

王中华, 王乾坤, 周天赐, 谢媛圆, 王军光. 黑土长缓坡耕地侵蚀与碳流失对玉米大豆全生育期覆盖的响应特征[J]. 土壤学报, 2026,

WANG Zhonghua, WANG Qiankun, ZHOU Tianci, XIE Yuanyuan, WANG Junguang. Responses of Erosion and Carbon Loss to Full-growing-season Maize and Soybean Cover on Long Gentle-slope Black Soil Croplands[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

黑土长缓坡耕地侵蚀与碳流失对玉米大豆全生育期覆盖的响应特征*

王中华¹, 王乾坤¹, 周天赐¹, 谢媛圆², 王军光^{1†}

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430072)

摘要: 针对东北黑土区长缓坡耕地土壤侵蚀与碳流失问题, 本研究通过原位径流小区模拟降雨试验, 探究大豆、玉米全生育期覆盖下不同坡面位置侵蚀特征及泥沙碳流失规律, 并优化覆盖管理因子(C因子)模型。在黑龙江省宾县福合小流域设置不同坡位(坡上、坡中、坡下)的径流小区。通过原位人工模拟降雨, 分析大豆玉米覆盖对产流产沙、泥沙碳流失及水沙关系的影响, 并整合覆盖度与株高构建C因子模型。结果表明: 大豆玉米覆盖时, 各小区产流产沙量随大豆、玉米生育期的推进, 先降低后增加, 呈“V”型变化趋势, 减流减沙效益最优时期分别为大豆始粒期(33.76%~40.33%、89.96%~94.54%)和玉米抽雄期(46.32%~54.23%、92.67%~96.29%); 玉米相较于大豆具有更优的防蚀能力, 不同坡位侵蚀敏感性表现为坡下>坡中>坡上, 且产流产沙量及径流泥沙浓度与作物覆盖度和株高呈极显著负相关。植被覆盖度融合株高的优化模型($C = -0.595 \log(0.01V) \times (0.00491H + 1.65048)$)较传统模型均方根误差降低了59%。泥沙碳流失量与作物覆盖度和株高呈显著负相关, 作物覆盖最高可使泥沙碳流失总量减少91.04%~96.12%(大豆始粒期/玉米抽雄期作用效果最优), 且泥沙碳流失量中32.65%~69.91%由大颗粒泥沙(>0.25 mm)贡献。研究揭示了黑土长缓坡耕地大粒作物全生育期覆盖下土壤及泥沙碳流失规律, 为黑土长缓坡耕地侵蚀防治与碳固存提供理论依据。

关键词: 黑土坡耕地; 作物覆盖; 土壤侵蚀; 土壤有机碳流失; C因子

中图分类号: S157 文献标志码: A

Responses of Erosion and Carbon Loss to Full-growing-season Maize and Soybean Cover on Long Gentle-slope Black Soil Croplands

WANG Zhonghua¹, WANG Qiankun¹, ZHOU Tianci¹, XIE Yuanyuan², WANG Junguang^{1†}

(1. Research Center of Soil and Water Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Institute of Plant Protection, Soil and Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to investigate the erosion characteristics and sediment carbon loss patterns at different slope positions in the long and gentle slope farmland of the black soil region in Northeast China. The research focused on the full - growth - period coverage of soybean and maize, and at the same time, optimized the cover management factor (C - factor) model to provide a theoretical basis for erosion control and carbon sequestration in this specific geographic area.

* 国家自然科学基金项目(42177317)和国家重点研发计划项目(2021YFD1500703)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42177317) and National Key Research and Development Program of China (No.2021YFD1500703)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jgwang@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 王中华(1999-), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: wzonghuax@163.com

收稿日期: 2025-07-04; 收到修改稿日期: 2026-03-04; 网络首发日期(www.cnki.net):

【Method】 The research was conducted in the Fuhe small watershed of Bin County, Heilongjiang Province. Runoff plots were established at three distinct slope positions: the upper slope, middle slope, and lower slope. Through in situ artificial simulated rainfall experiments, the study systematically analyzed the impacts of soybean and maize coverage on runoff generation, sediment yield, and sediment carbon loss. The dynamic relationship between water and sediment was explored. Furthermore, by integrating two key vegetation parameters, crop coverage and plant height, a comprehensive and optimized C-factor model was constructed to improve prediction accuracy. 【Result】 The results demonstrated that under the coverage of soybean and maize, the runoff and sediment yield in all plots followed a "V"-shaped trend, initially decreasing and then increasing as the crop growth periods progressed. The optimal stages for reducing runoff and sediment were identified as the beginning of the grain filling stage for soybean (with reduction rates of 33.76%~40.33% and 89.96%~94.54%, respectively) and the tasseling stage for maize (46.32%~54.23% and 92.67%~96.29%, respectively). Comparatively, maize exhibited superior erosion resistance capabilities to soybean. Regarding spatial distribution, the erosion sensitivity across different slope positions followed the hierarchy of lower slope > middle slope > upper slope. Statistical analysis showed that runoff volume, sediment yield, and sediment concentration in runoff were all highly significantly negatively correlated with both crop coverage and plant height. The optimized model integrating these parameters ($C = -0.595\log(0.01V) \times (0.00491H + 1.65048)$) demonstrated a significant improvement, reducing the root mean square error (RMSE) by 59% compared to traditional models. Additionally, sediment carbon loss was significantly negatively correlated with crop coverage and plant height. Maximum crop coverage was found to reduce total sediment carbon loss by 91.04%~96.12%, with the most effective stages being soybean grain filling and maize tasseling. Notably, 32.65%~69.91% of the total sediment carbon loss was contributed by large sediment particles (> 0.25 mm). 【Conclusion】 This study successfully reveals the specific patterns of soil and sediment carbon loss under the full-growth-period coverage of large-grain crops on long and gentle slopes in the black soil region. The research highlights the critical role of crop phenology and slope position in influencing erosion processes. The findings and the optimized C-factor model provide a robust theoretical foundation for developing effective erosion prevention measures and enhancing carbon sequestration strategies in the long and gentle slope farmland of the Northeast China black soil region.

Key words: Black soil sloping farmland; Crop coverage; Soil erosion; Soil organic carbon loss; C factor

东北黑土区土壤有机质丰富肥力高,是中国重要的商品粮食基地之一^[1],黑土区地貌特点主要是山前波状起伏台地或漫岗地,坡度较缓,坡度一般为 $1^{\circ} \sim 8^{\circ}$,坡长一般为500~2 000 m,最长达4 000 m^[2-3]。该地区属温带大陆性季风气候,季节性降雨集中。坡耕地在侵蚀性降雨的作用下极易造成严重的土壤侵蚀,导致表层黑土及土壤有机质的流失,威胁粮食生产与生态安全^[4-6]。在侵蚀性降雨期间,雨滴的击打会导致土壤团聚体的破碎,而坡面径流则会将这些破碎的土壤颗粒向坡下搬运,同时有机碳以泥沙为载体随水流迁移^[7-8]。长且缓的坡面可能导致侵蚀的泥沙未能完全流出地块,而沉积在不同坡位上,导致不同坡位土壤理化性质存在较大差异。坡上与坡中作为侵蚀区域土层变薄结构退化,土壤有机质与养分随着土壤颗粒的迁移而流失。坡下作为沉积区域土层较厚结构相对良好,土壤有机质与养分则相对富集^[9-10]。鉴于不同坡位之间存在显著差异,开展基于坡面位置差异的精准研究,对于深入揭示东北黑土区长缓坡耕地的土壤侵蚀机制具有至关重要的意义。

