

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.04.006

CSTR:32310.14.stbxb.2025.04.006

刘玥婷,郭雯娴,廖东亮,等.毛乌素沙地固沙林恢复土壤矿物颗粒结合态无机碳固存效应[J].水土保持学报,2025,39(4):31-39,47.

LIU Yueting, GUO Wenxian, LIAO Dongliang, et al. Restoration of soil mineral particle-bound inorganic carbon sequestration effect by sand-fixing forest in Mu Us sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):31-38, 47.

毛乌素沙地固沙林恢复土壤矿物颗粒 结合态无机碳固存效应

刘玥婷¹, 郭雯娴¹, 廖东亮¹, 谢 贇², 马艳霞¹, 刘 洋³, 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.西北农林科技大学
资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.大唐热电有限公司, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为揭示沙漠化土地植被重建过程中土壤无机碳固存效应及其环境影响机制。[方法] 于榆林毛乌素沙地红石峡试验林场选择从半固定沙地(0 a)到植被恢复24~56 a的灌木和乔木固沙林地, 量化0~10、10~20 cm土层全土总无机碳、水溶性无机碳及砂粒、粉粒、黏粒结合态无机碳组分的演变特征, 同时解析无机碳组分库演变与植被、土壤理化性质因子的作用关系。[结果] 随着固沙林植被恢复时间延长, 2种固沙林土壤总无机碳及其组分质量分数均呈增长趋势, 2个土层中均以粉粒结合态无机碳累积速率较高, 在灌木和乔木林地0~20 cm土层固碳速率分别达0.13、0.17 g/(m²·a), 分别是水溶性无机碳及砂粒、黏粒结合态无机碳累积速率的5.0、1.2、7.0倍。植被恢复56 a时, 乔木和灌木林地0~10 cm土层土壤总无机碳质量分数比半固定地分别增加12.4、17.9倍, 增量为10~20 cm土层的1.4~1.8倍。同时, 不同土壤组分中无机碳占比表现为粉粒碳>砂粒碳>水溶性碳>黏粒碳。进一步RDA和相关性分析表明, 枯落物质量、土壤体积质量和Ca²⁺浓度变化是促进土壤无机碳及其组分固存的关键因素。[结论] 固沙林恢复环境因子改善能显著促进总无机碳及矿物颗粒结合态无机碳的增加, 尤其以粉粒吸附结合为无机碳主要固定形式, 可能是沙漠化逆转土壤累积无机碳的重要机制之一。

关键词: 土壤无机碳; 土壤颗粒; 植被重建; 固碳

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0031-08

Restoration of Soil Mineral Particle-Bound Inorganic Carbon Sequestration Effect by Sand-Fixing Forest in Mu Us Sandy Land

LIU Yueting¹, GUO Wenxian¹, LIAO Dongliang¹, XIE Yun², MA Yanxia¹, LIU Yang³, TONG Xiaogang¹

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Datang Yangling Thermal Power Company Limited, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the soil inorganic carbon sequestration effects and the environmental impact mechanisms during the vegetation restoration process in desertified lands. [Methods] Shrub and tree sand-fixing forests from semi-fixed sandy land (0 a) to vegetation restoration of 24–56 a in the Hongshixia experimental forest farm of Yulin Mu Us Sandy Land were selected. The evolution characteristics of total inorganic carbon, water-soluble inorganic carbon, and inorganic carbon components in the 0–10 and 10–20 cm soil layers, as well as sand, silt and clay-bound inorganic carbon components, were quantified. Meanwhile, the relationships between the evolution of inorganic carbon component pools and vegetation and soil physicochemical properties were analyzed. [Results] As the restoration time of sand fixation forest prolonged, the contents of total

收稿日期: 2024-11-04

修回日期: 2025-02-28

录用日期: 2025-03-31

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-16

资助项目: 陕西省自然科学基金项目(2023-JC-ZD-10); 大唐杨凌热电有限公司光伏治沙科技项目(2023-ZH-054); 国家自然科学基金面上项目(42477324)

第一作者: 刘玥婷(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事植被修复研究。E-mail: liuyueting@nwafu.edu.cn

通信作者: 佟小刚(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事林草生态工程研究。E-mail: xiaogangtong@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

inorganic carbon and its components in the soil of both types of sand fixation forest showed an increasing trend. Moreover, in both soil layers, the accumulation rates of mineral particle-bound inorganic carbon were relatively high. In the 0–20 cm soil layer of shrub land and arbor land, the carbon fixation rate reached 0.13 and 0.17 g/(m²·a), which were on average 5.0, 1.2 and 7.0 times higher than the accumulation rates of water-soluble inorganic carbon and sand particles and clay particles, respectively. When the vegetation was restored for 56 years, total inorganic carbon contents in the 0–10 cm soil layer of the arbor land and shrub land were 12.4 and 17.9 times greater than that of semi-fixed land, with increments 1.4–1.8 times those of the 10–20 cm soil layer. Meanwhile, the proportions of inorganic carbon in different soil components were ranked as silt-bound carbon > sand-bound carbon > water-soluble carbon > clay-bound carbon. Further RDA and correlation analyses indicated that changes in litter mass, soil bulk density, and Ca²⁺ concentration were key factors promoting the sequestration of soil inorganic carbon and its components. [Conclusion] The improvement of environmental factors during sand-fixing forest restoration can significantly promote the increase of total inorganic carbon and mineral particle-bound inorganic carbon, with silt-bound carbon being the primary form of inorganic carbon fixation. This may be one of the important mechanisms for reversing accumulation of inorganic carbon in the soil during desertification.

