

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.029

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):382-390,399.

LI Linyuan, GAO Lei, PENG Xinhua, et al. Spatial variation characteristics and influencing factors of black soil quality in typical water-eroded sloping croplands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 382-390, 399.

典型水蚀区坡耕地黑土质量的空间分异特征及影响因素

李林源^{1,2}, 高磊¹, 彭新华^{1,2}, 钱芮^{1,2}, 王建茜¹, 杜豪^{1,2}

(1.中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室,南京 210018;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: [目的] 为明确侵蚀—沉积在黑土坡耕地土壤质量空间分异格局中的塑造作用。[方法] 以东北典型水蚀区坡耕地为研究对象,利用 110 个样点的土壤属性,采用基于最小数据集的土壤质量指数(SQI)指标,评价坡面尺度土壤质量的空间分异特征,并利用广义线性模型(GLM)明确坡度、坡位、土层深度等因子对土壤质量的贡献。[结果] (1)坡耕地土壤养分含量和空间特征在耕作层和亚表层间呈相反规律。对于大部分养分指标,耕作层的含量显著高于亚表层,但是,其空间异质性及土壤养分含量间的相关性低于亚表层($p < 0.05$);(2)侵蚀沉积作用影响坡耕地土壤质量的空间分布特征。SQI 在强烈侵蚀的坡中显著低于轻度侵蚀的坡上和沉积区的坡下($p < 0.05$),与坡上相比,坡中 SQI 在耕作层和亚表层分别降低 26.2%和 31.6%,沉积作用并不一定提高强烈侵蚀坡耕地沉积区的土壤质量,坡下和坡上耕作层的土壤质量无显著差异($p > 0.05$);(3)土层深度、坡位和坡度是坡耕地 SQI 变异的主要影响因素。GLM 结果显示,对于同一个土壤层次,坡度、坡位及其交互作用对 SQI 变异的解释度达 95%,其中,坡位和坡度的解释度分别为 68%和 22%;考虑土壤深度因素,在 0—40 cm 土层,土层深度、坡位和坡度对 SQI 变异的解释度分别为 39%,31%和 10%。[结论] 采用 SQI 和 GLM 相结合的方法,明确侵蚀—沉积过程在坡耕地黑土质量空间分异中的塑造作用,研究成果可为典型水蚀区侵蚀退化黑土地质量评价和管理提供技术支撑。

关键词: 土壤侵蚀;沉积作用;地形因子;土壤质量指数;广义线性模型

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)03-0382-09

Spatial Variation Characteristics and Influencing Factors of Black Soil Quality in Typical Water-Eroded Sloping Cropland

LI Linyuan^{1,2}, GAO Lei¹, PENG Xinhua^{1,2}, QIAN Rui^{1,2}, WANG Jianxi¹, DU Hao^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil and Agricultural Sustainable Development, Nanjing Soil Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210018, China; 2. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to clarify the role of sedimentation and erosion in shaping the spatial pattern of soil quality in black soil slope croplands. [Methods] Taking the sloping farmland in typical water-eroded areas in northeast China as the research object, we used the soil attributes of 110 sample points and the soil quality index (SQI) index based on the minimum data set to evaluate the spatial differentiation characteristics of soil quality at the slope scale, while the effects of slope gradient, slope position, and soil depth were determined using generalized linear models (GLMs). [Results] (1) Opposing patterns of soil nutrient content and spatial characteristics were observed between the surface and subsurface layers in sloping croplands. Most nutrient indicators exhibited significantly higher content in the tillage layer compared to the subsurface layer. However, the surface layer showed lower spatial heterogeneity and weaker correlation with related physicochemical indexes comparing with the subsurface layer ($p < 0.05$). (2) Erosion and sedimentation significantly influenced the spatial distribution characteristics of soil quality. The SQI was significantly lower in slopes with severe erosion compared to up-slope areas with weakly eroded regions and

收稿日期:2023-12-13

修回日期:2024-01-15

录用日期:2024-02-10

网络首发日期(www.cnki.net):2024-04-25

资助项目:科技部重点研发计划项目(2021YFD1500801);中国科学院先导专项(XDA28010101)

第一作者:李林源(1999—),女,江苏南京人,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与农田生产力研究。E-mail:lilinyuan@issas.ac.cn

通信作者:高磊(1982—),男,山东济宁人,副研究员,博士,硕士生导师,主要从事农田土壤水文过程研究。E-mail:lgao@issas.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

down-slope areas in depositional areas ($p < 0.05$). Compared with the upper position, the SQI of middle position was 26.2% and 31.6% lower at surface and subsurface soil layers, respectively. Sedimentation did not improve the soil quality of severely eroded slope croplands, and there were no significant differences in SQI between down-slope and up-slope areas ($p > 0.05$). (3) Soil depth, slope position, and slope gradient emerged as key factors influencing the variability of SQI in slope croplands. The GLM results demonstrated that, for the same soil horizon, slope, aspect, and their interactions explained over 95% variation in SQI. Among them, the explanatory degree of slope position was 68%, and that of slope gradient was 22%. Considering the factor of soil depth, the explanatory degrees of soil depth, slope position, and slope gradient on the variation of SQI in the range of 0—40 cm were 39%, 31%, and 10%, respectively. [Conclusion] The combined method of SQI and GLM was used to clarify the shaping role of the erosion-sedimentation process in the spatial differentiation of black soil quality in sloping cropland, and the research results can provide technical support for the evaluation and management of the quality of eroded and degraded black soil in typical water-eroded areas.

Keywords: soil erosion; sedimentation; topographic factors; soil quality index; generalized linear model

Received: 2023-12-13

Revised: 2024-01-15

Accepted: 2024-02-10

Online(www.cnki.net): 2024-04-25

作为重要的粮食生产基地,东北黑土区是我国粮食安全的“稳压器”和“压舱石”^[1]。黑土因其养分含量高、物理性状好、适宜作物生长,被誉为我国“耕地中的大熊猫”^[2]。东北黑土区面积 109 万 km²,生产全国 1/4 的粮食,商品粮输出量占全国的 1/3^[3]。近年来,在土壤侵蚀和不合理耕作等因素的共同作用下,黑土发生明显退化,主要表现为黑土层变薄,肥力下降,土壤硬度增加。土壤侵蚀是黑土退化的重要驱动因素,典型黑土区 80% 以上的旱作农田为坡耕地,极易发生水土流失^[3],是我国第三大水土流失区。