大豆和玉米作为东北黑土区长缓坡耕地主要作物,其生育期(5月上旬至10月中旬)与黑土区雨季(6—8月)高度重叠,这种物候节律与降水周期的同步性对坡面侵蚀过程有着密切的影响^[11]。特别是其覆盖层作为降雨雨滴与地表土壤间的缓冲层,能够有效地拦截降雨动能、阻滞径流,提高土壤抗侵蚀能力,有良好的蓄水保土功能^[12-13]。针对植被覆盖度对水土保持作用的影响已有大量研究^[14-15],其中针对土壤侵蚀方程(USLE)中覆盖管理因子(C因子)的研究最为普遍^[16]。刘秉正等^[17]、蔡崇法等^[18]、刘宝元等^[19]知名学者针对农作物的植被覆盖度估算C值给出了不同计算公式。然而,作物冠层通常是复杂的三维结构,覆盖度仅能体现作物冠层在平面二维的投影。株高则作为冠层结构的另一关键影响因素,能够改变雨滴击溅到土壤表面的动能,在土壤侵蚀产沙过程中具有不可忽视的影响^[20-22]。因此,将株高纳入C因

子模型是提高其精度的重要措施。此外,大豆、玉米两种作物的冠层结构、生长动态以及根系形态存在本质差异,玉米植株高大、茎秆根系粗壮、冠层郁闭晚但垂直结构突出、根系浅而广泛;而大豆植株相对低矮、冠层郁闭早、覆盖更为密集、根系深而集中。这些差异导致二者在不同生育期的覆盖度、株高以及根系固土能力等方面均不相同,从而使其水土保持功能存在显著差异。现有研究针对作物覆盖对黑土长缓坡耕地侵蚀过程的影响,多聚焦于地块或区域尺度,缺乏坡面空间尺度的精细化分析,未能明确坡上、坡中、坡下因侵蚀沉积过程的差异。或是研究多局限于单一作物类型或特定生育期,缺乏对不同作物及其生育期冠层覆盖动态变化对土壤侵蚀过程影响的深入探讨。因此,将两种作物全生育期的冠层覆盖动态变化与长缓坡耕地空间异质性相耦合,系统研究其侵蚀过程的时空分异规律。尤其是玉米与大豆这两种冠层结构迥异的作物,其冠层覆盖动态如何影响长缓坡耕地不同坡位的水沙输移过程,以及不同粒级颗粒泥沙有机碳在坡面空间上的迁移规律,仍需进一步量化研究。

基于此,本研究以东北典型黑土缓坡耕地为研究对象,在同一长缓坡耕地的坡上、坡中、坡下分别建立原位径流小区进行模拟降雨试验,探究玉米、大豆全生育期覆盖下坡面侵蚀特征(产流产沙、水沙关系),整合覆盖度与株高优化 C 因子模型,并解析不同坡位泥沙碳迁移的粒级分选效应。以期对东北黑土区长缓坡耕地精准侵蚀防治、土壤碳固存及 C 因子模型本地化优化提供数据支撑与理论依据,对推动区域农业可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验开展于黑龙江省哈尔滨市宾县福合小流域(45°47′23.92N; 127°15′07.84E),海拔 182~251m,温带大陆性季风气候,年平均温度为 4.2℃,年平均降水为 681 mm。主要降水出现在 6—8 月,占全年降水量的 60%以上。该区域属于东北地区典型漫川漫岗丘陵区,该地区的土壤类型为典型黑土,土壤腐殖质层较厚,表层有机质含量丰富潜在肥力较高。主要种植作物为玉米(*Zea mays*. L.)和大豆(*Glycine max* (L.) Merr.)。土壤基础理化性质如表 1 所示。

表 1 研究区不同坡位土壤基本理化性状

Table 1 The basic physicochemical properties of soil at different slope positions in the study area								
坡位 Slope position	容重 Bulk density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity/%	土壤机械组成 Soil mechanical composition /%			平均质量直径 MWD/mm	pH	有机碳 SOC/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
			砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay			
坡上 Upper slope	1.27±0.06	48.38±3.97	19.35±3.80	61.94±2.88	18.71±0.94	1.54±0.09	5.48±0.06	17.70±3.00
坡中 Middle slope	1.36±0.10	50.01±7.89	17.65±7.89	67.81±7.50	14.64±3.00	1.28±0.15	5.83±0.23	20.62±1.53
坡下 Lower slope	1.39±0.05	47.91±5.98	23.38±7.73	60.27±8.29	16.35±3.46	1.22±0.09	5.57±0.09	23.27±1.91

1.2 试验设计

基于坡面侵蚀程度差异,选取一坡度约为 3° 的直行坡(坡长约为 520 m),在坡上、坡中和坡下分别设置 6 个径流小区,每 2 个为 1 组,共 9 组 18 个,径流小区为长 5 m×宽 1 m,每个径流小区的耕层厚度约为 20 cm,且坡度均修正为 3°。在每个坡位的径流小区内分别设置裸地、种植大豆、种植玉米三种处理,每个处理两个重复。径流小区内大豆和玉米均种植两行。大豆品种为“黑农 96”,播种间距为 10 cm,行间距为 25 cm,每个小区共 90 株。玉米品种为“协玉 250”,播种间距为 30 cm,行间距为 25 cm,每个小区共 30 株。施肥方式与当地农民一致。

依据作物生长、叶片的面积及数量将作物全生育期划分为五个生育期：幼苗期（P1）、大豆分枝期/玉米拔节前期（P2）、大豆开花期/玉米拔节后期（P3）、大豆始粒期/玉米抽雄期（P4）、成熟期（P5）。在每个生育期，以每组径流小区为单位进行模拟降雨试验，总计 45 场降雨试验。每个时期降雨前，借助 Image J 软件通过“照相法”测量植被覆盖度^[23]。用卷尺测定每颗植株顶端至地面的距离，取平均值即为株高。不同生育期大豆玉米植被覆盖度与株高如表 2 所示。

表 2 不同生育期下大豆与玉米的植被覆盖度与株高

Table 2 Vegetation coverage and plant height of soybean and maize at different growth periods

生育期 Growth period	大豆覆盖度 Soybean coverage/%			玉米覆盖度 Maize coverage/%		
	坡上 Upper slope	坡中 Middle slope	坡下 Lower slope	坡上 Upper slope	坡中 Middle slope	坡下 Lower slope
P1	10.71±1.11	11.6±0.66	12.33±1.02	22.12±3.07	27.47±0.94	18.18±1.11
P2	28.32±1.32	35.14±2.28	31.06±0.46	55.18±3.00	47.74±0.85	48.23±1.32
P3	50.57±2.63	53.08±0.24	51.96±0.28	71.96±0.74	75.41±0.75	72.72±2.63
P4	89.94±0.78	89.34±0.66	89.48±1.60	91.49±0.28	92.46±0.37	90.35±0.78
P5	44.78±2.23	46.49±2.38	46.11±1.59	85.49±0.65	85.18±0.29	78.96±2.23

生育期 Growth period	大豆株高 Soybean plant height/cm			玉米株高 Maize plant height/cm		
	坡上 Upper slope	坡中 Middle slope	坡下 Lower slope	坡上 Upper slope	坡中 Middle slope	坡下 Lower slope
P1	6.22±0.36	6.33±0.36	6.92±0.30	12.61±0.41	13.30±0.06	11.93±0.36
P2	35.00±0.54	42.64±0.17	37.5±0.41	143.58±4.29	102.63±3.43	117.15±0.54
P3	61.43±4.67	61.57±0.12	58.00±1.52	163.79±3.32	181.86±11.31	171.43±4.67
P4	101.03±1.12	100.05±0.45	100.03±2.27	228.58±0.48	234.58±0.34	220.78±1.12
P5	92.50±2.04	95.00±1.36	98.75±0.61	221.92±1.56	233.33±2.72	220.00±2.04

