

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.014.

周也琛, 邵明安, 魏孝荣, 等. 黄土高原土壤有机碳库对植被恢复的响应及其影响因素研究进展[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 395-405.

Zhou Yechen, Shao Mingan, Wei Xiaorong, et al. Response of Soil Organic Carbon Pool to Vegetation Restoration and Its Influencing Factors in Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 395-405.

黄土高原土壤有机碳库对植被恢复的 响应及其影响因素研究进展

周也琛¹, 邵明安^{2,3,4}, 魏孝荣^{4,5}, 陈明玉¹, 李同川^{4,5}

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3.中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100190; 4.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]揭示土壤碳库对植被恢复的响应特征和机理,为我国“生态系统碳中和”提供科学指导,助力实现国家“碳达峰、碳中和”目标。[方法]基于国内外有关黄土高原植被恢复固碳效应的文章,对土壤碳库地区差异、碳储量驱动因素、植被固碳机制进行了归纳分析。[结果](1) 土壤碳储量的主要影响因素包括植被特征(恢复年限、凋落物输入和根系分泌物)、气候变化(降水和温度)、土壤性质(土壤生物和土壤氮输入)等。(2) 黄土高原植被固碳效应存在明显的地区差异,植被恢复模式对土壤碳库具有重要影响。(3) 植被恢复通过改变土壤侵蚀过程对土壤碳库造成的间接影响不容忽视。[结论]深入揭示恢复生态系统土壤碳汇过程和驱动机制,细化生态环境分区,对于准确评估黄土高原土壤有机碳库、提高有机碳循环过程模型精度至关重要。未来亟需加强对深层土壤碳库、无机碳库及区域尺度上土壤碳循环等方面的研究。

关键词: 土壤碳库; 土壤动物; 土壤有机碳; 凋落物; 根系分泌物; 土壤侵蚀; 黄土高原; 植被恢复

中图分类号: S153.6; X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0395-11

Response of Soil Organic Carbon Pool to Vegetation Restoration and Its Influencing Factors in Loess Plateau

Zhou Yechen¹, Shao Mingan^{2,3,4}, Wei Xiaorong^{4,5}, Chen Mingyu¹, Li Tongchuan^{4,5}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the response characteristics and mechanism of soil carbon pool to vegetation restoration, to provide scientific guidance for ‘ecosystem carbon neutrality’ in China, and help to achieve the national goal of ‘carbon peak and carbon neutrality’. [Methods] Based on the articles on the carbon sequestration effect of vegetation restoration in the Loess Plateau at home and abroad, the regional differences of soil carbon pool, the driving factors of carbon storage and the mechanism of vegetation carbon sequestration were summarized and analyzed. [Results] (1) The main influencing factors on soil carbon storage include vegetation characteristics (restoration years, litter input and root exudates), climate change (precipitation and temperature), soil properties (soil organisms and soil nitrogen input).

收稿日期: 2024-01-15

修回日期: 2024-02-09

资助项目: 陕西省自然科学基金项目(2023-JC-QN-0217); 中国高校科学基金(2452022335); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB40000000)

第一作者: 周也琛(2000—), 女, 山西原平人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态学。E-mail: zhouyc0903@163.com

通信作者: 李同川(1988—), 男, 河南新乡人, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态学。E-mail: litongchuan_xinong@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

(2) There are obvious regional differences in the carbon sequestration effect of vegetation on the Loess Plateau, and the vegetation restoration model has an important impact on the soil carbon pool. (3) The indirect effect of vegetation restoration on soil carbon pool by changing soil erosion process cannot be ignored. [Conclusion] It is very important to reveal the process and driving mechanism of soil carbon sink in the restored ecosystem and refine the ecological environment division for accurately assessing the soil organic carbon pool in the Loess Plateau and improving the accuracy of the organic carbon cycle process model. In the future, it is urgent to strengthen the research on deep soil carbon pool, inorganic carbon pool and soil carbon cycle at regional scale.

Keywords: soil carbon pool; soil animal; soil organic carbon; litter; root exudates; soil erosion; Loess Plateau; vegetation restoration

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,在全球 0—2 m 的土层深度范围内约储存了 2 400 Pg($1 \text{ Pg C} = 10^{15} \text{ g C}$)的有机碳,约为陆地生物碳库的 4.4 倍,为大气碳库(以 CO_2 形态存在)的 3.2 倍^[1]。土壤碳储量的微弱变化即会对陆地生态系统碳循环过程和大气 CO_2 浓度等产生深远影响^[2]。黄土高原土壤较为贫瘠,根据第二次土壤普查结果统计发现西北黄土区土壤有机质含量平均不足 1%,而肥沃土壤有机质含量可达 3%~8%^[3],黄土高原土壤碳储量低,在固碳方面有很大的潜力^[4]。自退耕还林(草)等生态修复工程实施以来,大量耕地逐步转变为草地或人工林地,黄土高原的植被类型和盖度发生了显著变化,2000—2020 年黄土高原植被覆盖度由 39% 提高到 71%^[5]。大量研究表明退耕还林还草能够显著影响土壤碳储量,进而影响全球碳循环过程及气候变化^[6-7]。植物群落对陆地生态系统碳输入起着关键性作用^[8],退耕还林(草)工程实施后,植被恢复带来的碳汇效应使黄土高原土壤碳库发生巨大变化^[9]。Deng 等^[6]估算退耕还林还草工程实施地区 1999—2050 年的植被总固碳潜力和年代际固碳潜力后发现,2010 年植被恢复地区土壤碳储量为 682 Tg C,2020 年、2030 年、2040 年和 2050 年的累积碳汇估计分别为 1 697,2 635,3 438,4 115 Tg C。

影响土壤碳库的因素包括气候^[10-11]、植被^[9,12]、和土壤等^[13](图 1)。植被通过凋落物累积与分解^[14]及根系生命活动等^[15]过程作用于土壤,气候、土壤等因素影响土壤水分和热量资源的再分配,从而影响植物的生长发育,也影响着土壤的碳源汇效应。过去关于黄土高原土壤碳库的研究主要聚焦于土地利用类型转变背景下的微小尺度范围内的土壤碳汇效应^[16];影响土壤固碳能力因素(气候、地形、植被类型、恢复年限、根系生命活动、土壤生物等)的分析^[10];短期内植被恢复后土壤固碳能力估算等^[9,12],关于黄土高原植被恢复对土壤碳库的影响及机理机制归纳总结较

少。本文从空间分布、地区差异、影响因素等方面系统论述黄土高原地区土壤碳库的研究进展,分析研究不足和未来研究热点,有助于准确评估植被恢复在全球碳平衡中的作用,为实现我国“碳达峰、碳中和”战略目标提供科学参考。

