

毛乌素沙地固沙林恢复土壤矿物颗粒 固定碳氮效应及机制

郭雯娴¹, 马艳霞¹, 刘晓琛¹, 刘玥婷¹, 刘洋², 杨珂², 佟小刚¹

(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.大唐杨凌热电有限公司, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 揭示沙漠化逆转植被恢复过程土壤固定碳氮的效应与机制, 为评估固沙造林对沙漠化土壤质量的恢复效果提供科学依据。[方法] 选择榆林毛乌素沙地流沙地、半固定沙地以及恢复 20~50 a 的灌木和乔木固沙林地, 采用离心分组法, 分析 0—10 cm 和 10—20 cm 土层全土及砂粒、粉粒、黏粒矿物颗粒结合态碳氮的含量演变、密度增速及贡献比例的特征。[结果] 随固沙林恢复年限延长, 土壤总有机碳、全氮及矿物颗粒碳氮密度呈线性增长, 砂粒碳增速最高[0.14 mg/(hm²·a)], 粉粒次之, 黏粒最低。恢复 50 a 的乔木林总有机碳和全氮平均含量分别比灌木林高 26.9% 和 18.5%。灌木林上层(0—10 cm)砂粒、粉粒和黏粒碳含量较流沙地分别提高 13.75, 11.37, 5.24 倍, 乔木林则达 13.73, 24.78, 5.82 倍; 砂粒和粉粒碳氮固定作用在乔木林上层显著强于灌木林, 而黏粒及次表层颗粒作用无显著差异。砂粒贡献了 42.36%~48.70% 的碳氮增量, 但粉粒和黏粒(占全土质量 8.1%) 固持了 56.12% 的有机碳和 57.13% 的全氮, 显示出“低量高效”特征。全土及颗粒组分 C/N 在恢复 20~30 a 时出现拐点, 呈现“先升后降”趋势。粉粒 C/N 最高(26.6~39.9), 黏粒最低(10.7~18.4), 表明不同矿物颗粒结合有机质组成存在显著差异。[结论] 固沙林植被恢复通过促进砂粒碳氮快速积累及粉黏粒吸附固持成为沙漠化区植被恢复土壤碳氮库累积的重要机制之一。

关键词: 沙漠化防治; 毛乌素沙地; 植被恢复; 固沙林; 土壤颗粒; 矿物结合态碳氮

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0277-09

中图分类号: S714.8

文献参数: 郭雯娴, 马艳霞, 刘晓琛, 等. 毛乌素沙地固沙林恢复土壤矿物颗粒固定碳氮效应及机制[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 277-285. Guo Wenxian, Ma Yanxia, Liu Xiaochen, et al. Effects and mechanisms of carbon and nitrogen sequestration in soil mineral particles during restoration of sand-fixing forests in Mu Us sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 277-285. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.024; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.024.

Effects and mechanisms of carbon and nitrogen sequestration in soil mineral particles during restoration of sand-fixing forests in Mu Us sandy land

Guo Wenxian¹, Ma Yanxia¹, Liu Xiaochen¹, Liu Yueying¹, Liu Yang², Yang Ke², Tong Xiaogang¹

(1.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Datang Yangling Thermal Power Co., Ltd, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects and mechanisms of soil carbon and nitrogen sequestration during vegetation restoration in desertification reversal was revealed in order to provide a scientific basis for evaluating the restoration effects of sand fixation afforestation on desertified soil quality. [Methods] Sand fixation forests of shrubs and trees in the Mu Us sandy land of Yulin City, Shaanxi Province, including changing sandy land, semi-fixed sandy land and those restored for 20—50 years were selected. Using the centrifugal group method, the characteristics of content evolution, density growth rate and contribution ratio of carbon and nitrogen in the soil and the combined

收稿日期: 2025-02-18

修回日期: 2025-04-23

采用日期: 2025-04-24

资助项目: 陕西省自然科学基金基础研究项目“毛乌素沙地固沙林枯落物化学质量衰变对土壤有机碳库形成的调控机理”(2023-JC-ZD-10); 大唐杨凌热电有限公司光伏治沙科技项目“毛乌素沙地固沙林枯落物化学质量衰变对土壤有机碳库形成的调控机理”(2023-ZH-054); 国家自然科学基金面上项目“黄土高原人工林凋落物—土壤界面碳迁移转化及微生物作用机制”(42477324)

第一作者: 郭雯娴(2000—), 女(汉族), 河南省郑州市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: 1035269573@qq.com。

通信作者: 佟小刚(1979—), 男(锡伯族), 新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州人, 博士, 副教授, 主要从事生态修复效应与机制研究。Email: xiaogangtong@126.com。

state of sand, silt, and clay mineral particles in the 0—10 cm and 10—20 cm soil layers were explored. [Results] With prolonged restoration, sand-fixing forests substantially enhanced the densities of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and mineral particle-bound carbon/nitrogen, exhibiting linearly increasing trends. Sand fraction showed the highest carbon accumulation rate [0.14 Mg/(hm² · a)], followed by silt, whereas clay exhibited the lowest rate. After 50 years of restoration, arbor forests displayed 26.9% and 18.5% higher TOC and TN contents, respectively, than shrublands. In surface soils (0—10 cm), the carbon content in sand, silt, and clay particles increased by 13.75, 11.37, and 5.24 times in shrublands relative to that in mobile dunes, respectively, reaching 13.73, 24.78, and 5.82 times increments in arbor forests. The surface layers of arboreal forests demonstrated significantly stronger carbon and nitrogen sequestration capacity in sand and silt particles than those of shrublands, whereas no significant differences were observed in clay particles and subsurface layers. Although sand particles contributed 42.36%—48.70% of total carbon-nitrogen increments, the combined silt and clay fractions (representing only 8.1% of total soil mass) accounted for 56.12% of organic carbon and 57.13% of TN sequestration, showing the characteristics of ‘low quantity and high efficiency’. The soil C/N ratios exhibited a unimodal pattern with the restoration chronology peaking in 20—30 years. Silt particles maintained the highest C/N ratios (26.6—39.9), contrasting with the lowest values in clay fractions (10.7—18.4), indicating substantial compositional differences in mineral-associated organic matter. [Conclusion] These findings highlight the critical role of vegetation restoration in enhancing soil carbon and nitrogen sequestration via accelerated sand particle accumulation and effective silt-clay adsorption mechanisms in desertification-controlled ecosystems.

