活度, Bq/m²; n 为采样年份, 取 2022 年。

按照公式(4)计算土壤侵蚀速率, 正值表示侵蚀, 负值表示沉积:

$$E = R \times \rho \times 10^4 \quad (4)$$

式中: E 为样点土壤侵蚀速率, t/(km²·a); ρ 为土壤密度, g/cm³。

1.4 土壤质量评价方法

1.4.1 土壤数据的 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 和 Bartlett 检验 对选取的 15 项土壤物理、化学和生物学指标进行 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 和 Bartlett 检验。结果表明, 土壤性质指标的 KMO 取样适切性量数为 0.771, 表明土壤指标之间可以进行相关性分析。且在 Bartlett 球形度检验中, 显著性 $p < 0.05$, 拒绝原假设, 说明可以对土壤指标进行主成分分析。

1.4.2 最小数据集 (MDS) 的建立 采用主成分分析法 (PCA), 选取各主成分中因子载荷量, 将因子载荷量绝对值 > 0.5 且 Norm 值大于其最大值 90% 以上的指标, 纳入 MDS, 具体标准为:

1) 若 1 个主成分中, 高因子载荷量指标不止 1 个, 根据指标相关性进一步选取。若指标相关系数 $r < 0.5$, 则全部纳入; 若相关系数 $r > 0.5$, 则存在冗余指标, 采用多变量相关分析进行取舍。

2) 若 1 个主成分中, 只有 1 个高因子载荷指标, 则纳入 MDS。

指标载荷值的计算公式为:

$$N_{jk} = \sqrt{\sum_{i=1}^k u_{ik}^2 \lambda_k} \quad (5)$$

式中: N_{jk} 为 j 指标在特征值 ≥ 1 的前 k 个主成分上的

综合载荷值; k 为特征值 ≥ 1 的主成分个数; U_{ik} 为第 i 个变量在第 k 个主成分上的单因子载荷; λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

1.4.3 评价指标隶属函数 因不同的土壤性质指标对土壤质量的影响比较模糊, 为使评价指标具有可比性, 引入隶属函数, 将不同指标曲线函数转化为折线函数, 便于计算。本研究在计算土壤质量指标隶属度值时, 根据土壤质量指标与土壤质量的正负及适宜性关系, 选取 2 种隶属函数进行计算, 具体为:

前人^[20]研究表明, 土壤质量随土壤黏粒 (Clay)、有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、有效氮 (AN)、速效磷 (AP)、微生物生物量碳氮磷 (MBC、MBN、MBP) 和土壤胞外酶 (BG、CBH、NAG、LAP、ACP) 土壤性质的增加而增加。据此, 按照“S”形隶属函数计算每个指标的隶属值。计算公式为:

$$F(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq a \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 1.0 & x \geq b \end{cases} \quad (6)$$

因土壤质量随土壤粉粒 (Silt) 的增加而减少, 按照反“S”形隶属函数计算土壤粉粒的隶属值。计算公式为:

$$F(x) = \begin{cases} 1.0 & x \leq a \\ 1.0 - 0.9 \times \left(\frac{b-x}{b-a} \right) & a < x < b \\ 0.1 & x \geq b \end{cases} \quad (7)$$

式中: $F(x)$ 为各土壤指标的隶属度值; x 为各指标实测值; a 为实测指标最小值; b 为实测指标最大值。

1.4.4 土壤质量指数计算 土壤质量指标权重值的计算公式为:

$$W_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (8)$$

式中: n 为土壤性质指标的个数; W_i 为第 i 项土壤性质指标的权重系数; F_i 表示第 i 项土壤性质指标的公因子方差。

土壤质量指数 SQI 的计算公式为:

$$SQI = \sum_{j=1}^n W_j F_j \quad (9)$$

式中: n 为土壤质量指标数量; W_j 为第 j 个指标的权重值; F_j 为第 j 个指标的隶属值。

1.5 数据分析方法

使用 Excel 2019 软件进行数据统计处理和计算, 使用 SPSS 27.0 软件进行土壤质量指标统计分析和主成分分析, 使用 Origin 2024 软件进行土壤指标回归性分析和图像制作, 利用 Surfer 软件中的 Kriging 插值法绘制土壤侵蚀和土壤质量空间分布图。

2 结果与分析

2.1 耕地坡面土壤侵蚀-沉积特征

2.1.1 坡面土壤侵蚀-沉积速率 从表1可以看出,土壤¹³⁷Cs示踪估算的坡面土壤侵蚀-沉积速率为-1 563.2~7 916.1 t/(km²·a)(其中,-表示沉积,+表示侵蚀),平均侵蚀速率为2 669.0 t/(km²·a)。