采用下喷式组合降雨模拟器，包括立式降雨器降雨组件、恒压供水罐、供水管道和控制阀，模拟降雨的均匀系数大于 90%。下喷式喷头高为 5 m，安装于由三脚架固定的降雨支架上，喷头与支架距离为 1.75 m，降雨高度为 5 m，有效降雨面积为 10 m²。可通过压力表调节供水压力进而控制降雨强度。每次降雨使用两组降雨器进行模拟试验，由于该地区夏季多大到暴雨，同时结合历年降雨数据，设置降雨强度为 60 mm·h⁻¹。为了保证模拟降雨时各小区具有均匀的初始土壤含水量，在降雨试验前先采用 30 mm·h⁻¹ 雨强进行预降雨，在产流开始时终止，同时用塑料布在径流地块上覆盖 12 h，以排出自由水。为准确校准实际降雨强度，在试验地块周围均匀布置六个雨量桶，每十分钟校准一次雨强。每次模拟降雨记录初始产流时间，产流后持续 60 min，每 4 min 用径流瓶收集径流和泥沙样本。

1.3 指标测定

用百分位天平精确测定水沙样本质量，通过湿筛法对泥沙颗粒进行分级，包括大颗粒（>0.25 mm）、中颗粒（0.25~0.053mm）、小颗粒（<0.053 mm）3 个粒级，烘干称重，并通过重铬酸钾—外加热法测定各粒级土壤有机碳含量^[24]。产流量、产沙量、径流泥沙浓度、泥沙碳流失量、减流减沙效益等的计算等参考已有研究计算^[25]。

1.4 C 因子模型的构建

根据 USLE 的定义，C 值为有植被覆盖或实施田间管理的土壤流失量与同等条件下清耕休闲地上的

土壤流失量之比。在本研究中为作物覆盖小区产沙量与裸地产沙量之比。为构建一个适用于东北黑土区主要作物且包含冠层结构信息的 C 因子模型, 选取在国内外得到广泛应用、且形式适用于本研究的三种经典 C 因子模型作为候选基础模型, 分别为刘秉正模型^[17]、蔡崇法模型^[18]、刘宝元模型^[19], 以上模型 V 为作物覆盖度, %。通过计算各模型预测 C 值与本研究所有实测 C 值之间的均方根误差 (RMSE, Root Mean Square Error), 评估其在本数据集上的适用性, 并选择 RMSE 最小的模型作为本研究的优化基础。选定基础模型后, 将株高作为调节因子引入, 以表征冠层垂直结构对侵蚀的影响。本研究测试了两种具有明确物理意义的整合方式, 一是加法整合 (差值形式): 假设株高对 C 值的贡献是独立于覆盖度的线性项。模型形式为: $C = \text{base} + aH + b$, 其中 base 为基础模型, a 和 b 为待拟合参数, H 为株高。二是乘法整合 (比值形式): 假设株高以乘性因子的方式调节覆盖度的防蚀效应。模型形式为: $C = \text{base} \times (cH + d)$, 其中 c 和 d 为待拟合参数, H 为株高。利用本研究获取的所有作物-生育期-坡位组合下的实测数据 (覆盖度 V、株高 H、实测 C 值), 采用非线性最小二乘法分别对上述两种整合形式的模型进行参数拟合。通过比较优化后模型的决定系数 (R^2) 和 RMSE 来评价两个模型的拟合精度。最终, 选择 R^2 最高、RMSE 最低的模型作为本研究推荐的优化 C 因子模型。

1.5 数据处理

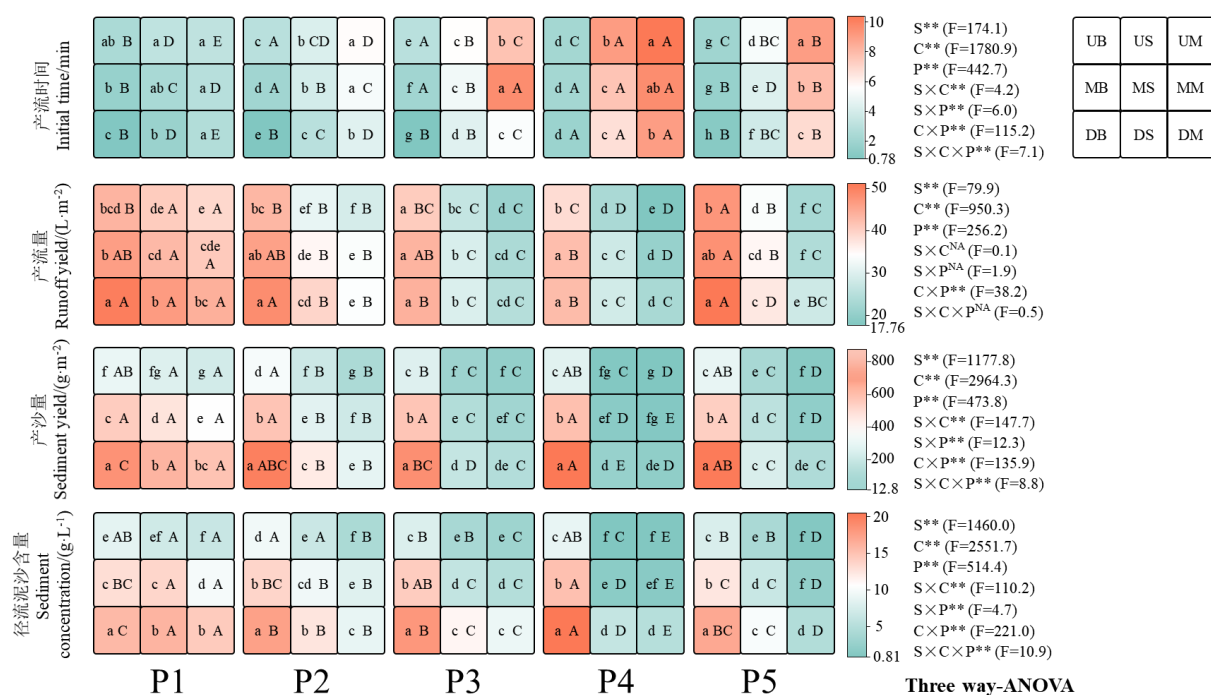
通过 Excel 2021 对数据进行处理和基础分析, 采用 SPSS 22.0 进行相关性和差异性统计分析, 差异显著性检验采用 LSD 法确定, 相关性基于 Pearson 方法分析, 采用 Origin 2021、R (v4.4.1) 绘图。

2 结果

2.1 作物全生育期覆盖对坡面侵蚀特征的影响

初始产流时间是指降雨开始至坡面产流所需要的时间, 通过量化降水-入渗动态平衡的临界点, 表征雨水地表储留及土壤入渗能力^[25]。整体上看, 在覆盖类型与生育期一致时, 初始产流时间表现为, 坡上 > 坡中 > 坡下。在各个生育期, 坡位相同时, 初始产流时间表现为玉米覆盖 > 大豆覆盖 > 裸地。两种作物覆盖时, 初始产流时间均随着作物生育期的推进逐渐延长, 在 P4 时期达到最大, 其中大豆、玉米覆盖滞后作用分别为 4.95~7.00 min、7.30~8.25 min。之后, 随着作物成熟 (P5 时期), 初始产流时间有所缩短。即作物的覆盖增加了坡面雨水的储留及土壤的入渗能力。产流量和产沙量分别是侵蚀过程中的核心表征指标。产流量指示了坡面水蚀过程的侵蚀潜能, 产沙量作为土壤物质迁移响应的综合指标, 两者为水土保持效益评估提供了关键诊断参数^[4]。产流量和产沙量在各个生育期, 均为坡下 > 坡中 > 坡上。值得注意的是, 产沙量相较于产流量在不同坡位上呈现出更大的差异。这一现象表明, 长缓坡耕地长期侵蚀沉积过程中土壤质地的差异对径流冲刷过程中泥沙迁移有着密切影响。在坡位相同的情况下, 两者则均表现为, 裸地 > 大豆覆盖 > 玉米覆盖。在作物覆盖时, 两者在 P1~P4 时期随着生育期的增长逐渐降低, 在成熟期 (P5) 出现上涨。其中 P4 时期玉米覆盖时产流量和产沙量最小, 分别为 17.76~23.01 L·m⁻²、12.80~64.35 g·m⁻²。径流泥沙含量作为坡面侵蚀过程中泥沙转运效率的核心指标。在不同坡位下径流泥沙含量呈坡下 > 坡中 > 坡上。随着生育期的推进, 自 P2 时期两种作物覆盖相较于裸地可以显著降低径流泥沙含量 ($P < 0.05$), 其中在 P4 时期作用效果最好。表明适宜的植被覆盖可以减弱径流对泥沙的转运。