Keywords: desertification control; Mu Us sandy land; vegetation restoration; sand-fixation forests; soil particles; mineral-bound carbon and nitrogen

中国北方干旱及半干旱地区曾面临严重的土地沙化问题,对生态环境和农业生产构成威胁^[1-2]。土地沙漠化不仅破坏土壤原有的物理结构,还导致土壤养分的严重流失,渐进性地促使土壤质地粗化并趋向贫瘠^[2]。在此背景下,植被重建被广泛应用于修复干旱及半干旱区域退化生态系统。自 20 世纪末起,中国于半干旱沙化区域大力推行以人工造林为核心的生态修复工程,显著提升了区域的植被覆盖度与人工林面积,有效遏制了沙漠化的进一步扩展,并实现了局部生态环境的积极恢复^[3-5]。植被恢复对土壤肥力的增加、土壤质量的改善具有积极效应。有机碳和氮作为土壤肥力的核心物质,两者紧密相关,对土壤结构改良、土壤持水能力改善及土壤生物多样性至关重要^[4]。因此,土壤碳氮库的动态变化特征及其固定机制成为评估植被恢复生态成效与内在过程的关键指标。

植被恢复能够显著提高土壤总有机碳与全氮的含量。然而,土壤碳氮库是由一系列活性、功能及周转速率各异的组分复合而成,仅依赖总有机碳与全氮的变化难以全面揭示植被恢复过程中对土壤碳氮的固存过程与机制^[6-7]。因此,近年来,基于土壤颗粒(砂粒、粉粒、黏粒等)分级法的碳氮分组研究技术逐渐受到重视^[5,8-9]。研究表明,砂粒(53~2 000 μm)与有机物质松散结合,功能上具有活性特征,多数研究将二者整体作为砂粒碳氮组分探究其量变特征^[6];而

粉粒(2~53 μm)与黏粒(<2 μm)则通过配位体交换、氢键及疏水键等作用吸附碳氮,形成稳定的惰性矿物结合态碳氮,有助于碳氮的长期固存^[5,10-11]。尽管这一物理分组方法在不同农业措施、土地利用方式下土壤碳氮库变化的研究中已得到广泛应用,但在探索植被恢复过程中土壤碳氮库动态变化方面的应用尚显不足,亟待进一步深入研究^[10]。

毛乌素沙地位于农牧交错带,是中国北方典型的干旱地区,生态环境脆弱,遭受严重的沙漠化^[12-13]。近几十年来,先后推进了一系列生态恢复与植被建设工程^[13],沙地的植被状况、土壤理化性质和碳氮储量均得到了明显改善。因此,本研究基于土壤颗粒分级法的碳氮分组技术,选取毛乌素沙地流沙地、半固定沙地以及不同恢复年限的灌木和乔木固沙林地作为研究对象,探究沙漠化逆转植被恢复过程中土壤不同粒径颗粒结合碳氮组分的演变过程与累积效应,为准确评估固沙造林对沙漠化土壤质量的恢复效果提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市红石峡林区(38°19′29″N, 109°43′82″E),该区属于暖温带半干旱季风气候,年平均气温 8.5℃,年平均降水量 415 mm,干燥度 1.48,无霜期 160 d,年总辐射量 552.6 kJ/cm²。土壤类型以

风沙土为主,土壤瘠薄,有机质含量极低,抗侵蚀性能差。植被类型属于荒漠草原—典型草原—森林草原的过渡类型。

20世纪50年代以来,以生态修复为核心的生态建设和植被恢复措施在当地持续开展,使区域内植被情况发生了明显的转变。目前,林区内覆盖植被有油松(*Pinus tabulaeformis*)、樟子松(*P. sylvestris* var. *mongolica*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)、花棒(*Hedysarum-coparium*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)等。

1.2 野外取样及土壤分析

基于时空互代法,2023年6月于研究区选择流沙地(对照样地)、治沙5 a形成的半固定沙地、恢复年限为20,30,50 a的灌木(以花棒和柠条为主)和乔木(樟子松纯林)2种固沙林地。样地土壤类型均为风沙土,砂粒、粉粒、黏粒含量分别为89.4%~96.5%,1.2%~6.6%,2.0%~3.5%(表1)。采样时,每个恢复年限固沙林地均选择3个立地条件基本一致的重复样地,样地间距大于50 m。在样地内设置20 m×20 m的标准采样区。

表1 样地基本特征及0—20 cm土层物理化学性质

Table 1 Characteristics of experimental sites and physiochemical properties of 0—20 cm soil layer

样地	种植密度/ (株·hm ⁻²)	植被 覆盖率/%	凋落物生物 量/(g·m ⁻²)	根生物量/ (g·m ⁻²)	容重/ (g·cm ⁻³)	砂粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	pH值	
沙地	流沙地	0	1.7 ^e	0	0	1.71 ^c	97.1 ^b	1.6 ^c	1.3 ^a	8.11 ^a
	半固定沙地	0	16.2 ^d	15.3 ^c	76.7 ^d	1.70 ^c	96.6 ^b	2.2 ^c	1.2 ^a	8.09 ^a
灌木	20年生	874 ^b	70.5 ^c	307.2 ^d	261.4 ^c	1.67 ^{bc}	94.7 ^{ab}	4.0 ^{bc}	1.3 ^a	8.05 ^a
	30年生	856 ^b	86.7 ^a	464.8 ^c	368.3 ^b	1.63 ^b	92.9 ^a	5.8 ^{ab}	1.3 ^a	7.92 ^{ab}
	50年生	826 ^b	92.2 ^a	566.4 ^c	397.7 ^b	1.55 ^a	90.0 ^a	8.5 ^a	1.5 ^a	7.71 ^b
乔木	20年生	1231 ^a	67.4 ^c	538.2 ^c	616.9 ^a	1.67 ^{bc}	95.4 ^{ab}	3.4 ^{bc}	1.2 ^a	8.08 ^a
	30年生	1279 ^a	85.3 ^b	883.6 ^b	638.2 ^a	1.57 ^{ab}	91.2 ^a	7.1 ^a	1.8 ^a	8.01 ^a
	50年生	1245 ^a	95.4 ^a	1 006.1 ^a	619.4 ^a	1.50 ^a	89.4 ^a	8.7 ^a	1.9 ^a	7.97 ^a

