

## 风水复合侵蚀对团聚体有机碳及其组分的影响

王艳辉<sup>1</sup>, 赵晓峰<sup>1</sup>, 张健乐<sup>1</sup>, 许明祥<sup>1,2,3</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 为探究黄土高原风水复合侵蚀对土壤团聚体有机碳的影响。[方法] 通过室内模拟降雨及风洞试验, 研究不同侵蚀营力和侵蚀顺序下 5~2 mm 土壤团聚体有机碳及其活性碳组分的流失机制。[结果] 1) 风水复合侵蚀下土壤团聚体有机碳(SOC)、易氧化有机碳(EOC)、颗粒态有机碳(POC)、可溶性有机碳(DOC)质量分数较单营力侵蚀分别降低 7%~25%、8%~29%、52%~71%、16%~32%。2) 风水复合侵蚀中先风后水侵蚀(WR)下, SOC、EOC、POC、DOC、微生物生物量碳(MBC)质量分数较先水后风侵蚀(RW)分别降低 19%、20%、4%、13%、9%。3) 土壤团聚体有机碳及活性碳组分对不同侵蚀营力的敏感性响应不同, EOC 对水蚀作用反应更敏感; POC 对风蚀和风水复合侵蚀作用更敏感。[结论] 风水复合侵蚀较单营力侵蚀更易加剧土壤团聚体有机碳及活性碳组分的流失, 且 SOC 流失程度具有侵蚀顺序依赖性。研究结果可为风水复合侵蚀区土壤侵蚀防控及有机碳固存策略提供理论支撑。

**关键词:** 风水复合侵蚀; 团聚体有机碳; 活性有机碳组分; 敏感性指标

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0267-08

## Effect of Wind-rain Complex Erosion on Aggregate Organic Carbon and Its Fractions

WANG Yanhui<sup>1</sup>, ZHAO Xiaofeng<sup>1</sup>, ZHANG Jianle<sup>1</sup>, XU Mingxiang<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the effects of wind-rain complex erosion on soil aggregate organic carbon in the Loess Plateau. [Methods] Laboratory-based rainfall simulation and wind tunnel experiments were conducted to study the loss mechanisms of organic carbon and its labile fractions in 5–2 mm soil aggregates under different erosion forces and erosion sequences. [Results] 1) Under wind-rain complex erosion, the mass fractions of soil aggregate organic carbon (SOC), easily oxidizable organic carbon (EOC), particulate organic carbon (POC), and dissolved organic carbon (DOC) decreased by 7%–25%, 8%–29%, 52%–71% and 16%–32%, respectively, compared with single-force erosion. 2) Under wind-rain complex erosion, the mass fractions of SOC, EOC, POC, DOC, and microbial biomass carbon (MBC) under wind-then-rain erosion (WR) decreased by 19%, 20%, 4%, 13% and 9%, respectively, compared with rain-then-wind erosion (RW). 3) Aggregate organic carbon and its labile components exhibited different sensitivity response to different erosion forces: EOC showed higher sensitivity to rain erosion, while POC was more sensitive to wind erosion and wind-rain complex erosion. [Conclusion] Wind-rain complex erosion more significantly exacerbates the losses of aggregate organic carbon and labile organic carbon fractions compared to single-force erosion, and the degree of SOC loss shows dependence on

收稿日期: 2025-02-28

修回日期: 2025-04-07

录用日期: 2025-04-30

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-03

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42177345); 国家重点研发计划项目(2022YFF1300802)

第一作者: 王艳辉(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事流域管理研究。E-mail: 13683914454@163.com

通信作者: 许明祥(1972—), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事流域管理研究。E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

erosion sequence. These findings provide theoretical support for developing soil erosion prevention and organic carbon sequestration strategies in regions affected by wind-rain complex erosion.

**Keywords:** wind-rain complex erosion; aggregate organic carbon; labile organic carbon fractions; sensitivity index

**Received:** 2025-02-28

**Revised:** 2025-04-07

**Accepted:** 2025-04-30

**Online**(www.cnki.net): 2025-06-03

土壤侵蚀作为全球性环境问题,在黄土高原风水复合侵蚀区侵蚀作用十分剧烈<sup>[1]</sup>,土壤结构严重退化。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,对增强土壤稳定性、提升抗侵蚀能力和维持土壤质量至关重要。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是促进土壤团聚的关键胶结物<sup>[2]</sup>,能通过微生物作用与矿物结合<sup>[3]</sup>,显著提升土壤稳定性<sup>[4]</sup>;同时,土壤团聚体作为 SOC 的主要载体,其物理包裹和化学吸附等作用均有助于土壤固碳<sup>[5]</sup>。土壤活性有机碳作为 SOC 的活跃部分,虽然占比小,但对土壤的微小变化极为敏感,且直接参与生物化学转化过程<sup>[6]</sup>,对团聚体的形成和稳定影响显著。因此,深入研究土壤团聚体有机碳及其活性碳组分对提升土壤抗侵蚀能力和维持土壤结构稳定具有极为重要的意义。