表 1 A和B样地坡面土壤侵蚀-沉积速率

Table 1 Soil erosion-deposition rates on slope surfaces in plots A and B

研究样地	坡位	土壤侵蚀-沉积速率/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)				变异系数/%
		最小值	最大值	平均值	标准差	
A	坡顶	-311.5	4 776.2	2 439.3	811.5	33.3
	坡中上	860.8	6 266.5	3 276.5	519.6	15.9
	坡中下	851.2	7 916.1	4 969.9	617.6	12.4
	坡底	-1 563.2	4 235.5	583.7	693.5	118.8
	全坡面	-1 563.2	7 916.1	2 871.4	2 509.0	87.4
B	坡顶	1 459.4	3 796.9	2 672.6	240.3	9.7
	坡中上	2 226.3	5 096.9	2 749.0	499.6	18.7
	坡中下	342.3	7 169.9	3 592.1	707.5	25.7
	坡底	974.6	1 947.2	-20.2	420.4	208.5
	全坡面	-1 000.5	7 169.9	2 432.8	1 951.9	80.2

A样地坡面平均侵蚀速率为2 871.4 t/(km²·a),B样地坡面的平均侵蚀速率为2 432.8 t/(km²·a),A样地坡面较B样地坡面平均侵蚀速率增加15.3%。A和B样地坡面均在坡底发生沉积,沉积速率分别为-1 563.2、-1 000.5 t/(km²·a)。虽然A样地坡面土壤侵蚀速率及其变异系数略大于B样地坡面,但总体上2个坡面的土壤侵蚀强度等级相同,均为中度侵蚀等级^[21],表明研究区耕地坡面土壤侵蚀较严重。

2.1.2 耕地坡面土壤侵蚀-沉积空间分布特征 由表1和图3可知,A样地和B样地坡面的土壤侵蚀具有相似的空间分布特征,即随着坡长的增加均呈弱-强-弱的变化趋势,土壤侵蚀较强区域集中在坡面中下部,其平均土壤侵蚀速率在A和B样地分别为3 592.0、4 969.9 t/(km²·a);A和B样地的坡顶和中上部侵蚀较轻,其平均土壤侵蚀速率分别为3 110.5、860.8 t/(km²·a)和1 459.5、2 226.3 t/(km²·a)。2块样地坡面坡底处50 m坡长的沉积现象明显,A样地坡面侵蚀最强烈的部位分布在100~150 m坡段,B样地坡面侵蚀最强烈区在120~170 m坡段。表明研究区坡耕地土壤侵蚀重点治理部位处于100~170 m坡长,与前人^[22]基于稀土元素的示踪结果类似。

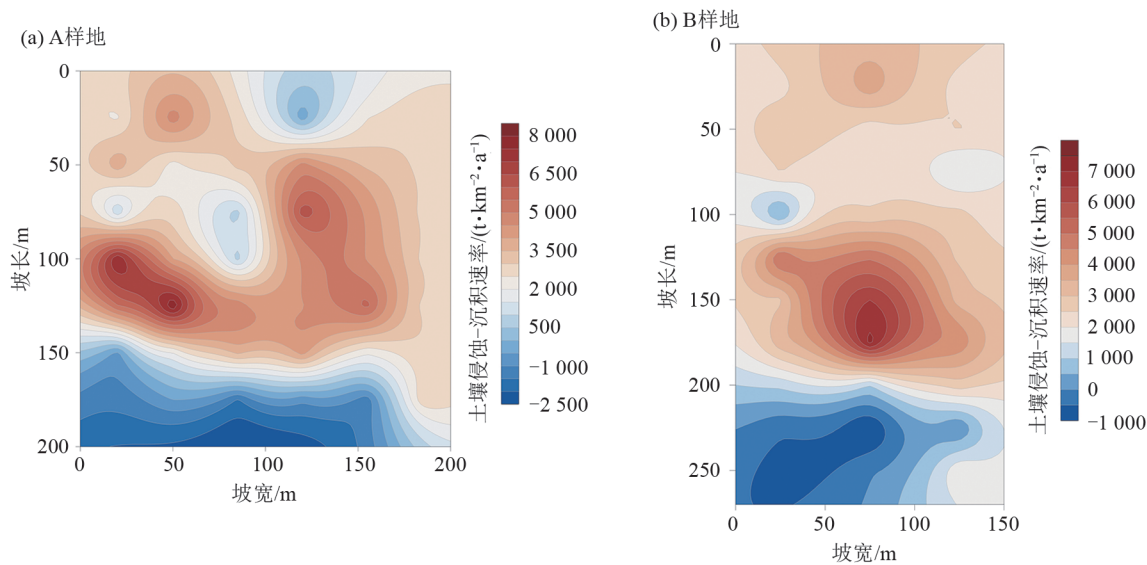


图 3 A和B样地坡面土壤侵蚀-沉积空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil erosion-deposition on slope surfaces in plots A and B

2.2 耕地坡面土壤性质的空间分布

A、B样地的土壤性质在坡面空间分布上有较大差异(图4),在A、B样地中,坡底沉积区的土壤黏粒(Clay)、土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、土壤全磷(TP)和土壤微生物生物量均高于侵蚀区,其中,A样地坡底沉积区坡面的土壤全磷(TP)和速效磷(AP)显著高于其他坡位,而B样地坡底沉积区的土壤微生物生物量碳(MBC)显著高于其他坡位。与土壤侵蚀速率的空间分异相似,A样地坡面土壤性质在