三因素方差分析的结果表明 (图 1), 覆盖类型、坡位、生育期、覆盖类型与坡位的交互效应、覆盖类型与生育期交互效应、坡位与生育期的交互效应、以及三者之间的交互效应均可以显著影响初始产流时间、产沙量和径流泥沙浓度。对于产流量而言, 覆盖类型、坡位、生育期、覆盖类型与生育期交互效应对其有极显著影响, 覆盖类型与坡位的交互效应、坡位与生育期的交互效应、以及三者之间的交互效应则对其无显著影响。相关分析结果表明, 初始产流时间与作物覆盖度和株高呈极显著正相关, 产流量、产沙量、径流泥沙浓度与作物覆盖度和株高呈极显著负相关 (表 3)。结果表明植被覆盖的提高可以有效减弱降雨对坡面的侵蚀。



注：U、M、D 分别代表坡上、坡中、坡下，B、S、M 分别代表裸地、大豆、玉米。P1：幼苗期；P2：大豆分枝期/玉米拔节前期；P3：大豆开花期/玉米拔节后期；P4：大豆始粒期/玉米抽雄期；P5：成熟期。三因素方差分析中 S、C、P 分别代表坡位、覆盖类型、生育期。图中不同小写字母代表不同坡位及覆盖类型处理间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母代表不同生育期间差异显著 ($P<0.05$)。*表示显著 ($P<0.05$)，**表示极显著 ($P<0.01$)，NA 表示不显著。下同。

Note: U, M, and D represent the upper slope, middle slope, and lower slope, respectively, and B, S, and M represent bare land, soybean, and maize, respectively. P1: Seedling Stage, P2: Soybean Branching Stage / Pre-Stall for Corn, P3: Soybean Flowering Stage / Post-Stall for Corn, P4: Soybean Pod Initiation Stage / Tasseling Stage for Corn, P5: Maturity Stage. S, C, and P in the three-way ANOVA represent slope position, cover type, and fertility period, respectively. In the figure, different lowercase letters represent significant differences between different slope positions and coverage types ($P<0.05$). Different capital letters represent significant differences between different growth periods ($P<0.05$). * indicates significant ($P<0.05$), ** indicates highly significant ($P<0.01$), and NA indicates not significant. The same below.

图 1 大豆和玉米不同生育期对不同坡面位置侵蚀特征的影响 (以彩图发表)

Fig. 1 Effects of different growth periods of soybean and maize on erosion characteristics of different slope positions

表 3 植被覆盖度、株高与坡面侵蚀特征相关性

Table 3 Correlation analysis of vegetation coverage, plant height and slope erosion characteristics

	植被覆盖度 ^①	株高 ^②	初始产流时间 ^③	产流量 ^④	产沙量 ^⑤	径流泥沙含量 ^⑥
植被覆盖度 ^①	1	0.91**	0.94**	-0.93**	-0.85**	-0.83**
株高 ^②	0.91**	1	0.9**	-0.88**	-0.76**	-0.74**
初始产流时间 ^③	0.94**	0.9**	1	-0.94**	-0.87**	-0.87**
产流量 ^④	-0.93**	-0.88**	-0.94**	1	0.89**	0.85**
产沙量 ^⑤	-0.85**	-0.76**	-0.87**	0.89**	1	0.98**
径流泥沙含量 ^⑥	-0.83**	-0.74**	-0.87**	0.85**	0.98**	1

注：*表示显著 ($P<0.05$)，**表示极显著影响 ($P<0.01$)。Note: * indicates significant ($P<0.05$), ** indicates highly significant ($P<0.01$).

① Vegetation coverage, ② Plant height, ③ Runoff Initial time, ④ Runoff yield, ⑤ Sediment yield, ⑥ Sediment concentration

不同坡位、作物覆盖及生育期下，作物覆盖的减流减沙效益如图 2 所示。减流减沙效益主要受作物生育期的影响，随着生育期的推进，减流减沙效益逐步增加，在 P4 时期达到最大值，在作物成熟期出现下降。其中 P4 时期大豆玉米覆盖，减流效益分别达到 33.76%~40.33%、46.32%~54.23%，减沙效益分别达到 89.96%~94.54%、92.67%~96.29%。不同坡位之间的减流减沙效益差异明显低于不同生育期之间的差异，这表明在长缓坡耕地中，土壤结构的差异对植被覆盖的减流减沙效益影响相对较小。此外，在作物每个生育期，其减沙效益均高于减流效益，这表明作物覆盖对坡面泥沙的拦截作用大于对坡面径流的拦蓄

作用。径流既是土壤侵蚀的驱动因子，也是侵蚀泥沙颗粒的搬载体。剖析不同坡面位置的水沙耦合关系，能够直观呈现坡面侵蚀过程中水沙的动态平衡关系^[25]。将所有降雨的产流量与产沙量分别依据坡面位置和覆盖类型进行函数拟合（图 3）。两个变量之间满足函数 $y=ax^b$ ，其中 y 表示产沙量， x 表示产流量， a 、 b 分别为系数。在不同坡位条件下，拟合方程的 R^2 分别为 0.879（坡上）、0.907（坡中）、0.869（坡下）。坡下与坡中的产沙量随产流量增速较坡下更快。在不同覆盖类型下，拟合方程的 R^2 分别为 0.228（裸地）、0.859（大豆）、0.869（玉米），其中大豆和玉米的拟合效果优于裸地。同时，裸地的产沙量随产流量增长迅速，作物覆盖下，在产流量低于 $30 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ 时产沙量随产流增长速度较为缓慢，当产流量高于 $30 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ 时产沙量随产流量增长速度则较快。

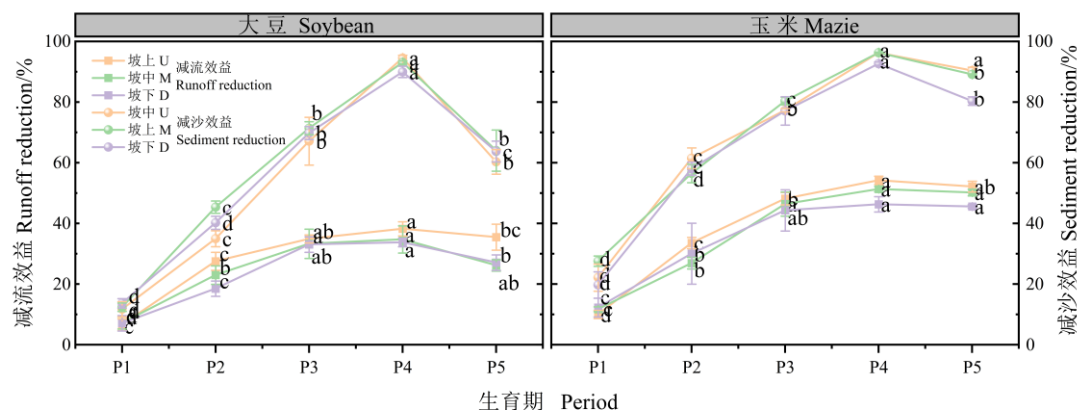


图 2 作物覆盖在不同坡位及生育期下的减流减沙效益（以彩图发表）

Fig. 2 Runoff and sediment reduction benefits of crop coverage under different slope positions and growth periods

