

祁连山农牧交错带典型草地和梯田土壤侵蚀对 团聚体有机碳的影响

周 铃^{1,2}, 苏正安¹, 杨 静³, 周 涛^{1,2}, 谢晓健^{1,2}, 吴清华^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西藏昌都市农业技术推广总站, 西藏 昌都 854000)

摘 要: [目的] 为探明祁连山农牧交错带草地和梯田景观土壤侵蚀、团聚体及其有机碳的坡面分布格局, 明确土壤侵蚀如何驱动团聚体有机碳的坡面再分布变化, 为该区的保土固碳提供理论依据。[方法] 选取典型草地和顺坡梯田为研究对象, 采用 ¹³⁷Cs 核素示踪技术, 估算土壤水力侵蚀速率和耕作侵蚀速率; 采用湿筛法分析土壤团聚体的质量分数、稳定性及有机碳质量分数。[结果] 1) 在草地和梯田顺坡方向, 草地土壤 ¹³⁷Cs 面积活度呈下降—上升—下降—上升趋势, 梯田土壤 ¹³⁷Cs 面积活度呈波动上升趋势, 且在梯田 1 (T1) 和梯田 2 (T2) 相接处, ¹³⁷Cs 面积活度发生突变。2) 草地和梯田的总侵蚀速率分别为 -17.55~4 579.69 和 -1 358.10~11 226.20 t/(km²·a); 梯田坡顶总侵蚀速率显著高于草地。3) 草地不同景观部位土壤均以 >2 mm 团聚体为主, 梯田以 0.25~2 mm 团聚体为主; 草地的平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 均高于梯田; 在梯田顺坡方向, >2 mm 团聚体质量分数、团聚体稳定性呈波动上升趋势, <0.25 mm 团聚体质量分数呈相反趋势; 土壤团聚体有机碳质量分数在草地和梯田顺坡方向均表现为波动增加趋势, 但梯田坡脚处团聚体有机碳质量分数相比坡顶的增加量 (191.15%) 显著高于草地 (25.70%)。4) 在梯田景观中, 土壤侵蚀速率与团聚体质量分数、团聚体稳定性、团聚体有机碳质量分数呈显著相关, 而在草地景观中无显著相关性。[结论] 在祁连山农牧交错带, 坡耕地耕作侵蚀和水力侵蚀交互作用加剧 >2 mm 团聚体的破碎与迁移过程, 降低坡顶团聚体稳定性, 导致坡顶有机碳流失和坡脚有机碳累积。

关键词: 土壤团聚体; 土壤有机碳; 水力侵蚀; 耕作侵蚀; ¹³⁷Cs; 草地; 梯田; 坡面

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0198-10

Effects of Soil Erosion on Aggregate-Associated Organic Carbon in Typical Grassland and Terraced Fields of the Agro-Pastoral Ecotone of Qilian Mountains

ZHOU Ling^{1,2}, SU Zheng'an¹, YANG Jing³, ZHOU Tao^{1,2}, XIE Xiaojian^{1,2}, WU Qinghua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Agricultural Technology Extension Station of Qamdo City, Qamdo, Xizang 854000, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to clarify the spatial distribution patterns of soil erosion, soil aggregates, and aggregate-associated organic carbon in the grassland and terraced fields in the agro-pastoral ecotone of Qilian Mountains, and to elucidate how soil erosion drives the redistribution of aggregate-associated organic carbon along slopes. The findings will provide a theoretical basis for soil conservation and carbon sequestration in this region. [Methods] Typical grassland and terraced fields were selected as the study objects. The ¹³⁷Cs tracer method was used to estimate the rates of water erosion and tillage erosion. The wet sieving method was used to separate aggregates into four particle sizes fractions. The mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter

收稿日期: 2025-02-12

修回日期: 2025-04-10

录用日期: 2025-05-06

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-05-29

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42277338); 国家重点研发计划项目 (2023YFD1901203)

第一作者: 周铃 (2001—), 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: zhouling@imde.ac.cn

通信作者: 苏正安 (1980—), 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: suzhengan@imde.ac.cn

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

(GMD), organic carbon content in each aggregate size fraction, and organic carbon content were calculated. [Results] 1) The soil ^{137}Cs inventory exhibited a "decrease-increase-decrease-increase" trend along the slope direction of the grassland. However, the soil ^{137}Cs inventory exhibited a fluctuating increase, with a sharp mutation at the junction of Terrace 1 (T1) and Terrace 2 (T2). 2) The total erosion rates ranged from -17.55 to $4\,579.69\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ in grassland and $-1\,358.10$ to $11\,226.20\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ in terraces. Higher soil erosion rates were found at the top of each terrace than that in the grassland. 3) The aggregate composition varied among different slope positions. In the grassland, large macroaggregates ($>2\text{ mm}$) dominated at all landscape positions, whereas in terraced fields, small macroaggregates ($0.25-2\text{ mm}$) were dominant. The MWD and GMD of grassland aggregates were higher than those of terraces. Along the downslope direction of terraced fields, the mass fraction of $>2\text{ mm}$ aggregates and aggregate stability showed a fluctuating increase, while the fraction of $<0.25\text{ mm}$ aggregates exhibited the opposite trend. For both grassland and terraced fields, the aggregate-associated organic carbon showed a fluctuating trend of increase in the downslope direction, but the increase in organic carbon content at the foot position of the terraced fields (191.15% higher than that at the summit) was significantly greater than that in the grassland (25.70% higher than that at the summit). [Conclusions] In the agro-pastoral ecotone of the Qilian Mountains, the combined effects of tillage erosion and water erosion in sloping croplands exacerbates the fragmentation and migration of $>2\text{ mm}$ aggregates, reducing aggregate stability at the slope summit, and consequently leading to organic carbon depletion at the summit and accumulation at the foot position of the slope.

