

水力侵蚀过程中土壤有机碳循环研究进展

林杰¹, 张相², 姜姜¹, 蒯杰¹, 郭赓¹, 孟苗婧¹, 李肖³

(1. 南京林业大学林学院, 南方现代林业协同创新中心, 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 江苏 南京 210037;
2. 苏州市水利设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215000; 3. 华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 水力侵蚀(水蚀)是土壤侵蚀研究的焦点和热点领域,研究水蚀作用下侵蚀与沉积过程中土壤有机碳的动态变化对于评估土壤碳的“源/汇”效应具有重要意义。笔者总结了水蚀过程中土壤碳循环的研究现状,从侵蚀过程中土壤有机碳流失的定量研究、有机碳迁移与再分配以及有机碳矿化的影响等3个方面明确了土壤水蚀过程中土壤有机碳动态,并对国内外土壤水蚀过程中的有机碳主要研究成果进行了对比分析。建议未来研究中先对水蚀过程中有机碳的破坏、搬运和沉积等全过程进行精准解析和量化,在此基础上揭示其物理、化学及生物等共同作用下碳矿化特征的响应机制,全面探究水蚀过程中土壤碳收支的动态,量化土壤侵蚀对全球土壤碳循环的贡献率。

关键词: 土壤侵蚀; 水力侵蚀; 有机碳矿化; 碳循环; 侵蚀与沉积过程

中图分类号: S714.7

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2022)06-0187-08



A review on the soil organic carbon cycling under water erosion

LIN Jie¹, ZHANG Xiang², JIANG Jiang¹, KUAI Jie¹, GUO Geng¹, MENG Miaoqing¹, LI Xiao³

(1. College of Forestry, Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Jiangsu Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. Suzhou Water Conservancy Design and Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215000, China; 3. College of Resources & Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Water erosion was the focus and hot field of soil erosion research. It was of great significance to study the dynamics of soil organic carbon during erosion and deposition under water erosion for evaluating the “source & sink” effect of soil carbon. The study summarized the research status of soil carbon cycle under water erosion, expounds the research and methods of soil carbon mineralization in the process of soil water erosion, and clarified the dynamics of soil organic carbon in the process of soil water erosion from three aspects: the quantitative research of soil organic carbon mineralization, the redistribution of organic carbon and the influence of organic carbon mineralization. The main achievements of organic carbon in the process of soil water erosion at home and abroad are compared and analyzed. It is suggested that the whole process of water erosion, such as destruction, transportation and deposition, should be accurately analyzed and quantified in future research. On this basis, the response mechanism of carbon mineralization characteristics under the combined action of physics, chemistry and biology should be revealed, and the dynamics of soil carbon budget during water erosion should be comprehensively explored to quantify the contribution of soil erosion to the global soil carbon cycle.

Keywords: soil erosion; water erosion; organic carbon mineralization; carbon cycle; erosion and deposition process

水土流失是全球普遍关注与研究的重大环境问题之一,严重制约着人类的生存和经济的发展。

联合国粮农组织调查表明,近百年来全球有价值的土壤因侵蚀和退化等原因损失面积大约 2 000

收稿日期 Received: 2022-06-13

修回日期 Accepted: 2022-07-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31870600)。

第一作者: 林杰(jielin@njfu.edu.cn), 教授, 博士。

引文格式: 林杰, 张相, 姜姜, 等. 水力侵蚀过程中土壤有机碳循环研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 187-194. LIN J, ZHANG X, JIANG J, et al. A review on the soil organic carbon cycling under water erosion[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(6): 187-194. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202206017.

万 km^2 ^[1]。全球土壤退化的面积大约占总土地面积的 15%,其中亚洲的土壤退化面积最多^[2]。中国是全世界水土流失状况最严重的国家之一,水土流失面积已达到国土总面积的 38%,每年土壤的流失量约为 50 亿 t,流失的土壤养分(氮、磷、钾等)超过人为投入生产的总量^[3]。在我国,集中、频繁的暴雨,破碎、坡度大的地形,抗蚀性弱、可蚀性强的母岩,植被覆盖度低及人为开发活动共同驱动土壤发生剧烈侵蚀,严重威胁着社会经济的发展和生态环境保护^[4]。现阶段,我国土壤侵蚀带来的危害主要体现在破坏土地资源、表土被径流冲刷流失、土壤肥力逐渐退化、原有生态环境脆弱化、土壤固持水的能力降低、水资源污染、库容淤积和河床抬高、蓄洪能力降低等方面^[5]。

土壤作为陆地生态系统碳库的载体之一,蕴藏着约 2 500 Pg 碳,包括 1 550 Pg 的有机碳(SOC)和 950 Pg 的无机碳(SIC)^[6]。其中土壤有机碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分,土壤有机碳库的微弱变化会给大气中碳的周转平衡带来较大影响^[7]。土壤有机碳库平衡收支对于陆地生态系统与大气间碳交换至关重要^[8],土壤有机碳的周转更新在全球碳循环中扮演着重要角色^[9]。同时,SOC 是改善土壤质量、提高农业经济效益及实现生态系统可持续发展的重要衡量因素^[10-11]。然而,近年来人类扰动增加、极端气候频繁发生,土壤侵蚀格局发生变化^[12]。土壤侵蚀与陆地碳循环、大气 CO_2 以及全球气候变暖也有着紧密的关系^[13],土壤侵蚀对碳平衡收支及土壤碳循环的影响一直是各国科学家探究的热点^[14]。在全球变化及“双碳”背景下,土壤碳循环中“源/汇”效应成为争论的焦点,对全球碳循环系统的正常运转也产生不可预估的影响^[15-17]。