土壤侵蚀显著降低 SOC 质量分数。在水蚀方面已有研究<sup>[7-8]</sup>发现,土壤 DOC 随径流迁移损失,MAOC 和 POC 易随泥沙搬运,从而导致 SOC 质量分数降低。在坡面侵蚀过程中约 50.51% 的 SOC 通过泥沙损失<sup>[9]</sup>。在风蚀方面,尽管相关研究较少,但有研究<sup>[10-11]</sup>表明,风蚀导致土壤严重退化,使 SOC 质量分数显著衰减。在风水复合侵蚀方面有研究<sup>[12-13]</sup>发现,在水蚀风蚀交错区复杂的侵蚀环境使土壤碳储量对退耕措施的响应显著区别于单一的侵蚀环境。然而,目前鲜有研究将风水复合侵蚀对团聚体有机碳的影响与单营力侵蚀进行对比分析。风水复合侵蚀具有交互性和复杂性,难以明确区分风力和水力在侵蚀过程中的单独作用,关于风水复合侵蚀如何改变土壤团聚体有机碳组分及其变化程度的研究仍不充分,且与单营力侵蚀相比的差异也不明确。

鉴于此,以风水复合侵蚀区的土壤团聚体为研究对象,通过设计 4 种不同的侵蚀处理,分析风水复合侵蚀与团聚体有机碳及活性碳组分质量分数变化的关系,揭示团聚体有机碳及活性碳组分对复合侵蚀的敏感性响应特征,为风水复合侵蚀区土壤侵蚀防治及土壤有机碳固存策略制定提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土样选用宁夏固原云雾山草原自然保护区(36.25°~36.26°N, 106.38°~106.40°E)的黄绵土,该

区地处黄土高原风水复合侵蚀带<sup>[14]</sup>,海拔 1 800~2 148 m,为黄土覆盖的低山丘陵区,植被类型以草本植物为主。年平均降雨量 400~450 mm,多集中在 7—9 月,占全年降雨量 70%,蒸发量 1 500~1 700 mm,属于中温带半干旱气候,冬春季节风力较大易发生风蚀,夏季降雨集中易发生水蚀。

于 2023 年 9 月在研究区内随机选取 3 块坡度、坡向、海拔相似的大针茅草地作为样地,随机布设 9 个 1 m×1 m 的样方,在各样方内按照“S”形多点、等量混合采集无人活动(如放牧)干扰的草地表层 0~20 cm 原状土,取 8~10 个点,带回室内,风干保存,同时用环刀法测土壤体积质量。将采回的土样剔除粗根和小石块,采用激光粒度仪进行土壤颗粒粒径测定其砂粒、粉粒和黏粒质量分数分别为 23.29%、60.03%、16.68%,土壤水分质量分数为 16.14%,有机碳质量分数为 22.45 g/kg。按照四分法,取其中的一部分放在 4℃冰箱内冷藏,剩余土样风干后进行干筛分级,筛分出 5~2 mm 土壤团聚体并保存,以备后续实验使用。

### 1.2 试验设计

室内模拟试验于 2024 年 6 月在水土保持与荒漠化整治国家重点实验室人工降雨大厅中进行。所需试验设备包括风洞及降雨设备。风洞设备试验前进行风速率定,达到设计风速( $\pm 0.2$  m/s),将供试样品(5~2 mm 土壤团聚体)均匀铺开在风洞设备的试验段进行试验;降雨装置采用侧喷式降雨系统,试验前在降雨均匀度最高的雨区范围内进行雨强率定,达到设计雨强( $\pm 2.7$  mm/h),将供试样品均匀铺展于试验筛上,置于降雨区进行降雨试验。通过侵蚀前后损失的土壤干重来计算风、水蚀前后土壤团聚体的损失量,分别将风、水蚀后的土壤团聚体收集保存,以备后续实验使用。

为模拟风水复合侵蚀区土壤团聚体在风蚀、水蚀及其复合作用下土壤团聚体有机碳及其碳组分的变化情况,本研究以未侵蚀的初始土壤团聚体(CK)作为对照,设计不同风蚀时长、不同降雨时长及不同风水复合侵蚀 4 种侵蚀处理类型(表 1),根据宁夏固原的风速数据,该区年最大风速超过起沙风速 6 m/s<sup>[15]</sup>,结合本试验前期预试验的结果,为确保既能

有效模拟风力侵蚀过程,又能保证供试土壤团聚体在侵蚀后满足后续试验分析的质量需求,本研究将风速设定为 8 m/s;同时,依据黄土高原风水复合侵蚀区侵蚀性降雨特征<sup>[16]</sup>,本研究将降雨强度设定为 90 mm/h,每个试验处理重复 3 次以上,以获取足够数量的土壤团聚体样品用于后续试验测定。不同侵蚀营力下侵蚀前后土壤团聚体颗粒组成及质量含水率变化特征见表 2。