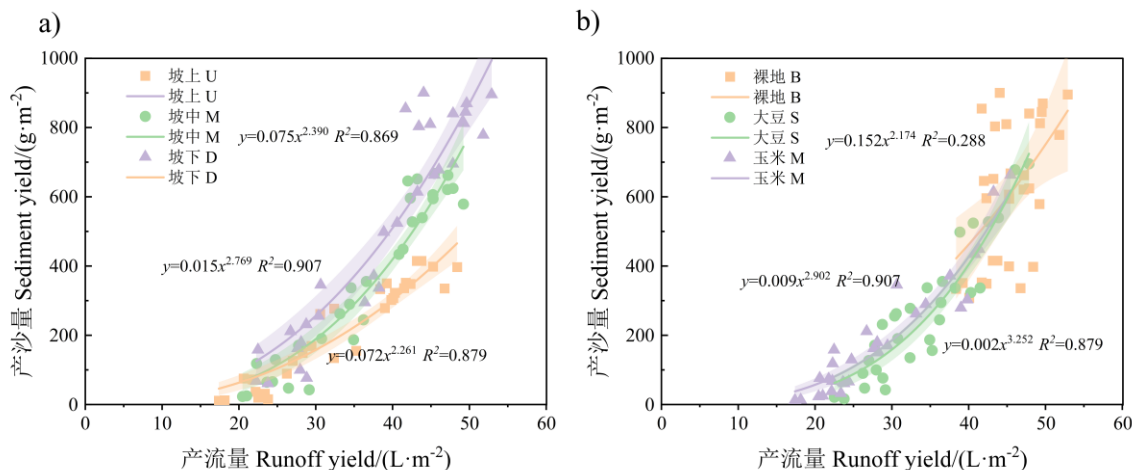


图 3 不同坡位及覆盖类型下的水沙关系（以彩图发表）

Fig. 3 The relationship between water and sediment under different slope positions and coverage types

2.2 作物全生育期覆盖下 C 因子模型构建及精度评价

作物覆盖与管理对土壤侵蚀的影响通常用 C 表示， C 定义为有植被覆盖或实施田间管理的土壤流失量与同等条件下清耕休闲地上的土壤流失量之比。 C 因子（植被覆盖和管理因子）是通用土壤流失方程（USLE）中的一个重要组成部分。 C 因子模型可以定量评估植被覆盖和土地管理措施对土壤侵蚀的影响，对预测土壤侵蚀风险具有重要意义^[26]。将大豆和玉米覆盖下的作物覆盖度和实测 C 值与刘秉正、蔡崇法以及刘宝元构建的 C 因子模型进行对比，三者的均方根误差分别为 0.13、0.32、0.23。结果表明作物覆盖度和 C 值与刘秉正的拟合曲线最为接近（图 4a）。因此以刘秉正的拟合函数关系及系数作为本研究 C 因

子模型构建的基本形式 ($C=0.595\lg(0.01V)$)。

将株高作为调节因子分别以差值和比值两种形式纳入模型进行拟合 (图 4b, 图 4c), 得到的 C 因子模型分别为:

$$C=-0.595\lg(0.01V)-0.00116H+0.30619, R^2=0.930, P<0.05 \quad (1)$$

$$C=-0.595\lg(0.01V)\times(0.00491H+1.65048), R^2=0.963, P<0.05 \quad (2)$$

式中, V 为作物覆盖度, %; H 为作物高度, cm。

以差值和比值构建的模型在 95% 置信区间下, R^2 分别为 0.930、0.963, 两者均具有较高的拟合度 ($P<0.05$)。两者的均方根误差分别为 0.072、0.053, 均低于刘秉正模型, 且精度分别提升了 44.61% 和 59.23%。其中, 大豆覆盖下以差值和比值构建的模型均方根误差分别为 0.084、0.058, 较基础模型精度分别提高 35.38% 和 55.38%。玉米覆盖下, 以差值和比值构建的模型均方根误差分别为 0.051、0.054, 较基础模型精度分别提高 60.77% 和 58.46% (图 4b, 图 4c)。以上结果表明, 以比值形式构建的 C 因子模型具有更好的拟合精度。

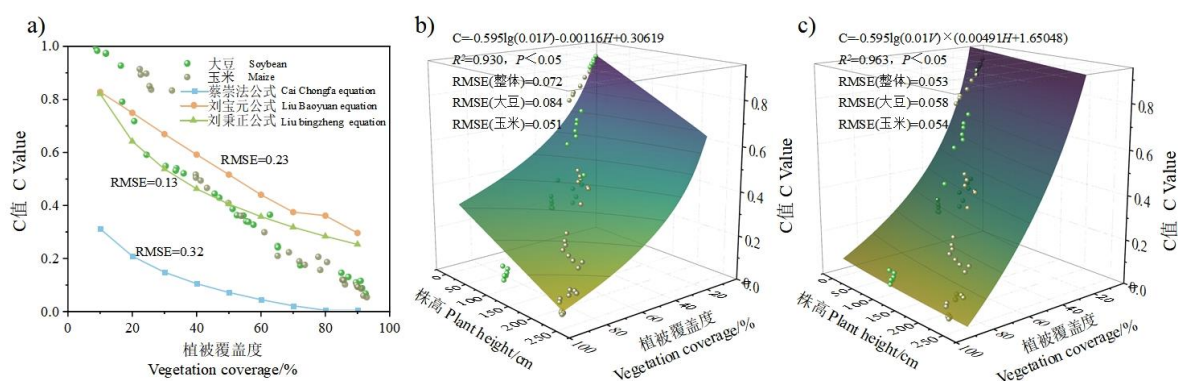
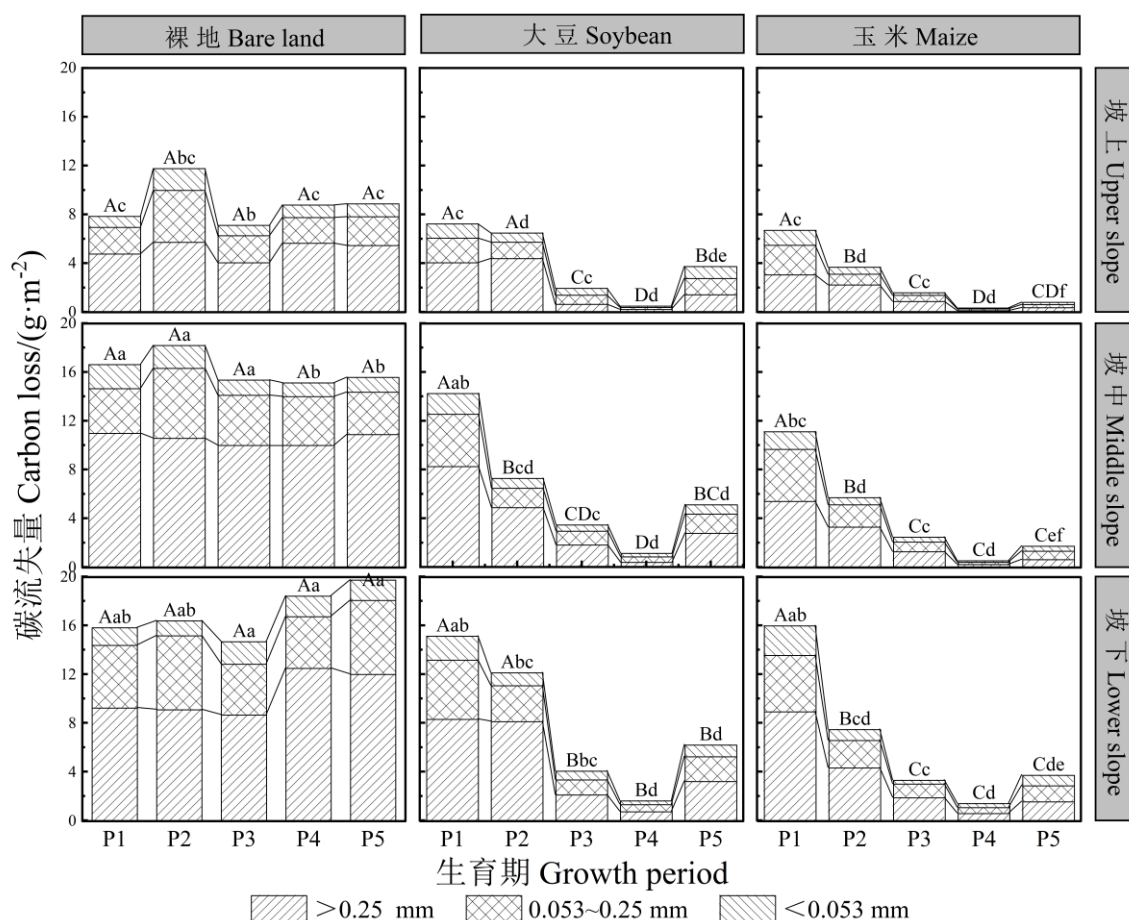