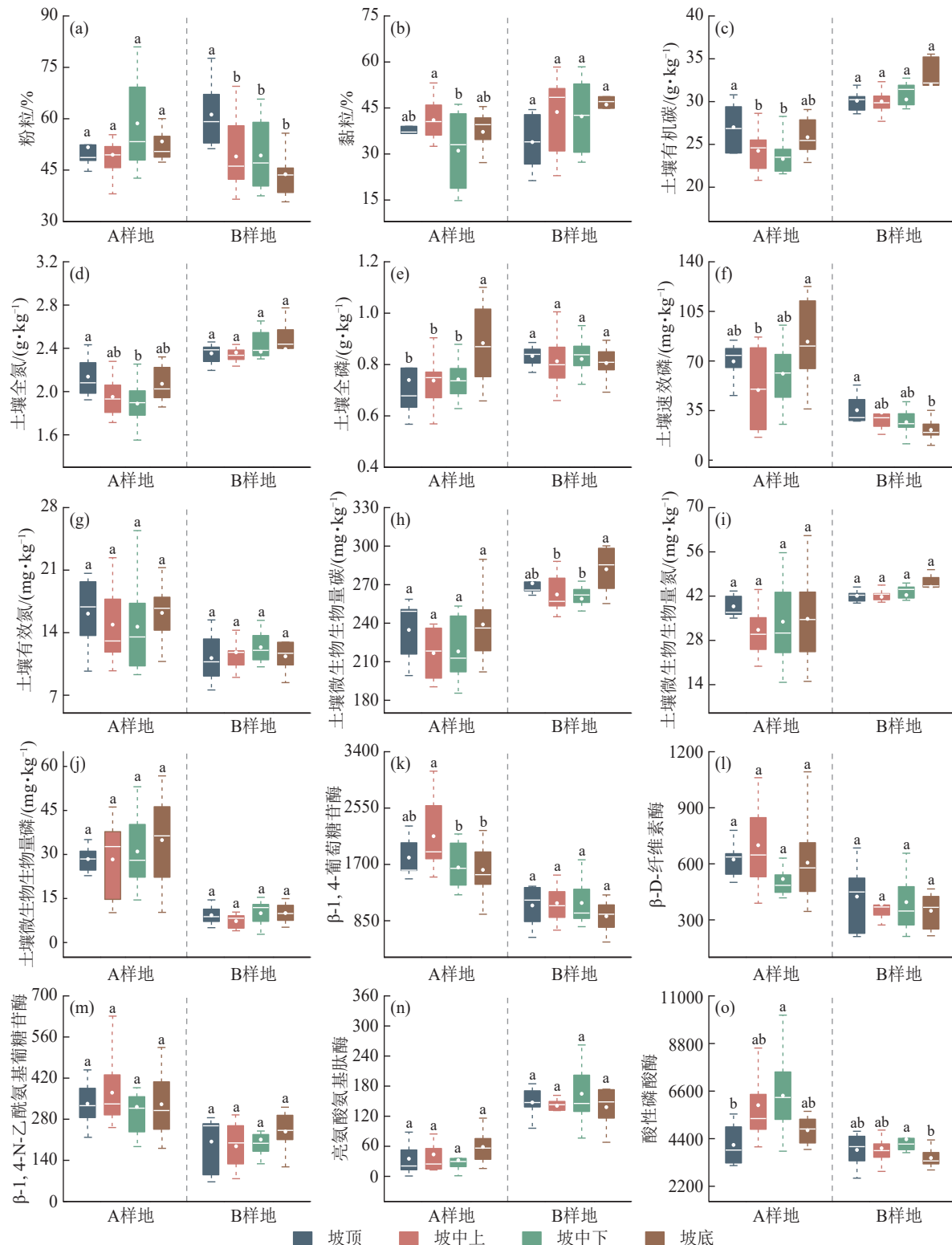
不同坡位的空间分异性大于B样地。表明土壤侵蚀的空间分布对土壤性质的空间分布产生一定影响。

2.3 坡耕地土壤质量评价

2.3.1 基于主成分的最小数据集构建 对15项土壤质量指标进行主成分分析,根据旋转后因子载荷量,5个主成分的特征值均为>1,累计方差贡献率为83.86%,表明5个主成分可解释农耕地坡面土壤属性83.00%以上的信息(表2)。基于土壤质量指标主成分分析结果,结合Norm值,主成分1中,因SOC、TN

与 MBC 之间相关系数 >0.5 , 且考虑 MBC 为生物学指标, 选取 SOC 和 MBC 纳入最小数据集 (MDS)。主成分 2 中, 因 BG 与另外 3 个土壤质量指标的相关系数均 >0.5 , 选取 BG 纳入 MDS。主成分 3 中, 因只有 AN 的 Norm 值大于最大值的 90%, 选取 AN 纳入