Keywords: soil inorganic carbon; soil particles; vegetation restoration; carbon sequestration

Received: 2024-11-04

Revised: 2025-02-28

Accepted: 2025-03-31

Online(www.cnki.net): 2025-05-16

土壤无机碳(soil inorganic carbon, SIC)储量约占全球陆地土壤总碳库的 38%^[1],而广袤的干旱荒漠区土壤可能是潜在的巨大 SIC 碳汇^[2]。已有研究^[3]表明, SIC 在干旱地区以碳酸盐形式积累,并且碳酸盐是由土壤从大气中吸收 CO₂而形成^[4]。由于无机碳循环慢,不直接参与生物途径转化,次生积累效率低,多数研究集中于土壤有机碳的累积和固存机制,对于 SIC 知之甚少。目前,已有研究^[5]表明,土壤矿物颗粒在土壤有机碳累积中发挥很大作用。蔡岸冬等^[6]研究表明,在砂粒(53~2 000 μm)中,有机碳均为活性有机碳,二者间的键合关系并不密切;而粉黏粒(<53 μm)的有机碳为惰性矿物键合有机碳,不容易被微生物降解或矿化^[7],是土壤有机碳固持的重要组成部分。有机碳与无机碳的耦合变化已引起广泛关注,而土壤中粉黏粒对无机碳形成也可能存在潜在促进作用。植被恢复过程中促进土壤碳积累和转化,土壤碳的积累与转化不仅影响有机碳的动态,同时对无机碳的形成与分布产生重要影响。黄土丘陵在退耕恢复后 SIC 显著累积^[8],毛乌素沙区无机碳质量分数随樟子松栽植年限增加而逐渐增大^[9]。造林过程中土壤有机碳汇的变化已经广泛关注,但是不同组分中无机碳如何变化仍不明确。同时,无机碳累积受到荒漠地区环境因子及植被因子的影响,通过改变土壤理化因子、植物种类、微生物特性进而影响 SIC 的转化和积累^[10]。LI 等^[11]研究发现,植被重建促进土壤无机碳累积,而环境因素在其中也发挥着重要作用。土壤无机碳储量与 CO₂分压、降雨量等气候条件、成土母质和土壤钙镁离子关系

密切^[12-13]。因此,系统研究干旱地区植被恢复过程中土壤无机碳库的变化过程,对于深入评估和理解荒漠生态系统中无机碳库的累积机制具有重要意义。

当前,国内外学者^[14]主要聚焦于植被恢复过程中有机碳的动态变化研究,而对无机碳库变化的关注相对较少。在典型的生态脆弱区—毛乌素沙地,一系列生态恢复与植被建设工程相继实施,显著增加沙漠区域的碳储量,并大幅改善生态环境^[15]。因此,以毛乌素地区不同植被恢复年限的固沙林地为研究对象,探究植被恢复过程中土壤矿物颗粒固存无机碳库的效应与环境影响机制,为阐明沙漠化逆转植被恢复生态系统土壤无机碳的固定机制及碳汇计量提供科学依据。

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试验林场,地处毛乌素沙地东缘(38°19′29″N, 109°43′82″E)。该区域属暖温带半干旱气候区,年平均气温约 8.5 °C,年降水量 250~400 mm 且季节分配不均,年太阳辐射总量约 552.6 kJ/cm²,干旱指数 1.48,无霜期 160 d。地质基质以风沙土为主,具有明显的土壤贫瘠特征,表现为有机质匮乏、抗侵蚀性弱等典型脆弱生态属性。植被属荒漠草原—草原—森林草原的过渡类型,为我国典型生态环境脆弱区。自 20 世纪 50 年代后期,该地区作为防沙治沙试验区,进行人工固沙植被的引种和筛选试验。通过大面积的飞播造林种草,围栏封育、人工造林种草等防沙治沙措施,该区域的植被得以明显恢复,形

成从半固定到不同恢复年限的乔、灌、草植被恢复模式。人工林系统主要包括以樟子松(*Pinus sylvestris*)为优势种的乔木群落,花棒(*Hedysarum scoparium*)与踏郎(*Caragana korshinskii*)构成的灌木群落,以及由狗尾草(*Setaria viridis*)、沙鞭(*Psammochloa villosa*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)等组成的草本层。经过长期治理,该区域已构建起具有显著生态恢复效应的沙地植被体系,为开展不同恢复年限固沙林生态效应研究提供理想的试验样地^[16]。

1.2 样地选择与采样

基于林场造林种草的历史调研,于2023年6月以空间代替时间的方法,选择恢复年限为24、44、56 a的灌木和乔木固沙林地,并以半固定沙地作为恢复0 a对照。其中灌木林以花棒和柠条为主,乔木林则为樟子松纯林地。每个恢复年限林地选择立地条件基本一致的3个样地,均设置20 m×20 m的标准采样区。在每个采样区内随机设置3个1 m×1 m的样方,采用样方法进行草本物种名称、植被覆盖度、种植密度的调查,同时进行表层凋落物收集。土样采集时在标准区内按照“S”形选12点,以直径5 cm土钻钻取0~10、10~20 cm土层土样,将各层取样点土样混合均匀后作为小区待测样品,经自然风干后过2 mm筛备用。同时使用环刀法测定各土层土壤体积质量,以计算土壤无机碳密度。

1.3 不同大小矿物颗粒结合碳组分的分离

采用离心法分离得到不同大小土壤颗粒^[17],基

于ANDERSON等^[18]方法的基础上略作修改。采用标准土壤颗粒分级方法,称取20 g风干土样置于250 mL烧杯中,加入100 mL去离子水后在稳定水流条件下振荡过250 μm筛。随后将筛下物转移至超声波清洗槽中进行30 min超声分散处理,以提高颗粒分散效果。分散后的悬浮液经53 μm筛反复冲洗,直至流出液澄清,此时筛上物即为53~2 000 μm的砂粒组分及未完全分解的有机残体。根据Stokes沉降定律计算不同粒径颗粒的沉降时间,使用水平转子离心机通过调节转速和离心时长分离出2~53 μm的粉粒组分。对于<2 μm的黏粒组分,采用0.2 mol/L CaCl₂溶液絮凝后再进行离心富集。最后将分离得到的各粒级组分转移至铝盒中,先经水浴蒸发去除水分,再置于60 °C烘箱中干燥12 h,完成整个分级过程,粒径分级标准参照USDA土壤分类体系^[18]。

1.4 土壤指标测定

土壤无机碳(SIC)和不同矿物颗粒结合无机碳采用元素分析仪测定。水溶性无机碳(dissolved organic carbon, DIC)和有机碳(soil organic carbon, SOC)采用TOC仪进行测定。土壤pH采用pH计(PHSJ-4 F的雷磁pH计)测定。水杨酸法^[19]测定土壤全氮(total nitrogen, TN)质量分数。土壤速效氮(available nitrogen, AN)采用碱性扩散法^[20]测定。土壤钙离子和镁离子采用EDTA(乙二胺四乙酸)滴定法^[21]测定。不同样地理化性质见表1。