Keywords: soil aggregates; soil organic carbon; water erosion; tillage erosion; ^{137}Cs ; grassland; terraces; slope

Received: 2025-02-12

Revised: 2025-04-10

Accepted: 2025-05-06

Online(www.cnki.net): 2025-05-29

土壤有机碳(SOC)作为陆地生态系统最大的碳库,是全球碳循环的重要组成部分,其储量的减少不仅降低土壤肥力和作物产量,还显著增加大气 CO_2 排放,加剧温室效应^[1]。在土壤有机碳迁移转换过程中,土壤侵蚀等土壤退化过程被认为是影响有机碳库动态变化的重要因素^[2]。土壤侵蚀通过再分配土壤,搬运富含碳的表层土壤并将其掩埋在沉积环境中,深刻改变土壤及其有机碳的分布。每年全球土壤侵蚀重新分配大约 75 Pg 的土壤和 $1\sim5\text{ Pg}$ 的SOC^[3]。其中,土壤团聚体作为储存土壤有机碳的重要场所,土壤侵蚀破坏、分解团聚体,并释放包裹在团聚体中的有机碳,加速有机碳的分解和矿化^[4]。由于不同团聚体对有机碳的保护机制及能力不同,进一步影响有机碳库的动态变化。因此,研究土壤侵蚀对不同水稳性团聚体有机碳的影响对于明晰有机碳固存机制至关重要。

在坡面尺度上,土壤顺坡迁移过程引起土壤团聚体及其有机碳数量和质量的再分布^[5],进一步影响土壤 CO_2 的排放量,对全球碳循环产生重要影响^[1]。其中,水力侵蚀是影响团聚体及其有机碳迁移的重要因素。大量细颗粒土壤物质由于水力侵蚀选择性搬运作用,优先通过下坡方向的地表径流重新分布^[5]。在坡耕地景观中,WANG等^[6]、ZHANG等^[7]、李露等^[8]研究表明,耕作侵蚀对团聚体及有机碳的再

分布影响不可忽视。耕作侵蚀破坏团聚体结构,一方面增加有机碳暴露程度,促进有机碳的分解和转化;另一方面,耕作侵蚀促进水力侵蚀对土壤颗粒的搬运作用,导致有机碳发生顺坡迁移,且通常是细颗粒优先被侵蚀,并在沉积区堆积^[9];ZHANG等^[10]研究发现,水力侵蚀和耕作侵蚀对土壤有机碳储量及动态变化的影响不同,水力侵蚀主导下迁移的有机碳更容易发生矿化,导致有机碳的损失,而耕作侵蚀主导下的影响较小。表明水力侵蚀和耕作侵蚀由于侵蚀机制不同,对坡面团聚体及其有机碳的空间分布将产生不同影响。因此,探明不同侵蚀类型下土壤团聚体及其有机碳的坡面格局,可为制定适宜的土壤管理措施提供建议。

祁连山农牧交错带地处青藏高原东北缘,是我国西北干旱区的重要生态安全屏障。该区不仅是干旱半干旱过渡区,也是耕地与草地、农业与畜牧业的过渡带。耕地和草地作为该区的重要土地利用类型,对于维系该区生态平衡和农牧业发展具有重要意义。但受气候变化、人类活动的影响,该区面临着水土流失严重、生态环境脆弱的问题^[11]。基于此,已有相关学者开展有关土壤侵蚀的初步研究,如童姍等^[12]利用RULSE模型、CA-Markov模型及LMDI模型初步探明地形、降雨及植被覆盖对祁连山南坡土壤侵蚀的影响;张虔等^[11]通过分析不同植被覆盖下

的土壤粒径分布与分形维数发现,高山灌丛相比云杉和草地具有更高的黏粒质量分数和抗侵蚀能力。同时,在全球气候变暖的背景下,许多学者在该区域围绕土壤有机碳开展大量研究,探明不同土地利用类型的土壤养分特征及其影响因素^[13],并基于 $\delta^{13}\text{C}$ 技术分析不同土壤粒径的有机碳特征^[14]。但在该区域,采用核素示踪和原位调查技术,研究耕地和草地土壤侵蚀差异对团聚体有机碳的影响鲜见报道。

以祁连山农牧交错带典型顺坡梯田为研究对象,以草地为对照,利用 ^{137}Cs 核素示踪技术查明不同土地利用下的侵蚀格局,并探究不同土壤侵蚀类型(耕作侵蚀和水力侵蚀)对团聚体有机碳坡面分布格局的影响,以期丰富该区土壤团聚体有机碳的研究,为该区的水土保持和土壤管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省海北藏族自治州门源县($37^{\circ}29'\sim 37^{\circ}45'\text{N}$, $101^{\circ}12'\sim 101^{\circ}23'\text{E}$)(图1),地处祁连山脉南麓,达坂山北麓,大通河自西向东流经全境。地势起伏较大,最高海拔5 254.5 m,最低海拔2 388.0 m。该区属于高原大陆性气候,具有日照时间长、太阳辐射强、昼夜温差大、冬季寒冷、夏季湿热等特点,全年日照时间2 264.8~2 739.8 h,年平均气温 1.5°C ,年平均降水量300~400 mm^[13]。土壤类型主要为栗钙土。植被以乔灌木和草本为主,乔木主要为杨树(*Populus L.*)、柳树(*Salix babylonica L.*)等;灌木主要为沙棘(*Hippophae rhamnoides Linn.*)、红柳(*Tamarix ramosissima Ledeb.*)等;草本主要以嵩草(*Kobresia myosuroides (Villars) Foiri*)为主,伴生有针茅(*Stipa capillata L.*)、早熟禾(*Poa annua L.*)等,植被覆盖度约为75%。该区以发展农牧业为主,2022年耕地面积约324.75 km²,主要种植青稞(*Hordeum vulgare var. coeleste Linnaeus*)、小油菜(*Brassica napus L.*)。耕作方式为顺坡耕作,耕作制度一年一季,耕地施肥主要以氮肥(尿素)、磷肥(磷酸二铵)等化肥为主,尿素、磷酸二铵的施用量分别约为111、187.5 kg/hm²^[15]。

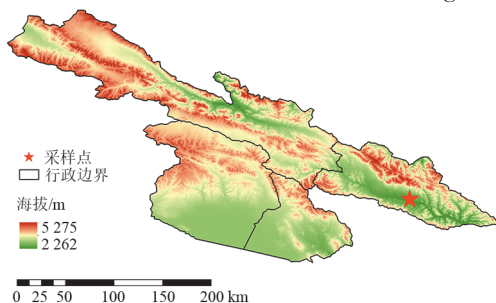


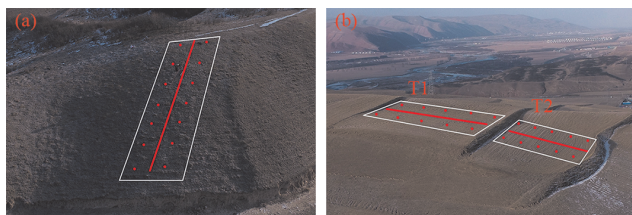
图1 研究区概况

Fig. 1 Location of the study area

1.2 样品采集与分析

本研究于2020年8月开展采样工作。选取研究区的草地和顺坡梯田作为研究样地,草地和梯田的土壤类型为栗钙土,土壤体积质量为 $1.03\sim 1.44\text{ g/cm}^3$ 。顺坡梯田包括2个线性坡式梯田(从上至下依次命名为T1、T2),坡长64 m,坡宽约50 m,坡度 $5\%\sim 22\%$,土壤质地为壤土,其中T1种植油菜,T2种植大麦,作物处于开花抽穗期,均具有较高植被覆盖度。草地主要以嵩草和紫花苜蓿为主,坡长30 m,坡度 $7\%\sim 20\%$,土壤质地为粉砂壤土。