MDS。主成分 4 中, 2 个土壤质量指标的相关系数 >0.5 , 考虑黏粒对于土壤团粒结构形成的重要作用, 选取 Clay 纳入 MDS。主成分 5 中, 只有 TP 1 个土壤质量指标被纳入 MDS。最终构建的 MDS 包括 Clay、SOC、TP、AN、MBC、BG, 总计 6 个土壤质量指标。



注: 箱式图置信区间为 25%~75%, 箱体中横线为中值线, 圆点为平均值; 图中不同小写字母表示 A、B 样地坡面在不同坡位上的土壤性质差异显著 ($p < 0.05$)。

图 4 A 和 B 样地土壤性质在坡面上的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil properties on slope surfaces in plots A and B

表 2 土壤质量指标主成分分析
Table 2 Principal component analysis of soil quality indicators

土壤指标	分组	旋转后因子载荷					Norm
		1	2	3	4	5	
Slit	4	-0.102	0.010	-0.012	<u>0.973</u>	0.021	1.397
Clay	4	0.159	-0.075	-0.081	<u>-0.954</u>	-0.009	1.406
SOC	1	<u>0.894</u>	-0.212	-0.241	-0.152	-0.030	1.842
TN	1	<u>0.890</u>	-0.139	-0.221	-0.152	0	1.809
TP	5	0.333	-0.067	0.059	0.092	<u>0.836</u>	1.146
AP	3	0.105	0.394	<u>0.693</u>	-0.123	-0.285	1.418
AN	3	-0.162	0.094	<u>0.799</u>	0.003	0.348	1.373
MBC	1	<u>0.789</u>	-0.227	-0.280	-0.057	0.159	1.654
MBN	1	<u>0.750</u>	-0.089	0.010	-0.053	0.244	1.551
MBP	3	-0.195	0.240	<u>0.749</u>	0.095	0.139	1.354
BG	2	-0.349	<u>0.872</u>	0.188	0.058	-0.043	1.690
CBH	2	-0.087	<u>0.908</u>	0.200	0.046	0.002	1.613
NAG	2	-0.227	<u>0.877</u>	0.169	-0.003	-0.014	1.599
LAP	3	0.482	-0.037	<u>-0.741</u>	-0.093	0.100	1.521
ACP	1	<u>-0.681</u>	<u>0.521</u>	-0.025	0.042	0.226	1.615
特征值		3.834	2.997	2.566	1.983	1.199	—
方差贡献率/%		25.562	19.981	17.104	13.222	7.991	—
累积贡献率/%		25.562	45.543	62.648	75.869	83.861	—

注:加下划线数据表示绝对值>0.5的土壤质量指标载荷值。

2.3.2 全数据集和最小数据集的土壤质量指标的权重确定 对于全数据集(TDS)和最小数据集(MDS),根据公式(8)确定土壤质量指标权重。由表3可知,土壤有机碳(SOC)和微生物生物量碳(MBC)具有较高的权重值。

表 3 TDS和MDS公因子方差及权重

Table 3 Common factor variances and weights for TDS and MDS

土壤指标	公因子方差		权重	
	TDS	MDS	TDS	MDS
Slit	0.975		0.078	
Clay	0.972	0.683	0.077	0.182
SOC	0.928	0.802	0.074	0.213
TN	0.887		0.071	
TP	0.890	0.280	0.071	0.075
AP	0.784		0.062	
AN	0.819	0.578	0.065	0.154
MBC	0.783	0.799	0.062	0.213
MBN	0.638		0.051	
MBP	0.693		0.055	
BG	0.925	0.615	0.074	0.164
CBH	0.871		0.069	
NAG	0.850		0.068	
LAP	0.804		0.064	
ACP	0.760		0.060	

2.3.3 SQI_{MDS}与SQI_{TDS}的相关性分析 根据公式(9)计算基于全数据集(TDS)和最小数据集(MDS)的土壤质量指数(SQI),并分别对A、B样地的总样点数及2块样地所有样点基于TDS和MDS计算的SQI进行回归分析(图5),结果显示,SQI_{MDS}与SQI_{TDS}之间的数据点多分布在1:1线附近和95%水平的置信区间中,说明SQI_{MDS}与SQI_{TDS}相接近。且3组关系式中,SQI_{MDS}与SQI_{TDS}之间存在显著的线性关系($p<0.001$),表明本研究确定的MDS可以替代TDS较真实地反映研究区坡耕地土壤质量状况。

2.4 坡耕地土壤质量指数(SQI)对坡面土壤侵蚀的响应

2.4.1 坡耕地 SQI_{MDS}与土壤侵蚀速率关系分析 对A和B样地所有样点的SQI_{MDS}分别与侵蚀速率和沉积速率进行相关分析发现,SQI_{MDS}随侵蚀速率的增加或沉积速率的减少而降低(图6)。其中,在沉积区,随着沉积速率的增大,耕地SQI_{MDS}呈不显著增加趋势;而在侵蚀区,SQI_{MDS}与侵蚀速率呈显著负相关($p<0.01$)。说明土壤侵蚀是导致研究区坡耕地质量退化的主要驱动力。