1 水蚀的形成及其介导的土壤有机碳循环过程

水蚀是世界上分布最为广泛、造成危害最多的土壤侵蚀类型,是指表层土壤颗粒在雨滴和径流的影响下发生分散、搬运和沉积的过程^[18-19]。水蚀的发生取决于降雨强度、地形、植被和土壤母质等^[20],其中影响最大的是降雨强度。降雨强度较小时,雨滴穿过地被物滑落在表土层后被吸收渗入土壤中,不会发生地表径流;降雨强度较大时,穿透雨急速冲击表层土壤颗粒,将大颗粒分散为细小颗粒,使土壤大孔隙堵塞并隔绝水分渗入造成严重的水土流失^[21]。侵蚀过程中,径流控制着侵蚀沟道

内土壤养分格局的重新分配,这个过程受到多种因素的影响,如地形、降雨、土壤质地等因子,故侵蚀-沉积过程中的水蚀是复杂多变且具有较高的时空变异^[22]。地表径流往往从侵蚀沟道内的侵蚀区向沉积区流动,低洼的沉积区呈现出较高的土壤含水量^[23-24],Du 等^[23]和 Gao 等^[25]研究发现,沉积区各层土壤的含水量均显著高于侵蚀区,其主要原因是沉积区径流的输入、土壤细颗粒和有机质的富集使水分保持在较高水平,吸附性较强的细颗粒与有机质相结合,增加了土壤的胶体含量,提升了土壤固持水的能力。大量模拟降雨的研究发现,径流量随着坡度的增加而增大,说明坡度越陡土壤水分下渗量减小,以径流迁移的形式汇入沉积区^[26-28]。也有研究发现,当坡度达到一个阈值时,径流量会先增大后减小,其原因是土壤随之减少,使整个坡面的径流量减小^[29]。如南方丘陵红壤区看似树木十分茂密,实际林下灌木零星分布、草本稀疏单一、土壤裸露面积广,常有“远看绿油油,近看光秃秃”之说,再加上跌宕起伏的地形和高强度的持续降雨,极易使侵蚀坡面在短期内形成径流,携带大量包裹着养分的泥沙汇入侵蚀沟道内,诱发严重的水土流失。

水蚀能够加速土壤有机碳的矿化与流失,可显著影响土壤有机碳储量并改变与大气交换的 CO_2 量^[30-31]。在全球尺度的土壤侵蚀过程中,汇入大气中的 CO_2 可能是碳源,侵蚀区发生降雨过程后雨滴的溅蚀及径流的剪切力改变了土壤结构、破坏了土壤团聚体,使保护的土壤有机碳暴露出来,进而被矿化^[6, 16];泥沙迁移过程中的土壤有机碳多为活性碳组分,迁移至沉积区后,这些活性组分也容易被矿化扩散至大气^[32]。另一部分研究者则认为土壤侵蚀过程中向大气释放的 CO_2 可能是碳汇,在侵蚀区通过微生物量的再生和分解促进了新有机碳的形成,而沉积区发生迁移的泥沙将原本的泥沙埋藏起来,使 SOC 被物理保护^[33-34]。关于土壤侵蚀究竟是净碳汇还是净碳源,尚未达成共识^[35-40],其瓶颈问题在于不同尺度的侵蚀过程对土壤有机碳去向和稳定性影响机理的差异尚不明晰。土壤侵蚀过程中的碳“源/汇”主要取决于影响 SOC 动态变化的众多因素,因此应该更多关注碳平衡及准确量化。

2 水蚀影响土壤有机碳流失的定量分析

一直以来,土壤侵蚀在全球碳循环过程中扮演着十分重要的角色,然而关于侵蚀过程中量化土壤

碳的研究目前还比较缺乏^[41]。Cui 等^[42]研究发现,在水蚀迁移过程中的 SOC 矿化量是水蚀过程的一小部分。但在小流域侵蚀过程中,仅有小部分泥沙会随径流迁移汇入河流,造成 SOC 损失;而大部分则在侵蚀坡面的各坡位间发生侵蚀、沉积和再沉积过程,在凹洼地形的坡面更为明显^[43]。值得关注的是,泥沙作为 SOC 发生迁移的重要载体,溶于水损失的 SOC 含量微乎其微^[44]。现阶段关于估算土壤侵蚀过程中造成 SOC 损失或消耗量的疑难点主要集中在:①随径流迁移过程中的原位沉积作用;②迁移过程中土壤团聚体的破碎作用;③运移到沉积区的富集作用等造成的 SOC 损失^[45]。Lal^[11]研究发现,土壤侵蚀过程中坡下的侵蚀模式会随时间发生变异,随着侵蚀的进一步发展,初期随迁移埋藏在沉积区会转变为侵蚀区, SOC 同样会发生损失。方华军等^[46-47]也发现 SOC 存在着复杂的空间变异。此外,侵蚀过程中侵蚀部位的原位沉积、埋藏顺序及团聚体的重新团聚均能影响 SOC 的矿化^[13]。

在小流域中,假设 SOC 不会随泥沙流出小流域,则 SOC 储存变化量(Δ_{SOC})的计算公式为:

$$\Delta_{\text{SOC}} = \sum_{i=1}^n (C_i - C_0) \times S_i \times H_i \times (\rho_{\text{BD}_i} - \rho_{\text{BD}_0}) \quad (1)$$

式中: C_0 是初始土壤有机碳含量, g/kg; C_i 是运移后土壤有机碳含量, g/kg; S_i 是第 i 处坡位的面积, m^2 ; H_i 是土壤厚度; ρ_{BD_i} 是第 i 处坡位的土壤容重, g/cm^3 ; ρ_{BD_0} 为初始土壤容重, g/cm^3 , i 是坡位; t 是时间。