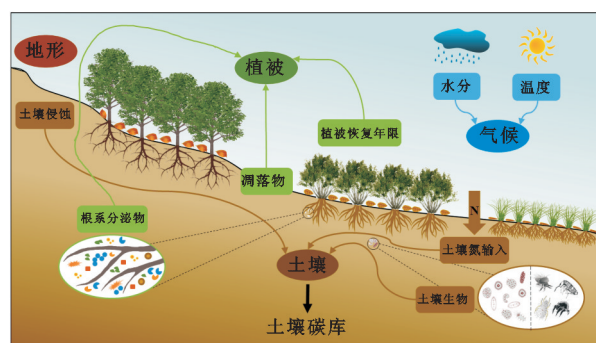


图 1 黄土高原植被恢复下土壤碳储量的影响因素

Fig. 1 Factors affecting soil carbon storage under vegetation restoration on the Loess Plateau

1 黄土高原土壤有机碳的垂直分布特征

植被恢复显著影响土壤碳的垂直分布^[11-12]。农地中 30—60 cm 深度土壤有机碳含量最高,而在灌木林地、乔灌混交林及草地中,土壤有机碳含量最高值均出现在 10—30 cm^[17]。经过 30 年的退耕还林,加剧了黄土高原土壤有机碳的垂直分布差异。一般来说,植被恢复能够显著增加 0—20 cm 层土壤碳,但随天然植被恢复年限的增加,0—100 cm 土层有机碳储量总体变化趋势是先减少后增加最后趋于稳定^[18-19]。在次生林演替过程中,土壤有机碳含量和储量显著增加,随土层深度增加则表现为逐渐降低的趋势^[20];其 0—30 cm 层土壤有机碳中脂肪族碳组分相对含量减少,芳香族碳组分相对含量增加,而 30—100 cm 土壤有机碳化学组成稳定性表现为先增加后降低^[21]。值得注意的是,土壤干化能够限制植物根系活动,随植被恢复年限的增加深层土壤有机碳含量存在降低风

险^[22]。黄土高原天然草地土壤碳在表层和深层土壤均有积累^[23]。围栏草地土壤有机碳含量在 0—40 cm 土层变化较大^[24],丘陵区天然草地 0—10 cm 层土壤有机碳含量随恢复时间显著增加,而在 10—100 cm 层随恢复时间未表现出显著变化^[25]。

虽然植被恢复对上层土壤有机碳含量影响较大,但是深层土壤有机碳储量也不容忽视。深层土壤有机碳较稳定,且其转化速率明显低于表层。在全球范围内,0—3 m 的土壤有机碳储量较 0—1 m 高 56%^[26]。土壤有机碳含量与土壤密度共同决定了土壤有机碳储量,因此明确土壤碳在不同深度土层的分布规律及影响因素是准确评估土壤碳库的重要前提。

2 植被固碳的区域差异

土地利用类型的改变,会直接影响土壤有机质的数量和质量,进而影响土壤碳库。大量耕地转变为人工或天然林草地,驱动土壤碳库发生变化,其影响远大于自然改变。黄土高原地形地貌、气候、植被、土壤等由南到北分异特征明显,而这些因素都可通过制约植被类型及植被生产力等影响土壤碳的积累及周转^[7]。由于环境因子不同,黄土高原不同区域采取了不同的退耕还林还草措施,如人工林地、人工草地、自

然恢复草地及灌木等。除植被类型外,恢复年限也是影响土壤固碳量的重要因子^[27],土壤碳固存效应在多因子综合作用下呈现显著差异。

不同植被类型具有不同的根系分泌物及生物归还量^[28],从而表现出不同的固碳能力,且形成独特的表土层微环境,进而对土壤碳输入造成影响^[29]。在黄土高原不同区域,草地、灌木林和林地的固碳效应存在差异^[11,30-31]:(1)在降雨量较低的区域,草地的固碳速率最高^[10]。(2)在降雨量高于 450 mm 的地区,植被恢复的中后期阶段林地表现出了更高的固碳速率^[19]。(3)灌木比纯林恢复模式土壤固碳效果更好^[18](表 1)。而同种植被在黄土高原不同气候区也具有不同的固碳速率,降雨量在 450~550 mm 固碳速率最高,为 0.51 Mg/(hm²·a);而年降雨量>550 mm 的南部地区固碳速率最低,为 0.21 Mg/(hm²·a)^[10]。

一般而言,黄土高原土壤有机碳含量随纬度的增加逐渐减低,张向茹等^[32]研究认为土壤有机碳含量随纬度增加呈指数型降低。黄土高原不同地理区域间自然环境多变、人为干扰异质性大等原因,均会影响土壤碳库分布和累积^[18],因此对土壤碳库的评估仍存在较大的不确定性,在黄土高原地区需要进一步开展区域尺度下的土壤碳循环研究^[19]。

表 1 黄土高原不同植被类型的区域固碳差异

Table 1 Regional carbon sequestration differences of different vegetation types in the Loess Plateau

地区	年平均 降水量/mm	土壤 质地	平均恢复 年限/a	植被 类型	主要 物种	结论	参考 文献
甘肃合水连家砭	587	粉砂壤土	100	林地	山杨、白桦	在退耕还林(草)生态工程中,退耕还草的固碳速率较高	邓蕾 ^[10]
			45	灌木	狼牙刺、沙棘、黄刺玫		
			15	草地	白羊草、苔草、长芒草		
陕西安塞纸坊沟	503	粉砂壤土	14	草地	长芒草、白羊草、冰草、狗尾草、铁杆蒿、茵陈蒿、二色胡枝子、阿尔泰狗娃花	天然草地比植树造林更有利于土壤有机碳的固存	Jin 等 ^[31]
宁夏固原云雾山	410.7		48	草地	百里香、铁杆蒿、长芒草、大针茅		
甘肃省庆阳市西峰区南小河盆地	556.5		60	林地	刺槐、侧柏、油松、山杏、山杨、旱柳		
陕西省安塞县大南沟小流域	549	粉壤土	60	草地	野古草、冰草、艾蒿	林地、灌木、草地土壤有机碳含量依次降低	冯棋等 ^[11]
			24	林地	刺槐、山杏		
			24	灌木	柠条、沙棘		
甘肃省定西市安家坡流域	427	粉砂壤土	20	草地	早芦苇、早熟禾、刺儿菜、铁杆蒿、猪毛蒿、草木樨状黄芩、火絨毛草、披针叶苔草、朝天委陵菜、多花胡枝子、达乌里胡枝子	半干旱黄土丘陵区从农田到灌丛的土地利用转换更有利于土壤固碳	Chen 等 ^[30]
			25	林地	野杏、油松		
			25	灌木	柠条、沙棘		
山西省右玉县	410	粉砂土	(农田撂荒)	草地	长芒草、沙蒿	林地在退耕中长期相比于灌木和草地均表现出较高的碳氮累积速率	史利江等 ^[19]
			37	林地	小叶杨、油松、华北落叶松		
			37	灌木	沙棘		
			31	草地	白莲蒿、达乌里秦艽、蒙古蒿		