表 2 不同侵蚀营力下土壤团聚体颗粒组成及质量含水率变化特征

Table 2 Variation characteristics of soil aggregate particle composition and mass moisture content under different erosion forces

| 侵蚀处理   | 黏粒         | 粉粒         | 砂粒         | 质量含水率      |
|--------|------------|------------|------------|------------|
| CK     | 18.44±0.26 | 30.03±0.37 | 51.53±1.02 | 16.14±1.18 |
| W5     | 18.45±0.05 | 30.30±0.07 | 51.25±0.02 | 10.93±0.30 |
| W10    | 17.71±0.33 | 29.31±0.34 | 52.98±0.68 | 7.87±0.18  |
| W20    | 17.54±0.03 | 28.52±0.16 | 53.93±0.12 | 5.45±0.24  |
| R5     | 18.00±0.06 | 29.43±0.07 | 52.57±0.16 | —          |
| R10    | 17.46±0.20 | 28.14±0.24 | 54.63±0.43 | —          |
| R20    | 16.72±0.14 | 27.65±0.05 | 55.63±0.20 | —          |
| W5R5   | 16.68±0.01 | 28.25±0.25 | 55.07±0.27 | 10.32±0.09 |
| W10R10 | 15.72±0.21 | 26.42±0.17 | 57.86±0.35 | 7.53±0.16  |
| R5W5   | 17.22±0.10 | 28.53±0.06 | 54.25±0.12 | 10.67±0.22 |
| R10W10 | 16.37±0.10 | 28.17±0.05 | 55.46±0.05 | 8.03±0.34  |

注:表中数据均为平均值±标准差;质量含水率为单风蚀和复合侵蚀中风蚀后的质量含水率。

1.3 测定指标与方法

样品测定参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[17]</sup>,土壤有机碳(SOC)质量分数采用重铬酸钾外加热测定,土壤易氧化有机碳(easily oxidizable organic carbon, EOC)采用KMnO<sub>4</sub>氧化法测定,土壤颗粒态有机碳(particulate organic carbon, POC)用六偏磷酸钠提取法测定,土壤微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)采用氯仿熏蒸浸提法测定,水溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)采用K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法测定。

为分析风水复合侵蚀过程中土壤团聚体有机碳组分的敏感性,在前人<sup>[18]</sup>SSI模型的基础上,通过比较某种活性碳组分在侵蚀前后的变化频率,建立不同侵蚀营力下碳组分敏感指数模型CSI(component sensitivity index)。

$$CSI(X)=(X_i-X_{CK})/X_{CK}\times 100\%$$

式中: $X_i$ 为某种活性碳组分,g/kg; $X_{CK}$ 为未侵蚀时某碳组分,g/kg; $CSI(X)$ 为 $X_i$ 组分受侵蚀营力影响的敏感指数,% ,负值表示负敏感,表示侵蚀导致碳组分质量分数减少,反之亦然,绝对值越大代表敏感性越高。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2016、Origin 2024 和 SPSS

表 1 风水复合侵蚀试验处理设计  
Table 1 Experimental treatment design for wind-rain complex erosion

| 侵蚀处理     | 侵蚀时长 |   |     |       |
|----------|------|---|-----|-------|
| 风蚀(W)    | 0    | 5 | 10  | 20    |
| 水蚀(R)    | 0    | 5 | 10  | 20    |
| 先风后水(WR) | —    | — | 5+5 | 10+10 |
| 先水后风(RW) | —    | — | 5+5 | 10+10 |

26.0 软件对数据进行处理,通过单因素方程分析(analysis of variance, ANOVA)和 LSD 多重比较法对不同侵蚀处理、不同侵蚀时长下土壤团聚体 SOC 及各组分质量分数差异分析( $p<0.05$ ),并用 Origin 2024 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同侵蚀营力对团聚体 SOC 质量分数的影响

由图 1 可知,团聚体 SOC 质量分数在 W5、R5 时较 CK 分别降低 9%、3%,W10、R10 较 W5、R5 分别降低 5%、4%,W20、R20 较 W10、R10 分别降低 3%、9%,随着侵蚀时间的延长,风蚀作用下团聚体 SOC 质量分数损失速率逐渐减小,水蚀作用下团聚体 SOC 质量分数损失速率逐渐增大。在 W10、R10 时,团聚体 SOC 质量分数与 CK 相比分别降低 13%、7%;在 W20、R20 时,与 CK 相比分别降低 16%、15%,风蚀、水蚀作用下,随着侵蚀的发生,土壤团聚体 SOC 质量分数呈减小趋势。

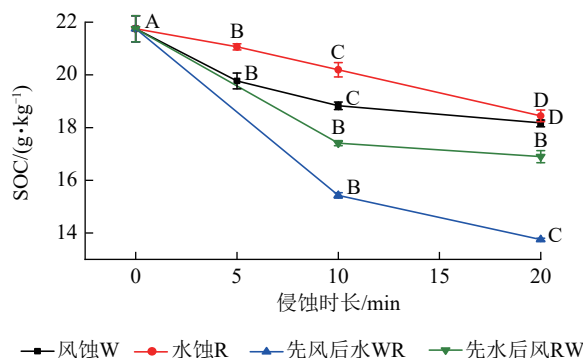
复合侵蚀作用下团聚体 SOC 质量分数为 W20≈R20>R10W10>W10R10,W10R10、R10W10 与 CK 相比分别降低 37%、22%,风水复合侵蚀下团聚体 SOC 损失(22%~37%)远超相同时长下各单营力侵蚀的总和(13%+7%),表明风水复合侵蚀具有复杂

的交互效应。与单营力侵蚀相比,复合侵蚀作用下的团聚体SOC质量分数降低显著,且降低程度与风水蚀发生顺序有关。R10W10较W20、R20分别降低7%、8%,W10R10较W20、R20分别降低24%、25%,较R10W10降低19% ( $p<0.05$ ),表明风水复合侵蚀对团聚体SOC的破坏具有顺序依赖性,先风后水侵蚀对团聚体SOC的影响大于先水后风侵蚀。