表1 样地基本特征及土壤理化性质

Table 1 Characteristics of the sampling sites and physicochemical properties of the soil

| 样地 | 海拔/ m | 经度 (E) | 纬度 (N) | 种植密 度/ (hm ⁻²) | 植物 覆盖 度/% | 体积 质量/ (g·cm ⁻³) | pH | 枯落物 密度/ (g·cm ⁻³) | Ca ²⁺ / (mg·kg ⁻¹) | Mg ²⁺ / (mg·kg ⁻¹) | SOC/ (g·kg ⁻¹) | TN/ (g·kg ⁻¹) | AN/ (mg·kg ⁻¹) |
|-------------------|----------|-----------|-----------|----------------------------------|-----------------|------------------------------------|--------|-------------------------------------|--|--|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| SF _{0a} | 1 103 | 109°44' | 38°11' | — | — | 1.68ab | 8.11a | 15d | 16.11c | 4.12b | 1.36c | 52.89c | 2.19c |
| SH _{24a} | 1 189 | 109°38' | 38°16' | 2 500a | 80a | 1.67ab | 8.05a | 307c | 34.98b | 4.47b | 3.51b | 96.24c | 2.63c |
| SH _{44a} | 1 093 | 109°42' | 38°19' | 1 000b | 88a | 1.63ab | 7.92ab | 465b | 26.88b | 4.60b | 3.96b | 193.29b | 8.98b |
| SH _{56a} | 1 118 | 109°43' | 38°20' | 900b | 90a | 1.55b | 7.71b | 566b | 43.77a | 5.94a | 4.20a | 374.73a | 9.68a |
| AR _{24a} | 1 077 | 109°42' | 38°21' | 1 075b | 75a | 1.67ab | 8.08a | 538b | 30.38b | 4.31b | 4.33a | 115.02c | 6.12b |
| AR _{44a} | 1 138 | 109°42' | 38°19' | 1 925a | 78a | 1.57b | 8.01a | 884a | 48.04a | 4.41b | 4.29a | 251.46b | 6.86b |
| AR _{56a} | 1 112 | 109°43' | 38°20' | 1 350ab | 85a | 1.50b | 8.00a | 1 006a | 57.72a | 5.53a | 4.14a | 392.51a | 7.85b |

注:SF、SH、AR分别为半固定沙地、灌木林地、乔木林地,下标为恢复年限;同列不同小写字母表示不同林间差异显著($p < 0.05$)。下同。

土壤无机碳密度指单位面积单位厚度土层中无机碳的质量,不同土层土壤总无机碳及其组分碳密度^[22]的计算公式为:

$$SICD_i = \sum_{i=1}^n \frac{D_i \times BD_i \times SIC_i}{10}$$

式中:SICD_i为第*i*层土壤无机碳密度,g/m²;SIC_i为第*i*

1.5 数据处理

运用单因素方差分析(ANOVA)对不同恢复年限固沙林地的无机碳及不同大小颗粒无机碳质量分数进行方差分析($p < 0.05$)。采用LSD法对不同恢

复年限间的土壤无机碳储量差异显著性进行检验分析($p < 0.05$)。运用线性回归模型分析全土及各粒径无机碳储量与恢复年限的关系,并利用 Canoco 5.0 软件进行土壤无机碳与理化性质的冗余分析(redundancy analysis, RDA)。采用 Correlation Plot 插件进行 SIC 与理化性质的相关性分析。所有数据采用 Office Excel 2007、SPSS 19.0 软件分析处理,采用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 土壤颗粒质量比例与碳浓度变化特征

植被恢复 56 a 0~10 cm 土层砂粒质量比例与半固定沙地相比降低,黏粉粒质量比例之和上升至 17.03%(表 2),植被恢复对土壤不同大小颗粒的变化影响显著。植被恢复显著增加颗粒无机碳浓度。恢复过程中灌木林地 0~10 cm 土层黏粒碳、粉粒碳浓度分别为半固定沙地的 1.67~3.16、38.4~123.1 倍,

乔木林地 0~10 cm 黏粒碳、粉粒碳分别为半固定沙地的 2.4~4.6、25.5~154.8 倍。分析结果表明,土壤总无机碳的回收效率较高(98.4%~99.1%),分组过程导致的碳损失平均仅为 3.2%。与半固定沙地相比,水溶性无机碳浓度在植被恢复过程中发生显著变化,但随植被恢复年限增加其无显著变化。

2.2 土壤总无机碳质量分数变化特征

不同植被恢复年限下不同土层无机碳质量分数与半固定沙地相比均显著增加(表 2)。灌木林地 0~10、10~20 cm 土层无机碳质量分数相差不大,在植被恢复 56 a 时达到最大值,与半固定沙地相比,恢复过程中无机碳质量分数增加至 3.1~12.2、5.2~18.2 倍。乔木林地在植被恢复 56 a 时 0~10 cm 土层无机碳质量分数高于 10~20 cm 土层,恢复过程中不同土层无机碳质量分数与半固定沙地相比分别增加至 3.0~17.8、5.6~32.7 倍。总体可见,在植被恢复年限较高的情况下,乔木林地固碳能力较强。

表 2 植被恢复过程中土壤颗粒在土壤中的百分比与碳浓度特征

Table 2 The proportions of soil particles in the soil and their carbon concentrations during the process of vegetation restoration