2.4.2 坡耕地 SQI_{MDS}对土壤侵蚀空间分布的响应 对比A和B样地SQI_{MDS}与土壤侵蚀速率在坡面上的空间分布(图3和图7)发现,2块样地的SQI_{MDS}空间

分布与土壤侵蚀速率呈相反的变化趋势。具体来讲,2块样地坡面100~170 m坡段侵蚀强烈区的 SQI_{MDS} 明显低于其他区域,而坡底50 m坡长范围沉积区的 SQI_{MDS} 较高。与沉积区相比,侵蚀区 SQI_{MDS} 平均减少13.3%;与坡顶轻度侵蚀区相比,100~170 m坡

段侵蚀强烈区的 SQI_{MDS} 平均减少8.7%。表明研究区土壤侵蚀是导致坡耕地土壤质量退化的关键驱动力。与土壤侵蚀速率的空间分布相似,A和B样地的 SQI_{MDS} 在坡面空间分布上也存在差异(图7),其中,A样地的 SQI_{MDS} 变异程度显著高于B样地。

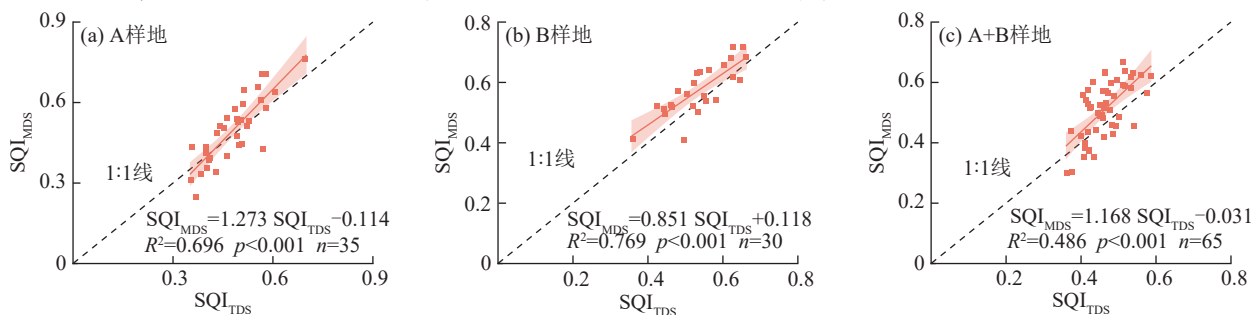


图5 研究样地 SQI_{TDS} 与 SQI_{MDS} 线性关系

Fig.5 Linear relationship between SQI_{TDS} and SQI_{MDS} in study plots

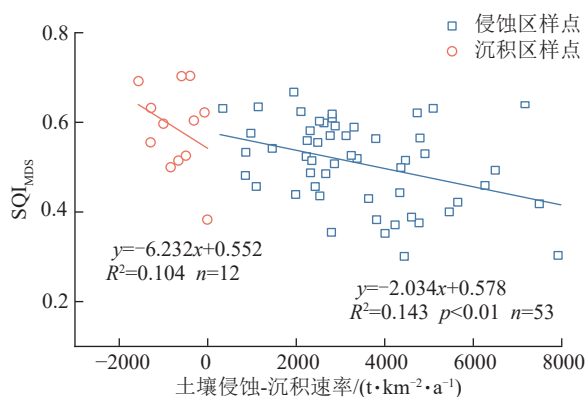


图6 研究样地 SQI_{MDS} 与土壤侵蚀-沉积速率的关系

Fig.6 Relationship between SQI_{MDS} and soil erosion-deposition rate in study plots

3 讨论

3.1 耕地坡面土壤侵蚀速率空间分布

本研究发现,耕地土壤侵蚀-沉积速率在坡面不同坡位上表现为坡中下>坡中上>坡顶>坡底(表2),侵蚀最强烈区域分别分布在A样地的100~150 m和B样地的120~170 m坡段,沉积分布在坡底50 m范围处(图3)。前人^[23]研究结果表明,黑土坡面土壤侵蚀速率随坡长呈弱-强-弱的变化趋势,中度和强烈侵蚀主要分布在坡下部,而沉积主要发生在坡底。王小康等^[24]研究表明,厚层黑土区侵蚀强度存在140 m坡长的周期性变化规律,与本研究结果类似。黑土区耕地坡面土壤侵蚀速率呈弱-强-弱变化的原因可能是,当发生降雨和融雪时,坡上部径流较分散,径流流速小,导致径流侵蚀能力较弱;而随着坡长的增加,径流进一步汇集,导致径流量和流速增加,从而使径流侵蚀能力和输沙能力增强,土壤侵蚀速率增加;之后,随着坡长增加,坡底处坡度变缓,导致径流侵蚀能力减弱,坡底处发生沉积。