为保证采集样品的代表性和典型性,本研究在具有代表性的草地和梯田中部选取1个局部坡面代表整个坡面,采用双剖面线法^[16]进行坡面布点采样,即在顺坡方向布设2条间隔约5 m的平行剖面线,分别位于局部坡面中轴线两侧,在剖面线上等间距布设样点采集样品,并将2条剖面线上采集的同一景观部位的样品进行均匀混合,代表坡面同一坡位的土壤特征(图2)。在每个梯田景观内,2条剖面线均等间距设置5个采样点,共计10个采样点。顺坡向下,每条剖面线前4个采样点采集耕层(0~15 cm)和亚耕层(15~30 cm)土样,第5个采样点位于坡脚,土壤出现堆积,为保证土壤侵蚀速率的正确计算,故采集0~15、15~30、30~45、45~60 cm土层样品,并将2条剖面线上同一坡位同一深度土层样品进行均匀混合,故顺坡梯田系列共采集土壤样品24个。草地景观内,每条剖面线均等间距设置7个采样点,每个采样点采集0~15、15~30 cm土层土样,并将2条剖面线同一坡位同一深度土层样品均匀混合,共采集土壤样品14个。



注:a、b分别为草地、梯田;T1、T2分别为梯田1、梯田2。

图2 样点布设示意

Fig. 2 Landscape map of the sampling points

对采集的土壤样品进行预处理,分析并测试土壤体积质量、 ^{137}Cs 质量分数、水稳性团聚体质量分数及团聚体有机碳质量分数。土壤体积质量采用烘干法测定; ^{137}Cs 质量分数采用美国的高纯锗(HPGe) γ 谱仪测定,每个样品测试质量 $>500\text{ g}$,测试结果的相对误差 $<5\%$;水稳性团聚体通过湿筛法^[3]进行测定,分离得到的大团聚体($>2\text{ mm}$)、中团聚体($0.25\sim 2\text{ mm}$)、微团聚体($0.053\sim 0.25\text{ mm}$)和粉黏团聚体($<0.053\text{ mm}$)经过烘干过筛,供有机碳分析使用。由于研究区土壤

为碱性土壤,需先用一定浓度的盐酸对土壤进行酸洗,随后在60℃下烘干,研磨后过100目筛,最后使用元素分析仪测定有机碳质量分数。

1.3 计算与统计分析

土壤 ^{137}Cs 背景值的确定。已有研究^[17]在2003年提出与青海省门源县相近的青海省共和县(35°30'N,100°00'E)的 ^{137}Cs 背景值(2 571 Bq/m²)。两地相距250 km,其中,共和县的年平均降雨量约为398.6 mm^[18],与本研究区降雨特征相似,均位于400 mm等降雨线附近,属于半干旱半湿润地区。因此,可根据 ^{137}Cs 的年放射性衰变常数(0.977)修正为2020年的有效背景值(1 731 Bq/m²),并以此作为本研究 ^{137}Cs 背景值。

顺坡梯田土壤总侵蚀速率采用简化质量平衡模型^[7]进行计算,公式为:

$$Y = \frac{1\,000\,Bd}{P} \left[1 - \left(1 - \frac{X}{100} \right)^{\frac{1}{T-1963}} \right] \quad (1)$$

$$X = (A_0 - A) / A_0 \times 100 \quad (2)$$

式中: Y 为土壤总侵蚀速率,t/(km²·a); B 为土壤体积分质量,kg/m³; d 为耕作层厚度,m; P 为粒径修正因子; A 为样点的 ^{137}Cs 面积活度,Bq/m²; A_0 为 ^{137}Cs 背景值,Bq/m²; T 为采样年份。

草地土壤总侵蚀速率采用剖面模型^[16]进行计算,公式为:

$$Y = \frac{100}{\lambda(T-1\,963)} \ln \left(1 - \frac{X}{100} \right) \quad (3)$$

式中: λ 为下渗参数。

对于梯田,每一阶梯田均为线性坡,且由于田埂作用,被认为是一个封闭的系统,故每阶梯田耕作侵蚀速率采用ZHANG等^[7]提出的公式计算,公式为:

$$R_1 = 1\,000\,dB(k_1 + k_2S)/L \quad (4)$$

式中: R_1 为耕作侵蚀速率,t/(km²·a); k_1 和 k_2 为耕作传输系数,分别取0.106 6和0.490 2 m; S 为坡度,m/m; L 为坡长,m。

经实地调查,梯田主要受耕作侵蚀和水力侵蚀作用,故梯田水力侵蚀速率通过总侵蚀速率减去耕作侵蚀速率获取^[10]。

团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)参照WANG等^[6]的方法计算,公式为:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (5)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{R}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (6)$$

式中: $\bar{R}_i$ 为某一粒级团聚体的平均直径,mm; w_i 为某一粒级团聚体的干质量,g。

土壤总团聚体有机碳质量分数计算公式^[8]为:

$$W = \sum_{i=1}^n y_i p_i \quad (7)$$

式中: W 为土壤不同粒径团聚体有机碳总质量分数,g/kg; y_i 为某粒径团聚体有机碳质量分数,g/kg; p_i 为相应粒径团聚体质量分数,%; n 为团聚体粒级数。

采用Excel 2021软件计算土壤 ^{137}Cs 面积活度和土壤侵蚀速率;利用SPSS 19.0软件采用单因素方差分析(ANOVA)和LSD检验($p < 0.05$)对不同坡位的各粒级团聚体质量分数、团聚体稳定性指标、团聚体有机碳质量分数进行差异性检验,采用Pearson相关对侵蚀指标和团聚体指标进行相关分析。使用Origin 2021软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 草地和梯田不同景观部位的土壤侵蚀特征

草地土壤 ^{137}Cs 面积活度和土壤侵蚀速率的坡面格局变异明显(图3a)。 ^{137}Cs 面积活度呈顺坡下降—上升—下降—上升的波动趋势,在0~20、20~30 m处均呈先下降后上升特征。土壤侵蚀速率则呈相反的变化规律:顺坡方向呈上升—下降—上升—下降的波动趋势,在0~10、20~25 m处表现为相对侵蚀,在10~20、25~30 m处则表现为相对沉积。其中,0 m处的侵蚀速率为负值,主要是因为草地0 m处位于坡顶,地势平坦。总体而言,草地的 ^{137}Cs 面积活度为268.24~1 743.41 Bq/m²(平均为885.20 Bq/m²),土壤侵蚀速率为-17.55~4 579.69 t/(km²·a)[平均为2 124.73 t/(km²·a)],表明该地区草地土壤发生净侵蚀。