| 样地 | 土层深度/cm | 土壤颗粒质量分数/% | | | 颗粒 SIC 浓度/(mg·kg ⁻¹) | | | | 全土 SIC 质量分数/(mg·kg ⁻¹) | |
|-------------------|---------|------------|--------|-------|----------------------------------|-----------|-----------|--------|------------------------------------|--------|
| | | 砂粒 | 粉粒 | 黏粒 | 砂粒碳 | 粉粒碳 | 黏粒碳 | 水溶性碳 | 实测总无机碳 | 回收无机碳 |
| SF _{0a} | 0~10 | 95.46a | 1.28b | 1.97a | 23.81d | 18.85c | 239.94c | 29.65b | 47.35e | 46.35 |
| SH _{24a} | | 92.08a | 4.48b | 2.61a | 41.31c | 724.55b | 407.66c | 63.70a | 148.00d | 141.85 |
| SH _{44a} | | 89.56a | 6.63b | 2.94a | 151.47b | 707.50b | 390.00c | 77.19a | 271.19c | 269.19 |
| SH _{56a} | | 82.03a | 12.97a | 3.41a | 245.30a | 2 282.00a | 760.00b | 52.91a | 576.04b | 576.04 |
| AR _{24a} | | 91.25a | 4.79b | 3.15a | 33.67c | 480.30b | 580.00b | 71.42a | 143.42d | 133.42 |
| AR _{44a} | | 85.07a | 10.20a | 3.57a | 79.30c | 857.00b | 610.00b | 60.26a | 236.93c | 236.93 |
| AR _{56a} | | 81.60a | 13.84a | 3.84a | 335.29a | 2 918.93a | 1 111.20a | 49.81a | 840.65a | 830.65 |
| SF _{0a} | 10~20 | 95.84a | 0.78a | 1.47a | 9.09d | 17.39e | 68.43d | 8.31c | 18.99e | 17.99 |
| SH _{24a} | | 94.29a | 2.48a | 2.23a | 45.67c | 692.93d | 424.60c | 23.38b | 94.05d | 90.05 |
| SH _{44a} | | 93.44a | 2.36a | 2.42a | 89.20c | 1 551.67c | 636.12c | 32.73b | 169.07c | 165.07 |
| SH _{56a} | | 92.99a | 3.37a | 3.22a | 159.77b | 3 528.33b | 1 047.00b | 35.36b | 327.50b | 321.50 |
| AR _{24a} | | 94.64a | 2.47a | 2.44a | 34.90c | 925.00c | 437.56c | 34.77b | 101.35c | 97.35 |
| AR _{44a} | | 93.78a | 2.77a | 2.78a | 66.80c | 843.33c | 664.24c | 33.90b | 140.55c | 137.55 |
| AR _{56a} | | 93.57a | 2.21a | 3.06a | 285.20a | 8 143.43a | 2 333.51a | 47.11a | 589.67a | 586.18 |

注:同一列不同字母表示不同土层在不同恢复年限颗粒质量分数或浓度差异显著($p < 0.05$)。

2.3 土壤颗粒固存无机碳质量分数变化特征

植被恢复过程中土壤不同颗粒结合的无机碳质量分数增幅表现出显著差异(图 1)。半固定沙地砂粒无机碳质量分数远高于粉粒、黏粒无机碳。0~10 cm 土层,灌木和乔木砂粒无机碳在植被恢复 56 a 分别为 201.2、273.6 mg/kg,与半固定沙地相比增幅较大,10~20 cm 土层累积量规律性与 0~10 cm 土层相似。粉粒、黏粒无机碳及水溶性无机碳均随植被恢复年限增加呈增长趋势。粉粒碳在 0~10 cm 表层增幅较高,分别在植被恢复 56 a 时为半固定沙地的 238.7(灌木)、325.8 倍(乔木),质量分数分别为 296.0、403.9 mg/kg。黏粒无机碳和水溶性无机碳在不同植被恢复年限下增

幅相对较小。0~10 cm 土层,黏粒无机碳在植被恢复 56 a 时为 25.90(灌木)、42.67 mg/kg(乔木),分别为半固定沙地的 5.48、10.66 倍。水溶性无机碳质量分数在植被恢复 56 a 时分别为 52.91(灌木)、110.4 mg/kg(乔木),但灌木林地植被恢复 44 a 时水溶性无机碳达到最大值 75.19 mg/kg。与表层相比,10~20 cm 土层粉粒碳、黏粒碳和水溶性无机碳虽在植被恢复过程中显著增加,但固定无机碳质量分数较低。对于不同颗粒无机碳来说,灌木及乔木林地的恢复过程显著增加砂砾及粉粒无机碳的质量分数,而黏粒无机碳及水溶性无机碳质量分数随植被恢复年限在 2 种不同林地下增长趋势较慢。

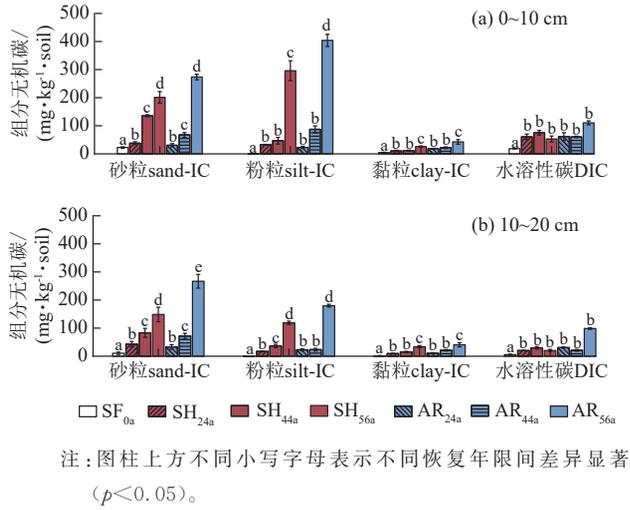


图 1 颗粒无机碳质量分数变化特征
Fig.1 Characteristics of variation in mineral particle-bound inorganic carbon content

2.4 土壤颗粒固定无机碳速率与分配比率

植被恢复过程中不同固沙林地组分碳密度和总碳密度呈线性增长趋势(图 2)。整体来看,粉粒无机碳密度在 0~10、0~20 cm 土层增长速率高于其他组分,灌乔林地在 0~20 cm 土层分别为 0.13、0.17 g/(m²·a)。乔木林地碳密度增长速率高于灌木林地,在 0~20 cm 土层,乔木林地砂粒碳、粉粒碳、黏粒碳、水溶性碳密度增速分别为 0.17、0.17、0.03、0.06 g/(m²·a),分别为灌木林地的 2.8、1.9、

3.0、3.0 倍。表明乔木林地无机碳积累更快,但灌木和乔木林地的粉粒碳增速均显著高于砂粒、黏粒及水溶性碳组分。

植被恢复过程中,土壤中砂粒无机碳比例随植被恢复年限增加而逐渐降低,粉粒无机碳比例则逐渐增大(图 3)。植被恢复 56 a 时,粉粒无机碳对全土无机碳贡献度平均为 50%。黏粉粒颗粒仅占全土 15% 左右,但无机碳贡献度却高达 55%。砂粒无机碳和水溶性无机碳质量分数在半固定沙地上贡献比例较高,随植被恢复年限增加其贡献比例逐渐降低。