## 2.2 不同侵蚀营力对团聚体活性有机碳组分质量分数的影响

由图2可知,单营力侵蚀作用下,团聚体活性有机碳组分质量分数的变化趋势与团聚体SOC基本一致。土壤团聚体中EOC、POC、DOC、MBC质量分数在W10时,与CK相比分别降低4%、44%、7%、12%;R10时分别降低28%、1%、14%、20%;W20时分别降低14%、52%、9%、26%;R20时分别降低

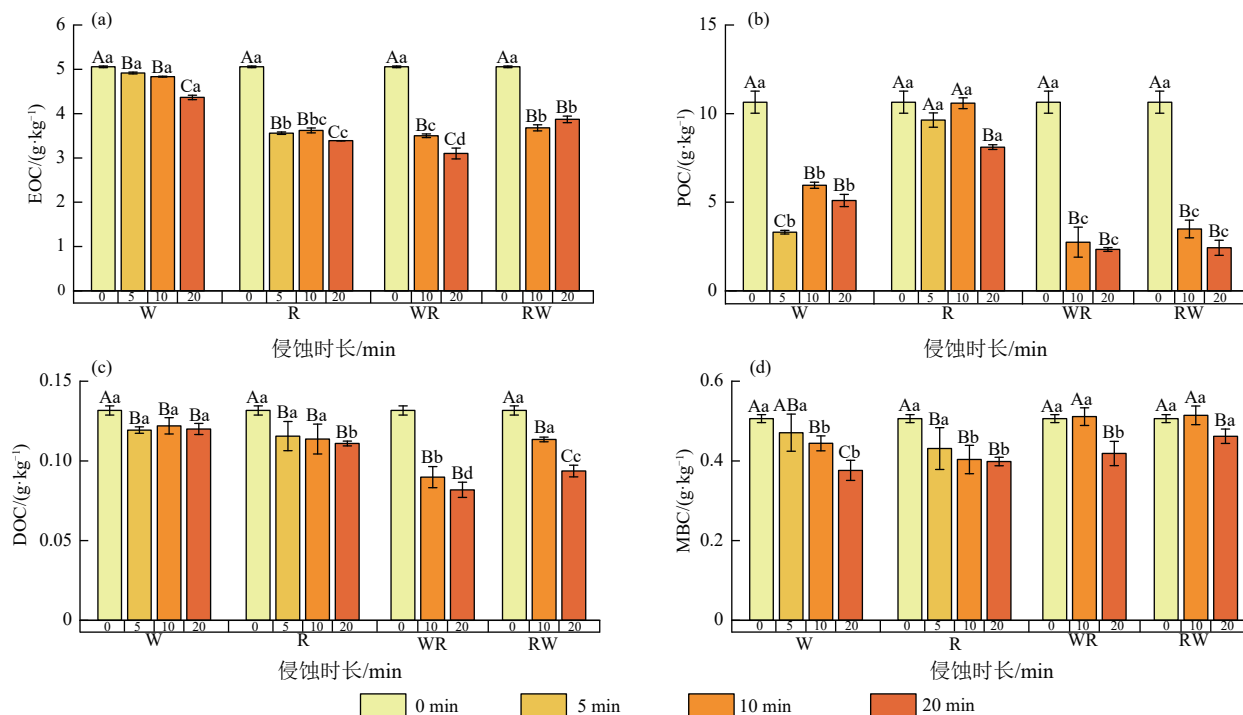
33%、24%、16%、21%。



注:不同大写字母表示同一侵蚀营力不同侵蚀时长间差异显著 ( $p<0.05$ )。

图1 不同侵蚀营力下土壤团聚体SOC质量分数变化

Fig.1 Variation in SOC mass fractions under different erosion forces



注:不同小写字母表示同一侵蚀时长不同侵蚀营力下差异显著 ( $p<0.05$ )。

图2 不同侵蚀营力下土壤团聚体活性有机碳组分质量分数变化

Fig.2 Variation in mass fractions of labile organic carbon fractions in soil aggregates under different erosion forces

复合侵蚀作用下,土壤团聚体活性有机碳组分(EOC、POC、DOC、MBC)质量分数显著降低。其中,EOC质量分数为W20>R10W10>R20>W10R10,W10R10、R10W10与CK相比分别降低39%、23%;POC质量分数为R20>W20≈R10W10≈W10R10,W10R10、R10W10与CK相比分别降低78%、77%;DOC质量分数为W20>R20>R10W10>W10R10,W10R10、R10W10与CK相比分别降低38%、29%;MBC质量分数为R10W10>W10R10≈W20≈R20,W10R10、R10W10与CK相比分别降低17%、9%。

复合侵蚀下团聚体活性有机碳组分的损失(除MBC外)均远超相同时长下各单营力侵蚀的总和,表明风水复合侵蚀具有复杂的交互效应。

与单营力侵蚀相比,复合侵蚀作用下的团聚体活性有机碳组分质量分数降低更显著 ( $p<0.05$ ),且与风蚀、水蚀发生顺序有关。其中EOC质量分数R10W10比W20多损失24%,比R20少损失14%,W10R10比W20、R20分别多损失29%、8%,较R10W10降低20%;POC质量分数R10W10较W20、R20分别多损失52%、70%,W10R10较W20、R20分别多损失