3 黄土高原植被恢复下土壤有机碳储量的影响因素

3.1 植被因素

植被是黄土高原土壤碳储量变化的重要影响因素。黄土高原退耕还林(草)工程使土壤碳固存提升了 62%,其中耕地转为乔、灌、草后分别增加 88%,55%,43%^[9]。对于不同植被类型的土壤碳储量来说:常绿乔木>落叶乔木、沙棘>柠条、天然草地>人工草地^[9]。研究表明在不同恢复阶段的乔、灌、草土壤有机碳在 22%~155%变化,恢复后期固碳效果最佳。在降雨量>550 mm 的地区种植乔、灌木,而在降雨量<450 mm 的地区以草地恢复为主。另外,植被恢复年限、植物产生的凋落物和根系分泌物等都会直接或者间接地影响土壤碳储量^[8]。凋落物和根系分泌物的输入会直接改变土壤碳储量,一些根系分泌物也会改变土壤团聚过程,间接影响土壤碳储量;而植被恢复年限和植被类型则是通过改变植物群落结构、凋落物数量和质量^[33]以及根系分泌物^[15]的产生等间接影响土壤碳储量。

3.1.1 植被恢复年限对土壤碳储量的影响 生态恢复过程中形成的多年生植被有助于提升土壤有机碳的积累,土壤有机碳含量随植被年限的增加不断提升^[27]。然而,不同植被类型的碳固存效应随恢复年限的增加存在明显差异^[19]。在植被恢复初期,灌木林地土壤碳含量较林草地提升明显,而到中后期时,乔木对碳蓄积能力更强。乔灌草 3 种植被恢复类型的土壤固碳量均与恢复年限呈正相关,而不同恢复阶段有机质的输入量与消耗量不平衡可能导致固碳量有所差异^[10]。随植物恢复年限增加,枯落物和植被根系生物量的土壤碳输入量增加。然而也有研究认为土壤有机碳在恢复初期呈下降趋势,随后逐渐增加^[12]。目前研究结果并无统一结论,所得结果的差异性大多是由于研究区域及植被类型等差异造成的。

3.1.2 凋落物输入对土壤碳储量的影响 凋落物是陆地生态系统土壤有机碳的主要来源^[14],据 Raich 等^[34]估计,在世界范围内,每年约有 68 Pg 的碳是通过凋落物分解过程产生的,约占碳通量的 70%。土壤动物微生物等分解者影响凋落物分解过程,其在参与凋落物破碎、代谢过程的同时,也是土壤碳循环的重要组成部分^[35]。凋落物分解对土壤碳循环的影响见参考文献^[33],随植被恢复年限增加,凋落物蓄积量增加,其在分解过程中将含有的营养物质释放到土壤,有利于提高土壤有机碳储量^[33]。凋落物输入与

土壤碳储量存在正相关关系^[14],但不同植被类型的枯落物蓄积量不同,对土壤碳库的影响存在差异。一般认为枯落物丰富度越高,对土壤养分及其有机质含量的提升越快。此外,枯落物的 C:N 直接决定了其分解速率以及植物的二次利用能力,进而间接影响枯落物碳对土壤有机碳库的转换过程^[36]。凋落物向土壤有机碳库的转变是由多因子间的强烈交互作用共同调控着的^[28]。目前,在黄土高原地区已经进行广泛的凋落物对土壤有机碳库贡献的研究^[14,37],但目前存在试验年限相对不长和凋落物分解影响因素复杂等问题,因此有必要开展长期试验以深入探究凋落物分解与土壤碳库的动态关系。

3.1.3 根系分泌物对土壤碳储量的影响 植物根系分泌是植物-土壤物质交换、植物-土壤-微生物联系以及植物根际碳沉积的重要过程和桥梁,深刻影响着土壤碳周转和循环过程。植物释放的根系分泌物约占光合固定碳总量的 5%~17%^[38]。根系分泌物本身含有大量的活性有机碳物质,能够直接影响土壤固碳增汇能力。同时,根系分泌物中含有的黏胶类物质,能够促进大团聚体的形成,从而改善土壤结构与质地^[39]。根系分泌物是土壤食物网的重要联通者,与根际微生物和土壤动物共同调控土壤有机碳和养分的转化^[39-40](图 2)。另一方面,根系的腐殖化速率较凋落物更快,约为凋落物的 2.3 倍,因此根系是地下土壤稳定性有机碳主要来源^[41]。然而由于根系残体具有分解速率快、不易监测等特征,导致根系碳输入的重要作用常常被忽视^[42]。此外,不同植被根系周转时间不同,导致地下生物量碳库的空间格局、转化与循环过程等更复杂^[43]。目前的研究成果认为根系分泌物对土壤碳的作用可以分为两种:(1)正向作用。植物根际土壤有机碳含量高于非根际,根系分泌物可以提高土壤有机碳的含量,增加土壤腐殖质,从而改善土壤质量^[15]。(2)负向作用。根系分泌物的激发效应刺激土壤有机质分解,不利于土壤有机碳的积累^[44]。由于植物根系分泌物在土壤中的停留时间很短,会迅速被土壤细菌同化利用并分解成 CO₂,因而探究植物根系分泌物输入与土壤碳动态变化的相互作用机制还存在很多困难。

3.2 气候因素

在区域尺度上,降水和温度是土壤碳储量的主要驱动因素,它们会通过影响植物生长影响土壤碳储量。此外,降水和温度的变化也会改变地表的微气候,改变土壤微环境(土壤温度、土壤湿度、土壤生物活性等),从而影响土壤有机碳循环过程^[29]。黄土高原经纬度和地形地貌等因素的不同决定了降水、温度