土壤侵蚀对土壤养分的含量和分布有不可忽视的影响^[4]。LI 等^[5]研究发现,侵蚀强度越大,侵蚀区的土壤有机碳和氮含量越低,沉积区则含量增加;土壤侵蚀不仅影响表层养分,而且对深层土壤养分也有不同程度的影响,CHENG 等^[6]利用¹³C 示踪技术发现,侵蚀导致矿物结合态有机碳垂直分布曲线下移;冯志珍^[7]在比较流域尺度多种土壤属性空间分异的差异发现,与沉积区相比,侵蚀区的土层厚度、土壤有机碳、全氮等含量降低,并且降低幅度与土壤侵蚀强度相关。

自 DORAN 等^[8]在 1994 年提出土壤质量的概念以来,土壤质量指数(SQI)综合评估土壤生态系统功能、土壤质量和土壤健康的方法在农业科学研究中得到广泛运用。在众多 SQI 构建方法中,主成分分析法(PCA)能有效减少指标之间的冗余信息,提高数据使用效率,是目前主流的构建 SQI 的方法^[9-10]。

近年来,以“变瘦”“变薄”和“变硬”为主要特征的黑土退化问题受到广泛关注。利用土壤质量的方法

定量黑土退化程度成为研究的热点,汪景宽等^[11]利用该方法研究黑土区土壤质量的演变规律;杨维鸽^[12]进一步研究土壤质量对侵蚀的响应。但是,在分析坡耕地黑土质量的空间分异特征时,主要关注的是耕作制度、耕作年限等因素^[13],土壤质量空间分异的侵蚀贡献缺乏定量研究。基于此,以东北典型水蚀区坡耕地为研究对象,在明确土壤理化属性空间特征的基础上,构建黑土质量指标体系,借助广义线性模型(GLM)量化侵蚀因素对土壤质量的贡献,以期为侵蚀退化黑土地质量评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省海伦市。海伦市地属中温带大陆性季风气候,多年平均风速为 1.4 m/s,相对湿度 67.6%,年平均气温 2.2℃,日照时间 7.2 h,年平均降水量 567 mm,降水季节分配不均,雨热同期,50% 以上的集中在 6—8 月。以上气象数据来源于国家气象中心 1961—2021 年数据。

坡耕地位于前进镇张大眼珠子屯(126°50′27″—126°50′39″E, 47°23′03″—47°23′15″N),总面积约 7 hm²,海拔为 212~233 m。该坡耕地属于典型的中厚层黑土区,地形起伏,水力侵蚀强烈,不同坡位侵蚀沉积作用差异明显(图 1)。根据土壤侵蚀强度分级标准(SL 190—2007)^[14],坡面的中上部为弱侵蚀区,侵蚀速率为 2 080 t/(km²·a),黑土层厚度约 30 cm;坡中最大坡度超过 10°,为强烈侵蚀区,侵蚀速率为 7 970 t/(km²·a),已呈现明显的“破皮黄”;坡下地形平坦,为沉积区,黑土层厚度超过 100 cm。

该坡耕地开垦历史超过 60 年,主要种植作物为玉米和大豆,以轮作为主,采样期间作物类型为大豆。耕作方式通常为旋耕,顺坡垄作,耕作深度为 15—20 cm,耕作时间因作物类型而异,玉米季通常为第 2 年春天耕作,作物为大豆时,一般当年秋收后耕作。

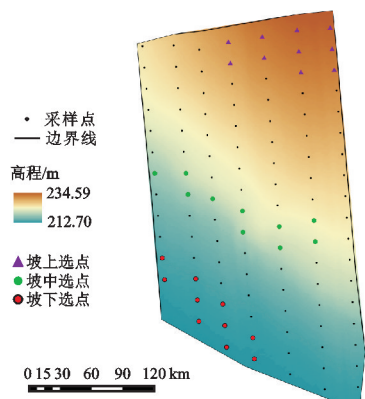


图 1 研究区地形与采样点布设

Fig. 1 Topography of the study area and placement of sampling points

1.2 样点布设与数据获取

在所选择的坡耕地上按照 20 m×30 m 的间距布设 110 个采样点(图 1),为充分捕捉侵蚀信息,沿坡上到坡脚方向样点布设间距设置为约 20 m,水平方向间距约 30 m,以上间距均为投影距离。利用手持 GPS(Trimble Geo7x,美国)外接 RTK 服务,测定坡面的地形信息和采样点坐标,进一步利用 ArcGIS 软件提取采样点的坡度。

对于每个采样点,测定 0—20,20—40 cm 2 个深度 16 种主要的土壤理化指标。其中,考虑到土壤水分和穿透阻力具有较强的时间变异性,采用动态测定的方法,土壤水分是在大豆生育期利用烘干法测定 11 次,取平均值;土壤穿透阻力是利用土壤紧实度仪(SC900,美国)在原位测定,在大豆生育期测定 4 次,每个样点测定 5 个重复,取平均值。土壤总碳、颗粒组成等 14 个其他土壤指标在 2022 年 10 月大豆收获后采样测定。样品包括扰动土和原状土 2 种,扰动土主要用来测定总碳、总氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、CEC、pH、土壤黏粒、粉粒和砂粒含量。其中,土壤的总碳和总氮含量采用红外吸收光谱法元素分析仪测定(ALPHA,德国),土壤颗粒组成采用吸管法,其他指标均按照经典方法^[15]测定。利用 100 cm³的钢环刀采集土壤原状土样品,采样深度为 5—10,25—30 cm,分别代表耕作层和亚表层。原状土样品采用烘干法和定水头法分别测定土壤容重和饱和导水率。

1.3 土壤质量指数指标体系构建

采用主成分分析法(PCA)建立土壤质量指数的

最小数据集,该方法的优点是用少量关键指标表达大部分土壤质量信息。首先,利用 PCA 确定主成分(PCs)和各 PC 的代表性指标。在 PCA 分析中,采用相关矩阵的方法实现降维,选择保留特征值≥1 的主成分^[11],是因为只有特征值<1 的主成分所解释的方差高于单个原始变量,意味着主成分能够有效表示数据的变异性,保留主成分也就保留大部分原始数据的信息。在被保留下来的 PC 中,选择与最高负荷相差不超过 10% 的指标,当 PC 中有多个指标符合该要求时,要进一步检验这些指标的相关性,如果指标彼此密切相关,该 PC 只保留具有最高负荷的指标,如果指标间没有显著相关性,那么与最高负荷相差不超过 10% 的指标均进入土壤质量指标体系。然后,利用非线性评分函数对选定的土壤指标进行转换,得到无量纲的指标。最后,利用所筛选指标和所占权重的加权计算 SQI^[8]。主要聚焦侵蚀对与农田生产力密切相关的土壤物理和肥力属性的影响,因此,SQI 越高,表示土壤的生态生产功能越好。

$$SQI = \sum_{i=1}^n S_i * W_i \quad (1)$$

式中: S_i 为土壤指标得分; W_i 为所筛选土壤指标的加权值; n 为最小数据集的指标个数。

$$S = a / [1 + (x / x_0)^b] \quad (2)$$

式中: $a = 1$; x_0 为各土壤指标的平均值; b 为指数值,取值为 -2.5,对应“越多越好”的函数参数^[16]。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2023 软件对数据进行初步整理,SPSS 26.0 软件进行主成分分析和相关矩阵分析,Origin 2023 软件进行数据处理与制图;利用 ArcGIS 10.7 软件完成 SQI 的空间分布图;利用多元方差分析进行不同坡位、坡度之间的显著性检验;借助 Python 语言运行 GLM,确定相关因素对 SQI 的贡献。