54%、71%，较 R10W10 降低 4%；DOC 质量分数 R10W10 较 W20、R20 分别降低 22%、16%，W10R10 较 W20、R20 则分别降低 32%、26%，较 R10W10 降低 13%；MBC 质量分数 W10R10 与单营力侵蚀无显著差异，较 RW20 降低 9%。表明风水复合侵蚀比单营力侵蚀更能显著降低土壤团聚体活性有机碳组分质量分数；且该影响具有顺序依赖性，与风蚀、水蚀发生的先后顺序有关，先风后水侵蚀所引起的损失更大。

2.3 风水复合侵蚀过程中土壤团聚体有机碳组分敏感性分析

由表 3 可知，单营力侵蚀作用下，风蚀在侵蚀初期 0~10 min 时，活性有机碳组分中 POC 的 CSI 指数绝对值最大，侵蚀后期 10~20 min 时为 MBC，0~20 min 内整体上 POC 的 CSI 指数绝对值最大；水蚀

侵蚀初期表现为 EOC 的 CSI 指数绝对值最大，侵蚀后期为 POC，0~20 min 内整体上表现为 EOC 的 CSI 指数绝对值最大。

复合侵蚀作用下，先风后水侵蚀初期表现为 POC 的 CSI 指数绝对值最大，侵蚀后期为 MBC，0~20 min 内整体上表现为 POC 的 CSI 指数绝对值最大，与风蚀情况基本相似；先水后风侵蚀在各个侵蚀时间段均表现为 POC 的 CSI 指数绝对值最大。

因此，风蚀与先风后水侵蚀作用下，侵蚀初期 POC 为较敏感的活性碳组分，侵蚀后期 MBC 更为敏感，0~20 min 内整体上 POC 对侵蚀反应更为敏感；水蚀作用下，侵蚀初期 EOC 较为敏感，后期 POC 更为敏感，整体上水蚀以 EOC 更为敏感；先水后风侵蚀以 POC 较为敏感。

表 3 不同侵蚀营力下土壤团聚体有机碳及组分在不同时间段的敏感指数

Table 3 Sensitivity indices of soil aggregate organic carbon and its fractions over different time intervals under different erosion forces

| 侵蚀营力     | 侵蚀时段/ min | CSI <sub>SOC</sub> | CSI <sub>EOC</sub> | CSI <sub>POC</sub> | CSI <sub>MBC</sub> | CSI <sub>DOC</sub> |
|----------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 风蚀(W)    | 0~10      | -13.44             | -4.40              | -44.01             | -12.25             | -7.34              |
|          | 10~20     | -3.44              | -9.67              | -14.45             | -15.29             | -1.63              |
|          | 0~20      | -16.41             | -13.64             | -52.10             | -25.66             | -8.85              |
| 水蚀(R)    | 0~10      | -7.14              | -28.41             | -0.54              | -20.25             | -13.63             |
|          | 10~20     | -8.65              | -6.39              | -23.41             | -1.26              | -2.46              |
|          | 0~20      | -15.17             | -32.98             | -23.82             | -21.25             | -15.75             |
| 先风后水(WR) | 0~10      | -29.05             | -30.85             | -74.20             | 1.02               | -31.79             |
|          | 10~20     | -10.91             | -11.27             | -14.95             | -18.11             | -8.85              |
|          | 0~20      | -36.79             | -38.64             | -78.06             | -17.28             | -37.82             |
| 先水后风(RW) | 0~10      | -19.93             | -27.20             | -67.18             | 1.65               | -13.81             |
|          | 10~20     | -2.94              | 5.22               | -30.39             | -10.22             | -17.48             |
|          | 0~20      | -22.28             | -23.40             | -77.15             | -8.74              | -28.87             |

3 讨论

3.1 不同侵蚀营力对团聚体有机碳的影响

本研究揭示不同侵蚀营力对土壤团聚体有机碳流失的影响不同。单营力侵蚀中，风蚀后地表粗糙度增加，加剧地表跃移颗粒的冲击打磨作用，削弱团聚体稳定性，并产生大量富含有机碳的可蚀性颗粒，此颗粒的流失造成团聚体有机碳减少<sup>[19-20]</sup>。有研究<sup>[21-22]</sup>表明，表层 SOC 质量分数与风蚀强度呈显著负相关；SU 等<sup>[21]</sup>研究发现，沙化草地开垦 3 a 后耕层 SOC 质量分数因风蚀下降 38%。溅蚀过程中雨滴的击打作用导致团聚体破碎<sup>[23-24]</sup>，其中大粒径团聚体更易发生机械破碎<sup>[25-26]</sup>，破碎后团聚体对 SOC 的保护作用减弱，加速 SOC 矿化分解，最终导致有机碳减少<sup>[27]</sup>，也与本研究的发现一致。