等气象因子的空间差异,这在很大程度上制约着该地区的地表植被生产力和生物多样性,并通过其对植物的生长调节土壤碳库的空间分布。

气温是土壤碳储量和周转过程的重要影响因素:一方面气温会影响植物的生长发育进而改变凋落物的数量;另一方面,温度显著影响有机碳的分解速率^[28]。温度变化可通过引起水热条件、枯落物基质质量和土壤生物活性等因素的改变来增强或减缓凋落物分解,从而对其输入土壤中的有机碳含量和土壤碳库循环过程产生重要作用。不同类型植被形成的表土层小气候也会造成土壤碳库变化差异^[29],与草地相比,人工林的郁闭度和蒸腾作用更大,导致地表温度低且干燥,从而降低人工林表面枯落物的分解速率和进入土壤的有机碳的数量;而草下温度高、湿度大,微生物群落活动旺盛,促进了有机质分解。反之低温条件则会造成微生物及部分土壤动物活性降低,有机质和凋落物分解速度下降,从而影响土壤碳循环^[45]。

降水是黄土高原土壤水分的主要来源,土壤水分通过矿化、分解和降解外源有机碳从而间接影响土壤有机碳储量。黄土高原降水分布不均且植被生长过程又显著影响土壤水分条件。退耕还林政策能够显著提高土壤碳库的碳汇功能,但由于忽视了降雨特征、土壤性质的空间异质性,致使退耕还林的生态效益不高。李妙宇等^[46]基于黄土高原的气候特征将其分为半湿润、半干旱和干旱3个区域。在不同气候区,降雨对土壤碳库的影响差异显著,当地区降水量在415~817 mm时,区内退耕还林工程生态效率较高,当地区降水量小于415 mm,大于817 mm时,区内工程生态效率较低。随着恢复年限的增长,植被后期固碳量较前期有所下降与植被生长前期大量耗水有关。根系固碳过程伴随着显著的土壤水分消耗^[47],严重的水分短缺和土壤干层的形成可能会抑制细根周转及根系分泌物释放等生理活动,进而影响土壤有机碳固存^[48]。此外,水分条件是微生物活动的一个重要限制因素,水分多寡将限制微生物活性,从而对有机质分解产生影响^[35]。

在黄土高原区域,气温、降雨呈现由东南到西北逐渐降低的变化规律,与植被碳密度的空间分布规律十分类似。气温、降雨等因素决定不同地区水热条件等环境因子,通过影响植被的光合效率,进而调节该地区植被空间分布,相对于气温,降雨对地上生物量碳密度的影响更大。

3.3 土壤因素

在剖面尺度上,土壤生态过程和土壤性质驱动着微观尺度下土壤碳循环。土壤生物作为土壤碳循环

的直接参与者,通过影响凋落物分解、有机质矿化等过程直接影响土壤碳储量。土壤氮输入通过改变土壤碳氮比例,调节土壤微生物活性从而影响土壤碳循环过程。此外,土壤侵蚀对土壤的分离、搬运、沉积过程也会改变土壤团聚体结构和土壤碳矿化,影响土壤碳储量^[13]。

3.3.1 土壤质地对土壤有机碳的影响 不同的土壤质地粒度可以在一定程度上对不同类型碳库的碳密度空间格局进行解释,特别是黏粒含量对各个碳库的碳密度都有正向效应^[49]。刘志鹏^[50]对黄土高原0—5 m土壤进行大面积采样,发现土壤黏粒含量是区域尺度上影响土壤有机碳浓度变异的最重要因素之一,而黄土高原土壤黏粒含量表现出较强的区域分布特征,从西北到东南土壤质地逐渐变细,黏粒含量增加。黏粒含量通过两种方式影响矿化作用:一是黏粒与有机化合物之间存在着密切的键合作用,从而提高了土壤有机碳分子的自稳定性^[51]。二是由于黏粒的存在,导致了土壤孔隙氧气分压及水分扩散效率下降,进而影响了微生物活性,土壤有机碳降解减少^[52]。

3.3.2 土壤氮输入对土壤有机碳储量的影响 土壤碳氮比的改变对全球碳、氮的转化具有重要的作用^[53]。植被恢复在一定程度上能够提高土壤氮素含量^[54]。土壤氮素的输入量主要取决于植物残体归还及生物固氮,豆科植物如柠条等可通过生物固氮作用参与土壤氮循环,使土壤氮含量增加,为微生物活动提供动力,有利于土壤腐殖质的积累。同时,植被修复显著改变土壤性质,有效降低了土壤侵蚀造成的氮素损失。土壤碳库随氮输入的动态变化可分为3种类型:(1)随着植被恢复年限的增加,水土流失区土壤中有机碳和全氮含量逐渐增加,二者呈显著正相关关系^[54]。(2)氮输入导致土壤碳氮比下降。研究表明^[53]氮输入虽然同时增加了土壤碳库和氮库,但土壤碳库的增量百分比要低于土壤氮库的增量百分比。(3)氮输入对土壤碳库影响不大。如科罗拉多高山苔原带土壤碳库随氮输入变化并不明显^[55]。

目前已有的研究表明,适度的氮肥施用可以提高土壤有机碳的含量,但过量施氮则会促进有机质分解,从而导致土壤有机碳含量降低,碳库稳定性下降^[56]。尽管国际上关于氮添加对土壤有机碳的作用已有一些研究成果,但仍有很大争论,对其作用机理等尚无定论。由于土壤类型、肥力、氮添加水平等多种因子共同影响着土壤有机碳库稳定性,还受到碳组分空间分布、水热条件地形地貌、土壤结构特征和微生物活性等多种因子的综合效应影响。因此不同地区、不同种植方式、不同土壤类型下的无机肥施用对

土壤有机碳库的影响存在较大差异,需要更多的长期试验来揭示氮添加对土壤碳库的影响机制。

3.3.3 土壤动物对土壤有机碳库的影响 土壤生物是土壤有机碳的重要组成部分,是土壤生态系统分解作用和养分转化的重要调节者,参与凋落物分解^[14]、植物根系发育^[28,37]、土壤呼吸等过程^[57],从而影响土壤碳循环(图 2)。土壤动物在全球范围内分布范围广泛且数量巨大,其参与了土壤大部分的循环过程与生态功能。在最近的数十年中,人们对微生物活动的关注程度超过了土壤动物。而土壤动物对土壤碳循环的分解、碳稳定性、植物与微生物的调控以及土壤呼吸等都具有不可忽视的重要意义,它们能够通过自身的进食、消化、分泌、呼吸等生理活动,对土壤碳循环起到重要的调控作用^[40]。一方面,通过对养分的转化、贮存和释放,使土壤理化性质发生变化,从而对生态系统碳循环产生重要影响。另一方面,土壤动物-微生物-植物构成一种非常复杂的交互作用,通过改变植物和微生物的活性,进而对土壤生态系统中的有机碳库进行调控。土壤动物主要涉及从原生动物到节肢动物多种类群,根据体宽可分为小型(平均体宽小于 0.2 mm)、中型(平均体宽在 0.2~2 mm)和大型土壤动物(平均体宽大于 2 mm)^[57]。目前,大型土壤动物如蚯蚓、蚂蚁、白蚁,中型土壤动物跳虫、螨虫,小型土壤动物线虫、原生土壤动物等是土壤碳循环研究的主要对象,而对于中小型土壤动物关注不足。