东北黑土区坡耕地大多为复合坡型,且在不同坡形上,坡面土壤侵蚀-沉积分布规律也不尽相同。目前黑土区坡面的土壤侵蚀-沉积及土壤性质研究,多采用单一坡面和线型采样^[25],忽略了黑土区复合坡型的土壤侵蚀-沉积及土壤性质的空间分异。基于此,本研究选取地形特征有明显差异的2块坡耕地,采用网格法进行土壤样品的采集,对比分析坡面侵蚀-沉积分布特征,从而避免研究结果的偶然性和不确定性。研究结果表明,虽然A、B样地在地形上存在差异,但坡面土壤侵蚀速率均表现为弱-强-弱的分布规律,该结果更符合东北黑土区坡耕地的土壤侵蚀现状,更具有普适性。

3.2 基于最小数据集的坡耕地土壤质量评价

本研究构建基于最小数据集的坡耕地土壤质量评价指标,包括土壤黏粒(Clay)、有机碳(SOC)、全磷(TP)、有效氮(AN)、微生物生物量碳(MBC)和 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)共6个土壤性质指标,涵盖土壤物理、化学和生物学性质。前人^[26-27]研究结果显示,在土壤最小数据集构建中,土壤有机质的选取频率最高,其次为速效磷。全氮、土壤体积质量、pH和速效钾的选取频率也较高。本研究选取的6个坡耕地土壤质量指标中,土壤物理指标为土壤黏粒(Clay),其对土壤结构稳定性和抗蚀能力具有重要作用。选取的土壤化学指标包括土壤有机碳(SOC)、全磷(TP)和有效氮(AN),其中,SOC在进行土壤质量评价时具有较高的权重值(表3),其变化直接影响土壤的基本理化性质,且SOC对土壤侵蚀的响应也较敏感;TP和AN是影响作物生长和微生物活动的重要元素,在侵蚀条件下,土壤氮磷主要以颗粒态磷和溶解态氮的形态损失为主^[28],因此,二者是作为评估土壤肥力的

有效指标。选取的土壤生物学指标包括微生物生物量碳(MBC)和 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG),本研究中MBC具有较高的权重值(表3),同时,土壤微生物对外界环境反应敏感,能够对土壤环境变化作出响应^[29];土壤酶是参与和调控土壤各种生物化学反应的必要元素,在土壤理化性质和养分等因素发生变

化时,酶计量随之发生变化^[30],因此,二者适合作为评估土壤质量的指标。本研究基于最小数据集(MDS)和全数据集(TDS)计算的土壤质量指数(SQI)之间呈显著正相关($p < 0.001$),说明MDS可以替代TDS,能够准确反映和评价研究区坡耕地的土壤质量。

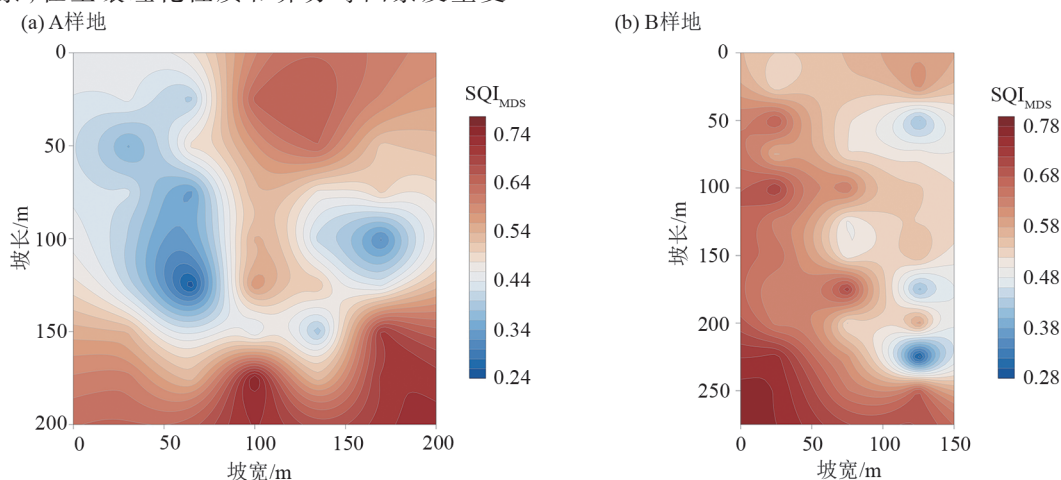


图7 SQI_{MDS}在研究样地坡面上的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of SQI_{MDS} on slope surfaces in study plots