2.5 环境因子与无机碳累积关系

基于相关分析和 RDA 分析检测无机碳密度与土壤理化变量间的关系(图 4)分析表明,BD 和土壤砂粒质量分数与全土及不同组分无机碳变化都呈显著负相关,土壤黏粒和粉粒质量分数与土壤全土及颗粒无机碳变化存在显著相关性,Ca²⁺、Mg²⁺ 及 SOC 与 SIC 存在显著正相关,枯落物质量与黏粒无机碳变化存在显著相关性。RDA 分析结果表明,0~20 cm 土层中 Ca²⁺、Mg²⁺、枯落物质量及 pH、BD 对土壤无机碳浓度影响较大,影响因子中 BD、pH 与无机碳浓度呈负相关,而 SOC、枯落物生物量及 Ca²⁺、Mg²⁺ 离子浓度为正相关。其中 BD 对土壤无机碳浓度呈极显著影响。

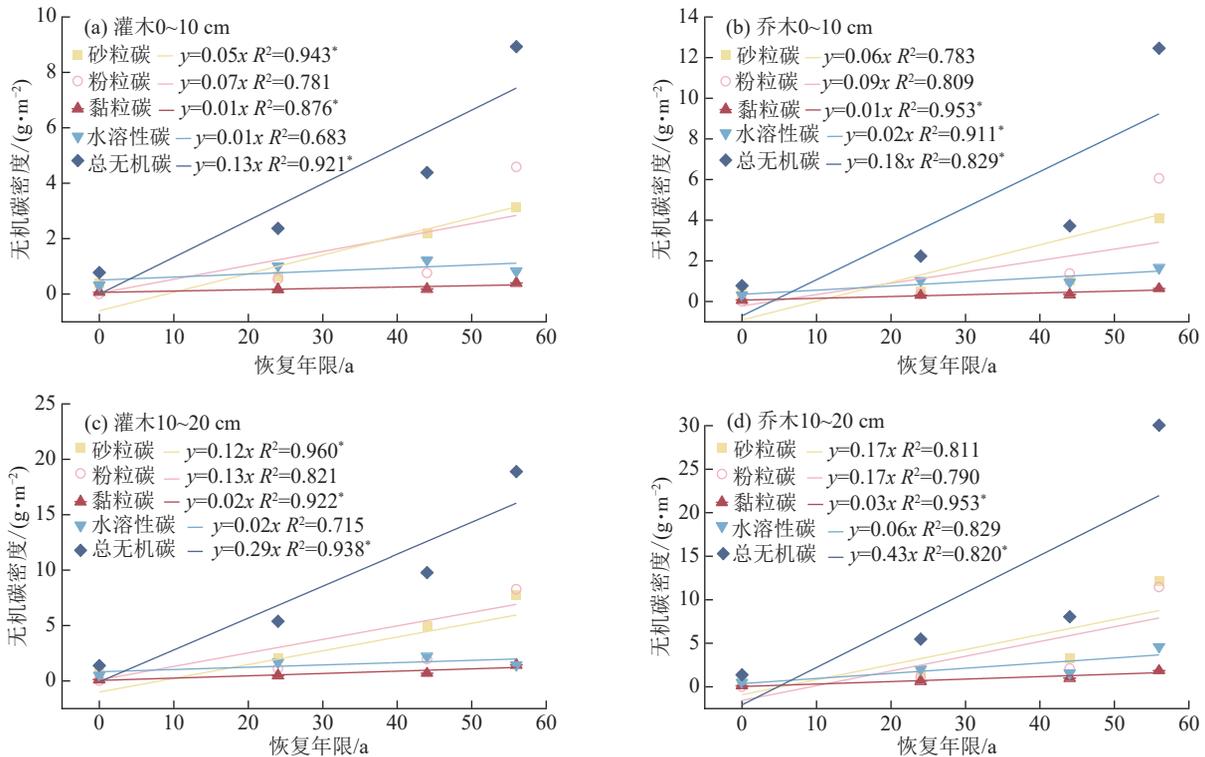


图 2 颗粒无机碳密度与植被恢复年限的线性回归关系
Fig.2 Linear regression relationship between mineral particle-bound inorganic carbon density and vegetation restoration years
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

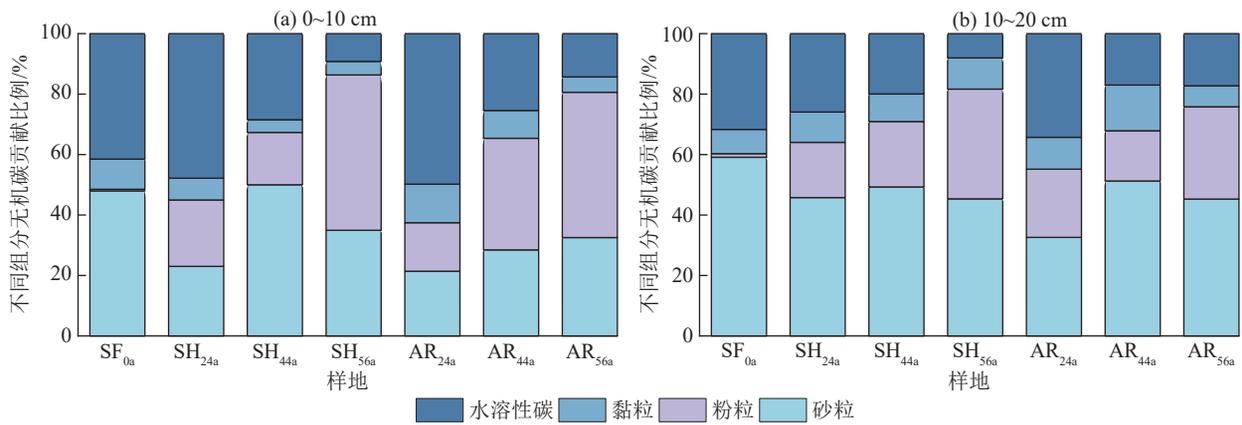
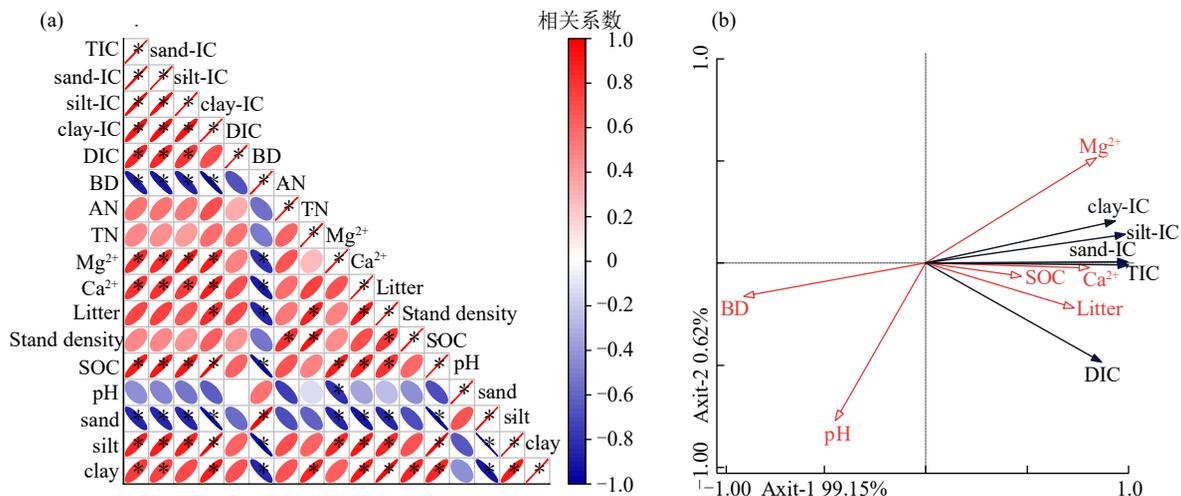