在风水复合侵蚀作用下，侵蚀时长对团聚体有机碳的流失速率具有显著影响。随着侵蚀时间的延

长，风蚀作用下团聚体 SOC 质量分数损失速率呈逐渐降低趋势，水蚀作用下团聚体 SOC 质量分数损失速率则逐渐增加。可能是因为在风蚀初期，富含活性有机碳的细颗粒物被优先剥离<sup>[11]</sup>，导致 SOC 流失速率较快；随着侵蚀的持续进行，团聚体表层易蚀物质逐渐减少，剩余团聚体粒径相对增大，其抗风蚀能力增强，从而使 SOC 损失速率逐渐减小。在水蚀过程中，初期雨滴的打击作用逐渐破坏土壤团聚体结构，释放出更多被包裹的 SOC<sup>[23-24]</sup>，随着侵蚀时间的延长，持续的雨滴打击可能导致团聚体破碎程度加剧，进一步暴露更多原本被物理保护的 SOC，从而加剧 SOC 的损失<sup>[28]</sup>。因此，在生产实践中，应当在侵蚀的初级阶段采取有效措施，防止土壤团聚体遭受打击破碎，同时避免其受到风蚀的影响，以减少有机碳的流失。

在风水复合侵蚀作用下，团聚体有机碳的流失

呈复杂的交互效应和顺序依赖性。本研究表明,相较于单营力侵蚀,复合侵蚀下 SOC 损失量显著增加,且远超单营力侵蚀的总和。先风后水的侵蚀顺序下 SOC 流失量较先水后风的侵蚀顺序更高。是因为前期的风蚀作用显著促进后续的水蚀强度。已有研究<sup>[29]</sup>表明,前期风蚀通过降低土壤硬度和抗剪强度,减少黏粒和粉粒,导致土壤质地粗化,显著削弱团聚体的抗侵蚀能力,进而增强后续水蚀强度,从而导致团聚体有机碳质量分数进一步减少。而在先水后风的侵蚀顺序下,前期的水蚀对后续的风蚀有一定的抑制作用<sup>[30]</sup>,前期水蚀通过破碎土壤大颗粒,降低地表粗糙度<sup>[31]</sup>,同时,残留水分使颗粒间产生黏滞力和团聚作用<sup>[32]</sup>,形成物理结皮,提高临界起动风速<sup>[33]</sup>,抑制后续风蚀强度,保护团聚体有机碳免受进一步的侵蚀损失。

因此,侵蚀顺序对团聚体有机碳流失具有显著影响。在风水复合侵蚀区,风蚀先于水蚀引发“机械破碎-水力剥离”的反应,加剧碳损失;水蚀先于风蚀则产生“物理结皮-风力抑制”的作用,减缓碳损失。为风水复合侵蚀区土壤管理提供重要依据,应优先防控风蚀,通过覆盖措施或种植深根系植物来阻断侵蚀链<sup>[34]</sup>,增强土壤团聚体稳定性。

### 3.2 不同侵蚀营力对团聚体活性有机碳组分的影响

本研究发现,复合侵蚀对团聚体活性有机碳组分的影响也具有复杂的交互效应。除 MBC 外,其他碳组分的变化规律与团聚体 SOC 一致。而团聚体 MBC 受风蚀的影响较水蚀更大,水蚀的影响主要集中在侵蚀初期。二者均通过破坏团聚体结构,削弱对有机碳的保护作用,导致 MBC 质量分数下降<sup>[19-20,23]</sup>。风蚀还通过降低团聚体养分含量抑制微生物活性,减少 MBC 周转<sup>[35]</sup>;在水蚀中后期土壤孔隙堵塞并形成结皮层,导致土壤团聚体的透水通气性显著下降<sup>[16]</sup>,且随着土壤中易分解碳源的逐渐减少,微生物群落开始转向利用难降解的碳源,其代谢速率也随之降低<sup>[36]</sup>,使得 MBC 流失量在中后期趋于稳定。

团聚体活性碳组分对不同侵蚀营力的敏感性不同,EOC 对水蚀作用反应更敏感;POC 对风蚀和风水复合侵蚀作用更敏感。EOC 作为土壤活性有机碳的重要组成部分,尽管占比相对较小,但能敏锐反映土壤有机质的细微变化<sup>[37]</sup>。EOC 对水蚀作用反应更敏感,与水蚀破坏团聚体结构的特性密切相关。贾松伟等<sup>[38]</sup>指出,侵蚀强度和 EOC 流失量呈显著正相关,即时间越长、强度越大,EOC 流失越多。原因是水蚀作用导致大团聚体破碎,而大团聚体由微团聚体通

过活性有机碳为主的有机胶结物黏合而成<sup>[27]</sup>,而高强度的侵蚀暴露更多活性有机碳,促使 EOC 从土壤中分离。水蚀优先迁移富含有机质的细颗粒(如黏粒和粉粒),该颗粒通常吸附大量 EOC,从而加剧其随泥沙流失<sup>[39]</sup>。POC 主要以颗粒形式存在,与矿物颗粒结合或存在于团聚体中,风蚀通过物理作用直接剥离表层土壤颗粒(尤其是细颗粒),导致 POC 大量流失。同时,风蚀将土壤颗粒搬运到空中,增加 POC 与氧气的接触面积,加速其氧化分解,如 BEYER 等<sup>[40]</sup>指出,在风蚀过程中约有 70% 的 POC 被氧化。与 EOC 不同,POC 与土壤颗粒的结合主要依赖物理吸附而非化学胶结,因此,其对风蚀引起的机械扰动更为敏感。风蚀的持续冲击导致颗粒表面 POC 剥离,而风水复合侵蚀则进一步加剧该过程。因此,在风水复合侵蚀区的土壤管理过程中,水力过程为主的复合侵蚀区可通过地表覆盖(如秸秆、地膜)或种植深根系植物增强团聚体稳定性以减少 EOC 损失;风力过程为主的复合侵蚀区可通过覆盖措施、免耕技术及防风林带建设,抑制颗粒迁移,保护 POC 和维持土壤碳库稳定性。