凋落物中营养元素的降解和释放是土壤养分的重要来源,其降解过程受到生物因子和非生物因子的协同作用,从而改变了土壤碳库的周转速率,调控土壤养分水平^[35]。土壤动物在凋落物的分解过程中扮演着重要角色,它既能直接影响凋落物的分解,又能通过影响土壤理化性质和微生物活性等对凋落物的降解产生间接影响。大中型土壤动物利用物理破碎将新鲜凋落物分解,再经过众多小型土壤动物及微生物的作用,最终形成结构稳定的腐殖质^[37]。

地栖性土壤动物的取食和筑巢活动也会显著影响土壤碳循环过程,例如蚁群将其他昆虫尸体、植物组织等带入蚁巢,加之它们的粪便在蚁巢中堆积导致蚁巢内部的养分含量明显超过周围的土壤^[58]。作为另一种典型土壤生物,蚯蚓的取食、消化、排泄及分泌等过程产生的团聚体(蚯蚓粪)也是影响土壤碳库及其稳定性的关键因素^[59]。此外,蚯蚓可以通过有氧呼吸增加二氧化碳排放量^[60]。在中型土壤动物类群中,螨类与跳虫在团聚体形成过程中的作用也十分关键,他们能够通过排出大量的粪粒来加速团聚体形成,但主要是通过取食微生物对微生物的间接作用从

而对团聚体的形成产生影响^[61]。

土壤动物通过地下食物网对植物生长形成强烈反馈,植被恢复和土壤生物之间通过相互作用深刻地影响并调控土壤有机碳的储存和转化。综合分析发现土壤动物呼吸是土壤异养呼吸的重要组成部分,而土壤呼吸对温度的响应规律和机制仍不明确,在全球变暖的背景下,几乎所有模型都预测气温升高会导致土壤中碳的损失,土壤动物与碳循环之间的关系变得尤为重要。以往研究多集中在微生物对土壤碳库的贡献和影响机制,对土壤动物的固碳能力研究较少,其多样性及结构变化对生态系统碳循环产生的影响也很难定论,土壤动物代谢过程中的 CO₂ 排放量也没有得到准确量化,揭示土壤动物在土壤呼吸中的作用机制和贡献比例是黄土高原土壤碳源汇效益研究的重要发展方向。

3.3.4 土壤侵蚀对土壤碳储量的影响 土壤侵蚀是影响土壤碳循环的重要驱动因子^[62]。2012 年世界范围内的水土流失总量达到 35.9 Pg/a,其中 70%~90% 的土壤侵蚀带动坡面表土最终在一些小流域及相邻地势低洼的河流山麓等区域沉积^[63]。土壤侵蚀驱动下的陆地碳源汇效应,目前尚有较大争论。Doetterl 等^[64]的综述研究表明,土壤侵蚀每年会导致全球 1 Pg 的碳源或 1 Pg 的碳汇。Pimentel 等^[65]从土壤生产力角度出发,结合侵蚀过程中的分离、搬运和沉积 3 个主要环节,认为土壤侵蚀是碳源而非碳汇。而一些研究则从以下两个方面将土壤侵蚀视为碳汇^[66]:一是土壤侵蚀导致侵蚀区的有机碳库损失,而由于植被重新生长产生的生物量使这部分有机碳得到补充,从而实现了碳汇作用。其次,沉积物将有机碳包裹埋藏,使得表层以下的有机碳矿化程度下降,松散的粉黏粒重新聚集,从而达到固碳和减少矿化的作用。

关于土壤侵蚀过程中的碳源汇作用学者们持有不同的观点,国内外学者对侵蚀驱动下的土壤碳源汇过程认识不一,研究成果也不尽相同。Doetterl 等^[64]认为主要有以下两方面原因造成土壤侵蚀的碳源汇效应存在较大的不确定性。首先,由于研究方法和时间、空间尺度的不同,研究成果可能出现较大的偏差,从而引起侵蚀量估算的定量差异。其次,缺乏对土壤有机碳库在侵蚀过程各阶段的认识。若要研究侵蚀对碳循环的长远效应,则必须研究流失碳库的稳定性。为此,针对全流域碳循环,研究土壤侵蚀过程中不同阶段物理、化学、生物等因素及环境因子的改变引起的碳稳定变化过程及其机理对今后研究开展具有重要意义。