由于持续不断的水力侵蚀,侵蚀区的表层土壤随径流泥沙迁移汇集形成了沉积区表土,侵蚀区表土则为深层土壤经过侵蚀暴露形成,而由侵蚀造成的土壤碳迁移并在沉积区不断被埋藏,最后表现为沉积区深层土壤的 SOC 含量高于表层土壤。因此,由水蚀造成的 SOC 变化不能忽略沉积区的埋藏作用^[48],故计算公式可调整为:

$$\Delta_{\text{SOC}} = \Delta_{\text{SOC}_E} + \Delta_{\text{SOC}_D} + \Delta_{\text{SOC}_A}; \quad (2)$$

$$\Delta_{\text{SOC}_A} = C_i \times S_i \times H_i \times \rho_{\text{BD}_i} \times 10 \quad (3)$$

式中: Δ_{SOC} 为沉积区埋藏作用的有机碳变化量, kg; Δ_{SOC_E} 是侵蚀区的土壤有机碳变化量, kg; Δ_{SOC_D} 是沉积区原始土层的土壤有机碳变化量, kg; Δ_{SOC_A} 是沉积区累积的土壤有机碳变化量, kg; ρ_{BD_i} 是运移后的土壤容重, g/cm^3 ; 10 是校正系数。

目前,大部分研究可以通过核素示踪法^[49]或飞灰标记法^[50]来计算埋藏在沉积区的 SOC。随着水蚀的持续发生,沉积区的 SOC 分布表现为随土

层变浅而降低,在中层土壤中则表现出随土层的增加而增加并至峰值(埋藏土壤和原始土壤的分界面),之后随土层的增加而降低。因此,未来在计算小流域土壤碳去向时更应该关注埋藏在沉积区的 SOC 顺序。

3 水蚀过程中土壤有机碳的迁移与再分配

近百年来,坡面土壤水力侵蚀机理研究已经取得了显著的进展。土壤侵蚀可分为分离、迁移、再分布及沉积阶段,除分离阶段外,其他 3 个阶段在侵蚀过程中互相影响相互制约^[32]。SOC 作为土壤的重要组成部分之一,是由土壤中动物、植物和微生物等相互作用共同形成的有机物质(腐殖质和非腐殖质), SOC 是有机质组成的核心部分^[51],在水蚀作用下主要以被泥沙包裹的结合态有机碳和随径流迁移的溶解态有机碳的形式发生损失^[52],泥沙中包裹的 SOC 迁移在不同侵蚀条件和侵蚀阶段存在差异,土壤中 SOC 含量的增加和 SOC 流失量的减少都能改善土壤环境,降低土壤侵蚀速率,提高土壤肥力和延缓土壤退化。SOC 受侵蚀影响的动态变化已经成为业界共同关注的热点话题^[53]。

径流和泥沙作为水蚀过程中 SOC 损失的动力和载体,是土壤碳发生时空变异分布的主要影响因素之一。有学者研究发现,水蚀过程中 SOC 的损失与径流泥沙流失量呈比例变化,随泥沙迁移损失的 SOC 含量约等于总 SOC 的损失量^[54]。在侵蚀轻微的土壤中,随泥沙迁移损失的 SOC 多以可溶性 SOC 为主,主要取决于 SOC 活性和含量,而 SOC 活性越高土壤越稳定,这也证实了抗蚀性较强的土壤中 SOC 的活性和含量较高。相反,在侵蚀严重的土壤中, SOC 多包裹在泥沙中随径流损失,其含量和活性也较低。Lal^[55]研究发现, SOC 的迁移伴随着侵蚀的全过程,迁移的方式主要包括横向(随径流迁移)和纵向(SOC 矿化、沉积、淋溶等)。在侵蚀过程中,土壤结构和降雨强度对 SOC 迁移损失的影响较大,团聚体作为稳定的土壤结构单元,当发生侵蚀的降雨时,粒径 $>0.25 \text{ mm}$ 土壤团聚体在雨滴的冲击下破碎为粒径 $<0.25 \text{ mm}$ 的小团聚体,与之相邻的 SOC 显露出来并随径流发生迁移^[56]; Wang 等^[57]研究发现,降雨强度直接关乎 SOC 的含量,降雨强度较高时,沉积物中小团聚体粗颗粒的 SOC 含量较高;反之,沉积物中小团聚体细颗粒的 SOC 含量较低。径流迁移过程中,大部分 SOC 随泥沙汇集在地势较低的凹洼处,少部分继续迁移,最后汇入河流生态系统中或聚集在更远

的沉积区^[58]。

SOC 在水蚀作用下发生迁移,导致 SOC 会在侵蚀坡面及土壤剖面重新分配。发生水蚀时,溶于水中的 SOC 经过土壤淋溶作用会向更深层次的土壤纵向沉积^[59]。土壤侵蚀是决定 SOC 重新分配的重要因素,水蚀后有机碳长期和短期的再分配过程也有差异。发生长期侵蚀后,侵蚀区土壤含量减少,沉积区汇集了大量侵蚀土壤,大量携带 SOC 的泥沙汇聚于沉积区,使得沉积部位的 SOC 含量高于侵蚀部位,导致沉积区的 SOC 被埋藏^[60],改变了原有的 SOC 分布格局。在对侵蚀坡面的研究中,有学者利用¹³⁷Cs 示踪研究长期水蚀作用下 SOC 再分配的规律,结果显示,坡上处的侵蚀最为严重,坡顶和坡中表现微弱,而坡下和坡脚呈现沉积汇聚^[61];此外,¹³⁷Cs 在不同坡位土层中的含量也不同,说明在侵蚀-沉积过程中,SOC 同时发生水平分配和垂直分配。也有研究利用⁷Be 研究发现,在短期极端的侵蚀阶段,侵蚀-沉积过程中 SOC 的分配与长期侵蚀阶段的情况存在差异,短期极端条件下土壤侵蚀量更大,坡中以上发生侵蚀,坡中以下表现为沉积^[59, 62]。