## 4 结 论

1) 风水复合侵蚀比单营力侵蚀更能加剧土壤团聚体有机碳及活性碳组分的流失,且存在复杂的交互效应。土壤团聚体总有机碳(SOC)、易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)、可溶性有机碳(DOC)质量分数分别较单营力侵蚀降低 7%~25%、8%~29%、52%~71%、16%~32%。

2) 风水复合侵蚀对大粒径土壤团聚体有机碳及碳组分质量分数的影响具有顺序依赖性。风水复合侵蚀中先风后水侵蚀(WR)下土壤团聚体 SOC、EOC、POC、DOC、MBC 质量分数较先水后风侵蚀(RW)分别降低 19%、20%、4%、13%、9%。

3) 土壤团聚体活性碳组分对不同侵蚀营力的敏感性响应不同。水蚀作用下,侵蚀初期 EOC 较为敏感,侵蚀后期 POC 更敏感,整体上以 EOC 更为敏感;风蚀与 WR 作用下,侵蚀初期 POC 较敏感,后期 MBC 更敏感,整体上 POC 对侵蚀反应更为敏感;RW 作用以 POC 更敏感。

### 参考文献:

- [1] 唐克丽,陈永宗,景可,等.黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径[M].北京:中国科学技术出版社,1990:213-222.
- TANG K L, CHEN Y Z, JING K, et al. Soil erosion regional characteristics and its harness way in Loess Plateau [M]. Beijing: Science and Technology of China

- Press, 1990: 213-222.
- [2] LIU S, GUO Z C, PAN Y B, et al. Rare earth oxides for labelling soil aggregate turnover: Impacts of soil properties, labelling method and aggregate structure[J]. *Geoderma*, 2019, 351: 36-48.
- [3] XU P D, WU J, WANG H, et al. Combined application of chemical fertilizer with green manure increased the stabilization of organic carbon in the organo-mineral complexes of paddy soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(2): 2676-2684.
- [4] GAUTAM A, GUZMAN J, KOVACS P, et al. Manure and inorganic fertilization impacts on soil nutrients, aggregate stability, and organic carbon and nitrogen in different aggregate fractions[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, 68(9): 1261-1273.
- [5] 张成行, 翁白莎, 严登华. 基于文献可视化分析的土壤团聚体研究进展[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(4): 429-438.
- ZHANG Y H, WENG B S, YAN D H. Research progress of soil aggregates based on literature visualization analysis[J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(4): 429-438.
- [6] COLEMAN D C, REID C P P, COLE C V. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems[J]. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13: 1-55.
- [7] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 黑土坡耕地侵蚀和沉积对物理性组分有机碳积累与损耗的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 467-474.
- FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Effects of soil erosion and deposition on loss and accumulation of soil organic carbon in physical fractions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 467-474.
- [8] BERHE A A, HARTE J, HARDEN J W, et al. The significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink[J]. *Bioscience*, 2007, 57(4): 337-346.
- [9] 肖胜生, 汤崇军, 王凌云, 等. 自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 874-884.
- XIAO S S, TANG C J, WANG L Y, et al. Soil erosion-induced selective transfer of organic carbon in red soil slope field under natural rainfall[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 874-884.
- [10] 刘连友, 王建华, 李小雁, 等. 耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定[J]. *科学通报*, 1998, 43(15): 1663-1666.
- LIU L Y, WANG J H, LI X Y, et al. Wind tunnel simulation determination of erodible particles in cultivated soil[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(15): 1663-1666.
- [11] 苏永中, 赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 928-934.
- SU Y Z, ZHAO H L. Losses of soil organic carbon and nitrogen and their mechanisms in the desertification process of sandy farmlands in horqin sandy land[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(8): 928-934.
- [12] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2279-2287.
- LI Y Y, SHAO M A, ZHENG J Y, et al. Impact of grassland recovery and reconstruction on soil organic carbon in the northern Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2279-2287.
- [13] 李俊超, 郭胜利, 党廷辉, 等. 黄土丘陵区不同退耕方式土壤有机碳密度的差异及其空间变化[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(6): 1167-1173.
- LI J C, GUO S L, DANG T H, et al. Spatial variations in soil organic carbon density under different restoration practices in loess hilly-gully region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6): 1167-1173.
- [14] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. *中国水土保持*, 2000(11): 13-19.
- TANG K L. Importance and urgency of harnessing the interlocked area with both water and wind erosion in the Loess Plateau[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2000(11): 13-19.
- [15] 范清成, 王飞, 穆兴民, 等. 近50年黄土高原风蚀区风速的区域变化特征分析[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(3): 40-43.
- FAN Q C, WANG F, MU X M, et al. Regional disparity and change of wind velocities in wind erosion area of Loess Plateau during last 50 years[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(3): 40-43.
- [16] 脱登峰. 黄土高原风水交错侵蚀对坡面产流产沙及土壤质量的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- TUO D F. Effects of wind-water alternate erosion on runoff, sediment and soil quality on Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2013.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- LU R K. Soil agrochemical analytical methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [18] 余健. 高潜水位区采煤塌陷地复垦土壤碳库特征[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- YU J. The carbon pool properties of reclaimed soil in coal mining subsidence area with high groundwater level[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2014.
- [19] 苑依笑, 王仁德, 常春平, 等. 风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失特征及其对土壤性质影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 104-109.
- YUAN Y X, WANG R D, CHANG C P, et al. Loss characteristics of fine particles by wind in farmland and its effect on soil properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 104-109.
- [20] NEUMAN C M, MAXWELL C. Temporal aspects of the