2 结果与分析

2.1 侵蚀坡面土壤基本理化性质

土层深度影响坡耕地土壤理化属性的含量和空间状态。16 种土壤指标中的 14 个在耕作层(0—20 cm)和亚表层(20—40 cm)间差异显著($p < 0.05$),除总钾和阳离子交换量外,耕作层土壤的养分状况均优于亚表层(表 1)。例如,总碳和总氮在 0—20 cm 耕作层含量分别为 18.1、1.6 g/kg,20—40 cm 亚表层分别降低 14.0 和 1.2 g/kg,耕作层 pH 显著低于亚表层土壤,分别为 5.79 和 5.92。在土壤质地方面,相对于耕作层,亚表层土壤更为黏重,黏粒含量达到 41.5%,比耕作层高 6.6%。另外,与耕作层相比,亚表层土壤容重更高,穿透阻力更大,导水性能更差。除土壤

pH、黏粒含量和土壤容重外,亚表层土壤指标的空间异质性均强于耕作层土壤,仍以总碳和总氮为例,耕作层的变异系数为 23.4%和 21.4%,而亚表层则分别增加到 40.1%和 36.2%(表 1)。

表 1 耕作层和亚表层土壤基本理化性质

土壤指标	耕作层(0—20 cm)				亚表层(20—40 cm)			
	平均值	最大值	最小值	CV	平均值	最大值	最小值	CV
总碳/(g·kg ⁻¹)	18.12 A	30.38	9.35	23.40	13.98 B	37.55	5.16	40.08
总氮/(g·kg ⁻¹)	1.57 A	2.57	0.95	21.41	1.23 B	3.17	0.50	36.18
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	159.63 A	257.25	95.55	20.23	126.96 B	294.00	51.45	36.01
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.67 A	1.07	0.39	16.37	0.57 B	0.98	0.39	20.85
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	27.79 A	63.78	10.91	34.44	16.20 B	54.28	6.19	58.92
全钾/(g·kg ⁻¹)	21.23 A	24.88	15.55	6.83	21.18 A	26.45	12.82	8.55
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	197.41 A	285.00	150.00	11.77	189.50 B	270.00	130.00	14.10
CEC/(cmol·kg ⁻¹)	28.13 A	31.68	23.96	5.48	28.50 A	32.97	23.07	7.28
pH	5.79 B	6.89	4.89	7.33	5.92 A	6.91	4.97	7.03
砂粒含量/%	5.94 A	10.83	2.02	29.77	5.12 B	8.69	2.04	32.47
粉粒含量/%	55.08 A	62.57	47.51	5.10	53.34 B	64.24	46.22	5.65
黏粒含量/%	38.97 B	45.97	29.88	8.08	41.54 A	49.46	33.09	7.57
饱和导水率/(mm·min ⁻¹)	3.75 A	14.71	0	102.87	0.03 B	0.85	0	292.08
土壤含水量/%	24.20 B	28.87	21.64	6.05	26.37 A	36.36	21.10	11.80
穿透阻力/kPa	639.69 B	1 042.59	327.89	24.76	1 003.53 A	1 840.04	477.33	27.52
容重/(g·cm ⁻³)	1.19 B	1.51	1.01	9.79	1.40 A	1.57	1.04	6.67

注:同行不同大写字母表示不同土层间差异显著,($p<0.05$);CV 为变异系数(%); $n=110$ 。

土壤理化指标的相关性在不同指标间差异显著。Pearson 相关分析表明,土壤总碳、总氮、碱解氮和全磷间相关性较强,Pearson 相关系数均 >0.6 ,达到极显著水平,而速效钾、阳离子交换量和 pH 与其他指标的相关性较低(表 2)。另外,土层深度影响土壤理化性质的相关性,亚表层土壤属性间的相关性显著强于耕作层($p<0.05$)。在 0—20 cm 土层,土壤容重与总碳、土壤穿透阻力及土壤含水量间相关性均不显著,Pearson 系数分别为 $-0.13,0.05,0.18$,然而,在亚表层土壤中,土壤容重与总碳、土壤穿透阻力、土壤含水量间的 Pearson 相关系数达到 $-0.59,0.31,-0.65$,均达到极显著水平(表 2)。