图 4 C 因子模型的构建及模型评价 (以彩图发表)

Fig. 4 Construction and evaluation of the C-factor model

2.3 作物全生育期覆盖下坡面泥沙碳流失特征

土壤有机碳是土壤肥力的重要组成部分, 同时有助于改善土壤结构, 增加土壤养分贮存和水分保持能力^[27]。有机碳的流失会导致土壤质量下降和侵蚀风险的增加。不同坡位、覆盖类型及生育期各小区随泥沙碳流失总量及各粒级泥沙碳流失量如图 5 所示, 整体上, 坡中和坡下的泥沙碳流失总量及各粒级泥沙碳流失量显著高于坡上 ($P<0.01$)。作物覆盖与裸地覆盖的泥沙碳流失特征存在明显的差异, 其中裸地条件下不同坡位总碳流失量以及各粒级泥沙碳流失量在不同生育期变化差异较小, 作物覆盖下碳流失量随着生育期的推进呈先降低后增加的趋势, 在 P4 时期泥沙碳流失总量及各粒级泥沙碳流失量均最小。其中大豆覆盖和玉米覆盖较裸地泥沙碳流失总量分别减少 91.04%~94.34%、92.22%~96.12%。泥沙碳流失总量中由大颗粒泥沙碳流失量占比达到 32.65%~69.91%, 中颗粒泥沙碳流失量和小颗粒泥沙碳流失量则分别占比 21.87%~39.54%、7.45%~28.79%。结果表明, 坡面侵蚀过程中土壤碳主要是通过大颗粒泥沙迁移而流失。



注：图中不同小写字母代表不同坡位及覆盖类型处理间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母代表不同生育期间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: In the figure, different lowercase letters represent significant differences between different slope positions and coverage types ($P<0.05$).

Different capital letters represent significant differences between different growth periods ($P<0.05$).

图 5 不同坡位、覆盖类型及生育期下各粒级泥沙颗粒碳流失量

Fig. 5 The amount of carbon loss of sediment particles of different particle sizes under different slope positions, cover types and growth periods

三因素方差结果表明 (图 6a)，坡位、覆盖类型、生育期、覆盖类型与生育期的交互作用均能极显著影响泥沙碳流失总量及各粒级泥沙碳流失量 ($P<0.01$)，覆盖类型与坡位的交互作用可以极显著影响泥沙碳流失总量及大颗粒和中颗粒的泥沙碳流失量 ($P<0.01$)，对小颗粒泥沙碳流失无显著影响。坡位与生育期的交互作用可以显著影响泥沙碳流失总量和中颗粒泥沙碳流失量 ($P<0.05$)，坡位、覆盖类型及生育期三个因素的共同交互作用则对泥沙碳流失无显著影响。相关性分析结果表明 (图 6b)，泥沙碳总流失量及各粒级泥沙碳流失量与产流量、产沙量、径流泥沙含量呈极显著正相关 ($P<0.01$)，与植被覆盖度、株高、初始产流时间呈极显著负相关 ($P<0.01$)。同时，相较于株高，植被覆盖度与泥沙碳总流失量及各粒级泥沙碳流失量具有更强的负相关关系。

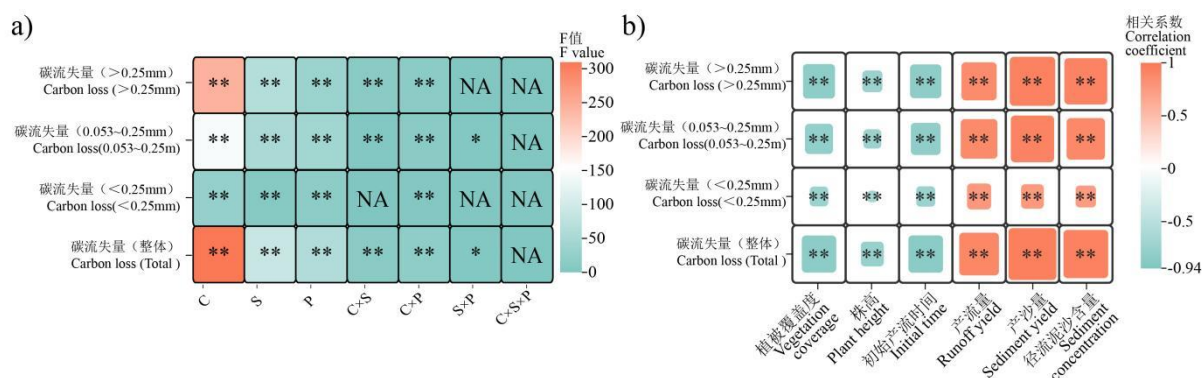


图 6 不同颗粒泥沙碳流失量三因素方差分析与侵蚀特征指标相关性 (以彩图发表)

Fig. 6 Three-way NAOVA of carbon loss of different particle sediments and correlation analysis with erosion characteristic indexes