- abrasion of microphytic crusts under grain impact[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27(8): 891-908.
- [21] SU Y Z, ZHAO H L, LI Y L, et al. Carbon mineralization potential in soils of different habitats in the semiarid horqin sandy land: A laboratory experiment [J]. *Arid Land Research and Management*, 2004, 18(1): 39-50.
- [22] 延昊, 王绍强, 王长耀, 等. 风蚀对中国北方脆弱生态系统碳循环的影响[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(6): 672-677.
- YAN H, WANG S Q, WANG C Y, et al. Impact of wind erosion on carbon cycle of fragile ecosystem in northern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2004(6): 672-677.
- [23] FERNÁNDEZ-RAGA M, PALENCIA C, KEESSTRA S, et al. Splash erosion: A review with unanswered questions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 171: 463-477.
- [24] LI G L, ZHENG T H, FU Y, et al. Soil detachment and transport under the combined action of rainfall and runoff energy on shallow overland flow [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(7): 1373-1383.
- [25] 郭伟, 史志华, 陈利顶, 等. 红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响[J]. *生态学报*, 2007(6): 2516-2522.
- GUO W, SHI Z H, CHEN L D, et al. Effects of topsoil aggregate size on runoff and erosion at hillslope in red soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007(6): 2516-2522.
- [26] ZHANG B, HORN R. Mechanisms of aggregate stabilization in ultisols from subtropical China [J]. *Geoderma*, 2001, 99(1/2): 123-145.
- [27] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [28] LAL R. Global soil erosion by water and carbon dynamics [J]. *Soils and Global Change*, 1995, 30(12): 131-142.
- [29] 左小锋, 郑粉莉, 张加琼, 等. 典型薄层黑土区前期地表风蚀作用影响坡面水蚀的研究[J]. *土壤学报*, 2021, 58(5): 1145-1156.
- ZUO X F, ZHENG F L, ZHANG J Q, et al. Study on effect of surface wind erosion on hillslope water erosion in regions of typical thin layered mollisol at early stages [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(5): 1145-1156.
- [30] 杨会民. 半固定风沙土坡面风水复合侵蚀试验研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2017.
- YANG H M. Experimental study on the complex erosion by wind and water on slope based on semi-fixed aeolian sandy soil [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2017.
- [31] TUO D F, XU M X, ZHAO Y G, et al. Interactions between wind and water erosion change sediment yield and particle distribution under simulated conditions [J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(5): 590-598.
- [32] 杨会民, 王静爱, 邹学勇, 等. 风水复合侵蚀研究进展与展望[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 962-971.
- YANG H M, WANG J A, ZOU X Y, et al. Progress and prospect of research on wind-water complex erosion [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(4): 962-971.
- [33] 何清, 杨兴华, 艾力·买买提明, 等. 塔中地区土壤风蚀的影响因子分析[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 502-508.
- HE Q, YANG X H, ALI Mamtimin, et al. Impact factors of soil wind erosion in Tazhong area [J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(4): 502-508.
- [34] 雷阿林, 唐克丽, 王文龙. 土壤侵蚀链概念的科学意义及其特征[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(3): 79-83.
- LEI A L, TANG K L, WANG W L. Significance and character of conception of soil erosion chain [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14(3): 79-83.
- [35] LI F R, ZHAO L Y, ZHANG H, et al. Wind erosion and airborne dust deposition in farmland during spring in the Horqin sandy land of eastern Inner Mongolia, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 75(2): 121-130.
- [36] 喻为, 李忠武, 黄金权, 等. 水力侵蚀影响下土壤有机碳和微生物数量动态变化特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(2): 423-430.
- YU W, LI Z W, HUANG J Q, et al. Dynamics of soil microbial population and organic carbon under water erosion [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 423-430.
- [37] DIXON R K, SOLOMON A M, BROWN S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [38] 贾松伟, 贺秀斌, 韦方强. 黄绵土土壤活性有机碳的侵蚀和沉积效应[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(2): 10-13.
- JIA S W, HE X B, WEI F Q. Erosion and deposition effects of soil labile organic carbon in loessal soil [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(2): 10-13.
- [39] CHRISTENSEN B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates [J]. *Advances in Soil Science*, 1992, 20: 1-90.
- [40] BEYER L, FRÜND R, SCHLEUBU, et al. Colluvials under cultivation in Schleswig-Holstein. 2. Carbon distribution and soil organic matter composition [J]. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*, 1993, 156(3): 213-217.