注:表中不同小写字母表示不同样地不同处理下差异显著($p < 0.05$)。

采样时先除去地面凋落物,按照“S”型在标准采样区内随机选12个样点,以直径5 cm的土钻钻取0—10 cm和10—20 cm深林下及草本植物覆盖下的土样,代表固沙林地表层土壤。每层土样混匀形成混合样,共计获得土样48个(8个样地×3个重复×2个土层)。土样自然风干并过2 mm筛,用于土壤颗粒分级。同时,在每个标准采样区采用环刀法测定相应土层土壤容重,计算土壤总有机碳、全氮及不同粒径土壤颗粒结合态有机碳和氮的密度。

采用改进的Anderson D W等^[14]和佟小刚等^[15]的方法分离各粒级土壤颗粒。称取20 g风干土样于250 ml烧杯,加水100 ml,在超声波发生器清洗槽中超声分散30 min,然后将分散悬浮液冲洗过53 μm筛,直至洗出液变清亮为止,在筛上得到大于53 μm松散结合的砂粒和有机质(有机残体与半分解有机物),即为土壤砂粒组分(53~2 000 μm)^[6]。根据Stockes定律计算每一个粒级颗粒分离的离心时间,用水平离心机对洗出液进行离心。

具体为将洗出液置于400 ml离心杯,700 r/min离心4 min,将上清液倒入量筒中,再在离心杯中加水100 ml,500 r/min离心3 min,重复4次,将上清液收

集到量筒中,离心杯底部剩余的即为土壤粉粒(2~53 μm)。量筒中收集的上清液加入0.2 mol/L CaCl₂絮凝,再500 r/min离心3 min收集黏粒(<2 μm)。各组分转移至铝盒后,先在水浴锅上蒸干,然后置于烘箱内,60 °C下干燥12 h。干燥后各组分磨细过0.15 mm筛,采用德国Eelementar元素分析仪测定各土壤颗粒组分有机碳和全氮含量,然后乘以各颗粒组分质量占全土百分比即得到各颗粒组分碳氮在全土中的含量,单位以g/kg表示。

1.3 数据计算与统计分析

土壤有机碳、氮密度是指单位面积一定厚度的土层中有机碳和全氮的质量,可以指示土壤有机碳和全氮的储量。其中,土壤表层有机碳和全氮密度为0—10 cm和10—20 cm层土壤有机碳和全氮密度之和^[16]。本文采用公式(1)计算不同土层土壤总有机碳、全氮及不同粒径颗粒结合碳和氮密度。

$$\text{SOC/ND}_i = \sum_{i=1}^n \frac{D_i \times \text{BD}_i \times \text{SOC/N}_i}{10} \quad (1)$$

式中: SOC/ND_i为第*i*层土壤有机碳/氮密度(mg/hm²); SOC/N_i为第*i*层总有机碳/氮或颗粒碳/氮含量(g/kg); BD_i为第*i*层土壤容重(g/cm³); D_i为第*i*层

土层厚度(cm)。

恢复50 a固沙林地每层各粒径土壤颗粒碳和氮增量对相应土层累积碳和氮总量贡献率计算公式为

$$R_i = \frac{C_{FFi} - C_{FQi}}{C_{TFi} - C_{TQi}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_i 为第*i*层土壤某颗粒碳/氮贡献百分率; C_{FFi} 为恢复50 a固沙林地第*i*层土壤对应某颗粒碳/氮含量(g/kg); C_{FQi} 为流沙地第*i*层土壤对应的颗粒碳/氮含量(g/kg); C_{TFi} 为恢复50 a固沙林地第*i*层土壤对应的总有机碳/全氮含量(g/kg); C_{TQi} 为流沙地第*i*层土壤对应的总有机碳/全氮含量(g/kg)。

不同植被恢复年限土壤中总有机碳、全氮、不同粒径颗粒碳和氮密度以及各土壤颗粒碳氮增量对土壤累积碳和氮总量贡献率的差异显著性采用双因素方差分析和LSD法($p=0.05$)进行多重比较检验分析。土壤有机碳和氮密度的年变化速率以有机碳和氮密度与植被恢复年限的线性回归方程斜率确定。以上试验结果的统计与分析采用SPSS 21.0软件进行,图采用Origin 2023软件绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤碳氮含量演变特征

与流沙地相比,半固定沙地土壤总有机碳和全氮含量均未显著增加,但随固沙林恢复年限延长,林地两层土壤总碳氮含量均持续增加(图1a, 1b)。从恢复20 a到50 a,0—10 cm土层灌木林总有机碳和全氮含量比流沙地分别提高了4.3~10.7倍和2.4~9.4倍,乔木林分别提高了4.8~13.7倍和3.1~11.3倍。对比10—20 cm土壤,灌木和乔木林0—10 cm土层总有机碳和全氮含量高出1.9~3.4倍和2.1~4.2倍。并且乔木林土壤总有机碳和全氮平均含量分别比灌木林的高26.9%和18.5%。在10—20 cm土层中,30 a生固沙林的土壤总有机碳含量远高于20 a生固沙林的总有机碳含量,但与50 a生固沙林的总有机碳含量无显著差异。相较于流沙地,灌木和乔木林地在次表层的土壤总有机碳含量增幅分别为2.6~4.7倍和3.3~4.3倍,全氮含量增幅为1.3~2.5倍和1.4~3.3倍。说明乔木林比灌木林有更显著的促进碳氮累积的效应。