表 2 耕作层和亚表层土壤属性的 Pearson 相关性

项目	总碳	总氮	碱解氮	全磷	速效磷	全钾	速效钾	CEC	pH	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量	饱和导水率	土壤含水量	穿透阻力	容重
总碳	1.00	0.97**	0.66**	0.67**	0.27**	0.18	-0.05	0.10	0.13	0.06	0.50**	-0.48**	-0.04	0.36**	-0.22*	-0.13
总氮	0.99**	1.00	0.63**	0.64**	0.29**	0.18	-0.05	0.08	0.12	0.09	0.43**	-0.43**	-0.07	0.36**	-0.31**	-0.12
碱解氮	0.87**	0.85**	1.00	0.66**	0.23*	0.28**	-0.16	0.02	0.13	0.14	0.39**	-0.43**	-0.03	0.38**	-0.26**	-0.03
全磷	0.64**	0.61**	0.62**	1.00	0.49**	0.37**	-0.10	0.08	0.15	0.18	0.21*	-0.29**	0.06	0.36**	-0.31**	-0.04
速效磷	-0.15	-0.14	-0.09	0.29**	1.00	0.23*	0.07	-0.09	0.05	0.31**	0.22*	-0.38**	0	0.03	-0.19*	0.02
全钾	0.03	0.05	0.01	0.27**	0.29**	1.00	-0.02	-0.08	-0.04	0.08	0.17	-0.19*	0.12	0.19*	-0.31**	-0.17
速效钾	-0.51**	-0.51**	-0.38**	-0.15	0.34**	-0.09	1.00	0.35**	-0.08	-0.09	-0.04	0.08	0	-0.18	0.17	0.07
CEC	0.34**	0.34**	0.34**	0.31**	-0.07	-0.09	0.15	1.00	-0.04	-0.11	-0.29**	0.32**	-0.10	0.13	0.19	0.21**
pH	0.43**	0.43**	0.36**	0.30**	0.12	0.03	-0.36**	0	1.00	0.03	0.19*	-0.19*	-0.12	0.45**	-0.18	0.25**
砂粒含量	0.07	0.08	0.01	-0.03	0.02	0.15	-0.02	0.01	-0.12	1.00	-0.11	-0.46**	-0.02	0.02	-0.01	0.08
粉粒含量	0.44**	0.41**	0.42**	0.40**	0.29**	0.19*	-0.36**	-0.28**	0.34**	-0.20*	1.00	-0.83**	-0.03	0.07	-0.11	-0.11
黏粒含量	-0.45**	-0.44**	-0.41**	-0.36**	-0.29**	-0.26**	0.35**	0.27**	-0.27**	-0.34**	-0.86**	1.00	0.04	-0.07	0.10	0.05
饱和导水率	0	-0.01	0.04	0.30**	0.37**	0.31**	0.23*	0.05	-0.08	0.15	0.01	-0.09	1.00	-0.11	-0.05	-0.48**
土壤含水量	0.85**	0.85**	0.77**	0.58**	-0.21*	-0.02	-0.47**	0.31**	0.49**	-0.09	0.32**	-0.26**	0	1.00	-0.33**	0.18
穿透阻力	-0.44**	-0.45**	-0.37**	-0.18	0.22*	-0.05	0.34**	-0.09	-0.35**	0.04	-0.17	0.15	0.02	-0.56**	1.00	0.05
容重	-0.59**	-0.57**	-0.60**	-0.41**	0.19*	-0.03	0.26**	-0.22*	-0.15	0.15	-0.17	0.09	-0.14	-0.65**	0.31**	1.00

注:上三角、下三角分别为耕作层、亚表层 Pearson 相关系数;*表示 $p<0.05$;**表示 $p<0.01$ 。

2.2 土壤质量指标体系

基于 PCA 结果,土壤指标划分为 5 个主成分,解释总方差的 71.2%(表 3)。根据各因子且相互间关系不显著原则,每个主成分仅 1 个指标符合,5 个主成分对应的土壤指标分别为土壤总碳、饱和导水率、速效磷、阳离子交换量和砂粒含量。结合主成分分析得到

加权值及 S 函数(表 4),研究区 SQI 的表达式为:
$$SQI = 0.24/[1 + (x_1/16.1)^{-2.5}] + 0.17/[1 + (x_2/1.9)^{-2.5}] + 0.20/[1 + (x_3/22.0)^{-2.5}] + 0.20/[1 + (x_4/28.3)^{-2.5}] + 0.19/[1 + (x_5/5.5)^{-2.5}]$$

(3)
式中: x_1 为土壤总碳; x_2 为饱和导水率; x_3 为速效磷; x_4 为阳离子交换量; x_5 为砂粒含量。

表 3 土壤理化指标对各主成分的因子负荷

Table 3 Factor loadings of soilphysical and chemical indicators for each principal component					
土壤指标	PC-1	PC-2	PC-3	PC-4	PC-5
总碳/(g·kg ⁻¹)	0.946 #	-0.047	0.118	-0.036	-0.052
总氮/(g·kg ⁻¹)	0.936 #	-0.062	0.113	-0.03	-0.068
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	0.888 #	-0.065	0.137	-0.022	-0.010
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.724	-0.076	0.443	0.158	0.028
土壤含水量/%	0.588	0.573	-0.297	0.056	0.108
穿透阻力/kPa	-0.570	0.427	-0.057	0.152	-0.132
饱和导水率/(mm·min ⁻¹)	0.192	-0.784 #	0.062	-0.056	0.056
容重/(g·cm ⁻³)	-0.504	0.729 #	-0.030	0.071	-0.094
pH	0.284	0.532	0.063	-0.174	0.375
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	0.146	-0.300	0.796 #	0.053	0.034
黏粒含量/%	-0.447	0.052	-0.601	0.538	0.153
全钾/(g·kg ⁻¹)	0.083	0.08	0.488	-0.052	-0.035
CEC/(cmol·kg ⁻¹)	0.268	0.175	-0.143	0.793 #	-0.093
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	-0.326	-0.257	0.394	0.616	0.056
粉粒含量/%	0.444	0.004	0.479	-0.485	0.267
砂粒含量/%	0.096	-0.108	0.331	-0.201	-0.753 #
特征值	5.605	2.183	2.146	1.739	1.146
方差百分比/%	31.139	12.127	11.924	9.663	6.365
累积贡献/%	31.139	43.266	55.190	64.853	71.218