3 讨论

本研究基于原位径流小区试验,揭示了不同坡位大豆玉米全生育期覆盖下坡面侵蚀特征。在不同覆盖类型条件下,相较于裸地,玉米和大豆覆盖能够显著延长初始产流时间,同时降低产流量、产沙量以及径流泥沙含量。此外,产流量、产沙量和径流泥沙浓度与作物覆盖度呈现极显著的负相关关系。较高的作物覆盖度和较大的株高通常对应着更为复杂的冠层结构,一方面可以有效阻挡雨滴对地表的直接冲击,另一方面可以使部分水流沿茎秆流下随根系下渗,进而延缓地表径流的形成速度^[12]。这与植被冠层截留雨水、根系增强土壤入渗及抗冲刷能力的理论一致^[11,28]。随着作物生育期的推进减流减沙效益呈倒“V”型的变化趋势,其在 P4 时期具有最好的减流减沙效益,在作物成熟期(P5)减流减沙效益下降。这是因为随着生育期的推进,作物冠层覆盖的增加和根系的生长显著增强了地表的水分涵养能力和抗侵蚀能力。然而,当作物进入衰老期,覆盖度和根系活力下降,导致抗蚀能力显著减弱,这与相关研究的结果保持一致^[29-31]。值得注意的是,本研究中玉米覆盖的水土保持效益优于大豆覆盖,这与 Yan 等^[11]在东北黑土区坡耕地田间径流小区试验结果相一致。本研究中,玉米相较于大豆,其具有更大的植被覆盖度和更高的株高,这种差异与作物本身的生物学特性密切相关,玉米作为高大草本植物,其茎秆和叶片的空间分布更有利于形成多层拦截结构,而大豆植株相对低矮,分枝较少,冠层覆盖的连续性和完整性较弱。然而,王全九等^[32]在黄土坡耕地上的一项研究表明大豆的水土保持效益优于玉米,这可能是由于种植区域存在差异,黑土区相较于黄土区,土壤养分含量更高,更有利于高大玉米的生长,从而提升了玉米的覆盖度和根系对土壤的固持能力。总体而言,这一结果与作物形态差异对侵蚀阻力影响的结论相吻合^[33-34]。在不同坡位上,无论裸地还是大豆玉米覆盖,产沙量和径流泥沙浓度均表现为坡下大于坡中大于坡上。水沙关系的结果也表明,坡面输沙过程存在显著空间异质性。相较于坡上,坡下产沙量随产流量增加增长率更大。这一结果受到长期的侵蚀与沉积作用下坡位土壤理化性质差异的显著影响。在长坡耕地上,坡下区域由于长时间接受来自上坡径流所携带的松散沉积物,这些沉积物不断堆积并改变了坡下土壤的结构和成分,从而使得坡下区域的泥沙对径流迁移的敏感性明显高于坡中和坡上区域^[35-37]。这种现象表明,坡下土壤因其特殊的沉积条件,更容易受到水流冲刷的影响,进而导致泥沙流失的风险大幅增加。

针对农作物覆盖度估算 C 因子值,刘秉正等^[17]、蔡崇法等^[18]、刘宝元等^[19]给出了不同的计算公式。其中,利用植被覆盖度估算 C 值仍是目前 C 因子计算的主要方法之一。本研究仍以植被覆盖度作为关键拟合因子。所得结果表明,相较于其他模型,刘秉正原模型($C=0.5951g(0.01I)$)具有较低均方根误差。通过整合株高调节因子,其差值模型和比值模型的均方根误差分别降低至 0.072 和 0.053,印证了“覆盖度

-株高”协同优化是提升模型预测精度的关键路径。然而,作物覆盖与管理对土壤侵蚀的影响是个复杂的过程,其中植被覆盖度与株高固然是影响土壤侵蚀的关键因素,但其仅为表征地表作物覆盖因素,不能代表C因子定义中的其它管理因素。有鉴于此,徐宁等^[26]、谢欣利等^[38]对地表糙度、土壤结皮等管理因子进行了研究并分别构建了植被覆盖与管理因子模型,模型精度较高。然而结皮厚度、糙度等土壤微地形参数在实地调查过程中获取难度较大,对其应用性造成了一定的局限性。本研究中虽仅通过植被覆盖度与株高两个因子构建C因子模型,但仍能达到较为理想的预测精度,同时也大大提高了其在实际生产应用中的便捷性。值得注意的是,本研究中的C因子模型是基于原位径流小区的模拟降雨数据得到的,难免受试验误差的影响。因此在不同降雨强度、土地利用类型、气候区以及自然降雨条件下多点验证或长期监测,对模型的推广应用仍十分重要。

探究大粒作物全生育期覆盖下东北黑土长缓坡耕地不同坡位下土壤有机碳的迁移特征,有助于深入理解作物种植周期内降雨驱动下土壤碳迁移动态过程,为减少碳流失提供理论依据。泥沙作为碳流失的载体,使得碳流失量与泥沙流失量密切相关^[39]。泥沙碳总流失量与产沙量在不同坡位及不同生育期作物覆盖下具有一致的变化趋势,两者呈极显著正相关,相关系数达到0.95。值得注意的是,泥沙碳流失总量中32.65%~69.91%由大颗粒贡献,这表明黑土缓坡耕地碳流失主要依赖于大颗粒泥沙的迁移。一方面黑土由于其本身具有较高的有机碳含量,使其团聚体在雨滴击溅和径流冲刷过程中不易破碎,泥沙中往往大颗粒的占比相对更高^[40-41]。另一方面,相较于小颗粒泥沙,大颗粒泥沙往往具有更高的有机碳含量以维持土壤颗粒间的胶结^[42]。随着大豆玉米生长植被覆盖度的增加,泥沙碳总流失量中大颗粒泥沙碳流失量占比逐步下降。这是由于作物生长初期对径流的消减作用相对较弱,更大的径流量和径流速率更容易带动较大的泥沙颗粒迁移,随着作物生长,冠层覆盖度的提高和根系的生长可以有效减小径流量和径流速率,使得泥沙中大颗粒占比逐渐降低^[43-45]。方差分析结果显示坡位与生育期的交互作用可以显著影响泥沙碳流失总量和中颗粒泥沙碳流失量,而坡位、覆盖类型与生育期的三因子交互作用对泥沙碳流失量无显著影响,这可能与覆盖类型和生育期这两个因子不相互独立有关。植被阻控泥沙碳流失的效应主要通过地表覆盖度和株高等物候指标实现,而这些指标本质上是作物随生育期演变的具体表现。因此二者在解释泥沙碳流失的变异时存在一定的统计耦合性,进而导致坡位与生育期的交互作用,在叠加覆盖类型后形成的三因素交互作用未能达到显著水平。相关性分析则进一步量化了植被参数与碳流失的响应关系,相较于株高,植被覆盖度与碳流失量具有更强的负相关关系。表明冠层密度的物理屏障作用较植株垂直结构对碳保存更为关键^[33, 46]。

4 结 论

本研究通过田间原位模拟降雨试验,探究了玉米与大豆覆盖对东北黑土区长缓坡耕地侵蚀过程及有机碳流失的调控作用。主要结论如下:作物类型与生育期动态共同调控坡面侵蚀过程。玉米因其更高的株高与覆盖度,其防蚀能力优于大豆。两种作物的防护效能均随生育期呈倒“V”型变化,在冠层郁闭度最高的大豆始粒期与玉米抽雄期达到峰值;坡面侵蚀-沉积过程导致的空间异质性是决定侵蚀与碳迁移格局的主导因子。长期侵蚀-沉积循环导致坡下土壤颗粒大量堆积,使其表现出更高的侵蚀敏感性。此外,土壤有机碳主要随大于0.25 mm的大颗粒团聚体迁移;融合株高参数的C因子优化模型显著提升了黑土区农田侵蚀预测精度。所构建的乘法模型通过引入株高这一关键冠层结构参数,显著降低了预测误差,为实现该区域土壤流失的精准评估和覆盖管理措施的优化提供了可靠工具。

参考文献 (References)

- [1] Liu X T, Yan B X. Soil and water loss and grain security of black soil region in northeast China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(1): 17-19.[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.]