4 水蚀作用下土壤有机碳的矿化及干扰因素

SOC 矿化是指在微生物作用下土壤中的 SOC 转化为 CO₂释放到大气过程^[63]。SOC 矿化过程贯穿于整个侵蚀过程,而释放的气体很难返回土壤,所以对大气中的碳浓度产生实质性的影响。目前,关于土壤侵蚀过程中土壤碳“源/汇”效应仍存在较大争议。

在水蚀过程中,造成 SOC 加速矿化的可能原因有:①表层土壤发生击溅侵蚀后,使原始土壤团聚体的内部空间发生紧缩,从而使包裹在团聚体中的 SOC 破碎且暴露于空气当中;②随径流泥沙迁移过程携带了富碳颗粒;③植物根系通过输入新碳产生的激发效应;④土壤中真菌数量降低,特别是细菌比率的失衡等。在土壤泥沙随径流迁移过程中,包裹在其中的团聚体崩解、水热因子变动和净初级生产力增加通过改变底物 SOC 含量,以及改善自养细菌微生物生物量等,这些因素均增加了土壤碳矿化的风险^[64]。而在泥沙沉积过程中,沉积区富集的活性 SOC 增加了可矿化碳库量,较高的酶活性增加了微生物的活性和底物的利用率^[65],这些进一步加速了土壤碳矿化的发生。

土壤侵蚀通常是一个非常复杂而且活跃的过

程,影响 SOC 矿化的因素更是复杂多变,内因主要有土壤水热因子、氮素含量和 SOC 含量等,外因有植物因子和微生物群落等^[66]。有研究发现,SOC 的矿化过程受到土壤侵蚀和地形等因子的影响^[67-68]。在不同侵蚀坡位中,水热因子、凋落物的分布和微生物的数量等的空间差异会直接影响 SOC 矿化的速率^[69],而坡面侵蚀过程中的地形因子能够改变侵蚀与沉积区的水热条件,则会导致 SOC 矿化发生空间变异^[70]。在侵蚀与沉积过程中,土壤水分对 SOC 的矿化存在阈值,当水分适宜时,SOC 矿化与土壤温度呈现显著的正相关关系;当水分不足或超过阈值时,SOC 的矿化会受到抑制^[71]。土壤温度对 SOC 矿化的影响与土壤水分相似^[72-74],高温通过抑制微生物活性降低 SOC 矿化,在特定的温度范围内,SOC 矿化与温度呈现正相关关系。在野外环境中,各个侵蚀坡位土壤的水热条件存在不确定性并受到众多因素的调控,如降雨量、微地形及季节动态等^[75]。目前,关于土壤碳动态的大部分研究主要聚焦于控制土壤水热因子的室内矿化试验或结合野外土壤呼吸的动态监测试验^[76-78],通过控制单一因素分析 SOC 的矿化影响,进一步探究其影响机制。团聚体作为土壤的基本结构单元和有机碳的载体,其形成机制与土壤结构稳定性及有机碳储存密切相关,在土壤侵蚀中起着重要的作用,并能够将有机碳与分解者隔离开来,营造出不易被分解的环境。现阶段有关团聚体有机碳矿化的规律研究相对较少,未来应该深入研究各径级土壤团聚体有机碳在不同条件下对 SOC 矿化动态的影响。

5 水蚀过程中土壤有机碳循环研究的关键问题

土壤侵蚀在陆地生态系统的碳循环过程中“源/汇”效应的争议从未间断过,造成这一长期争议的瓶颈问题在于缺乏系统性探究水蚀过程中多尺度效应及侵蚀对土壤碳库动态的不确定性。由于陆地生态系统自身的复杂性及时空异质性,水蚀过程存在明显的尺度依赖性^[79],不同尺度水蚀表现出的特点差异明显,因此更应该从系统化的角度研究水蚀过程中坡面、流域、区域和全球等多种尺度下的碳循环特征。Van Oost 等^[80]认为,碳源汇的争议主要原因之一是缺乏对土壤侵蚀这一复杂过程中碳收支的系统性评估。通过前人的研究发现,水蚀作用下的碳动态争议还与侵蚀-沉积过程中有机碳矿化的不确定性、研究方法及响应机制不

明确等因素有关。

5.1 侵蚀-沉积过程中的碳收支估算

侵蚀-沉积过程中的碳收支估算存在不确定性,了解土壤侵蚀各阶段(破坏、搬运和沉积)的碳动态对于准确评估全球气候变化至关重要,在侵蚀迁移过程中,不稳定土壤有机碳的去向在很大程度上是未知的,尤其是在侵蚀-沉积过程中全球碳循环的贡献方面,更需要考虑侵蚀迁移过程对土壤有机碳稳定性的交互影响。目前,对土壤侵蚀迁移阶段土壤有机碳的稳定性研究较少,在讨论土壤侵蚀对全球碳循环的贡献时大多被忽视,为了准确地评估侵蚀过程与大气之间的碳收支情况,亟须进一步了解和量化土壤侵蚀各阶段所发生的所有过程。全球自然系统处在不间断的更新与演替中,其碳矿化途径也极为复杂,现阶段全球、区域、小流域以及小尺度中有关碳收支的定量估算多聚集在基于“黑箱理论”的估算方法上^[81],通常情况下,对于特定尺度上的碳收支研究往往只关注侵蚀-沉积过程中的输入和输出,而对于此过程的土壤碳纵向矿化和淋溶作用因难以量化而被忽略,用“黑箱理论”来评估土壤碳收支的方法自身也存在一定的缺陷和未知性,因此会造成在土壤侵蚀过程中碳“源/汇”效应不平衡的结果。土壤侵蚀本就是一个复杂多变的过程,涉及多种因素及各因素间的交互影响,对于全球碳收支平衡的评估,理论上必须考虑各个侵蚀阶段和不同尺度,同时借助综合性强的系统模型将土壤侵蚀的各环境因素与定量估算融合在一起,才能准确、有效地评估土壤侵蚀中不同阶段和各个尺度上土壤碳收支的动态变化。