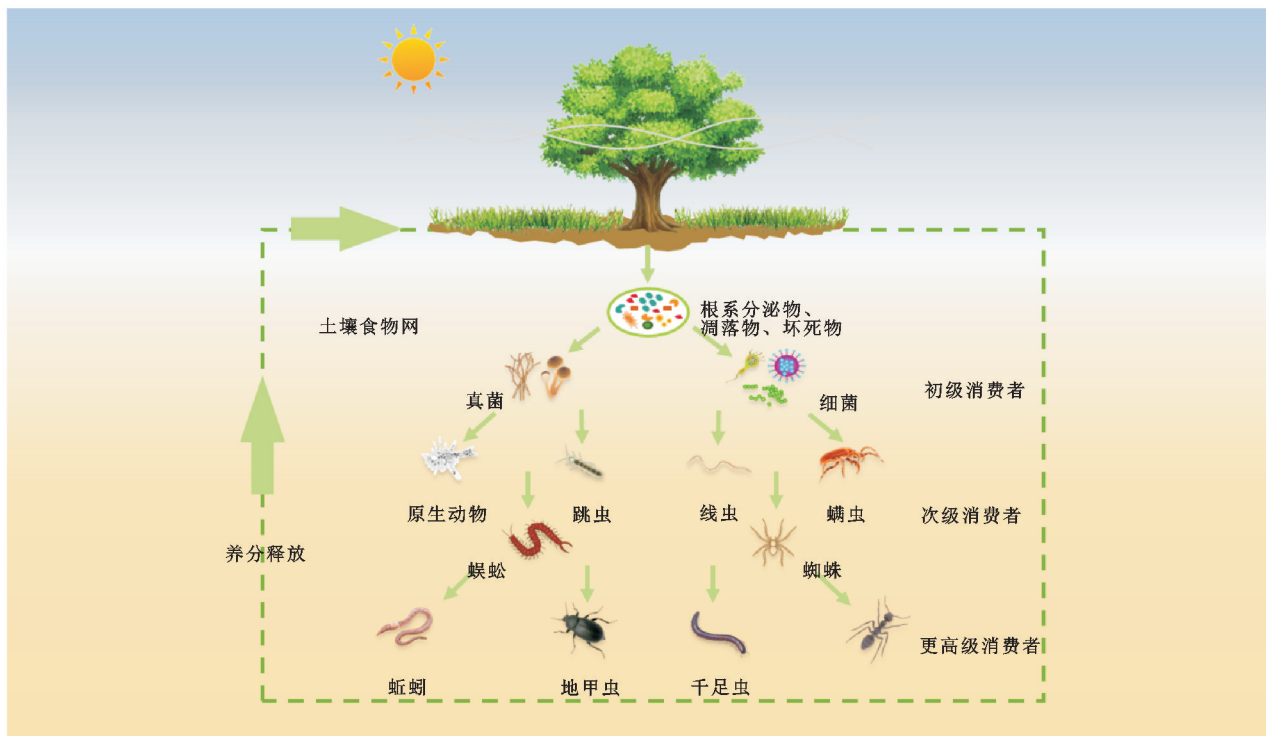


图2 土壤食物网与土壤养分循环

Fig. 2 Soil food web and soil nutrient cycling

植被恢复通过植被覆盖、截流入渗、根系穿插、枯落物分解、根系分泌物等过程直接或间接地影响土壤理化特征,植被冠层和枯落物层拦截雨滴、涵养水源、固结土壤、削弱地表径流、提高土壤的抗蚀性,抑制水土流失^[67],进而提高土壤碳储量及其稳定性^[62,68]。植被恢复显著减少了黄土高原土壤侵蚀、土壤有机碳的流失^[67]以及土壤颗粒在分离和搬运过程中有机碳的分解,产生了显著的固碳协同效益。植被恢复后土壤侵蚀区的碳固存主要与较稳定的团聚体和粉黏粒结合,有利于减少土壤碳的分解,且侵蚀区植被的碳输入补偿了由于侵蚀而造成的有机碳损失,这种效应在表层土壤中更为明显^[68]。

植被恢复进程是植物和土壤之间相互影响与作用的过程,期间植被的存在提高了有机质的输入,增加了土壤有机碳库的积累量;同时降低了土壤侵蚀及土壤碳流失^[54]。但也有试验结果显示尽管植被显著恢复,但因侵蚀剧烈,土壤碳含量整体呈下降趋势^[67]。目前黄土高原土壤碳库、植被恢复、土壤侵蚀三者之间的关系仍缺乏大尺度、长时间的研究结果。

4 结论及展望

4.1 细化生态环境分区,实施科学的植被恢复管理措施

植被恢复通过根系分泌物、枯落物分解、降低土壤侵蚀等方面增加了土壤有机碳储量,但由于黄土高

原不同区域的地形、气候、土壤等因素差异巨大,导致黄土高原植被恢复特征和固碳速率呈现强烈的地带性分布特征。在评估和调控植被恢复固碳效应过程中,应充分考虑当地气候条件和土壤环境条件,根据降水格局、气温条件将黄土高原生态分区进行细化,在此基础上针对不同生态区实施不同种植模式(单一种植或不同植被类型组合),结合氮添加、间伐和水土流失保护等人为管理措施,有助于提高土壤中有机碳的固存潜力,对维持和提升黄土高原生态环境可持续发展具有重要意义。

4.2 加强对深层土壤碳库及区域尺度土壤碳循环方面的研究

黄土高原自然环境复杂,受气候变化和人类活动的影响,准确评估土壤有机碳库及其固碳潜力难度较大,该地区土壤固碳能力的不确定性也增加了学者对中国陆地生态系统碳收支能力的评价难度。由于采样难度及成本问题,对深层土壤碳库的认识更加有限。同时,区域尺度上的土壤碳循环研究仍有许多问题需要解决,如土壤有机碳的停留时间、凋落物分解速率等都缺乏标准化的观测方法。未来应统一采样方法和标准,扩大尺度范围,提高有机碳循环过程模型精度,以期更准确地认识植被恢复过程中土壤固碳机制,评估土壤固碳潜力。

4.3 深入揭示恢复生态系统土壤碳汇过程和驱动机制

鉴于人类活动、气候变化、土壤性质、植被恢复等

因素的共同作用,黄土高原土壤生态系统的碳源汇效应应具有更大的不确定性,未来亟需对土壤碳库与各因子的相互作用进行更系统的研究,明确植被群落结构、土壤理化性质、土壤侵蚀、土壤微生物和动物等对土壤碳库的影响,准确揭示土壤有机碳变化驱动因素,深入理解有机碳变化规律及其内在机制。进而精确评估植被恢复在全球碳平衡中的作用,为实现“碳达峰、碳中和”的战略目标提供科学参考。

参考文献(References):