注: # 表示各主成分中高负荷指标; # + 下划线表示因子负荷对应于主成分中保留的指标。

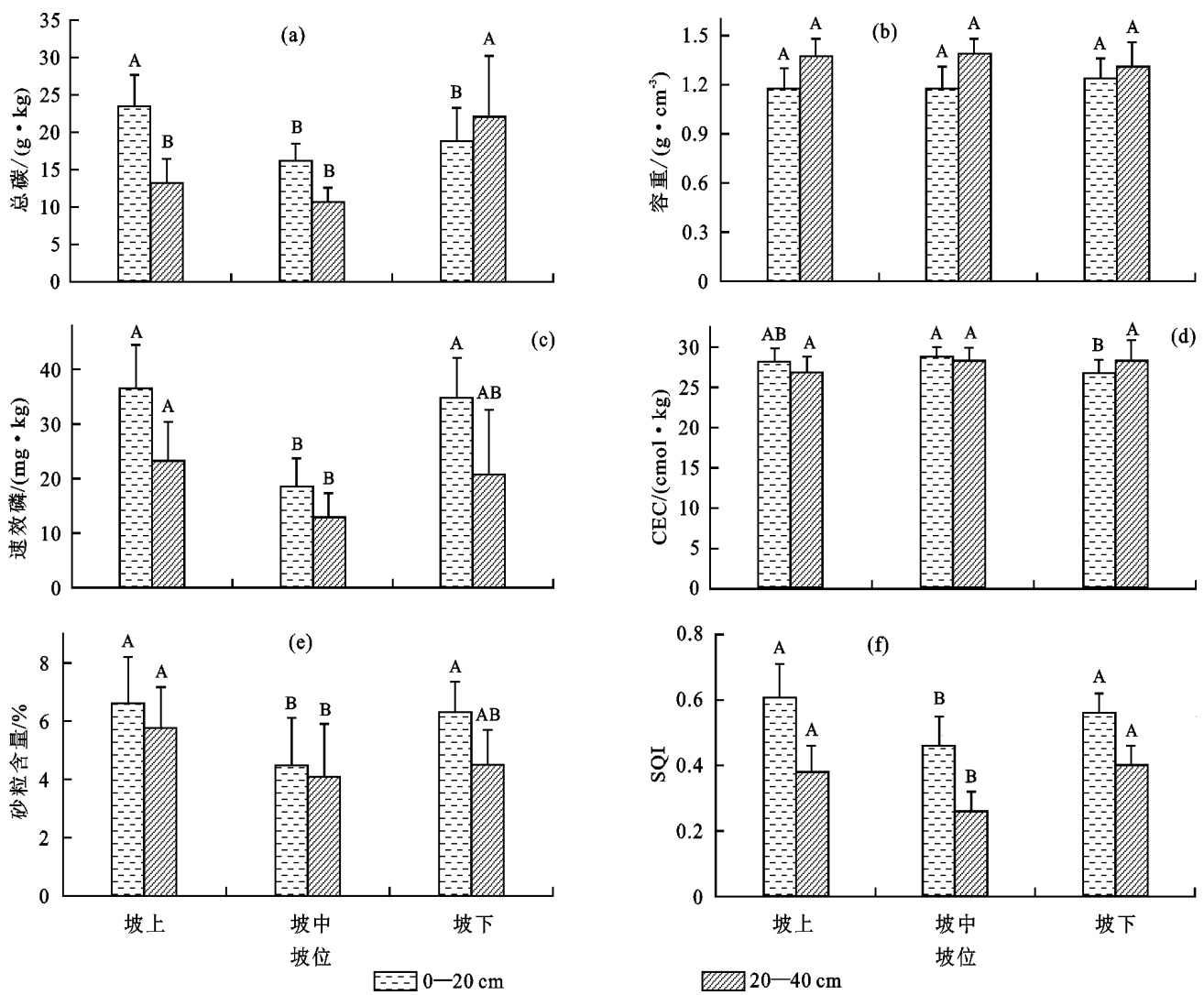
表 4 构建土壤质量指数指标的权重及评价函数

Table 4 Weights and evaluation functions for each indicator of soil quality index					
指标权重	总碳/ (g·kg ⁻¹)	饱和导水率/ (mm·min ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	砂粒含量/%
平均值(x_0)	16.050	1.870	22.000	28.320	5.530
公因子方差	0.915	0.661	0.748	0.759	0.738
评价函数	越多越好	越多越好	越多越好	越多越好	越多越好
斜率(b)	-2.500	-2.500	-2.500	-2.500	-2.500
权重	0.239	0.173	0.196	0.199	0.193
归一化方程	$1/[1 + (x/x_0)^b]$				

2.3 SQI 及其主要构成指标对坡位和坡度的响应

坡位和坡度是土壤侵蚀强度的重要指示指标。由图 2 SQI 及其主要构成指标对坡位的响应可见,除土壤容重外,其余指标均受坡位的显著影响,主要差异表现在强烈侵蚀区的坡中和其他 2 个坡位之间。以耕作层为例,坡中的土壤总碳比弱侵蚀区的坡上低 44.5%,比沉积区的坡下低 16.9%,速效磷的差异更为明显,坡中的速效磷含量仅为坡上和坡下的 50% 左右。作为土壤指标差异的综合体现,坡中耕作层的

SQI 显著低于其他坡位,坡上、坡中和坡下的 SQI 分别为 0.61,0.46,0.56(图 2)。沉积区和弱侵蚀区的差异较小,对于耕作层,仅土壤总碳在坡上和坡下差异显著,并且是坡上显著高于坡下($p < 0.05$)。对于亚表层土壤,沉积作用的影响与耕作层相比更为明显,特别是对于土壤总碳,沉积区亚表层的碳含量显著高于强烈侵蚀区,也显著高于弱侵蚀区的坡上,坡下的总碳对于耕作层土壤,占坡上含量的 80.9%,但是,对于亚表层,坡下土壤的总碳是坡上的 1.7 倍(图 2)。



注:不同大写字母表示同一土层不同坡位间差异显著;误差棒为标准差; $n=100$ 。

图 2 耕作层和亚表层土壤关键指标及土壤质量指数(SQI)对坡位的响应

Fig. 2 Responses of key indicators and soil quality index (SQI) to slope positions of surface and subsurface soil layers

坡度是衡量土壤侵蚀严重程度的重要指标。坡度与土壤关键指标及 SQI 的关系见图 3。与坡位的影响类似,坡度对土壤容重无显著影响,对 CEC 的影响主要表现在耕作层,随着坡度增加,耕作层 CEC 有显著增加,而对于其他指标,无论是耕作层还是亚表层,与坡度均呈显著或极显著的负相关(图 3)。同时,随坡度的增加,20—40 cm 土层的 SQI 下降速度是 0—20 cm 土层的 2 倍,并且 SQI 与坡度的相关性在亚表层也更强;与之类似,砂粒和总碳含量在亚表层下降速率更大,耕作层速效磷含量受坡度的影响更为显著。

为更直观展现 SQI 在坡面的空间分异特征,基于 110 个样点数据,分别生成 2 个土层的 SQI 空间分布(图 4)。从图 4 可以看出,0—20 cm 土层的 SQI 显著高于 20—40 cm 土层,平均值分别为 0.54,0.34。另外,2 个土壤层次的 SQI 均表现出坡上(弱侵蚀区)

和坡脚(沉积区)高、坡中(强烈侵蚀区)低的分布格局,由东北(弱侵蚀区)到西南(沉积区)方向,SQI 先降低后升高。

2.4 侵蚀因子对土壤质量的解释度

利用 GLM 进一步明确坡度、坡位和土层深度对 SQI 的解释度(图 5)。对于同一个土层深度,无论是耕作层还是亚表层,坡位的解释度均最大,并且在 2 个土壤层次,解释度大小相近,分别解释 SQI 总变异的 67.6%,68.3%。对 SQI 贡献第 2 位的是坡度因子,坡度和坡位共同反映侵蚀的作用,侵蚀因素在典型坡耕地上对 SQI 的解释度达到 90%左右。土壤层次是土壤质量变异重要因素,在 0—40 cm 土层,无论是坡度还是坡位,对 SQI 的解释度均低于土层深度,三者对 SQI 的解释度由大到小依次为土层深度、坡位和坡度,解释度分别为 38.5%,31.1%,10.0%。