5.2 侵蚀-沉积过程中有机碳矿化的定量化

土壤侵蚀在全球碳循环过程中扮演着重要的角色,主要原因是在侵蚀-沉积过程中土壤碳的矿化机制尚未被充分认知,以至于侵蚀作用下碳矿化的流失量不能够被全面而准确地量化。现阶段侵蚀-沉积过程中有机碳矿化的动向主要表现为3个方面:①土壤侵蚀发生后,土壤中到底有多少碳是由于矿化作用而造成的损失;②侵蚀过程中原位土壤的碳矿化存在哪些机制作用;③在侵蚀迁移过程中,驻留在坡面上的有机碳和富集在沉积区有机碳的矿化作用表现如何。作为土壤碳库收支的主要通道,这些过程对于土壤碳矿化的定量评估扮演着十分重要的角色,同时是土壤碳收支不可忽视的过程。由于这些过程本身具有复杂性和随机性,一直以来并没有系统化地提出新方法来解决侵蚀-沉积过程中碳矿化的定量评估。单一研究土壤有机碳

库的动态变化会使土壤碳收支不平衡、不可靠,若要准确、全面地定量研究侵蚀-沉积过程中的有机碳矿化流失量,应该综合考虑土壤有机碳矿化的影响因素及各因素间的交互影响,将与影响土壤矿化的生物因素联动在一起,结合多重因素建立合适的模型来量化土壤有机碳的矿化量,才能客观地解释侵蚀-沉积过程中土壤有机碳矿化的机制,为全球土壤碳矿化的准确评估奠定科学依据。

5.3 水蚀过程中微生物对土壤有机碳循环的响应机制

土壤中有机碳矿化流失是多因素共同作用的结果,但微生物作为主要参与者与土壤侵蚀碳循环过程中的响应机制尚不明确。土壤侵蚀是动态迁移的过程,能够加速土壤微生物的运移,随机分配微生物的数量和种类,通过改变土壤质地、水热条件及土壤养分使土壤微生物空间分布格局发生变化。现阶段大多数研究主要集中在长期侵蚀作用下典型的坡地区域上的侵蚀与沉积区的土壤微生物种类、生物量的差异性方面,而对于短期内的降雨或次降雨侵蚀使土壤微生物动态变化的响应机制的研究比较薄弱。实际上,降雨侵蚀是间歇性发生,而非持续不断,因此这种间歇性降雨侵蚀过程中的土壤微生物动态变化对土壤碳循环的影响应该得到关注。目前,关于土壤微生物和土壤侵蚀对土壤有机碳矿化响应机制尚不明确,但作为侵蚀作用下土壤碳矿化规律的基础,未来更应该全面、深入地探究。

从整体上来,目前土壤水力侵蚀对土壤碳循环影响的研究看已经取得了实质性进展,尤其是对于水蚀作用下土壤有机碳矿化的运移和量化过程已有较为深入的认识。然而从全球碳收支平衡的定量评估来看,土壤侵蚀过程中的碳“源/汇”效应仍然是一个具有争议的话题。水蚀过程对土壤有机碳矿化的影响主要表现为前期土壤碳的干燥、湿润及破碎激发效应,运移过程中的选择性迁移、原位富集和矿化,土壤微生物在土壤侵蚀过程中扮演着协调与促进的重要角色,土壤碳矿化的影响因素也会干扰微生物的生存与生长。对于土壤侵蚀过程中土壤碳矿化的研究大多数采用室内土壤矿化模拟试验,通过控制不同的温度和含水量,控制相同水热条件探究有机碳含量对其矿化的影响,或者通过室内培养与野外呼吸监测相结合探究土壤有机碳矿化的影响机制,这些研究试验很少探究微生物对其的影响。因此,未来应先对水力侵蚀的破坏、搬运和沉积等全过程进行精准解析和量化,在此基

础上,揭示物理、化学及生物等方面共同作用下碳矿化特征的响应机制,全面探究水蚀过程中土壤碳收支的动态,量化土壤侵蚀对全球土壤碳循环的贡献率。

参考文献(reference):