与草地相比,梯田景观的 ^{137}Cs 面积活度随坡长增加呈波动上升趋势,而土壤总侵蚀速率则呈波动下降趋势(图3b)。在上坡位的梯田(T1)具有较低的 ^{137}Cs 面积活度和较高的总侵蚀速率,在下坡位的梯田(T2)具有较高的 ^{137}Cs 面积活度和较低的总侵蚀速率;且在64 m处的总侵蚀速率为-1 358.10 t/(km²·a),表现为明显的沉积特征。在T1、T2交界处, ^{137}Cs 面积活度变化较大,表现为T1下部 ^{137}Cs 面积活度显著高于T2上部,表明梯田田埂可有效隔断整个坡面的泥沙输移过程。总体上,梯田系列的 ^{137}Cs 面积活度为333.94~2 119.86 Bq/m²,平均

值为 960.75 Bq/m², 总侵蚀速率为 - 1 358.10~ 11 226.20 t/(km²·a), 平均值为 4 919.81 t/(km²·a)。

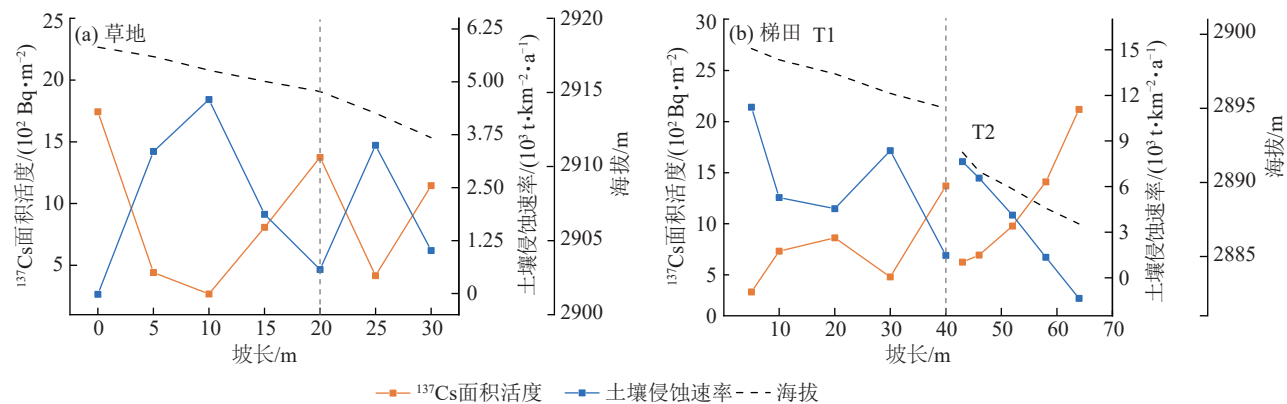


图 3 草地与梯田系列坡面土壤侵蚀特征

Fig. 3 Variations of soil erosion indices along the slopes in the grassland and terraced fields

与草地相比,梯田受水力侵蚀和耕作侵蚀的共同作用。坡长较长、坡度较小的T1中,水力侵蚀速率为 5 477.10 t/(km²·a),耕作侵蚀速率为 699.18 t/(km²·a),耕作侵蚀贡献率为 11.32%;坡长较短、坡度较大的T2中,水力侵蚀速率为 1 986.90 t/(km²·a),耕作侵

蚀速率为 1 676.43 t/(km²·a),耕作侵蚀贡献率为 45.76%(表1)。总体上,梯田系列的总侵蚀速率高于草地,且在梯田坡顶处的¹³⁷Cs面积活度显著低于草地,总侵蚀速率显著高于草地,梯田坡顶强烈耕作过程促进坡顶土壤流失。

表 1 草地和梯田系列的地貌特征与土壤侵蚀速率

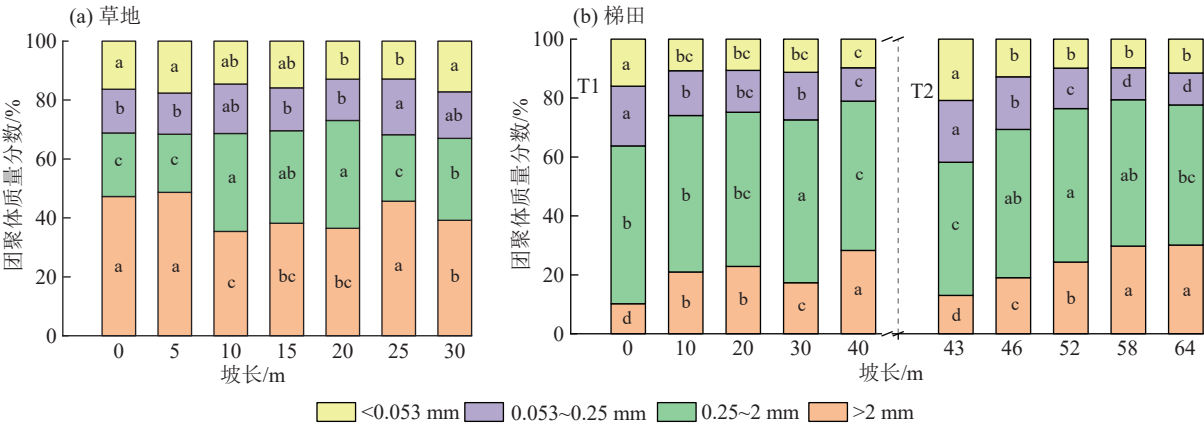
Table 1 Landscape characteristics and soil erosion rates of the grassland and terraced fields

样地	海拔/m	坡长/m	坡度/(m·m ⁻¹)	总侵蚀速率/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	耕作侵蚀速率/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	水力侵蚀速率/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	耕作侵蚀贡献率/%
草地	2 911.95~2 918.05	30	5~20	2 124.73	—	2 124.73	—
T1	2 895.00~2 899.03	40	8~13	6 176.28	699.18	5 477.10	11.32
T2	2 887.20~2 992.04	24	13~22	3 663.34	1 676.43	1 986.90	45.76

2.2 草地和梯田不同景观部位团聚体组成及其稳定性

草地土壤不同景观部位的团聚体质量分数差异显著,草地的大团聚体、中团聚体、微团聚体和粉黏团聚体的质量分数平均值分别为 41.55%、27.58%、

15.55%、15.32%,即各坡位均以大团聚体为主(图4a)。在不同景观位置下,大团聚体质量分数呈顺坡先下降后上升的波动趋势,在0、5、25 m处显著高于其他部位;中团聚体质量分数则呈先上升后下降规律;而< 0.25 mm团聚体质量分数在各景观部位的波动较小。