图 3 不同土壤大小颗粒无机碳质量分数在 0~20 cm 土层中对总无机碳的贡献比例

Fig.3 The contribution ratio of inorganic carbon content in different particle sizes to total inorganic carbon in the 0~20 cm soil layer



注: *表示 $p \leq 0.05$ 。

图 4 理化因子对土壤无机碳和不同大小颗粒碳密度的影响

Fig. 4 The effects of physicochemical factors on the densities of soil inorganic carbon and carbon in different particle sizes

3 讨论

本研究在毛乌素地区植被恢复过程中对无机碳质量分数变化的研究可知, 0~10、10~20 cm 土层土壤总无机碳分别增加 15.6、25.4 倍, 具有明显的碳固存效应, 与研究^[23]得出植被恢复能够促进土壤无机碳库累积的结论相似; 刘哲等^[24]研究表明, 多年生人工草地对高寒退化草地的 SIC 固定具有显著成效, 是因为土壤中存在“SOC-CO₂-SIC”微的碳循环系统, 随植被恢复年限增加, 地面枯落物经微生物分解释放 CO₂, 在生物过程中转化形成 HCO³⁻, 土壤中的 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 作用形成碳酸盐^[25]。潘根兴等^[26]研究发现, 在干旱半干旱地区, 碱性和富含钙元素的地球化学环境下, 土壤有机碳的矿化速率较高, 产生的大量 CO₂ 通过化学反应生成溶解无机碳和颗粒无机碳, 进而形成积淀结晶, 沉积无机碳。固沙林地凋落物、细根生物量和土壤有机碳储量较高, 进一步促进碳酸盐溶解和淋溶, 大量的植物有机残体进入土壤, 从而

加快 SIC 的形成^[27]。植物主要吸收深层土壤中的钙, 形成植物体中碳酸钙, 植物残体分解后, 有机部分被分解但碳酸钙被保留, 表聚在土壤中, 使得土壤无机碳质量分数增加, 乔木固沙林地枯落物显著高于灌木固沙林地, 可能也是植被重建后期乔木林地无机碳质量分数较多的原因之一^[26]。植被恢复过程中砂粒无机碳累积速率相对较高, 表层土壤受到表聚性影响, 大量碳酸盐在表层累积使得表层砂粒无机碳质量分数较高。同时, 植被恢复显著增加黏粒、粉粒无机碳质量分数, 粉粒、黏粒碳在植被恢复 56 a 时组分质量仅占不到 20%, 二者贡献超过 50% 的总无机碳质量分数(图 3)。固沙林植被恢复过程中土壤砂粒减少, 粉粒、黏粒增多(表 2), 植被重建过程细化土壤颗粒^[27], 粉黏粒具有较强的黏结性和吸附能力, 能够与无机碳形成稳定的碳结合体, 结构稳定。不同土层粉粒无机碳固定速率显著高于砂粒无机碳, 粉粒的吸附作用可能是荒漠地区植被重建过程中土壤固定无机碳的主要形式。且植被恢复对土壤水溶性

无机碳质量分数影响显著,20~56 a灌木林DIC平均是半固定沙地的4.2~5.8倍,20~56 a乔木林DIC平均是半固定沙地的6.1~18.2倍,可能与土壤水分运移和土壤蒸发有关。

干旱区无机碳的累积过程涉及复杂物理与化学作用的综合现象,该过程受众多环境因子的共同作用。主导因素包括气候条件、温度变化、降水状况及土壤母质的特性等多重环境要素的综合影响^[28]。RDA分析和相关性分析表明,土壤无机碳不仅受Ca²⁺、枯落物质量及有机碳的影响,同时受pH及BD等多重因素的影响,其中BD对无机碳密度变化影响极显著。蒋小董^[28]研究得出,BD对SIC质量分数变化有70.3%的贡献度,且SIC质量分数随着土壤BD的降低而增大。土壤BD较低,意味着土壤孔隙较大,更易与大气接触促进土壤呼吸,更加利于SIC质量分数的固存。黄战等^[29]研究指出,施氮处理可显著提升土壤中的SIC质量分数,同时降低土壤的pH。土壤pH与土壤无机碳间存在着密切的关系,可调控土壤的内部环境,促进土壤的酸化过程^[8]。植被恢复能够进一步推动土壤pH的降低(表1),为无机碳营造合适环境,从而对碳酸盐的溶解和沉降产生影响。土壤pH与土壤无机碳密度的变化呈负相关(图4),与徐薇薇等^[30]的研究结果一致。