在固沙林恢复过程中,两层土壤砂粒、粉粒和黏粒结合碳氮含量均呈现明显的上升趋势,且上层土壤各颗粒碳氮含量增幅明显高于其下层含量增幅。这与土壤表层总有机碳和全氮含量变化趋势一致(图1c, 1d, 1e, 1f, 1g, 1h)。相较于流沙地,半固定沙地仅10—20 cm土层中的粉粒氮含量升高了0.73倍。

同时,两种固沙林土壤砂粒和粉粒碳氮含量的增幅显著高于黏粒碳氮含量的增幅,3种土壤颗粒碳含量增幅均高于氮含量增幅($p<0.05$)。其中,恢复50 a灌木林比流沙地上层(0—10 cm)土壤砂粒、粉粒和黏粒碳含量分别升高了13.75, 11.37, 5.24倍,次表层(10—20 cm)土壤相应含量则分别升高了5.78, 3.01, 4.27倍。与流沙地相比,50 a生乔木林上层土壤砂粒、粉粒和黏粒碳含量增幅分别达13.73, 24.78, 5.82倍,次表层土壤相应含量增幅分别达5.24, 2.34, 4.59倍。与此相对,50 a生灌木林上层土壤砂粒、粉粒和黏粒氮含量均值为0.24, 0.08, 0.17 g/kg,增幅为10.85, 14.80, 4.73倍,其次表层相应均值为0.05, 0.02, 0.05 g/kg,增幅为1.86, 2.41, 1.11倍;恢复50 a的乔木林上层土壤相应均值分别为0.24, 0.22, 0.15 g/kg,增幅为10.86, 39.53, 4.04倍,其次表层相应均值为0.08, 0.01, 0.08 g/kg,增幅为3.11, 1.41, 2.17倍。可见,0—10 cm土层中,乔木林土壤砂粒和粉粒对碳氮固定作用明显大于灌木林土壤砂粒和粉粒的作用($p<0.05$),两种固沙林上层土壤的黏粒以及10—20 cm土层的3种土壤颗粒对碳氮固定作用没有表现出显著差异。

2.2 固沙林土壤固定碳氮速率

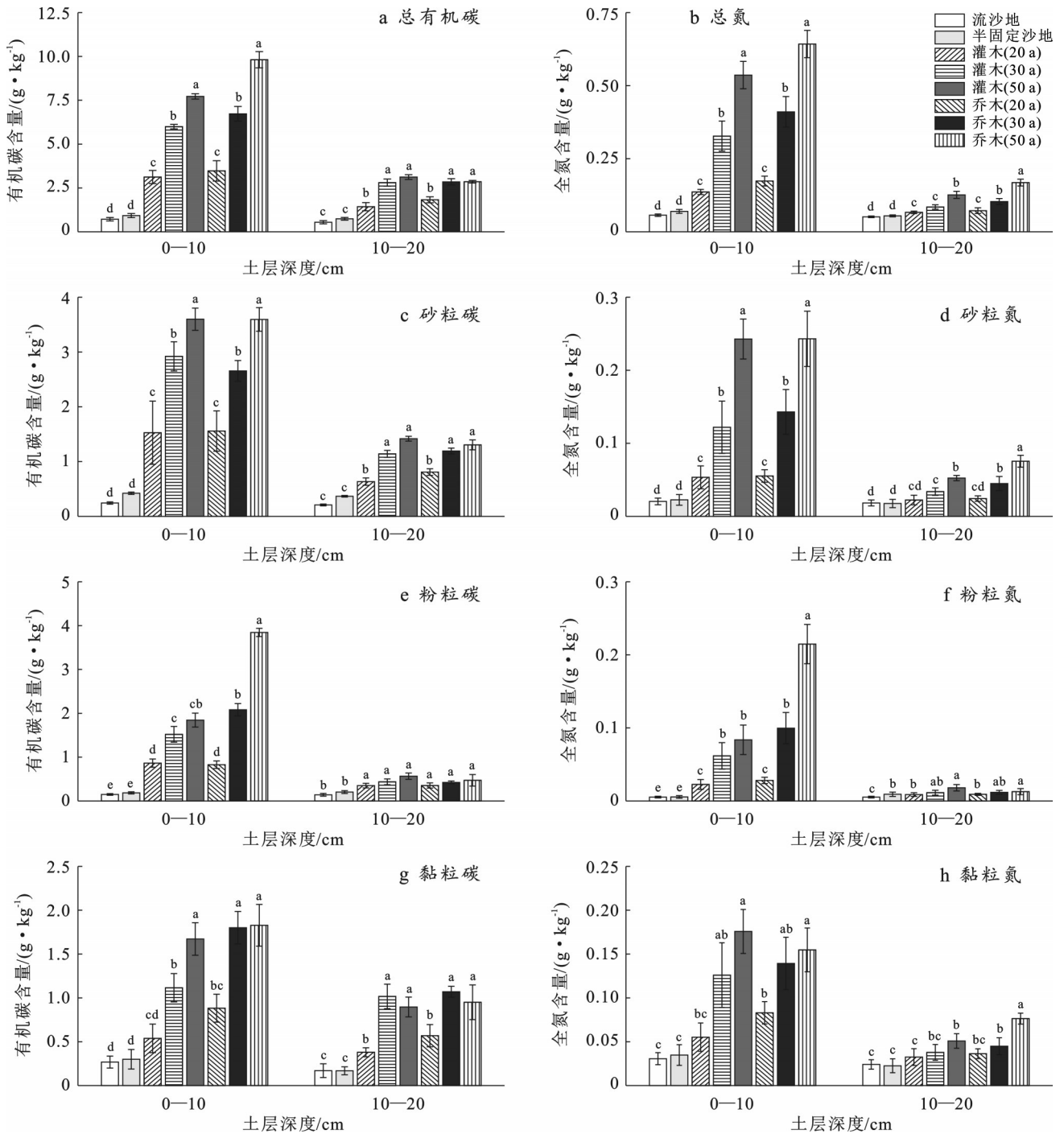
随着植被恢复年限延长,土壤总有机碳、全氮、颗粒碳氮密度均呈线性增长(图2)。灌木林土壤总有机碳、砂粒碳、粉粒碳和黏粒碳的年均增速分别为0.38, 0.14, 0.10, 0.07 [Mg/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)](图2a),而在乔木林对应增速分别为0.35, 0.14, 0.11, 0.10 [Mg/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)](图2b)。同时,灌木林土壤中全氮、砂粒氮、粉粒氮和黏粒氮的年均增速分别为0.017, 0.005, 0.005, 0.004 [Mg/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)](图2c),乔木林中则分别为0.017, 0.006, 0.003, 0.005 [Mg/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)](图2d)。可见两种林地问总有机碳、全氮及颗粒碳氮密度增速差异较小。但两种固沙林土壤矿物颗粒固碳的增速均表现为:砂粒碳>粉粒碳>黏粒碳,而固氮增速差异则不显著。