注:图柱中不同小写字母表示不同坡长间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 4 草地与梯田不同景观部位团聚体质量分数

Fig. 4 Distribution of water-stable aggregates at different landscape positions in the grassland and terraced fields

梯田系列土壤不同景观部位的团聚体质量分数也存在显著差异,梯田系列的大团聚体、中团聚

体、微团聚体和粉黏团聚体的质量分数平均值分别为 21.60%、51.00%、15.15%、12.27%,即总体上以

中团聚体为主(图4b)。在T1中,大团聚体质量分数表现为顺坡波动增加趋势;中团聚体质量分数在不同景观部位变化小;微团聚体和粉黏团聚体的质量分数则呈顺坡波动下降趋势,在0 m处最大,在10、20、30 m处差异不显著,在40 m处最小。在T2中,大团聚体质量分数顺坡逐渐增加;中团聚体质量分数在不同景观部位差异较小;微团聚体和粉黏团聚体的质量分数顺坡逐渐减小,在43 m处显著高于其他部位。总体上,梯田系列在侵蚀速率较高的部位,大团聚体质量分数较低,微团聚体和粉黏团聚体的质量分数较高;而在侵蚀速率较低的部位,则呈相反规律。

图5为草地和梯田系列不同景观部位土壤团聚体的MWD和GMD。在草地景观中,土壤MWD和GMD均呈顺坡先下降后上升再下降趋势,其变化分别为2.53~3.17、0.83~1.02 mm。在梯田景观中,T1和T2的土壤MWD和GMD与 ^{137}Cs 面积活度呈相似的坡面格局,均表现为顺坡波动增加趋势。其中,T1的MWD和GMD分别为1.25~2.29、0.49~1.00 mm;T2的MWD和GMD分别为1.31~2.36、0.42~1.04 mm。总体而言,草地的MWD和GMD大于T1和T2,且草地的MWD、GMD在不同坡位的波动程度低于梯田系列。

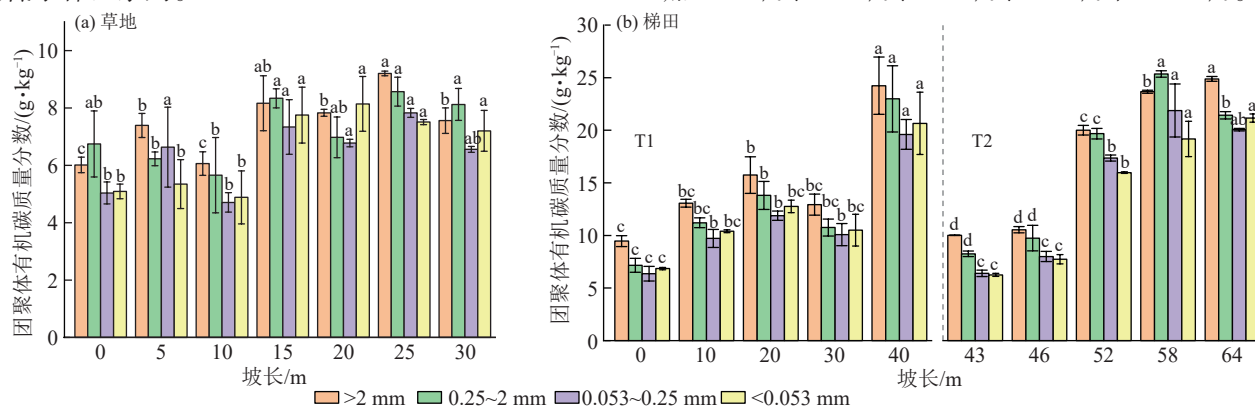


图6 草地与梯田不同景观部位团聚体有机碳质量分数

Fig. 6 Contents of organic carbon associated with different sizes of aggregates at different landscape positions in the grassland and terraced fields

梯田不同景观部位的团聚体有机碳质量分数差异显著(图6b和图7)。梯田总团聚体有机碳质量分数为14.78 g/kg,其中,大团聚体有机碳、中团聚体有机碳、微团聚体有机碳和粉黏团聚体有机碳的平均值分别为16.46、15.04、13.13、13.15 g/kg。顺坡方向,团聚体有机碳质量分数的分布趋势与 ^{137}Cs 面积活度的坡面分布特征一致,均呈波动增加趋势。其中,T1的团聚体有机碳质量分数在40 m处显著高于其他坡位,在40 m处的总团聚体有机

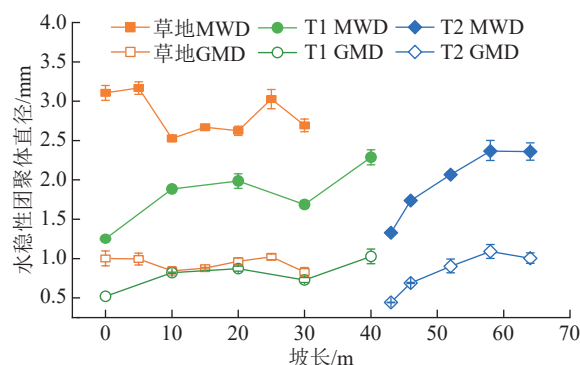


图5 草地与梯田不同景观部位团聚体稳定性

Fig. 5 Aggregate stability at different landscape positions in the grassland and terraced fields

2.3 草地和梯田不同景观部位团聚体有机碳质量分数

草地不同景观部位的团聚体有机碳质量分数差异显著(图6a和图7)。草地总团聚体有机碳质量分数为7.05 g/kg,其中,大团聚体有机碳、中团聚体有机碳、微团聚体有机碳和粉黏团聚体有机碳的平均值分别为7.46、7.23、6.41、6.56 g/kg。顺坡方向,总团聚体有机碳及各粒径团聚体有机碳的质量分数均呈波动增加趋势;其中,30 m处的总团聚体有机碳、大团聚体有机碳、中团聚体有机碳、微团聚体有机碳和粉黏团聚体有机碳质量分数相较于0 m处分别增加25.70%、20.44%、20.40%、30.24%和41.47%。

碳、大团聚体有机碳、中团聚体有机碳、微团聚体有机碳和粉黏团聚体有机碳质量分数较0 m处分别增加214.29%、156.21%、220.72%、208.01%和201.50%;T2的团聚体有机碳质量分数在52、58、64 m处显著高于43、46 m处,其中64 m处的总团聚体有机碳、大团聚体有机碳、中团聚体有机碳、微团聚体有机碳和粉黏团聚体有机碳的质量分数较0 m处分别增加191.15%、148.43%、159.65%、213.72%和238.42%。总体而言,梯田的团聚体有机碳质量