3.3 耕地土壤质量对土壤侵蚀-沉积的响应

本研究构建耕地土壤质量指数(SQI)与土壤侵蚀-沉积速率的关系式发现,在沉积区,随着沉积速率的增大,耕地SQI_{MDS}呈不显著增加趋势;在侵蚀区,SQI_{MDS}随土壤侵蚀速率的增加呈显著减少趋势(图6)。说明土壤侵蚀是导致研究区坡耕地土壤质量退化的关键驱动力,与前人^[31]研究结果一致。土壤侵蚀导致黑土层变薄变瘦,造成土壤物理性质恶化和土壤养分降低,影响土壤生物学性质,使土壤质量指数下降。相反,在沉积区,土壤沉积有利于养分富集,进而导致土壤质量指数的增加^[32]。目前,沉积区土壤质量与沉积速率的关系存在不确定性,本研究中,沉积区土壤质量随沉积速率的增加呈不显著增加变化趋势,有研究^[33]表明,沉积区土壤质量随沉积速率的增加呈减少趋势。因此,今后还需进一步开展土壤质量对沉积速率响应关系的研究。

本研究还表明,耕地坡面土壤质量与土壤侵蚀速率的空间分布呈相反的变化规律,坡面中下部侵蚀强烈区的SQI显著低于其他坡位,而坡底沉积区的SQI较高(图7)。ZHANG等^[34]在薄层黑土区的研究结果显示,侵蚀区的SQI显著低于沉积区,且在流域和坡面尺度上,强烈侵蚀区的SQI低于轻度和中度侵蚀区;YANG等^[35]在典型黑土区的研究结果也表明,流域尺度的SQI的空间分布特征与土壤侵蚀速率的空间分布特征相反,且SQI与土壤侵蚀速率呈显著负相关。众所周知,土壤质量是土壤物理、化学和生物

学性质的综合反映,而土壤侵蚀对土壤物理、化学及生物学性质均产生影响。本研究表明,与沉积区相比,侵蚀区土壤黏粒显著下降9.4%,土壤SOC显著下降6.3%,土壤TP显著下降6.9%,土壤AN显著下降8.8%,土壤微生物生物量显著下降3.7%~29.7%,土壤酶活性下降2.4%~10.2%;且当侵蚀强度达到强烈时,土壤有机质、全氮、速效磷、微生物生物量和酶活性较轻度侵蚀区的下降幅度为6.2%~11.9%。耕地土壤侵蚀导致土壤质量指标明显下降,进而导致土壤质量指数的下降,此结果进一步佐证土壤侵蚀是导致土壤质量退化的关键驱动力。

4 结论

1)研究样地的土壤侵蚀-沉积速率为-1 563.2~7 916.1 t/(km²·a),平均土壤侵蚀速率为2 669.0 t/(km²·a)。A、B样地的土壤侵蚀速率均随坡长的增加呈弱-强-弱变化趋势,且坡面中下部120~170 m坡段的侵蚀最强烈,坡底50 m坡长范围内发生沉积。

2)建立的最小数据集中土壤质量指标包括Clay、SOC、TP、AN、MBC和BG,且最小数据集中的土壤质量指标可以替代全数据集反映研究区坡耕地的土壤质量状况。

3)2块样地的SQI与侵蚀速率呈显著负相关,且在空间分布上与土壤侵蚀的空间分布呈相反变化趋势,表明土壤侵蚀是导致研究区坡耕地质量退化的主要驱动力。

参考文献:

- [1] 水利部、中国科学院、中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全[M]. 东北黑土区卷. 北京: 科学出版社, 2010. Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. Prevention and control of soil erosion and ecological security in China [M]. Northeast black soil region volume. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] 李保国, 刘忠, 黄峰, 等. 巩固黑土地粮仓 保障国家粮食安全[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1184-1193. LI B G, LIU Z, HUANG F, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in northeast China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1184-1193.
- [3] 中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020) [EB/OL]. [2021-12-21]. <http://www.igsnrr.cas.cn/publish/dbhtd/index.html>. Chinese Academy of Sciences. Northeast China black land white paper (2020) [EB/OL]. [2021-12-21]. <http://www.igsnrr.cas.cn/publish/dbhtd/index.html>.
- [4] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持, 2009(1): 17-19. LIU X T, YAN B X. Soil erosion and food security in black soil region of northeast China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(1): 17-19.
- [5] ADHIKARI K, HARTEMINK A E. Linking soils to ecosystem services: A global review [J]. Geoderma, 2016, 262: 101-111.
- [6] GOVERS G, MERCKX R, VAN WESEMAEL B, et al. Soil conservation in the 21st century: Why we need smart agricultural intensification [J]. Soil, 2017, 3(1): 45-59.
- [7] 李林源, 高磊, 彭新华, 等. 典型水蚀区坡耕地黑土质量的空间分异特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 382-390. LI L Y, GAO L, PENG X H, et al. Spatial variation characteristics and influencing factors of black soil quality in typical water-eroded sloping cropland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 382-390.
- [8] TUO D F, LU Q, WU B, et al. Effects of wind-water erosion and topographic factor on soil properties in the loess hilly region of China [J]. Plants, 2023, 12(13): e2568.
- [9] ZHANG Y, LIU X J, LI P, et al. Response of carbon acquisition enzyme activity and organic carbon mineralization to soil erosion and deposition [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 243: e106169.
- [10] SALEH A M, ELSHARKAWY M M, ABDELRAHMAN M A E, et al. Evaluation of soil quality in arid western fringes of the Nile Delta for sustainable agriculture [J]. Applied and Environmental Soil Science, 2021, 2021(1): e1434692.
- [11] 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.
- [12] 杨维鸽, 郑粉莉, 王占礼, 等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 572-581. YANG W G, ZHENG F L, WANG Z L, et al. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(3): 572-581.
- [13] WANG Y F, AN X B, ZHENG F L, et al. Effects of soil erosion-deposition on corn yields in the Chinese mollisol region [J]. Catena, 2024, 240: e108001.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 42-50. BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 42-50.
- [15] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 54-84. WU J S, LIN Q M, HUANG Q Y, et al. Soil microbial biomass determination method and its application [M]. Beijing: Meteorological Press, 2011: 54-84.
- [16] 安小兵, 郑粉莉, 王雪松, 等. 冻融作用对东北黑土区坡耕地土壤微生物养分限制的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(10): 2744-2754. AN X B, ZHENG F L, WANG X S, et al. Impacts of freeze-thaw process on soil microbial nutrient limitation in slope farmlands of the Chinese mollisol region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(10): 2744-2754.
- [17] 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.
- [18] ZHANG J H, QUINE T A, NI S J, et al. Stocks and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion [J]. Global Change Biology, 2006, 12(10): 1834-1841.
- [19] 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.