2.3 土壤不同粒径颗粒对碳氮增量的贡献率

固沙林恢复50 a时,2种林地0—10 cm土层平均42.46%和42.36%的有机碳和全氮增量来自砂粒组分,同时在10—20 cm土层砂粒碳和氮贡献率分别平均达47.43%和43.28%(图3)。灌木林两层土壤中砂粒碳氮的贡献率未产生显著差异,乔木林中0—10 cm土层砂粒碳氮的平均贡献率分别为36.96%和38.18%,明显低于其在10—20 cm土层的贡献率(47.65%和48.70%)。2种固沙林0—10 cm土层粉粒碳氮的贡献率均在16.40%以上,明显高于其在

10—20 cm 土层的贡献率,均值仅为 12.83%,而 0—10 cm 土层黏粒碳氮的贡献率约为 22.33%,明显低于 10—20 cm 土层的贡献率(34.55%)($p < 0.05$)。可

见,土壤砂粒中碳氮对土壤总碳氮增加贡献最大,但黏粒和粉粒质量平均仅占全土重的 8.1%(表 1),却也固定了平均 56.12%的总有机碳和 57.13%的总氮。



注:图中不同小写字母表示同一土层不同恢复年限下差异显著($p < 0.05$)。

图 1 植被恢复过程土壤总有机碳、总氮含量及其在砂粒、粉粒及黏粒中的变化
 Fig.1 Changes in contents of total organic carbon and nitrogen in whole soil and its sand, silt, clay particles during vegetation restoration

2.4 土壤不同粒径颗粒组分 C/N 变化

图 4 表明,50 a 沙漠化逆转植被恢复过程 2 种固沙林同一颗粒组分 C/N 差异不显著,但是 0—20 cm 全

土及其颗粒组分 C/N 均值都呈现先升后降的变化特征,拐点出现在固沙林恢复 20~30 a。不过 2 种固沙林地不同组分 C/N 比值存在显著差异,都以粉粒

组分 C/N 最高,达到了 26.6~39.9;其次是砂粒组分, C/N 比值为 20.9~30.7,与全土 C/N 比值接近;

C/N 最小的是黏粒组分,仅为在 10.7~18.4。表明颗粒矿物结合的有机质组成存在显著差异。

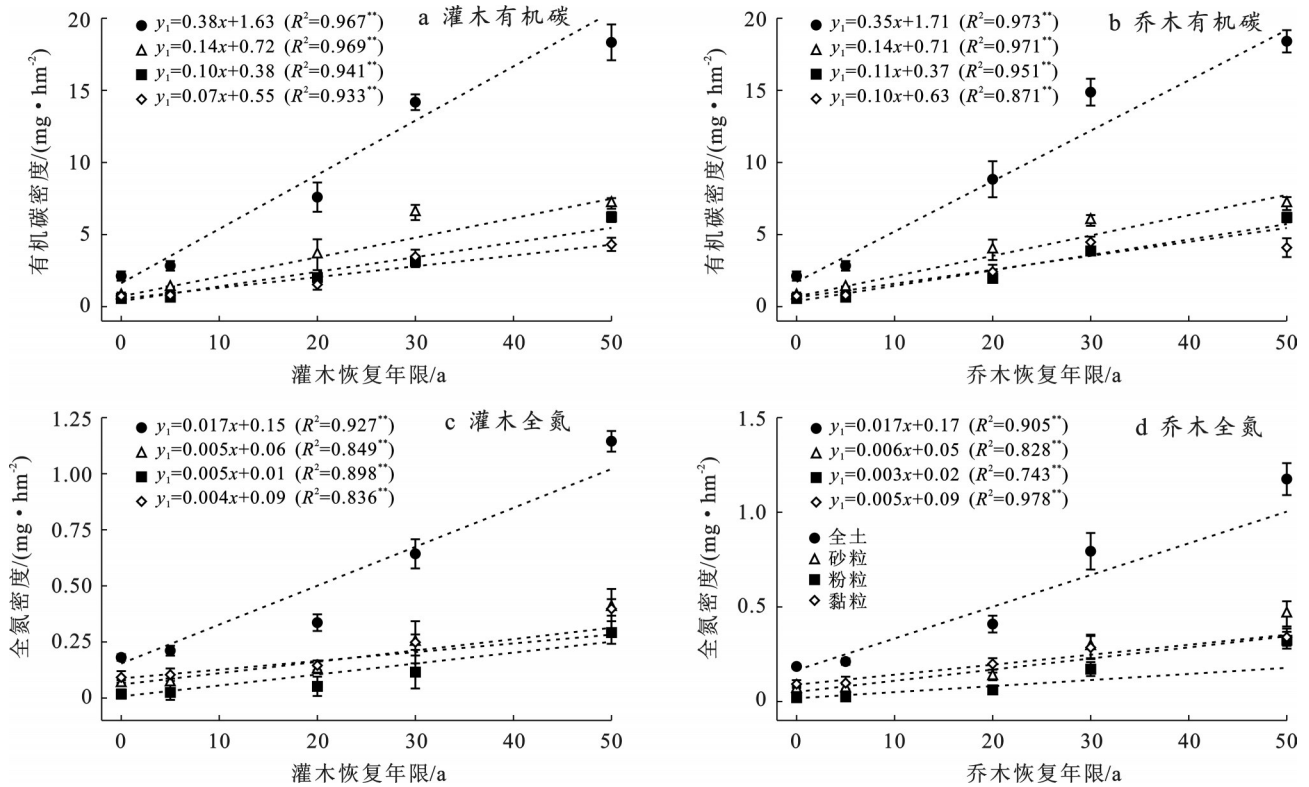


图 2 土壤总有机碳、总氮及颗粒碳氮密度与植被恢复年限的线性回归分析 (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$)