- [1] 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. DOI: 10.1016/j.catena.2018.05.005.
- [2] LAL R. Soil degradation by erosion[J]. Land Degrad Dev, 2001, 12(6): 519–539. DOI: 10.1002/ldr.472.
- [3] 史志华, 杨洁, 李忠武, 等. 南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 6–9. SHI Z H, YANG J, LI Z W, et al. Soil conservation in the hilly red soil region of southern China[J]. J Soil and Water Conserv, 2018, 32(1): 6–9. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.01.002.
- [4] 聂小东. 水力侵蚀对红壤丘陵区土壤有机碳迁移分布及稳定机制的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2017. NIE X D. Effects of water erosion on the mechanisms of soil organic carbon migration, redistribution and stability in the red soil hilly region[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [5] 史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1117–1127. SHI Z H, LIU Q J, ZHANG H Y, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: progress and prospects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1117–1127. DOI: 10.11766/trxb202002240070.
- [6] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623–1627. DOI: 10.1126/science.1097396.
- [7] XIAO H B, LI Z W, CHANG X F, et al. The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion[J]. Geoderma, 2018, 329: 73–81. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.05.018.
- [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. DOI: 10.1641/B570408.
- [9] VAN OOST K, QUINE T A, GOVERS G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. Science, 2007, 318(5850): 626–629. DOI: 10.1126/science.1145724.
- [10] FOUCHÉ J, KELLER C, ALLARD M, et al. Diurnal evolution of the temperature sensitivity of CO₂ efflux in permafrost soils under control and warm conditions[J]. Sci Total Environ, 2017, 581/582: 161–173. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.089.
- [11] LAL R. Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems[J]. Food Policy, 2011, 36: S33–S39. DOI: 10.1016/j.foodpol.2010.12.001.
- [12] COX P M, BETTS R A, JONES C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model[J]. Nature, 2000, 408(6809): 184–187. DOI: 10.1038/35041539.
- [13] DE NIJS E A, CAMMERAAT E L H. The stability and fate of soil organic carbon during the transport phase of soil erosion[J]. Earth Sci Rev, 2020, 201: 103067. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.103067.
- [14] MELILLO J M, STEUDLER P A, ABER J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. Science, 2002, 298(5601): 2173–2176. DOI: 10.1126/science.1074153.
- [15] GUO G, LI X, ZHU X, et al. Effect of forest management operations on aggregate-associated SOC dynamics using a ¹³⁷Cs tracing method[J]. Forests, 2021, 12(7): 859. DOI: 10.3390/f12070859.
- [16] LAL R, PIMENTEL D. Soil erosion: a carbon sink or source?[J]. Science, 2008, 319(5866): 1040. DOI: 10.1126/science.319.5866.1040.
- [17] HARDEN J W, BERHE A A, TORN M, et al. Soil erosion: data say C sink[J]. Science, 2008, 320(5873): 178–179. DOI: 10.1126/science.320.5873.178.
- [18] LAL R. Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO₂[J]. Soil Tillage Res, 2019, 188: 35–40. DOI: 10.1016/j.still.2018.02.001.
- [19] SHI P, VAN OOST K, SCHULIN R. Dynamics of soil fragment size distribution under successive rainfalls and its implication to size-selective sediment transport and deposition[J]. Geoderma, 2017, 308: 104–111. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.08.038.
- [20] MONTGOMERY D R. Soil erosion and agricultural sustainability[J]. Proc Nat Acad Sci USA, 2007, 104(33): 13268–13272. DOI: 10.1073/pnas.0611508104.
- [21] 田培, 仇浩然, 冯宇, 等. 雨强和坡度对红壤坡面产流产沙及侵蚀动力过程影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 1–8. TIAN P, QIU H R, FENG Y, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment production and erosion dynamic process on red soil slope[J]. Res Soil Water Conserv, 2020, 27(6): 1–8. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20200611.001.
- [22] 徐振剑, 权鑫, 史红伟, 等. 黄土坡面侵蚀过程与侵蚀-沉积空间分布特征[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 98–105. XU Z J, QUAN X, SHI H W, et al. Erosion process and spatial distribution characteristics of erosion-deposition on the loess slope[J]. J Shaanxi Norm Univ (Nat Sci Ed), 2021, 49(6): 98–105. DOI: 10.15983/j.cnki.jsnu.2021.04.022.
- [23] DU L L, WANG R, GAO X, et al. Divergent responses of soil bacterial communities in erosion-deposition plots on the Loess Plateau[J]. Geoderma, 2020, 358: 113995. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113995.
- [24] LI Z W, XIAO H B, TANG Z H, et al. Microbial responses to erosion-induced soil physico-chemical property changes in the hilly red soil region of southern China[J]. Eur J Soil Biol, 2015, 71: 37–44. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2015.10.003.
- [25] GAO X D, WU P T, ZHAO X N, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2011, 87(3): 357–367. DOI: 10.1016/j.catena.2011.07.004.
- [26] 甘艺贤, 戴全厚, 伏文兵, 等. 基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2754–2760. GAN Y X, DAI Q H, FU W B, et al. Characteristics of soil erosion on Karst slopes under artificial rainfall experiment conditions[J]. Chin J Appl Ecol, 2016, 27(9): 2754–2760. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201609.025.
- [27] 徐向舟, 刘大庆, 张红武, 等. 室内人工模拟降雨试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 52–58. XU X Z, LIU D Q, ZHANG H W, et al. Laboratory rainfall simulation with controlled rainfall intensity and drainage[J]. J Beijing For Univ, 2006, 28(5): 52–58. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1522.2006.05.009.
- [28] 陈洪松, 邵明安, 张兴昌, 等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 5–8. CHEN H S, SHAO M A, ZHANG X C, et al. Field experiment on hillslope rainfall infiltration and runoff under simulated rainfall conditions[J]. J Soil Water Conserv, 2005, 19(2): 5–8. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2005.02.002.
- [29] EL KATEB H, ZHANG H F, ZHANG P C, et al. Soil erosion and

- surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: a field experiment in southern Shaanxi Province, China[J]. *CATE-NA*, 2013, 105: 1–10. DOI: 10.1016/j.catena.2012.12.012.
- [30] WANG X, YOO K, MUDD S M, et al. Storage and export of soil carbon and mineral surface area along an erosional gradient in the Sierra Nevada, California[J]. *Geoderma*, 2018, 321: 151–163. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.02.008.
- [31] YUE Y, NI J R, CIAIS P, et al. Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO₂ flux induced by water erosion in China[J]. *PNAS*, 2016, 113 (24): 6617 – 6622. DOI: 10.1073/pnas.1523358113.
- [32] LAL R, GRIFFIN M, APT J, et al. Managing soil carbon[J]. *Science*, 2004, 304 (5669): 393. DOI: 10.1126/science.1093079.
- [33] SMITH S V, RENWICK W H, BUDDEMEIER R W, et al. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2001, 15 (3): 697 – 707. DOI: 10.1029/2000gb001341.
- [34] LIU S G, BLISS N, SUNDQUIST E, et al. Modeling carbon dynamics in vegetation and soil under the impact of soil erosion and deposition[J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 2003, 17: 1017. DOI: 10.1029/2002GB002010.
- [35] QIU L P, ZHU H S, LIU J, et al. Soil erosion significantly reduces organic carbon and nitrogen mineralization in a simulated experiment[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2021, 307: 107232. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107232.
- [36] THALER E A, LARSEN I J, YU Q. The extent of soil loss across the US Corn Belt[J]. *Proc Nat Acad Sci USA*, 2021, 118 (8): e1922375118. DOI: 10.1073/pnas.1922375118.
- [37] DOETTERL S, BERHE A A, NADEU E, et al. Erosion, deposition and soil carbon: a review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes[J]. *Earth Sci Rev*, 2016, 154: 102–122. DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.12.005.
- [38] HARDEN J W, BERHE A A, TORN M, et al. Soil erosion: data say C sink[J]. *Science*, 2008, 320 (5873): 178–179. DOI: 10.1126/science.320.5873.178.
- [39] LAL R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. *Environ Int*, 2003, 29 (4): 437–450. DOI: 10.1016/S0160-4120(02)00192-7.
- [40] STALLARD R F. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1998, 12 (2): 231 – 257. DOI: 10.1029/98gb00741.
- [41] AN J, LIU Q J. Soil aggregate breakdown in response to wetting rate during the inter-rill and rill stages of erosion in a contour ridge system[J]. *Catena*, 2017, 157: 241–249. DOI: 10.1016/j.catena.2017.05.027.
- [42] 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: 106218. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106218.
- [43] 杨维鸽, 郑粉莉, 王占礼, 等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀-沉积空间分布特征的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (3): 572–581. YANG W G, ZHENG F L, WANG Z L, et al. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region[J]. *Acta Pedol Sin*, 2016, 53 (3): 572–581. DOI: 10.11766/trxb201508240314.
- [44] VAN OOST K, GOVERS G, VAN MUYSEN W. A process-based conversion model for caesium-137 derived erosion rates on agricultural land: an integrated spatial approach[J]. *Earth Surf Process Landforms*, 2003, 28 (2): 187–207. DOI: 10.1002/esp.446.
- [45] VAN OOST K, BEUSELINCK L, HAIRSINE P B, et al. Spatial evaluation of a multi-class sediment transport and deposition model[J]. *Earth Surf Process Landforms*, 2004, 29 (8): 1027–1044. DOI: 10.1002/esp.1089.
- [46] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 土壤侵蚀对农田中土壤有机碳的影响[J]. *地理科学进展*, 2004, 23 (2): 77–87. FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Effect of soil erosion on soil organic carbon in cropland landscape[J]. *Prog Geogr*, 2004, 23 (2): 77–87.
- [47] 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 Pedol Sin*, 2007, 44 (3): 467–474. DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2007.03.013.
- [48] 方海燕, 吴丹瑞. 黑土区农田防护林带对小流域土壤侵蚀和泥沙沉积的影响[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 46 (1): 104–110. FANG H Y, WU D R. Impact of agricultural shelterbelt on soil erosion and sediment deposition at catchment scale in the black soil region, northeastern China[J]. *J Shaanxi Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 46 (1): 104–110. DOI: 10.15983/j.cnki.jsnu.2018.01.412.
- [49] 魏守才. 水土流失对黑土坡耕地土壤有机碳的影响[D]. 哈尔滨: 中国科学院研究生院东北地理与农业生态研究所, 2015. WEI S C. Effect of soil erosion on soil organic carbon on sloping field of black soil area in northeast China[D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [50] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地土壤有机碳再分布特征及其迁移累积平衡[J]. *核农学报*, 2005, 19 (3): 202–207. FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Soil organic carbon redistribution and budget of erosion and deposition in a sloping field[J]. *Acta Agric Nucleatae Sin*, 2005, 19 (3): 202–207. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8551.2005.03.010.
- [51] 周咪, 肖海兵, 聂小东, 等. 近 30 年国内外土壤有机碳研究进程解析与展望[J]. *水土保持研究*, 2020, 27 (3): 391–400. ZHOU M, XIAO H B, NIE X D, et al. Analysis and prospect of soil organic carbon research process in recent 30 years at home and abroad[J]. *Res Soil Water Conserv*, 2020, 27 (3): 391–400. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.03.056.
- [52] 陈磊, 李占斌, 李鹏, 等. 野外模拟降雨条件下水土流失与养分流失耦合研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19 (S1): 170–176. CHEN L, LI Z B, LI P, et al. The coupling effect on soil erosion and nutrient lost under a simulated rainfall[J]. *J Basic Sci Eng*, 2011, 19 (S1): 170–176.
- [53] 张相, 李肖, 林杰, 等. 南方红壤丘陵区侵蚀沟道内土壤团聚体及有机碳特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36 (19): 115–123. ZHANG X, LI X, LIN J, et al. Characteristics of soil aggregates and organic carbon in eroded gully in red soil region of Southern China[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2020, 36 (19): 115–123.
- [54] 袁东海, 王兆骞, 郭新波, 等. 红壤小流域不同利用方式水土流失和有机碳流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16 (2): 24–28. YUAN D H, WANG Z Q, GUO X B, et al. Properties of soil and water loss and organic carbon loss from small watershed under different land use patterns in red soil area[J]. *J Soil Water Conserv*, 2002, 16 (2): 24–28. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxc.2002.02.007.
- [55] LAL R. Soil erosion and carbon dynamics[J]. *Soil Tillage Res*, 2005, 81 (2): 137–142. DOI: 10.1016/j.still.2004.09.002.
- [56] SIX J, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T, et al. Soil structure and organic matter I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64 (2): 681–689.