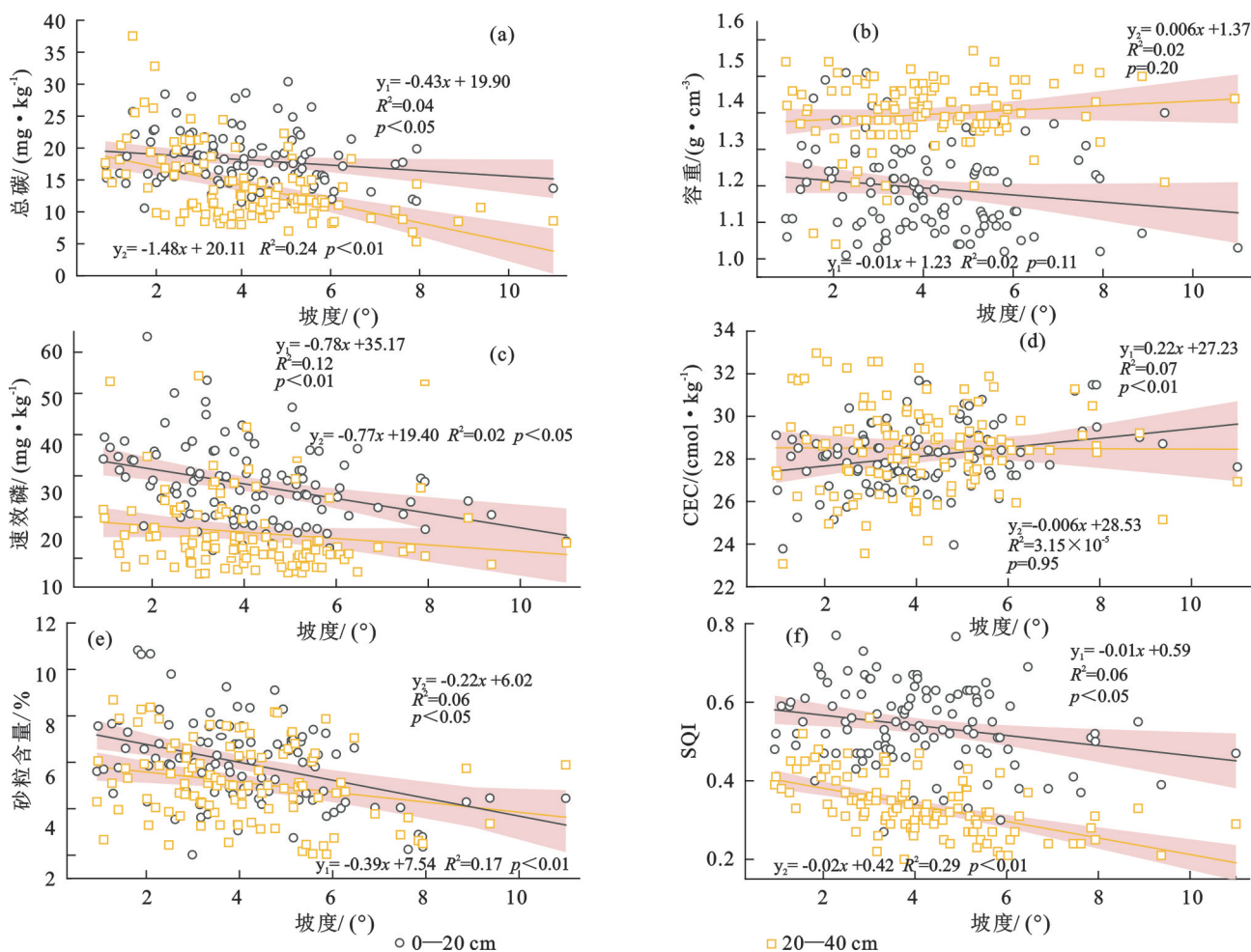


图 3 耕作层和亚表层土壤质量指数及其关键指标对坡度的响应

Fig. 3 Responses of soil quality index (SQI) and its key indicators to slope of the surface and subsurface soil layers

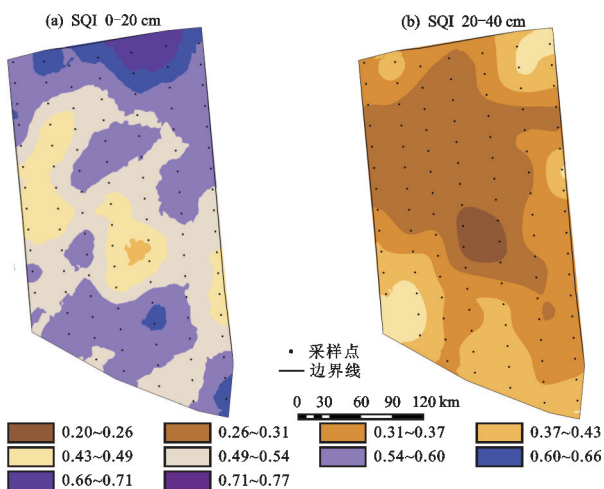


图 4 耕作层和亚表层土壤质量指数 (SQI) 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil quality index (SQI) of surface and subsurface soil layers

3 讨论

3.1 典型黑土坡耕地 SQI 的指标构成

合理选择土壤理化指标进行黑土质量评价对黑土地保护至关重要。众多研究^[17]发现,最小数据集是评估土壤质量的有效方法,具有指标需求少,评价

效果好的优点。在典型黑土区,FANG 等^[18]将不同数据集获得的土壤质量指数与玉米产量进行相关分析发现,最小数据集在评价黑土质量方面具有优势。但是,最小数据集的构成指标在不同研究区,甚至相同研究区的不同研究中不尽相同,本研究结果为总碳、饱和导水率、速效磷、CEC 及砂粒含量。土壤碳氮指标在土壤质量指标体系中出现的频率最高^[18]。但是,土壤碳氮具有极显著的相关性,考虑到指标信息的重复性,土壤碳和氮通常只保留其中 1 个,在本研究中,与总氮、碱解氮相比,总碳的权重值更高,对 SQI 的贡献更大。因此,土壤总碳是第 1 主成分的唯一指标,说明提升 SOC 含量在黑土地质量提升中的核心地位。MAHMOOD 等^[19]在美国的研究发现,土壤碳对玉米产量的预测作用甚至优于土壤健康评分(SHS)。饱和导水率(K_s)反映土壤的物理结构,在本研究中代表第 2 主成分。饱和导水率是强变异的土壤物理指标(表 1),通常土壤指标的变异性越强,根据地统计理论,获取相同的精度,需要更多的数据量,强变异指标一般不宜作为土壤质量的评价指

标,但是,耕作层和亚表层 K_s 差异极为显著,远超过土壤容重的差异,说明 K_s 比土壤容重对土壤物理结构的改变更为敏感,土壤容重反映土壤总孔隙度,而 K_s 更多的反映土壤的大孔隙度,土壤结构破坏首先改变土壤大孔隙占比,而少数大孔隙可贡献 90% 以