- [1] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018,115(16):4015-4020.
- [2] Ahirwal J, Maiti S K, Singh A K. Changes in ecosystem carbon pool and soil CO₂ flux following post-mine reclamation in dry tropical environment, India[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,583:153-162.
- [3] 刘驰,刘希瑶,刘澎.松辽平原典型黑土区有机质的变化及影响因素分析[J].*地质与资源*,2020,29(6):550-555.
Liu C, Liu X Y, Liu P. Analysis on the changes of organic matters and their influencing factors of typical black soil areas in Songliao Plain [J]. *Geology and Resources*, 2020,29(6):550-555.
- [4] Deng L, Shangguan Z, Bell S M, et al. Carbon in Chinese grasslands: Meta-analysis and theory of grazing effects[J]. *Carbon Research*, 2023,2(1):19.
- [5] 王逸男,孔祥兵,赵春敬,等.2000—2020年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析[J].*水土保持学报*,2022,36(3):130-137.
Wang Y N, Kong X B, Zhao C J, et al. Change of vegetation coverage in the Loess Plateau from 2000 to 2020 and its spatiotemporal pattern analysis[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(3):130-137.
- [6] Deng L, Liu S G, Kim D G, et al. Past and future carbon sequestration benefits of China's grain for green program [J]. *Global Environmental Change*, 2017,47:13-20.
- [7] 杨阳,刘良旭,童永平,等.黄土高原植被恢复过程中土壤碳储量及影响因素研究进展[J].*地球环境学报*,2023,14(6):649-662.
Yang Y, Liu L X, Tong Y P, et al. Advances and driving factors in soil organic carbon storage during vegetation restoration in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2023,14(6):649-662.
- [8] 邓蕾,刘玉林,李继伟,等.植被恢复的土壤固碳效应:动态与驱动机制[J].*水土保持学报*,2023,37(2):1-10.
Deng L, Liu Y L, Li J W, et al. Effect of vegetation restoration on soil carbon sequestration: Dynamics and its driving mechanisms[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(2):1-10.
- [9] 林枫,王丽芳,文琦.黄土高原土壤有机碳固存对植被恢复的动态响应及其碳汇价值[J].*水土保持研究*,2021,28(3):53-58.
Lin F, Wang L F, Wen Q. Dynamic responses of sequestration of soil organic carbon to vegetation restoration and the values of carbon sink in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(3):53-58.
- [10] 邓蕾.黄土高原生态系统碳固持对植被恢复的响应机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
Deng L. Responding Mechanism of Ecosystem Carbon Sequestration Benefits to Vegetation Restoration on the Loess Plateau of China[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2014.
- [11] 冯棋,杨磊,王晶,等.黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应[J].*生态学报*,2019,39(18):6598-6609.
Feng Q, Yang L, Wang J, et al. Response of soil moisture and soil organic carbon to vegetation restoration in deep soil profiles in Loess Hilly Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(18):6598-6609.
- [12] 黎鹏,张勇,李夏浩祺,等.黄土丘陵区不同退耕还林措施的土壤碳汇效应[J].*水土保持研究*,2021,28(4):29-33.
Li P, Zhang Y, Li X, et al. Effect of soil carbon sink in the hilly region of the Loess Plateau under grain for green project[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(4):29-33.
- [13] 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.
- [14] 王利彦,周国娜,朱新玉,等.凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响[J].*生态学报*,2021,41(7):2709-2718.
Wang L Y, Zhou G N, Zhu X Y, et al. Effects of litter on soil organic carbon and microbial functional diversity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(7):2709-2718.
- [15] 王丛.宁南山区典型植物根系分泌物组成及其对土壤碳库的贡献[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
Wang C. Composition and Contribution to Soil Carbon Pool of Typical Plants Root Exudates in the Mountainous Area of Southern Ningxia[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [16] 许小明,田起隆,孙景梅,等.子午岭地区植被演替的土壤碳汇效应[J].*水土保持学报*,2022,36(3):159-165,180.

- Xu X M, Tian Q L, Sun J M, et al. Effects on soil carbon sink of vegetation succession in the Ziwuling area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3):159-165,180.
- [17] 田静,郭景恒,陈海清,等.土地利用方式对土壤溶解性有机碳组成的影响[J].*土壤学报*,2011,48(2):338-346.
Tian J, Guo J H, Chen H Q, et al. Effect of land use on composition of soil dissolved organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011,48(2):338-346.
- [18] Deng L, Wang K B, Zhu G Y, et al. Changes of soil carbon in five land use stages following 10 years of vegetation succession on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018,171:185-192.
- [19] 史利江,高杉,姚晓军,等.晋西北黄土丘陵区不同植被恢复下的土壤碳氮累积特征[J].*生态环境学报*,2021,30(9):1787-1796.
Shi L J, Gao S, Yao X J, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen accumulation under different vegetation restoration in the loess hilly region of northwest Shanxi Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021,30(9):1787-1796.
- [20] 闫丽娟,李广,吴江琪,等.黄土高原4种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J].*生态学报*,2019,39(15):5546-5554.
Yan L J, Li G, Wu J Q, et al. Effects of four typical vegetations on soil active organic carbon and soil carbon in Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(15):5546-5554.
- [21] 刘涵宇,刘颖异,张琦,等.黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征[J].*环境科学*, 2023,44(4):2275-2282.
Liu H Y, Liu Y Y, Zhang Q, et al. Response characteristics of soil organic carbon pool and its chemical composition during secondary forest succession in the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2023,44(4):2275-2282.
- [22] Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation[J]. *Plant and Soil*, 2005,269(1/2):341-356.
- [23] 李建平,谢应忠.封育对黄土高原天然草地深层土壤碳、氮储量的影响[J].*草业科学*,2016,33(10):1981-1988.
Li J P, Xie Y Z. Effects of natural grassland enclosure on carbon and nitrogen storage in deep soil in the Loess Plateau of China[J]. *Pratacultural Science*, 2016,33(10):1981-1988.
- [24] 王玉红,马天娥,魏艳春,等.黄土高原半干旱草地封育后土壤碳氮矿化特征[J].*生态学报*,2017,37(2):378-386.
Wang Y H, Ma T E, Wei Y C, et al. Influence of grazing exclusion on soil organic carbon and nitrogen mineralization in semiarid grasslands of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(2):378-386.
- [25] 党珍珍,周正朝,王凯博,等.黄土丘陵区不同恢复年限对天然草地土壤碳库动态的影响[J].*水土保持通报*, 2015,35(5):49-54.
Dang Z Z, Zhou Z C, Wang K B, et al. Effects of vegetation restoration ages on soil carbon pool of natural grassland in loess hilly region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015,35(5):49-54.
- [26] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000,10(2):423-436.
- [27] Liu Y, Dang Z Q, Tian F P, et al. Soil organic carbon and inorganic carbon accumulation along a 30-year grassland restoration chronosequence in semi-arid regions (China) [J]. *Land Degradation & Development*, 2017,28(1):189-198.
- [28] 马志良,赵文强.植物群落向土壤有机碳输入及其对气候变暖的响应研究进展[J].*生态学杂志*,2020,39(1):270-281.
Ma Z L, Zhao W Q. Research progress on input of plant community-derived soil organic carbon and its responses to climate warming[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020,39(1):270-281.
- [29] 周莉,李保国,周广胜.土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J].*地球科学进展*,2005,20(1):99-105.
Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. *Advances in Earth Science*, 2005,20(1):99-105.
- [30] Chen L D, Gong J, Fu B J, et al. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, Loess Plateau of China[J]. *Ecological Research*, 2007,22(4):641-648.
- [31] Jin Z, Dong Y S, Wang Y Q, et al. Natural vegetation restoration is more beneficial to soil surface organic and inorganic carbon sequestration than tree plantation on the Loess Plateau of China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2014,485/486:615-623.
- [32] 张向茹,马露莎,陈亚南,等.黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J].*土壤学报*,2013,50(4):818-825.
Zhang X R, Ma L S, Chen Y N, et al. Ecological stoichiometry characteristics of *Robinia pseudoacacia* forest soil in different latitudes of Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013,50(4):818-825.