Fig.2 Linear regression analysis between soil organic carbon, total nitrogen and soil particle carbon and nitrogen density, and vegetation restoration age (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$)

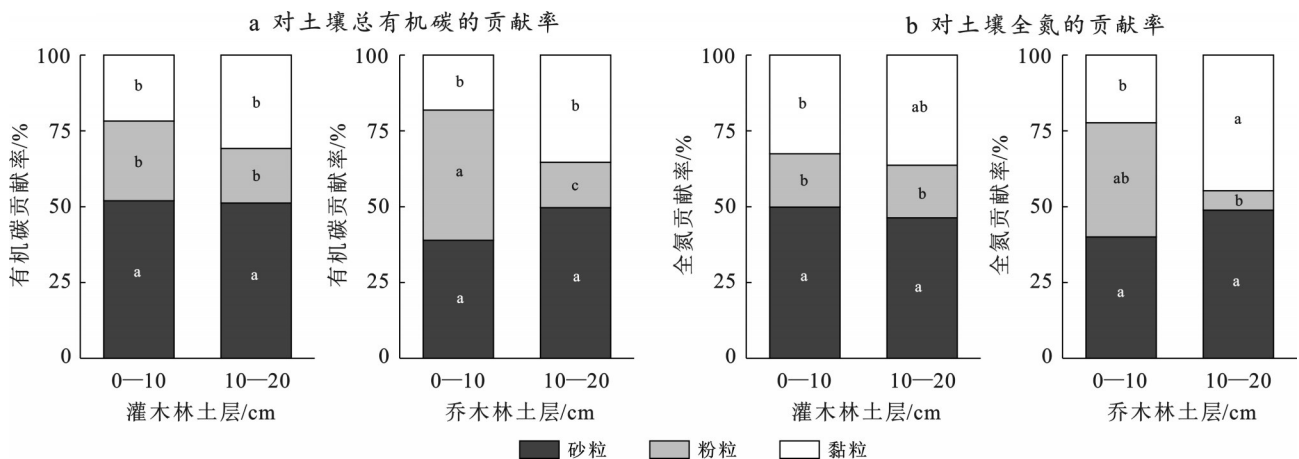


图 3 恢复 50 a 灌木和乔木林土壤颗粒碳氮含量对土壤总有机碳和全氮增量的贡献率

Fig.3 Contribution rates of organic carbon and total nitrogen content in soil particles to increment of total organic carbon and total nitrogen in soil in 50-year shrubberies and arbor forests

3 讨论

毛乌素沙地流沙地治理成为半固定沙地后,土壤全土及其颗粒结合碳氮并未显著增加,主要是治沙时间短,植被覆盖度低,凋落物对表层土输入很少,以及土壤特性未发生改良变化^[17-18]。相比之下,灌木和乔木林土壤有机碳和氮含量显著增加,且随

恢复年限延长而持续提高,这与多数植被恢复提升土壤碳氮库的研究结论一致^[18-20]。恢复 50 a 的固沙林地枯落物量达半固定沙地的 52.4 倍,根系发育改善表层土壤结构,地上/地下生物量增加为微生物活动提供底物^[8,21],促进碳氮投入及浅层养分周转^[22],共同驱动沙漠化逆转和表层碳氮富集^[5]。乔木林碳氮固定效应显著强于灌木林,归因其发达根系与

复杂凋落物体系持续输入有机质,而灌木根系较浅、凋落物覆盖有限^[5,20]。植被恢复对0—10 cm表层土壤碳含量提升尤为显著,主要由于凋落物和根系生物量

随土层加深减少,导致碳氮输入量呈垂直递减^[4-5,21],该结果与马建业等^[5]研究相印证,强调了沙漠化治理植被恢复表层土壤颗粒碳氮固定富集的作用。

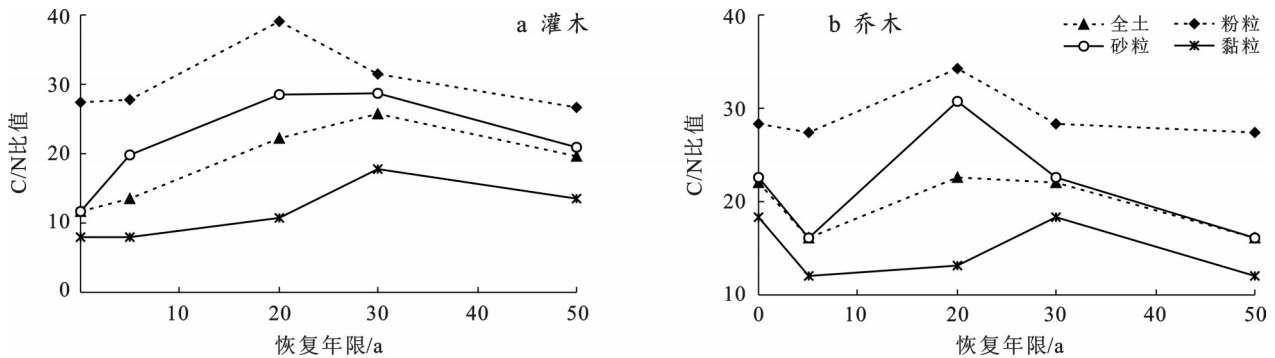


图4 不同恢复年限灌木(a)和乔木(b)固沙林0—20 cm全土及颗粒组分C/N特征

Fig.4 Characteristics of C/N in whole soil and particle fractions of 0—20 cm depth soil in shrub (a) and arbor (b) sand-fixing forests across different restoration ages