4 结论

1)毛乌素沙地固沙植被到恢复56 a灌木和乔木固沙林地土壤总无机碳显著增加,比半固定沙地增加13.9、21.9倍,其中33.7%、49.7%、4.8%分别来自砂粒、粉粒、黏粒无机碳,说明乔木林地比灌木林地具有更强的固碳效应,也说明粉粒在无机碳累积中是一个重要的固碳机制,由此预见,荒漠地区固沙林地具有较大的固碳潜力。

2)植被恢复不同大小颗粒无机碳质量分数及密度均随植被恢复年限延长呈显著增长趋势,0~20 cm土层灌乔木林地粉粒无机碳密度增速分别为0.09、0.17 g/(m²·a),远高于其他颗粒的固碳速率。植被恢复56 a粉粒碳密度增加5.8~23.2倍,黏粉粒无机碳占无机碳超55%的累积量,是毛乌素沙地植被恢复过程中无机碳固存的主要形式。

3)基于冗余分析可知,枯落物生物量,土壤体积质量和pH在土壤总无机碳和组分碳的累积中都发挥着至关重要的作用。pH的改变为土壤中无机碳的形成创造适宜的环境,而土壤的体积质量又使土壤的孔隙结构发生变化,与枯落物一同向土壤提供更多的CO₂,Ca²⁺和Mg²⁺离子的作用促使碳酸盐的形成。综上所述,植被的重建对荒漠地区土壤无机碳

库的积累具有显著的促进作用,本研究为未来荒漠地区的生态治理提供坚实的理论依据。

参考文献:

- [1] 孟延,周建斌,郝平琦,等.土壤无机碳研究进展及意义[J].北方农业学报,2017,45(3):54-57.
MENG Y, ZHOU J B, HAO P Q, et al. Research progress and significance on soil inorganic carbon[J]. Journal of Northern Agriculture, 2017, 45(3): 54-57.
- [2] XIE J X, LI Y, ZHAI C X, et al. CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle[J]. Environmental Geology, 2009, 56: 953-961.
- [3] 杨亚澜,刘耘华,陈静,等.新疆温性荒漠土壤有机碳和无机碳含量垂直分布的影响因素[J].新疆农业大学学报,2022,45(1):71-78.
YANG Y L, LIU Y H, CHEN J, et al. Influencing factors of vertical distribution of soil organic and inorganic carbon in Xinjiang temperate desert[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2022, 45(1): 71-78.
- [4] 卢伟伟,杨佳.苏北滨海土壤无机碳组成和储量及其控制因子[J].应用生态学报,2024,35(8):2131-2140.
LU W W, YANG J. Composition and storage of soil inorganic carbon as well as the controlling factors in coastal area of the northern Jiangsu, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(8): 2131-2140.
- [5] HE N P, WU L, WANG Y S, et al. Changes in carbon and nitrogen in soil particle-size fractions along a grassland restoration chronosequence in northern China[J]. Geoderma, 2009, 150(3): 302-308.
- [6] 蔡岸冬,徐香菇,张旭博,等.不同利用方式下土壤矿物结合态有机碳特征与容量分析[J].中国农业科学,2014,47(21):4291-4299.
CAI A D, XU X R, ZHANG X B, et al. Capacity and characteristics of mineral associated soil organic carbon under various land uses[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(21): 4291-4299.
- [7] 武天云,JEFF J,SCGOENAU,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 T Y, JEFF J, SCGOENAU, et al. Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(4): 717-722.
- [8] 沙国良,陈宇轩,魏天兴,等.黄土高原丘陵区典型退耕恢复植被土壤碳分布特征及其影响因素[J].土壤,2022,54(6):1265-1272.
SHA G L, CHEN Y X, WEIT X, et al. Distribution of soil carbon and its driving factors under typical restored vegetation in hilly areas of Loess Plateau[J]. Soils, 2022, 54(6): 1265-1272.
- [9] 王丽梅,张谦,白利华,等.人工樟子松林对毛乌素沙地