- [33] 裴蓓,高国荣.凋落物分解对森林土壤碳库影响的研究进展[J].中国农学通报,2018,34(26):58-64.
Pei B, Gao G R. Impact of forest litter decomposition on soil carbon pool: A review[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018,34(26):58-64.
- [34] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1992,44(2):81-99.
- [35] 陈婷,郝敏,孔范龙,等.枯落物分解及其影响因素[J].生态学杂志,2016,35(7):1927-1935.
Chen T, Xi M, Kong F L, et al. A review on litter decomposition and influence factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016,35(7):1927-1935.
- [36] 刘洋,曾全超,安韶山,等.黄土丘陵区草本植物叶片与枯落物生态化学计量学特征[J].应用生态学报,2017,28(6):1793-1800.
Liu Y, Zeng Q C, An S S, et al. Ecological stoichiometry of leaf and litter of herbaceous plants in loess Hilly and gully regions, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(6):1793-1800.
- [37] Frouz J. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization[J]. Geoderma, 2018,332:161-172.
- [38] Jones D L, Hodge A, Kuzyakov Y. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition[J]. The New Phytologist, 2004,163(3):459-480.
- [39] Rillig M C, Aguilar-Trigueros C A, Bergmann J, et al. Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation[J]. The New Phytologist, 2015,205(4):1385-1388.
- [40] Zhang K, Maltais-Landry G, Liao H L. How soil biota regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 156:108219.
- [41] Kätterer T, Bolinder M A, Andrén O, et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011,141(1-2):184-192.
- [42] Martinez C, Alberti G, Cotrufo M F, et al. Below-ground carbon allocation patterns as determined by the in-growth soil core ^{13}C technique across different ecosystem types[J]. Geoderma, 2016,263:140-150.
- [43] 辛晓平,丁蕾,程伟,等.北方草地及农牧交错区草地植被碳储量及其影响因素[J].中国农业科学,2020,53(13):2757-2768.
Xin X P, Ding L, Cheng W, et al. Biomass carbon storage and its effect factors in steppe and agro-pastoral ecotones in northern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020,53(13):2757-2768.
- [44] Finzi A C, Abramoff R Z, Spiller K S, et al. Rhizosphere processes are quantitatively important components of terrestrial carbon and nutrient cycles [J]. Global Change Biology, 2015,21(5):2082-2094.
- [45] 刘白贵,全川,罗榕婷.闽江河口湿地3种主要植物冬春季枯落物分解特征[J].福建师范大学学报:自然科学版,2008,24(2):80-85.
Liu B G, Tong C, Luo R T. Litter decomposition of three main plants in winter and spring in the marsh of Minjiang River estuary[J]. Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition, 2008,24(2):80-85.
- [46] 李妙宇,上官周平,邓蕾.黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J].生态学报,2021,41(17):6786-6799.
Li M Y, Shangguan Z P, Deng L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(17):6786-6799.
- [47] Yang F, Huang M B, Li C H, et al. Changes in soil moisture and organic carbon under deep-rooted trees of different stand ages on the Chinese Loess Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022,328:107855.
- [48] Wang X Y, Li Y Q, Gong X W, et al. Storage, pattern and driving factors of soil organic carbon in an ecologically fragile zone of northern China[J]. Geoderma, 2019,343:155-165.
- [49] Ge N N, Wei X R, Wang X, et al. Soil texture determines the distribution of aggregate-associated carbon, nitrogen and phosphorous under two contrasting land use types in the Loess Plateau[J]. Catena, 2019,172:148-157.
- [50] 刘志鹏.黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素[D].北京:中国科学院研究生院,2013.
Liu Z P. Spatial Distribution of Soil Nutrients and the Impact Factors Across the Loess Plateau of China[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [51] Hartley I P, Hill T C, Chadburn S E, et al. Temperature effects on carbon storage are controlled by soil stabilisation capacities [J]. Nature Communications, 2021,12:6713.
- [52] Lavalley J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing

- soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. *Global Change Biology*, 2020,26(1):261-273.
- [53] 卢蒙.氮输入对生态系统碳、氮循环的影响:整合分析[D].上海:复旦大学,2009.
- Lu M. The Effects of Nitrogen Additions on Ecosystem Carbon and Nitrogen Cycles: A meta-analysis[D]. Shanghai: Fudan University, 2009.
- [54] 翁伯琦,郑祥洲,丁洪,等.植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展[J].应用生态学报,2013,24(12):3610-3616.
- Weng B Q, Zheng X Z, Ding H, et al. Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen cycles: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(12):3610-3616.
- [55] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, et al. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon[J]. *Nature*, 2002,419:915-917.
- [56] Song X Y, Liu S T, Liu Q H, et al. Carbon sequestration in soil humic substances under long-term fertilization in a wheat-maize system from north China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014,13(3):562-569.
- [57] 杨析.黄土高原草地土壤动物地理分布及其生态功能研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
- Yang X. Geographic Distribution of Grassland Soil Fauna and Their Ecological Functions on the Loess Plateau[D].Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [58] 张雪慧,张仲胜,武海涛.蚂蚁扰动对土壤有机碳循环过程的影响研究进展[J].应用生态学报,2020,31(12):4301-4311.
- Zhang X H, Zhang Z S, Wu H T. Effects of ant disturbance on soil organic carbon cycle: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12):4301-4311.
- [59] Chen M Y, Shao M A, Wei X R, et al. Earthworm (*Metaphire guillelmi*) activities increase the risk of soil erosion: A simulation experiment [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022,47(7):1734-1743.
- [60] Lubbers I M, Pulleman M M, Van Groenigen J W. Can earthworms simultaneously enhance decomposition and stabilization of plant residue carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017,105:12-24.
- [61] Maaß S, Caruso T, Rillig M C. Functional role of microarthropods in soil aggregation[J]. *Pedobiologia*, 2015,58(2-3):59-63.
- [62] 王义霞.黄土丘陵区水力侵蚀和植被恢复对土壤有机碳输移及分布的影响[D].北京:中国科学院大学,2018.
- Wang Y X. Effects of Water Erosion and Vegetation Rehabilitation on the Soil Organic Carbon Transportation and Distribution in Small Catchments of the Hilly Loess Region [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [63] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017,8:2013.
- [64] 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-Science Reviews*, 2016, 154:102-122.
- [65] Pimentel D, Burgess M. Soil erosion threatens food production[J]. *Agriculture*, 2013,3(3):443-463.
- [66] 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.
- [67] 文孝丽,董一帆,杨己,等.元谋干热河谷冲沟发育区植被恢复对土壤碳氮的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):282-288.
- Wen X L, Dong Y F, Yang J, et al. Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen in gully development area of Yuanmou dry-hot valley[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(4):282-288.
- [68] 姚毓菲.黄土高原小流域侵蚀区和沉积区土壤碳氮分布与矿化特征[D].北京:中国科学院大学,2020.
- Yao Y F. Distribution and Mineralization of Soil Carbon and Nitrogen in the Erosion and Deposition Sites of Small Watersheds Across China's Loess Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2020.