土壤矿物颗粒通过物理化学特性的差异驱动碳氮固持的分级效应^[15]。砂粒有机质组分因其周转速率快、结合态有机质活性高(介于新鲜残体与腐殖化物质之间),成为植被恢复初期碳氮积累的关键载体^[5,22]。本研究发现,毛乌素沙地50 a生固沙林0—20 cm土层中,砂粒贡献了42.36%~48.70%的碳氮增量(图3),其高响应性与宁夏荒漠草原研究结论一致^[18],说明砂粒作为“活性养分库”的核心功能^[10-11]。特别是乔木林砂粒贡献率随土层加深显著增加,可能与深层根系分泌物促进有机质物理保护有关。然而,砂粒碳氮的高周转性导致其稳定性较低,易受环境扰动再矿化,但其快速转化特性对植物-土壤碳氮通量具有重要促进作用。

粉粒与黏粒虽占全土质量的8.1%,却固持了56.12%的有机碳和57.13%的全氮,呈现“低量高效”特征,这源于二者高比表面积与强吸附能力^[23-24],其固持效率受植被类型显著调控。乔木林0—10 cm土层粉粒碳、氮含量较流沙地分别增加24.48倍和39.53倍,显著高于灌木林(11.37倍和14.80倍),这与乔木改善土壤结构,促进砂粒向粉粒碳氮迁移密切相关^[4-5]。研究表明,粉粒C/N最高(26.6~39.9),其通过矿物—有机复合体的物理保护作用^[25],优先吸附大分子有机质(如木质素等),形成以芳香族化合物为主的稳定碳库,这对干旱区土壤碳库的长期固存具有重要意义;黏粒C/N最低(10.7~18.4),其凭借巨大的比表面积和表面电荷特性^[26],富集微生物代谢产物、可溶性有机氮等富氮物质,显著提升土壤氮素持留能力^[19,23],这对缓解干旱区氮素淋失具有关键作用。二者分别主导长期碳氮固持,粉粒作为“碳蓄积器”维系长期碳稳定性,黏粒作为“氮调节

器”维持养分可利用性。这种协同机制不仅增强土壤碳汇功能,还通过改善土壤团聚体结构提升系统抗干扰能力。探究粉粒、黏粒组分对碳氮固定的调控机制,可为优化植被配置、提升干旱区土壤生态服务功能提供理论依据,特别是在增强土壤碳封存潜力、减缓氮素流失方面具有重要应用价值^[27-28]。

固沙林恢复过程中,全土及颗粒组分C/N呈现“先升后降”的阶段性演变,拐点出现在20~30 a。恢复初期(<20 a)凋落物以高C/N木质纤维素为主;后期(>30 a)微生物分解增强、氮矿化加速,导致C/N下降^[19,22]。尽管乔木林与灌木林全土C/N趋势相似,但乔木林粉粒C/N更高,表明其更有利于高C/N有机质的积累。结合毛乌素沙地碳氮库快速周转特性^[20,23],固沙林植被恢复通过增强粉粒固持能力,显著延长碳氮的土壤驻留时间,成为沙漠化土地逆转恢复土壤固定碳氮的重要机制之一。

4 结论

(1) 毛乌素沙地由流沙转为半固定沙地初期,植被覆盖低,碳氮积累有限。灌木和乔木林生物量和凋落物输入增加,显著提升了土壤碳氮库,且随恢复年限延长持续增强。

(2) 由于植物碳氮源输入与微生物活动,土壤碳氮增量垂直递减,0—10 cm表层土壤提升最显著。乔木林因根系发达、凋落物体系复杂,碳氮固定效应高于灌木林。

(3) 砂粒贡献42.36%~48.70%碳氮增量,但稳定性低。粉黏粒仅占全土8.1%,却固持56%以上碳氮,显示“低量高效”特征:粉粒主导高C/N(26.6~39.9)木质素长期固存,黏粒低C/N比(10.7~18.4),

富集富氮代谢产物。

(4) 固沙林恢复初期木质纤维素的输入以及后期微生物分解的增强,使全土及颗粒C/N比先升后降,拐点在20~30 a。固沙林植被恢复通过增强黏粉粒对碳氮的固持,延长了碳氮在土壤中的驻留时间,成为沙漠化土地逆转恢复土壤累积碳氮的重要机制之一。

参考文献 (References)

- [1] 屠志方,李梦先,孙涛.第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J].林业资源管理,2016(1):1-5.
Tu Zhifang, Li Mengxian, Sun Tao. The status and trend analysis of desertification and sandification [J]. Forest Resources Management, 2016(1):1-5.
- [2] Zhang Qiumeng, Jia Baoquan, Li Tong, et al. Research on the sustainability of "greening" process in the Mu Us sandy land based on the spatiotemporal stability of ecological land [J]. PLoS One, 2024,19(2):e0292469.
- [3] 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 Lei, Liu Yulin, Li Jiwei, 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.
- [4] 陈闻,杨晶晶,袁媛,等.毛乌素沙地人工固沙植被的土壤养分效应[J].干旱区研究,2020,37(6):1447-1456.
Chen Wen, Yang Jingjing, Yuan Yuan, et al. Effects of artificial sand-fixing vegetation on soil nutrients in Mu Us sandy land [J]. Arid Zone Research, 2020,37(6):1447-1456.
- [5] 马建业,佟小刚,李占斌,等.毛乌素沙地沙漠化逆转过程土壤颗粒固碳效应[J].应用生态学报,2016,27(11):3487-3494.
Ma Jianye, Tong Xiaogang, Li Zhanbin, et al. Carbon sequestration in soil particle-sized fractions during reversion of desertification at Mu Us sand land [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(11):3487-3494.
- [6] 武天云,Jeff J. Schoenau,李凤民,等.土壤有机质概念和分组技术研究进展[J].应用生态学报,2004,15(4):717-722.
Wu Tianyun, Schoenau J, Li Fengmin, et al. Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004,15(4):717-722.
- [7] 张跃进,李沁谊,王好才,等.中国西南喀斯特地区植被自然恢复演替典型群落土壤碳氮储量特征[J].林业科学,2023,59(7):45-53.
Zhang Yuejin, Li Qinyi, Wang Haocai, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen storage in typical communities of natural restoration and succession of vegetation in karst areas of southwest China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023,59(7):45-53.
- [8] 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.
- [9] 谢莉,宋乃平,孟晨,等.不同封育年限对宁夏荒漠草原土壤粒径及碳氮储量的影响[J].草业学报,2020,29(2):1-10.
Xie Li, Song Naiping, Meng Chen, et al. Time course of changes in soil particle size and carbon and nitrogen reserves after fencing Ningxia desert steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020,29(2):1-10.
- [10] 魏艳春,马天娥,魏孝荣,等.黄土高原旱地不同种植系统对土壤水稳性团聚体及碳氮分布的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(2):305-313.
Wei Yanchun, Ma Tiane, Wei Xiaorong, et al. Effects of cropping systems on distribution of water-stable aggregates and organic carbon and nitrogen in soils in semiarid farmland of the Loess Plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016,35(2):305-313.
- [11] 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.
Qiu Xunxun, Cao Guangchao, Cao Shengkui, 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.
- [12] 闫峰,吴波.近40 a毛乌素沙地荒漠化过程研究[J].干旱区地理,2013,36(6):987-996.
Yan Feng, Wu Bo. Desertification progress in Mu Us sandy land over the past 40 years [J]. Arid Land Geography, 2013,36(6):987-996.
- [13] 熊好琴,段金跃,王妍,等.围栏禁牧对毛乌素沙地土壤理化特征的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(3):152-157.
Xiong Haoqin, Duan Jinyue, Wang Yan, et al. Effects of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded Mu Us sandy grassland, Inner Mongolia, northern China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012,26(3):152-157.
- [14] Anderson D W, Saggar S, Bettany J R, et al. Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: I. the nature and distribution of forms of carbon,