- DOI:10.2136/sssaj2000.642681x.
- [57] WANG Y X, FANG N F, ZHANG F B, et al. Effects of erosion on the microaggregate organic carbon dynamics in a small catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Soil Tillage Res*, 2017, 174: 205–213. DOI: 10.1016/j.still.2017.08.001.
- [58] STALLARD R F. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1998, 12(2): 231–257. DOI: 10.1029/98gb00741.
- [59] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 2847–2854. FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Spatial distribution of particulate organic carbon and aggregate associated carbon in topsoil of a sloping farmland in the black soil region, northeast China[J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(9): 2847–2854.
- [60] DE ALBA S, LINDSTROM M, SCHUMACHER T E, et al. Soil landscape evolution due to soil redistribution by tillage: a new conceptual model of soil catena evolution in agricultural landscapes[J]. *CATENA*, 2004, 58(1): 77–100. DOI: 10.1016/j.catena.2003.12.004.
- [61] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 利用¹³⁷Cs 技术研究黑土坡耕地土壤再分布特征[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 464–468. FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Redistribution patterns of black soil in hillslope landform of northeast China: a ¹³⁷Cs study[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(3): 464–468.
- [62] SEPULVEDA A, SCHULLER P, WALLING D E, et al. Use of ⁷Be to document soil erosion associated with a short period of extreme rainfall[J]. *J Environ Radioact*, 2008, 99(1): 35–49. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.06.010.
- [63] 陈晓芬, 刘明, 江春玉, 等. 不同施肥处理红壤性水稻土团聚体有机碳矿化特征[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(17): 3325–3334. CHEN X F, LIU M, JIANG C Y, et al. Organic carbon mineralization in aggregate fractions of red paddy soil under different fertilization treatments[J]. *Sci Agric Sin*, 2018, 51(17): 3325–3334.
- [64] 胡亚鲜, KUHN N J. 利用土壤颗粒的沉降粒级研究泥沙的迁移与分布规律[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1115–1124. HU Y X, KUHN N J. Using settling velocity to investigate the patterns of sediment transport and deposition[J]. *Acta Pedol Sin*, 2017, 54(5): 1115–1124. DOI: 10.11766/trxb201703100056.
- [65] XIAO H, LIU G, ZHANG Q, et al. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess Plateau of China[J]. *Soil Tillage Res*, 2018, 178: 150–158. DOI: 10.1016/j.still.2017.12.026.
- [66] NIE X D, LI Z W, HUANG J Q, et al. Thermal stability of organic carbon in soil aggregates as affected by soil erosion and deposition[J]. *Soil Tillage Res*, 2018, 175: 82–90. DOI: 10.1016/j.still.2017.08.010.
- [67] 李志刚, 侯扶江. 黄土高原不同地形封育草地的土壤呼吸日动态与影响因子分析[J]. *草业学报*, 2010, 19(1): 42–49. LI Z G, HOU F J. Analysis of soil respiration diurnal dynamics and factors influencing it in enclosed natural grasslands under different topographies in the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sin*, 2010, 19(1): 42–49. DOI: 10.11686/cyxb20100107.
- [68] 周焱, 徐宪根, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳矿化速率的比较[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(11): 1901–1907. ZHOU Y, XU X G, RUAN H H, et al. Mineralization rates of soil organic carbon along an elevation gradient in Wuyi Mountain of southeast China[J]. *Chin J Ecol*, 2008, 27(11): 1901–1907.
- [69] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 355–362. XU G X, WANG Z F, GAO M, et al. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. *Environ Sci*, 2018, 39(1): 355–362. DOI: 10.13227/j.hjxx.201705217.
- [70] YU H Q, LI Y, OSHUNSANYA S O, et al. Re-introduction of light grazing reduces soil erosion and soil respiration in a converted grassland on the Loess Plateau, China[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2019, 280: 43–52. DOI: 10.1016/j.agee.2019.04.020.
- [71] 杜兰兰. 侵蚀和沉积部位土壤呼吸变化特征及其影响因素[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. DU L L. Investigation the variation of soil respiration and its influencing factors from eroding and depositional sites[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [72] 覃乾. 黄土丘陵区侵蚀坡面土壤有机碳稳定性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019. QIN Q. Soil organic carbon stability on eroded slope land in the hilly loess plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [73] 刘娇. 降雨侵蚀对土壤团聚体稳定性及碳氮矿化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. LIU J. Effects of rainfall erosion on stability of soil aggregate and mineralization of organic carbon nad nitrogen[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [74] 李如剑. 土壤呼吸对侵蚀响应的模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. LI R J. Responses of soil respiration to soil erosion under simulation experiment[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [75] 张亚锋, 许明祥, 陈盖, 等. 黄土丘陵区水蚀坡面土壤有机碳矿化动态模拟[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(4): 9–17. ZHANG Y F, XU M X, CHEN G, et al. Modelling the dynamics of soil organic carbon mineralization on water-eroded sloping land in the loess hilly region[J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2016, 14(4): 9–17. DOI: 10.16843/j.sswc.2016.04.002.
- [76] YIN S, BAI J H, WANG W, et al. Effects of soil moisture on carbon mineralization in floodplain wetlands with different flooding frequencies[J]. *J Hydrol*, 2019, 574: 1074–1084. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.007.
- [77] HU Y X, KUHN N J. Erosion-induced exposure of SOC to mineralization in aggregated sediment[J]. *CATENA*, 2016, 137: 517–525. DOI: 10.1016/j.catena.2015.10.024.
- [78] LI X J, XIE J S, ZHANG Q F, et al. Substrate availability and soil microbes drive temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization to warming along an elevation gradient in subtropical Asia[J]. *Geoderma*, 2020, 364: 114198. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114198.
- [79] 史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 1–10. SHI Z H, SONG C Q. Water erosion processes: a historical review[J]. *J Soil Water Conserv*, 2016, 30(5): 1–10. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.05.001.
- [80] VAN OOST K, QUINE T A, GOVERS G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. *Science*, 2007, 318(5850): 626–629. DOI: 10.1126/science.1145724.
- [81] 黄金权, 程冬兵, 王志刚, 等. 水力侵蚀作用下土壤有机碳动态研究进展[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(12): 27–32. HUANG J Q, CHENG D B, WANG Z G, et al. Advances in dynamics of soil organic carbon affected by water erosion[J]. *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2016, 33(12): 27–32. DOI: 10.11988/ckyyb.20160337.

(责任编辑 郑琰琰)