上的渗漏通量^[20]。PCA 将 K_s 筛选为第 2 主成分,说明土壤导水能力为代表的土壤物理退化是土壤质量退化的重要体现形式。此外,与已有研究^[21] 结果类似,速效磷、CEC 和土壤砂粒含量作为重要的土壤理化指标,也成为典型黑土坡耕地 SQI 的评价指标。

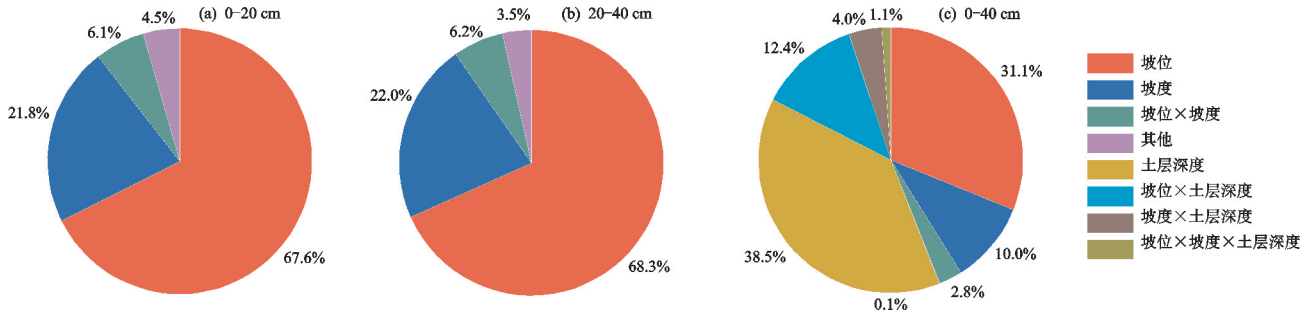


图5 基于一般线性模型 (GLM) 量化相关因素对土壤质量的贡献

Fig. 5 The contributions of related factors to soil quality based on a general linear model (GLM)

3.2 侵蚀沉积在坡耕地土壤质量空间分异中的作用

以坡度坡位为代表的地形因子显著影响坡耕地土壤质量。坡度和坡位是衡量土壤侵蚀程度的重要指示指标,以坡度为例,一般坡度越大,降水产流系数也越高,径流的侵蚀动能越大,土壤被侵蚀的风险越高。本研究表明,坡中的土壤质量显著低于坡上和坡下,随着坡度增加,SQI 显著下降($p < 0.05$)。土壤侵蚀破坏土壤的物理结构,降低土壤的养分含量^[22],土壤侵蚀导致的土壤退化进而降低农田的生产力,以黑土区为例,土壤侵蚀导致农田生产力下降 15% 左右^[23]。虽然,土壤侵蚀对农业生态系统的危害已有共识,但是,侵蚀—沉积作用对土壤质量的不同影响研究比较欠缺。通常认为沉积区的土壤质量高于侵蚀区^[24]。本研究发现,沉积作用并不一定提升土壤的质量,沉积区耕作层的 SQI 略低于坡上,即沉积作用对土壤质量出现负面影响。重要原因是侵蚀搬运的主要是细颗粒^[25],导致沉积区的黑土变得更加黏重,坡下的土壤砂粒含量略低于坡上(图 2f),土壤砂粒含量降低,细颗粒增加,降低土壤的导水导气性能。另外,随着侵蚀的加剧,侵蚀区的土壤养分急剧降低,沉积的土壤中养分含量不高,也是沉积区土壤质量提升有限的重要原因。本研究中,坡下沉积区耕层土壤的总碳含量低于坡上,和坡中更为接近(图 2a)。沉积作用对土壤质量的影响和土壤质地和侵蚀阶段有关,如果土壤质地偏砂质,细颗粒沉积改善土壤的保水保肥能力,侵蚀初期或者侵蚀区土壤养分含量高,也增加沉积过程在提升土壤质量中的积极作用。

黑土坡耕地的土壤质量受侵蚀因子和土层深度的共同影响。土层深度、坡位和坡度对土壤质量的贡献分别为 38.5%, 31.1%, 10.0% (图 5)。土层深度对土壤质量变异的高解释度主要归因于耕作层和亚表

层在有机物料输入和生物活动上的巨大差异,施肥和秸秆还田提高土壤碳、速效养分等与土壤质量密切相关指标的含,主要发生在耕作层。另外,由于耕作层的养分和温度等更适宜生物活动,耕层是作物根系生长的主要场所,也是微生物分布最为密集的区域,微生物能提高土壤养分的周转效率,微生物残体也能丰富耕层土壤的碳来源和改善碳活性,都有利于土壤质量的提升。侵蚀因子对 0—40 cm 土层深度土壤质量变异的贡献达到近 50%,黑土区部分侵蚀强烈区域出现的“破皮黄”现象就是侵蚀降低土壤质量的直接证据^[4]。尽管,侵蚀因子对土壤质量的贡献在不同的气候区,不同地形条件下有所不同,但是,侵蚀对土壤质量具有不可忽视的影响。

4 结论

基于高空间分辨率土壤理化属性数据,在明确土壤理化属性空间特征的基础上,构建侵蚀退化坡耕地土壤质量指标体系,并阐明侵蚀—沉积作用对严重侵蚀坡耕地黑土质量空间分异格局的影响。不仅土壤养分的含量随土层深度增加而降低,土壤养分指标的空间状态也与土壤层次密切相关,亚表层土壤养分的空间异质性一般强于耕作层,并且土壤养分和相关指标的相关性在亚表层更强。除耕作、施肥等农事操作外,土壤侵蚀也是影响土壤理化属性空间特征的重要因素。

侵蚀沉积作用通过影响土壤总碳、导水性能、土壤颗粒组成等土壤关键指标改变土壤质量的空间格局。侵蚀显著降低土壤质量,强烈侵蚀区的土壤质量显著低于弱侵蚀区和沉积区($p < 0.05$)。在侵蚀退化严重的坡耕地,沉积作用并未对耕层土壤质量起到积极影响,沉积区的 SQI 和弱侵蚀区无显著差异($p > 0.05$),侵蚀的发生阶段和不同侵蚀部位本身的土壤质量影响侵蚀沉积