- nitrogen, and sulfur [J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(4):767-772.
- [15] 佟小刚, 韩新辉, 李娇, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤颗粒结合态碳库分异特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21):170-176.
- Tong Xiaogang, Han Xinhui, Li Jiao, et al. Variances of carbon storage in soil particle-sized fractions following conversion of cropland to forest in loess hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(21):170-176.
- [16] Sainju U M. Carbon and nitrogen pools in soil aggregates separated by dry and wet sieving methods [J]. Soil Science, 2006, 171(12):937-949.
- [17] Zhang Chao, Liu Guobin, Xue Sha, et al. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China [J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 54:16-24.
- [18] 王星, 于双, 许冬梅, 等. 不同恢复措施对退化荒漠草原土壤碳氮及其组分特征的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(1):26-35.
- Wang Xing, Yu Shuang, Xu Dongmei, et al. Effects of different restorative measures on soil carbon and nitrogen and their component fractions in a degraded desert steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(1):26-35.
- [19] 张恒宇, 孙树臣, 吴元芝, 等. 黄土高原不同植被密度条件下土壤水、碳、氮分布特征[J]. 生态环境学报, 2022, 31(5):875-884.
- Zhang Hengyu, Sun Shuchen, Wu Yuanzhi, et al. Distribution characteristics of soil water, carbon and nitrogen under different vegetation densities in Loess Plateau [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(5):875-884.
- [20] 哈斯尔, 郑嗣蕊, 涂伊南, 等. 陕北固沙林恢复过程中土壤碳氮组分库特征与固存效应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4):835-843.
- Ha Sier, Zheng Sirui, Tu Yinan, et al. Sequestration efficiency and component characteristics of soil carbon and nitrogen contents during restoration of sand-fixing forests in north Shaanxi Province [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4):835-843.
- [21] 陶佳, 雷泽勇, 王国晨, 等. 沙地樟子松人工林叶凋落物的分解与养分释放[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(12):131-139.
- Tao Jia, Lei Zeyong, Wang Guochen, et al. Decomposition and nutrient release of leaf litter in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(12):131-139.
- [22] 李婷, 吕一河, 任艳姣, 等. 黄土高原植被恢复成效及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(23):8593-8605.
- Li Ting, Lü Yihe, Ren Yanjiao, et al. Gauging the effectiveness of vegetation restoration and the influence factors in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23):8593-8605.
- [23] 潘英杰, 何志瑞, 刘玉林, 等. 黄土高原天然次生林植被演替过程中土壤团聚体有机碳动态变化[J]. 生态学报, 2021, 41(13):5195-5203.
- Pan Yingjie, He Zhirui, Liu Yulin, et al. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon during secondary forest succession in the Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13):5195-5203.
- [24] Chen Yanlong, Zhang Yuhan, Xu Risheng, et al. Short-term responses of soil organic carbon and chemical composition of particle-associated organic carbon to anaerobic soil disinfestation in degraded greenhouse soils [J]. Land Degradation & Development, 2023, 34(14):4428-4440.
- [25] 王高起, 袁丹, 吴萍, 等. 深层土壤有机碳储量、稳定性以及对人类活动响应的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(3):435-448.
- Wang Gaoqi, Yuan Dan, Wu Ping, et al. Research advances on deep soil organic carbon storage, stability and responses to human activities [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(3):435-448.
- [26] 李娅丽, 何国兴, 柳小妮, 等. 陇中黄土高原温性荒漠不同草地型土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2024, 45(9):5431-5440.
- Li Yali, He Guoxing, Liu Xiaoni, et al. Distribution characteristics of soil aggregate stability and organic carbon of different grassland types in the temperate desert of Longzhong Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2024, 45(9):5431-5440.
- [27] 唐光木, 张云舒, 徐万里, 等. 长期耕作对新疆绿洲农田土壤颗粒中有机碳和全氮含量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(24):5039-5050.
- Tang Guangmu, Zhang Yunshu, Xu Wanli, et al. Effects of long-term cultivation on contents of organic carbon and total nitrogen in soil particulate fraction in oasis farmland of Xinjiang [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(24):5039-5050.
- [28] 安芳娇, 苏永中, 牛子儒, 等. 干旱区流动沙地建植梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林后细粒物质输入对土壤碳氮积累的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5):147-156.
- An Fangjiao, Su Yongzhong, Niu Ziru, et al. Effects of fine particulate matter input on soil carbon and nitrogen accumulation after establishment of *Haloxylon ammodendron* plantations on shifting sand dunes in arid area [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5):147-156.