分数高于草地,且梯田坡脚团聚体有机碳的增量也大于草地。

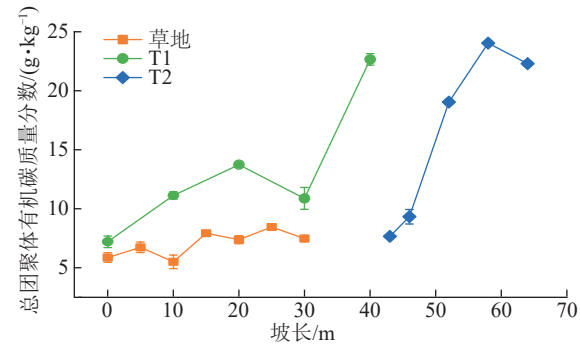


图7 草地与梯田不同景观部位总团聚体有机碳质量分数
Fig.7 Contents of aggregate-associated organic carbon at different landscape positions in the grassland and terraced fields

2.4 土壤侵蚀与团聚体有机碳相关性分析

草地和梯田景观中土壤侵蚀指标与团聚体指标、团聚体有机碳指标相关性不同(表2)。土壤¹³⁷Cs作为评价土壤侵蚀特征的重要指标,在草地景观中,¹³⁷Cs面积活度与团聚体指标均无显著相关性($p < 0.05$);而在梯田景观中,土壤¹³⁷Cs面积活度与大团聚

体质量分数、MWD、GMD、团聚体有机碳质量分数均呈显著正相关($p < 0.01$),与微团聚体质量分数呈显著负相关($p < 0.01$)。

3 讨论

3.1 草地和梯田景观坡面土壤侵蚀格局特征

地形是影响土壤侵蚀速率空间变异的重要因素之一^[19]。在坡面尺度上,不同景观的土壤侵蚀速率空间差异与坡度、坡长紧密相关。刘华征等^[20]利用¹³⁷Cs技术在东北黑土区研究3种坡型坡耕地的土壤侵蚀速率发现,3种坡型坡耕地土壤侵蚀速率均随坡长变化呈周期性变化规律,而非线性变化规律^[19]; ZHOU等^[21]在黄土高原研究也发现,草地坡面呈侵蚀与沉积交替的格局。在本研究的草地景观中也观测到类似规律。草地仅受水力侵蚀影响,土壤侵蚀速率在0~20、20~30 m坡长间均表现为随坡长增加呈先增加后减小趋势。由于水土流失过程是动态过程,一方面,坡长增加,汇水量增加,侵蚀速率更高^[22];另一方面,径流输送泥沙过程消耗水流能量削弱侵蚀强度^[23],并且缓坡的径流输送能量低于陡坡^[19]。

表2 草地和梯田景观中土壤侵蚀特征和团聚体及其有机碳的相关性系数

Table 2 Correlation coefficients between soil erosion indices and aggregates content, stability, aggregate-associated organic carbon content in the grassland and terraced fields

样地	土壤团聚体质量分数				MWD	GMD	团聚体有机碳质量分数				SOC
	>2 mm	0.2~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm			>2 mm	0.2~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm	
草地	0.11	0.01	-0.48	0.12	0.14	0.35	-0.27	0.11	-0.20	0.15	-0.10
梯田	0.88***	-0.47	-0.83**	-0.44	0.85**	0.78**	0.90***	0.84**	0.86**	0.90***	0.87*

注: SOC表示总团聚体有机碳质量分数; 数字表示两因子间相关性, 数字越接近于1, 相关性越高; *, **和***分别表示在 $p < 0.05$, $p < 0.01$ 和 $p < 0.001$ 水平上显著相关。

不同于草地,梯田受人类活动强烈影响,在水力侵蚀和耕作侵蚀的复合作用下,土壤侵蚀坡面格局表现出差异。T1的土壤侵蚀速率表现为顺坡先减小、后增大、再减小的特征,而T2则表现为顺坡减小的特征,与王丽娟等^[24]在藏东南的研究结果相似,二者土壤侵蚀格局差异是水力侵蚀和耕作侵蚀复合作用下对地形的响应结果。耕作侵蚀导致坡顶强烈侵蚀,坡脚发生沉积,因此,在中坡(40 m)上水蚀是主要侵蚀过程,在短而陡的坡面上耕作侵蚀是主要侵蚀过程^[25]。本研究发现,在2个梯田交界处,土壤侵蚀速率发生突变,下一阶梯田坡顶的侵蚀速率高于上一阶梯田坡脚,与SU等^[16]在青藏高原及ZHANG等^[10]在四川紫色土区的研究结果一致,表明梯田田埂显著改变斜坡上的土壤侵蚀空间格局和过程,也解释本研究中每一阶梯田坡脚处侵蚀速率最低的原因。

植被覆盖或土地利用也影响土壤侵蚀速率^[2]。植被覆盖度越高,土壤侵蚀速率越低。草地具有丰富的地上植被,能够削减雨滴对土壤的击溅分离作用,并拦截径流搬运的土壤颗粒^[26]。ZHOU等^[21]研究表明,退耕还草后能有效降低水土流失强度,与本文研究结果一致。草地的平均土壤侵蚀速率为2 124.73 t/(km²·a),而梯田系列为4 919.81 t/(km²·a)。根据《土壤侵蚀分类分级标准 SL 190—2007》,草地的侵蚀强度为轻度侵蚀,梯田的侵蚀强度为中度侵蚀,2种景观均表现为净侵蚀,梯田田埂未能完全拦截泥沙,水蚀作用可将部分土壤搬运到田块外部。

3.2 草地和梯田景观坡面土壤团聚体特征

研究结果表明,草地的大团聚体、MWD和GMD均高于梯田。同时,草地的土壤侵蚀速率低于梯田。与WANG等^[3]在黄土高原的研究相似,表明

植被恢复能够显著增加土壤大团聚体质量分数、MWD、GMD,并减少土壤流失。LU等^[26]研究表明,水力侵蚀过程中雨滴对团聚体的流失作用强于径流,雨滴对坡面土壤侵蚀的贡献率为78.3%~95.2%。草地的地上结构降低雨滴对团聚体的破碎作用,同时,草地的根系有利于大团聚体的形成和稳定,降低土壤可蚀性。因此,本研究中草地团聚体质量分数、MWD和GMD与¹³⁷Cs的相关性不显著($p < 0.05$),水力侵蚀对草地团聚体的破碎迁移能力较弱。