的作用。在侵蚀严重的坡耕地,土壤质量受土层深度、坡位和坡度等因素的共同影响,坡位、坡度及其交互作用对土壤质量的解释度大于土层深度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 梁爱珍,李禄军,祝惠.科技创新推进黑土地保护与利用,齐力维护国家粮食安全:用好养好黑土地的对策建议[J].中国科学院院刊,2021,36(5):557-564.
LIANG A Z, LI L J, ZHU H. Protection and utilization of black land and making concerted and unremitting efforts for safeguarding food security promoted by sci-tech innovation: Countermeasures in conservation and rational utilization of black land [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(5): 557-564.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] CHENG S L, FANG H J, ZHU T H, et al. Effects of soil erosion and deposition on soil organic carbon dynamics at a sloping field in black soil region, northeast China[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(4): 521-529.
- [7] 冯志珍.东北薄层黑土区土壤侵蚀:沉积对土壤性质和玉米产量的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
FENG Z Z. Research on the effect of soil erosion-sedimentation on soil properties and corn yield in thin black soil area of Northeast China[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2018.
- [8] DORAN J W, PARKIN T B. Defining and assessing soil quality[M]//SSSA Special Publications. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 2015: 1-21.
- [9] SHI C, ZHANG Q W, YU B W. Higher improvement in soil health by animal-sourced than plant-sourced organic materials through optimized substitution[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2024, 363: e108875.
- [10] LI H Y, ZHU N Y, WANG S C, et al. Dual benefits of long-term ecological agricultural engineering: Mitigation of nutrient losses and improvement of soil quality[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 721: e137848.
- [11] 汪景宽,王铁宇,张旭东,等.黑土土壤质量演变初探 I:不同开垦年限黑土主要质量指标演变规律[J].沈阳农业大学学报,2002,33(1):43-47.
WANG J K, WANG T Y, ZHANG X D, et al. An approach to the changes of black soil quality (I): Changes of the indices of black soil with the years of reclamation [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(1): 43-47.
- [12] 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].陕西 杨凌: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. Research on the effects of soil erosion on soil quality and corn yield in typical black soil areas[D]. Yangling, Shaanxi: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education), 2016.
- [13] 张兴义,李健宇,郭孟洁,等.连续 14 年黑土坡耕地秸秆覆盖免耕水土保持效应[J].水土保持学报,2022,36(3):44-50.
ZHANG X Y, LI J Y, GUO M J, et al. Effects of straw mulching and no tillage for continuous 14 years on soil and water conservation in mollisols sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 44-50.
- [14] 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. Soil erosion classification standard: SL 190—2007[S]. Beijing: China Water Resource and Hydropower Press, 2008.
- [15] Sparks D, Donald L, Page A, et al. Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods[M]. New York: John Wiley and Sons, 2020.
- [16] GUO S J, HAN X H, LI H, et al. Evaluation of soil quality along two revegetation chronosequences on the loess hilly region of China[J]. The Science of the Total Environment, 2018, 633: 808-815.

(下转第 399 页)

- [17] 简中华,宋金秋,曲颖,等.浙中某县 Cd 元素地球化学特征及生态效应[J].地球与环境,2013,41(6):618-624.
JIAN Z H, SONG J Q, QU Y, et al. Geochemical characteristics of element Cd and its ecological effect from a county, central Zhejiang [J]. Earth and Environment, 2013,41(6):618-624.
- [18] 刘道荣,周漪.浙西水田土壤镉形态与有效性研究[J].物探与化探,2020,44(5):1239-1244.
LIU D R, ZHOU Y. Speciation characteristics and bio-availability of cadmium in paddy soils, western Zhejiang province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020,44(5):1239-1244.
- [19] SPARK D L. Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods[M]. Madison: SSSA and ASA, 1996:703-919.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
Institution of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physicochemical analysis [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978.
- [21] 瞿建国,徐伯兴,龚书椿.连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态[J].环境化学,1997,16(3):277-283.
QU J G, XU B, GONG S C. Sequential extraction techniques for determination of selenium speciation in soils and sediments [J]. Environmental Chemistry, 1997, 16(3):277-283.
- [22] 章明奎.土壤地理学与土壤调查技术[M].北京:中国农业科学技术出版社,2011.
ZHANG M K. Classification, geography and investigation technologies of soils[M]. Beijing: China Agricultural Sciences and Technology Press, 2011.
- [23] 徐颖菲,张耿苗,张丽君,等.亚热带不同母岩成壤过程中金属元素的迁移和积累特点[J].浙江农业学报,2019,31(12):2064-2072.
XU Y F, ZHANG G M, ZHANG L J, et al. Migration and accumulation of metal elements during formation of soils derived from different parent rocks in subtropical zone[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 31(12): 2064-2072.
- [24] 姚林波,高振敏,龙洪波.分散元素硒的地球化学循环及其富集作用[J].地质地球化学,1999,27(3):62-67.
YAO L B, GAO Z M, LONG H B. Despersed element selenium: Its geochemical cycle and enrichment [J]. Geology-Geochemistry, 1999, 27(3): 62-67.
- [25] 刘小明,李泽琴,沈松.土壤中硒的生物可利用性研究进展[J].江西农业学报,2012,24(9):120-123.
LIU X M, LI Z Q, SHEN S. Research progress in bio-availability of selenium in soil [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(9): 120-123.
- (上接第 390 页)
- [17] BÜNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z G, et al. Soil quality: A critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 105-125.
- [18] 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.
- [19] MAHMOOD S, NUNES M R, KANE D A, et al. Soil health explains the yield-stabilizing effects of soil organic matter under drought[J]. Soil and Environmental Health, 2023, 1(4): e100048.
- [20] QIAN Y Q, YANG X F, ZHANG Z B, et al. Estimating the permeability of soils under different tillage practices and cropping systems: Roles of the three percolating pore radii derived from X-ray CT[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 235: e105903.
- [21] LIN L, DE PUE J, VIVANCO A K M, et al. Visual assessment of soil structural quality across soil textures and compaction levels-Part I: Examination of intact soil cores[J]. Geoderma, 2022, 426: e116099.
- [22] 史东梅,金慧芳,蒋光毅.土壤侵蚀对坡耕地耕层质量退化作用及其评价趋势展望[J].农业工程学报,2019,35(18):118-126.
SHI D M, JIN H F, JIANG G Y. Degradation effect of soil erosion on tillage-layer quality of slope farmland and its evaluation trend[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(18): 118-126.
- [23] 韩晓增,邹文秀.我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J].中国科学院院刊,2018,33(2):206-212.
HAN X Z, ZOU W X. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in northeast China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 206-212.
- [24] 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,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.
- [25] 童莉莎.侵蚀—沉积环境下土壤有机碳动态变化及其对无机碳的影响[D].武汉:华中农业大学,2023.
TONG L S. Dynamic changes of soil organic carbon and its effect on inorganic carbon under erosion-sedimentation environment [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.