- [2] Liu B Y, Yan B X, Shen B, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 1-8. [刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8.]
- [3] 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. [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.]
- [4] He J J, Lü Y, Gong H L, et al. Experimental study on rill erosion characteristics and its runoff and sediment yield process[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 398-405. [和继军, 吕烨, 宫辉力, 等. 细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 398-405.]
- [5] 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.
- [6] Duan X W, Xie Y, Ou T H, et al. Effects of soil erosion on long-term soil productivity in the black soil region of northeastern China[J]. Catena, 2011, 87(2): 268-275.
- [7] Zhu B B, Zhou Z C, Li Z B. Soil erosion and controls in the slope-gully system of the Loess Plateau of China: A review[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 657030.
- [8] Wang S S, Sun B Y, Li C D, et al. Runoff and soil erosion on slope cropland: A review[J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(5): 461-470.
- [9] Shen Y L, Gu J, Liu G, et al. Predicting soil erosion and deposition on sloping farmland with different shapes in Northeast China by using ^{137}Cs [J]. Catena, 2023, 229: 107238.
- [10] Xin Y, Liu G, Xie Y, et al. Effects of soil conservation practices on soil losses from slope farmland in northeastern China using runoff plot data[J]. Catena, 2019, 174: 417-424.
- [11] Yan Y, Jiang Y Y, Guo M M, et al. Effects of grain-forage crop type and natural rainfall regime on sloped runoff and soil erosion in the Mollisols region of Northeast China[J]. Catena, 2023, 222: 106888.
- [12] Shao Y M, Gao G Y, Liu J B, et al. Effects of vertical cover structure of grass and shrub on reducing runoff and soil loss under natural rainfall in the Loess Hilly Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 322-331. [邵奕铭, 高光耀, 刘见波, 等. 自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 322-331.]
- [13] de Moraes Frasson R P, Krajewski W F. Rainfall interception by maize canopy: Development and application of a process-based model[J]. Journal of Hydrology, 2013, 489: 246-255.
- [14] Zhou P, Luukkanen O, Tokola T, et al. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed[J]. Catena, 2008, 75(3): 319-325.
- [15] Hou G R, Bi H X, Huo Y M, et al. Determining the optimal vegetation coverage for controlling soil erosion in *Cynodon dactylon* grassland in North China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118771.
- [16] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [17] Liu B Z, Liu S H, Zheng S D. Soil conservation and coefficient of soil conservation of crops[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6(2): 32-36, 113. [刘秉正, 刘世海, 郑随定. 作物植被的保土作用及作用系数[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 32-36, 113.]

- [18] 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 and Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24. [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.]
- [19] Liu B Y, Bi X G, Fu S H, et al. Beijing soil loss equation[M]. Beijing: Science Press, 2010. [刘宝元, 毕小刚, 符素华, 等. 北京土壤流失方程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [20] Ma B, Liu Y X, Wu F Q. Effect of soybean plants on runoff erosion sediment on slope land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 32-36. [马波, 刘雨鑫, 吴发启. 植大豆对坡耕地径流侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 32-36.]
- [21] Hou J, Wang H Q, Fu B J, et al. Effects of plant diversity on soil erosion for different vegetation patterns[J]. Catena, 2016, 147: 632-637.
- [22] Jiao J Y, Zou H Y, Jia Y F, et al. Research progress on the effects of soil erosion on vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 85-91.
- [23] Sui J M, Song N P, Xue Y, et al. The method of extracting vegetation coverage in the desert steppe based on photographic[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(2): 58-64. [随金明, 宋乃平, 薛毅, 等. 基于照相法的荒漠草原植被覆盖度测定方法[J]. 中国草地学报, 2019, 41(2): 58-64.]
- [24] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [25] Li J M, Chen L, Ren H Y, et al. Response of runoff and sediment production and sediment and water benefits of engineering spoil heaps to vegetation characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(7): 142-151. [李建明, 陈兰, 任洪玉, 等. 工程堆积体产流产沙及水沙效益对植被近地表特征的响应[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 142-151.]
- [26] Xu N, Yang Y F, Lin Q T, et al. Research on soy C factor calculation model based on USLE[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 665-672. [徐宁, 杨一凡, 林青涛, 等. 基于 USLE 的大豆 C 因子计算模型研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 665-672.]
- [27] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618-623. [彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618-623.]
- [28] Shi P, Li P, Li Z B, et al. Effects of grass vegetation coverage and position on runoff and sediment yields on the slope of Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 259: 107231.
- [29] Zheng Z C, Zhang X Z, Li T X, et al. Soil anti-erodibility and analysis of its influencing factors during growing stages of maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(4): 100-108. [郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗蚀性特征及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 100-108.]
- [30] Wang F, Xu P, Yan K, et al. Rainfall erosion influenced by typical crops in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 92-95, 101. [王丰, 徐佩, 严坤, 等. 三峡库区典型农作物对降雨侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 92-95, 101.]
- [31] Wang L H, Wang Y F, Saskia K, et al. Effect of soil management on soil erosion on sloping farmland during crop growth stages under a large-scale rainfall simulation experiment[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(6):

921-931.

- [32] Wang Q J, Zhao G X, Liu Y L, et al. Effects of vegetation types on yield of surface runoff and sediment, loss of nitrogen and phosphorus along loess slope land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 195-201. [王全九, 赵光旭, 刘艳丽, 等. 植被类型对黄土坡地产生流沙及氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 195-201.]
- [33] Tang C J, Liu Y, Li Z W, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, Southern China[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107956.
- [34] Ma B, Liu G, Ma F, et al. Effects of crop-slope interaction on slope runoff and erosion in the Loess Plateau[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, 2019, 69(1): 12-25.
- [35] Liu R, Yu X X, Cai Q G, et al. Research progress in the effect of slope length on slope erosion, transportation and deposition processes[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6): 140-146. [刘冉, 余新晓, 蔡强国, 等. 坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积过程影响的研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(6): 140-146.]
- [36] Peng J, Long L, Guo Z L, et al. Construction and spatial variation of soil quality index in eroded farmland Mollisol of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(15): 54-64. [彭珏, 龙凌, 郭忠录, 等. 东北黑土区侵蚀农田土壤质量指数构建及其空间分异[J]. 农业工程学报, 2024, 40(15): 54-64.]
- [37] Cui M, Cai Q G, Zhu A X, et al. Soil erosion along a long slope in the gentle hilly areas of black soil region in Northeast China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(3): 375-383.
- [38] Xie X L, Li Q L, Wang L H, et al. A new method to estimate the cover management factor on the Loess Plateau in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 294-302. [谢欣利, 李晴岚, 王林华, 等. 黄土高原作物 C 因子新方法[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 294-302.]
- [39] Qi Y J, Huang J Q, Li W W, et al. Research progress on driving mechanism of soil organic carbon change based on hydraulic erosion process[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(5): 1196-1204. [齐瑜洁, 黄金权, 李威闻, 等. 基于水力侵蚀过程的土壤有机碳变化驱动机制研究进展[J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1196-1204.]
- [40] Zhang X Y, Xu J Z, Yang Q N, et al. Sorting characteristics of black soil splash erosion aggregates under intermittent rainfall conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 31-39. [张晓娅, 徐金忠, 杨庆楠, 等. 间歇性降雨条件下黑土溅蚀团聚体分选特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 31-39.]
- [41] Zhang J, Wei D, Zhou B K, et al. Responses of soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen in black soil to different long-term fertilization regimes[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: 105157.
- [42] Zhang Y H, Liu C, Fu Z Y, et al. Research progress of hydrological process and soil organic carbon migration in slope field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(3): 730-738. [张宇恒, 刘春, 付智勇, 等. 坡面水文过程与土壤有机碳迁移研究进展[J]. 土壤通报, 2023, 54(3): 730-738.]
- [43] Jiang Q, Zheng Z C, Wang Y D, et al. Characteristics of sediment particles during rill erosion on purple soil slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(S1): 114-121. [蒋倩, 郑子成, 王永东, 等. 紫色土坡面细沟侵蚀过程中泥沙颗粒特性[J]. 农业工程学报, 2022, 38(S1): 114-121.]
- [44] Su Y Y, Zhang Y, Wang H Y, et al. Effects of vegetation spatial pattern on erosion and sediment particle sorting

- in the loess convex hillslope[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 14187.
- [45] Zhang K, Li N, Fu S H, et al. Influence of surface cover type on sediment transport capacity and sediment retardation benefits based on flume experiments[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 248: 106455.
- [46] Li X T, Luo J R, Zhao Z J, et al. The effect of dynamic changes in vegetation coverage on the mechanism of organic carbon loss in inter-rill erosion[J]. Journal of Hydrology, 2024, 642: 131848.

（责任编辑：檀满枝）