梯田由于强烈耕作侵蚀,加剧团聚体坡面变异性,改变团聚体的稳定性。WANG等^[6]在25°的坡耕地模拟20次耕作对团聚体的影响发现,耕作侵蚀减少 >0.25 mm团聚体质量分数,增加 <0.25 mm团聚体质量分数。与本研究结果相似,但草地和梯田团聚体组成的差异却表明耕作侵蚀以破坏 >2 mm大团聚体为主,可能与耕作强度有关。同时,耕作侵蚀还加剧团聚体坡面变异性^[6]。耕作侵蚀具有无选择性搬运特点^[6,25],顺坡耕作使上坡大团聚体被水平传输搬运至下坡,同时下坡耕作过程将团聚体均匀混合^[8],导致大团聚体顺坡增加,微团聚体和粉黏团聚体顺坡减小,与樊红柱等^[9]在川北山区的研究结果相似。而大团聚体与团聚体稳定性密切相关,强烈耕作侵蚀导致坡顶大团聚体的破坏和流失,降低团聚体稳定性^[27],坡顶MWD和GMD显著低于坡脚,将进一步加剧坡顶水力侵蚀过程。

尽管2种景观中草地的团聚体结构更好,但草地的团聚体有机碳质量分数低于梯田,与以往研究^[3,28]结果不一致。可能是梯田通过施加化肥增加土壤有机碳的输入;而草地由于畜牧活动减少地上生物量,从而减少有机碳的归还量。土壤质地对有机碳质量分数也有显著影响。侵蚀条件下,土壤类型是影响有机碳的重要因素,其对有机碳的控制程度是团聚体的1.3倍^[29]。ZHU等^[5]在研究侵蚀和沉积对团聚体有机碳的动态影响时也发现,土壤团聚体有机碳质量分数与成土过程密切相关,土壤质地不同,砂粒质量分数越高,有机碳质量分数越低,可能是草地团聚体有机碳质量分数低于梯田的原因之一。

3.3 土壤侵蚀对团聚体有机碳的影响

相比于草地,顺坡梯田景观内叠加人为活动的土壤侵蚀过程,驱动土壤团聚体有机碳顺坡迁移过程发生显著变化。以往研究^[30]表明,土壤侵蚀导致侵蚀部位有机碳质量分数减少,沉积部位有机碳质量分数增加。在坡面尺度上,ZHU等^[5]研究发现,

中坡有机碳损失伴随着¹²C的损失,推测不稳定的有机碳在侵蚀力作用下将从团聚体中释放,并在坡脚富集。同时,吸附在土壤颗粒上的有机碳也发生迁移,团聚体有机碳一般表现为顺坡增加趋势^[9]。本研究中,草地和梯田中的团聚体有机碳质量分数基本符合此规律。但梯田坡脚和坡顶总土壤团聚体有机碳质量分数的差值是草地的7倍以上,表明耕作侵蚀和水力侵蚀的耦合作用加剧有机碳的空间变异性。相关分析结果显示,受耕作侵蚀和水力侵蚀复合影响的梯田中的团聚体有机碳质量分数对土壤侵蚀速率的响应程度更高,表现为极显著负相关($p < 0.001$),与赵鹏志等^[22]在黑土坡耕地研究结果较为一致。耕作侵蚀与SOC、POC具有显著相关,而水蚀与有机碳质量分数及其组分相关性不显著,表明土壤有机碳对耕作侵蚀的响应更加敏感。耕作侵蚀不仅加剧团聚体有机碳的顺坡迁移,还可能增强水力侵蚀对有机碳的矿化作用,加速有机碳的耗竭^[7]。尤其在坡上部位,耕作侵蚀加速有机碳的损失。根据草地和梯田坡面团聚体组分的差异,本研究结果表明,耕作侵蚀主要通过破坏具有高有机碳质量分数的 >2 mm大团聚体,加剧有机碳的暴露程度,并促进水力侵蚀对团聚体有机碳的矿化和迁移作用,进一步导致坡顶有机碳的减少和坡脚有机碳的增加。

综上,祁连山农牧交错带梯田景观内存在耕作和水蚀2种土壤侵蚀形式,而草地上主要存在水蚀作用,使土壤侵蚀速率、空间格局和土壤顺坡迁移过程存在显著差异,从而导致土壤团聚体的粒径质量分数、有机碳质量分数及其稳定性差异显著。为缓解顺坡梯田土壤及其养分流失,后期研究需减小坡式梯田坡长及坡度,改良当地耕作方式,采取免耕、少耕、等高水平耕作等保护性耕作措施,从而控制水力侵蚀及耕作侵蚀强度,保护土壤资源及其质量。

4 结论

1)草地和梯田景观坡面上土壤侵蚀格局存在显著差异。地形因子主导侵蚀过程,顺坡方向上草地的侵蚀速率呈上升一下降的周期性变化趋势,梯田总侵蚀速率呈波动下降趋势,并且上一阶梯田底部的侵蚀速率低于下一阶梯田顶部,表明梯田田埂具有一定的水土保持效益。但与草地相比,梯田的总侵蚀速率更高,且在坡顶处差异更显著,表明耕作加剧土壤侵蚀程度。

2)草地和顺坡梯田景观中的团聚体质量分数、MWD、GMD的坡面分布格局不同。草地各景观部

位均以大团聚体($>2\text{ mm}$)为主,而梯田则以中团聚体($0.25\sim 2\text{ mm}$)为主,且草地的MWD和GMD均高于梯田,表明草地的团聚体结构更加稳定。在梯田中, $>2\text{ mm}$ 团聚体质量分数呈顺坡波动增加趋势, $<0.25\text{ mm}$ 团聚体质量分数则呈顺坡波动减小趋势,主要是由于耕作侵蚀对团聚体的破碎、水平传输和垂直混匀作用。

3)不同侵蚀类型导致团聚体有机碳的坡面再分布程度存在显著差异。尽管顺坡方向草地和梯田的团聚体有机碳质量分数均表现为波动增加,但梯田总团聚体有机碳的增加量是草地的7倍。相关分析表明,梯田土壤团聚体有机碳质量分数与侵蚀特征参数间具有显著关系,而草地中无显著关系。表明耕作侵蚀与水力侵蚀复合作用对团聚体有机碳的再分布能力强于水力侵蚀,强烈耕作过程加剧水力侵蚀过程对有机碳的转移,导致上坡有机碳的流失和下坡有机碳的积累。

参考文献:

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304 (5677):1623-1627.
- [2] LI Y W, DUAN X W, LI Y, et al. Interactive effects of land use and soil erosion on soil organic carbon in the dry-hot valley region of southern China [J]. *Catena*, 2021, 201: e105187.
- [3] WANG Y X, RAN L S, FANG N F, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2018, 167: 257-265.
- [4] CUI L L, LI X, LIN J, et al. The mineralization and sequestration of soil organic carbon in relation to gully erosion [J]. *Catena*, 2022, 214: e106218.
- [5] ZHU Y L, WANG D Y, WANG X J, et al. Aggregate-associated soil organic carbon dynamics as affected by erosion and deposition along contrasting hillslopes in the Chinese corn belt [J]. *Catena*, 2021, 199: e105106.
- [6] WANG Y, ZHANG J H, ZHANG Z H. Influences of intensive tillage on water-stable aggregate distribution on a steep hillslope [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 151: 82-92.
- [7] ZHANG J H, NI S J, SU Z A. Dual roles of tillage erosion in lateral SOC movement in the landscape [J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63 (2): 165-176.
- [8] 李露,曹伟,赵鹏志,等.黑土区坡耕地与坡林地表团聚体有机碳库差异[J].北京林业大学学报,2016, 38(12):46-53.
- [9] 樊红柱,张建辉,王勇,等.川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J].农业机械学报,2015, 46(11):157-164.
- [10] FAN H Z, ZHANG J H, WANG Y, et al. Tillage erosion impacts on soil aggregate associated carbon in mountainous region slope farmland of northern Sichuan [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11):157-164.
- [11] 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.
- [12] 张虔,袁杰,曹广超,等.祁连山南坡不同生态系统土壤粒径分布与分形特征[J].草原与草坪,2024, 44(6): 34-41.
- [13] ZHANG Q, YUAN J, CAO G C, et al. Soil particle size distribution and fractal characteristics of different ecosystems on the southern slope of Qilian Mountains [J]. *Grassland and Turf*, 2024, 44(6): 34-41.
- [14] 童珊,曹广超,闫欣,等.祁连山南坡土壤侵蚀定量研究与影响因素分析[J].水土保持研究,2022, 29(5): 100-107.
- [15] TONG S, CAO G C, YAN X, et al. Quantitative study on soil erosion and its influencing factors on the south slope of Qilian Mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5):100-107.
- [16] 邱巡巡,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡农田土壤碳氮含量垂直分布特征及其影响因素[J].水土保持通报, 2022, 42(3):366-372.
- [17] QIU X X, CAO G C, CAO S K, et al. Vertical distribution characteristics and influencing factors of soil carbon and nitrogen content in farmland on southern slope of Qilian Mountains [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3):366-372.
- [18] 汉光昭,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡典型区域不同粒径土壤颗粒有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 特征[J].生态学杂志,2022, 41(10):1948-1954.
- [19] HAN G Z, CAO G C, CAO S K, et al. Characteristics of organic carbon $\delta^{13}\text{C}$ of different sized soil particulates in the southern slope of Qilian Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41 (10): 1948-1954.
- [20] 杨红萍.论青海省门源县青稞测土配方施肥田间试验

- [J].农民致富之友,2016(14):126.
- YANG H P. On the field experiment of soil testing and formula fertilization of highland barley in Menyuan county, Qinghai Province [J]. Friends of Farmers' Wealth, 2016(14):126.
- [16] SU Z A, WANG L J, LIU Y H, et al. ^{137}Cs tracing of the spatial patterns in soil redistribution, organic carbon and total nitrogen in the southeastern Tibetan Plateau[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(1):86-96.
- [17] 齐永青,张信宝,贺秀斌,等.中国 ^{137}Cs 本底值区域分布研究[J].核技术,2006,29(1):42-50.
- QI Y Q, ZHANG X B, HE X B, et al. ^{137}Cs reference inventories distribution pattern in China [J]. Nuclear Techniques, 2006, 29(1):42-50.
- [18] 严平,董光荣,张信宝,等.青海共和盆地土壤风蚀的 ^{137}Cs 法研究(II): ^{137}Cs 背景值与风蚀速率测定[J].中国沙漠,2003,23(4):391-397.
- YAN P, DONG G R, ZHANG X B, et al. Application of caesium-137 technique on wind erosion in Gonghe basin, Qinghai Province (II): ^{137}Cs reference inventory and ^{137}Cs model for wind erosion estimation [J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(4):391-397.
- [19] 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: e107238.
- [20] 刘华征,贾燕锋,范昊明,等.东北松嫩典型黑土区长缓坡耕地土壤侵蚀沿坡长变化规律及其对土壤质量的影响[J].自然资源学报,2022,37(9):2292-2305.
- LIU H Z, JIA Y F, FAN H M, et al. Variation of soil erosion intensity along the long gentle farming slopes and its influence on soil quality in the typical mollisol region, Songnen Plain, northeast China [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9):2292-2305.
- [21] ZHOU S X, LI P, ZHANG Y, et al. Formation of new erosion-deposition patterns after farmland conversion: The major role of topography [J]. Catena, 2023, 231: e107349.
- [22] 赵鹏志,陈祥伟,王恩姮.黑土坡耕地有机碳及其组分累积-损耗格局对耕作侵蚀与水蚀的响应[J].应用生态学报,2017,28(11):3634-3642.
- ZHAO P Z, CHEN X W, WANG E H. Responses of accumulation-loss patterns for soil organic carbon and its fractions to tillage and water erosion in black soil area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11):3634-3642.
- [23] HAN Z, ZHONG S Q, NI J P, et al. Estimation of soil erosion to define the slope length of newly reconstructed gentle-slope lands in hilly mountainous regions [J]. Scientific Reports, 2019, 9: e4676.
- [24] 王丽娟,苏正安,周涛,等.藏东南区梯田和复合坡耕地土壤侵蚀对有机碳和全氮空间分布格局的影响[J].水土保持通报,2022,42(5):293-300.
- WANG L J, SU Z A, ZHOU T, et al. Impacts of soil erosion on spatial patterns of soil organic carbon and total nitrogen in terraced fields and complex sloping land of southeast Tibet [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5):293-300.
- [25] SU Z A, ZHANG J H, NIE X J. Effect of soil erosion on soil properties and crop yields on slopes in the Sichuan basin, China [J]. Pedosphere, 2010, 20(6):736-746.
- [26] LU J, ZHENG F L, LI G F, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the mollisol region of northeast China [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 161:79-85.
- [27] XIA R, SHI D M, NI S H, et al. Effects of soil erosion and soil amendment on soil aggregate stability in the cultivated-layer of sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 223: e105447.
- [28] SHI P, REN M X, LI P, et al. Effects of 15-year vegetation restoration on organic carbon in soil aggregates on the Loess Plateau, China [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2023, 69(3):344-357.
- [29] 刘小岚,黄金权,齐瑜洁,等.有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素:基于Meta分析[J].环境科学,2023,44(9):5125-5134.
- LIU X L, HUANG J Q, QI Y J, et al. Response of organic carbon loss to soil erosion and its drivers: A meta-analysis [J]. Environmental Science, 2023, 44(9):5125-5134.
- [30] ZHANG W C, GREGORY A S, WHALLEY W R, et al. Characteristics of soil organic matter within an erosional landscape under agriculture in northeast China: Stock, source, and thermal stability [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: e104927.