- 土壤颗粒组成和固碳效果的长期影响[J].水土保持通报,2019,39(4):89-96.
- WANG L M, ZHANG Q, BAI L H, et al. Long-term effects of pinus sylvestris afforestation on soil particle composition and carbon sequestration in Mu Us sandy land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4):89-96.
- [10] 尤炜. 干旱土壤无机碳的碳汇研究[J]. 环境科学导刊, 2024, 43(1):22-26.
- YOU W. Carbon sinks of inorganic carbon in arid soils[J]. Environmental Science Survey, 2024, 43(1):22-26.
- [11] LI Y Q, AWADA T, ZHOU X H, et al. Mongolian pine plantations enhance soil physico-chemical properties and carbon and nitrogen capacities in semi-arid degraded sandy land in China[J]. Applied Soil Ecology, 2012, 56:1-9.
- [12] HUSSAIN S, SHARMA V, ARYA V M, et al. Total organic and inorganic carbon in soils under different land use/land cover systems in the foothill Himalayas [J]. Catena, 2019, 182: e104104.
- [13] 张普河, 姚佳, 王雪韧, 等. 短期氮添加对荒漠草原土壤无机碳及土壤酸缓冲能力的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(7):2081-2088.
- ZHANG P H, YAO J, WANG X R, et al. Effects of short-term nitrogen addition on soil inorganic carbon and soil acid buffering capacity in desert grasslands[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7):2081-2088.
- [14] 肖焯, 黄志刚, 令玉林, 等. 赤水河流域不同植被恢复类型土壤有机碳储量特征及其影响因素[J]. 土壤通报, 2024, 55(6):1636-1646.
- XIAO Y, HUANG Z G, LING Y L, et al. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon storage in different vegetation restoration types in the Chishui River basin [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(6):1636-1646.
- [15] 王庭秦, 陈梓萌, 程麟淞, 等. 毛乌素沙地生态系统服务价值及变化研究[J]. 林草资源研究, 2024(4):113-125.
- WANG T Q, CHEN Z M, CHENG L S, et al. The ecosystem service value and changes of in the Mu Us sandy land[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2024(4):113-125.
- [16] 杨京, 张延文, 李灿, 等. 毛乌素沙地固沙林枯落物-土壤连续体生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3):345-352.
- YANG J, ZHANG Y W, LI C, et al. Stoichiometric characteristics of the litter-soil continuum in sand fixation forest of the Mu Us sandy land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3):345-352.
- [17] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 等. 利用离心法进行土壤颗粒分级[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3):477-481.
- WU T Y, SCHOENAU J, LI F M, et al. Soil particle size fractionation with centrifugation method [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3):477-481.
- [18] 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, 45:767-772.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2005:45-52.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural Press, 2005:45-52.
- [20] 刘本先, 刘文彬, 刘文峰. 土壤中速效氮的测定方法[J]. 农村科技, 2007(10):18.
- LIU B X, LIU W B, LIU W F. Determination of quick-acting nitrogen in soil [J]. Rural Science and Technology, 2007(10):18.
- [21] 武涵, 俞秀丽, 吴晓娅, 等. 溶液中钙镁含量准确测定的方法研究[J]. 盐湖研究, 2013, 21(4):29-33.
- WU H, YU X L, WU X Y, et al. Method for accurate determination of solution containing calcium and magnesium [J]. Journal of Salt Lake Research, 2013, 21(4):29-33.
- [22] ZHANG Y L, CHEN L J, CHEN Z H, et al. Soil nutrient contents and enzymatic characteristics as affected by 7-year no tillage under maize cropping in a meadow brown soil [J]. Revista De La Ciencia Del Suelo Y Nutrición Vegetal, 2010, 10(2):150-157.
- [23] 王丽梅, 张谦, 白利华, 等. 毛乌素沙地 3 种人工植被类型对土壤颗粒组成和固碳的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1):88-94.
- WANG L M, ZHANG Q, BAI L H, et al. Effects of three artificial vegetation types on soil particle composition and carbon fixation in the Mu Us sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1):88-94.
- [24] 刘哲, 陈懂懂, 李奇, 等. 土地利用方式对高寒草甸生态系统土壤无机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5):73-79.
- LIU Z, CHEN D D, LI Q, et al. Effects of different land use patterns on soil inorganic carbon in alpine meadow ecosystem [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5):73-79.
- [25] 张林, 孙向阳, 曹吉鑫, 等. 西北干旱区森林和草原 SOC 向 SIC 转移的研究进展[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(2):40-44.
- ZHANG L, SUN X Y, CAO J X, et al. Research progress of soil organic carbon transfer to soil inorganic carbonates in forest and grassland soil in northwest arid areas [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(2):40-44.

(下转第 47 页)

- 累积的影响[J].干旱地区农业研究,2001,19(1):8-13.
- YUAN X M, YANG X Y, TONG Yan'an, et al. Effect of N fertilizer rate on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, 19(1):8-13.
- [23] MAGRINI-BAIR K, CZERNIK S, PILATH H M, et al. Biomass derived, carbon sequestering, designed fertilizers [J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, 3(1):217-225.
- [24] 郭洁芸,王雅歆,李建龙.氮添加对中国陆地生态系统植物-土壤碳动态的影响[J].生态学报,2022,42(12):4823-4833.
- GUO J Y, WANG Y X, LI J L. Effects of nitrogen addition on plant-soil carbon dynamics in terrestrial ecosystems of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(12):4823-4833.
- [25] 徐彬.减氮配施生物炭对稻田土壤有机碳氮矿化及水稻产量的影响[D].贵阳:贵州大学,2023.
- XU B. Effects of nitrogen reduction combined with biochar application on mineralization of organic carbon and nitrogen in paddy soil and rice yield [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [26] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: Science and technology [M]. London: Earthscan, 2009.
- [27] LEHMANN J, PEREIRA DA SILVA J, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2):343-357.
- [28] 陶朋闯,陈效民,靳译文,等.生物质炭与氮肥配施对旱地红壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):231-235.
- TAO P C, CHEN X M, JIN Z W, et al. Effects of biochar combined with nitrogen fertilizers on microbial biomass C, N and carbon-to-nitrogen ratio of upland red soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1):231-235.
- [29] BHOGAL A, MURPHY D V, FORTUNE S, et al. Distribution of nitrogen pools in the soil profile of undisturbed and reseeded grasslands [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(4):356-362.
- [30] LI T, ZHANG X K, WANG X Q, et al. Effect of inoculating thermophilic bacterial consortia on compost efficiency and quality [J]. *Waste Management*, 2023, 170:341-353.
- [31] 黄雨晗,曹银贵,周伟,等.秸秆生物炭对草原矿区重构土苜蓿生长状况的影响[J].生态学报,2021,41(2):588-602.
- HUANG Y H, CAO Y G, ZHOU W, et al. Effects of straw biochar on the growth of medicago falcata in the reconstructed soil of grassland mining area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2):588-602.
- (上接第38页)
- [26] 潘根兴,丁元君,陈硕桐,等.从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质[J].地球科学进展,2019,34(5):451-470.
- PAN G X, DING Y J, CHEN S T, et al. Exploring the nature of soil organic matter from humic substances isolation to SOMics of molecular assemblage [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(5):451-470.
- [27] 赵洋,陈永乐,张志山,等.腾格里沙漠东南缘固沙区深层土壤无机碳密度及其垂直分布特征[J].水土保持学报,2012,26(5):206-210.
- ZHAO Y, CHEN Y L, ZHANG Z S, et al. Soil inorganic carbon density and distribution characteristics in sand-fixed dunes in the Tengger Desert, northern China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5):206-210.
- [28] 蒋小董.毛乌素沙地防护林恢复土壤无机碳累积效应与机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- JIANG X D. Efficiency and mechanism of soil inorganic carbon accumulation following vegetation restoration of shelter forest in Mu Us sandy land [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2020.
- [29] 黄战,马泽跃,冯雷,等.氮肥施用对库尔勒香梨园土壤有机碳和无机碳剖面分布的影响[J].中国土壤与肥料,2023(6):50-60.
- HUANG Z, MA Z Y, FENG L, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on the distribution of organic carbon and inorganic carbon profile in Korla fragrant pear orchard soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(6):50-60.
- [30] 徐薇薇,乔木.干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析[J].中国沙漠,2014,34(6):1558-1561.
- XU W W, QIAO M. Soil carbon contents in relation to soil physicochemical properties in arid regions of China [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(6):1558-1561.