- [20] CHANDEL S, HADDA M S, MAHAL A K. Soil quality assessment through minimum data set under different land uses of submontane punjab[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2018, 49(6): 658-674.
- [21] 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: 228.
- 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 and Power Press, 2008: 228.
- [22] 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.
- [23] 莫帅豪, 王雪松, 郑粉莉, 等. 典型黑土区坡面侵蚀-沉积对土壤微生物养分限制的影响[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(6): 3023-3033.
- MO S H, WANG X S, ZHENG F L, et al. Effects of slope erosion-deposition on soil microbial nutrient limitation in the typical mollisol region of northeast China[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(6): 3023-3033.
- [24] 王小康, 谷举, 刘刚, 等. 横、顺坡垄作对黑土坡面侵蚀-沉积周期规律的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 430-439.
- WANG X K, GU J, LIU G, et al. The influence of transverse and longitudinal ridge tillage on soil erosion and deposition cycles for mollisol slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 430-439.
- [25] YUAN C, FAN H M. Response mechanism of black soil structure to compound erosion forces in sloping farmland, northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 240: e106103.
- [26] YANG E J, ZHAO X L, QIN W, et al. Temporal impacts of dryland-to-paddy conversion on soil quality in the typical black soil region of China: Establishing the minimum data set[J]. *Catena*, 2023, 231: e107303.
- [27] 魏晗梅, 郑粉莉, 冯志珍, 等. 薄层黑土区流域尺度土壤养分对侵蚀-沉积的响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 49-54.
- WEI H M, ZHENG F L, FENG Z Z, et al. Responses of soil nutrients to soil erosion and deposition at watershed scale in the thin layer mollisol area of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 49-54.
- [28] SHI J, ZHANG Z Y, WANG Z, et al. Soil erosion alters the composition of soil nitrogen and induces nitrogen immobilization along a sloping agricultural landscape[J]. *Soil Use and Management*, 2024, 40(2): e13067.
- [29] YUAN P L, WANG J P, LI C F, et al. Soil quality indicators of integrated rice-crayfish farming in the Jiangnan Plain, China using a minimum data set[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: e104732.
- [30] 耿华杰, 郑粉莉, 莫帅豪, 等. 典型黑土区农业流域土壤侵蚀-沉积对土壤养分和酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 47-53.
- GENG H J, ZHENG F L, MO S H, et al. Effects of soil erosion-deposition on soil nutrients and enzyme activities in an agricultural watershed of Chinese mollisol region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 47-53.
- [31] 杨维鸽. 典型黑土区土壤侵蚀对土壤质量和玉米产量的影响研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- YANG W G. Study on the influence of soil erosion on soil quality and maize yield in typical black soil region [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [32] 莫帅豪, 郑粉莉, 冯志珍, 等. 典型黑土区侵蚀-沉积对土壤微生物数量空间分布的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 685-693.
- MO S H, ZHENG F L, FENG Z Z, et al. Effects of soil erosion and deposition on the spatial distribution of soil microbial quantity in mollisol area of northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 685-693.
- [33] AVILÉS-JUNCO C, PRADO-PANO B, MORA-PALOMINO L, et al. Integrated multiscale assessment of andosol degradation after conversion from grasslands to agriculture[J]. *Catena*, 2025, 250: e108731.
- [34] 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.
- [35] YANG W G, ZHENG F L, HAN Y, et al. Investigating spatial distribution of soil quality index and its impacts on corn yield in a cultivated catchment of the Chinese mollisol region[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(2): 317-327.