

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.04.033

CSTR:32310.14.stbxb.2025.04.033

谢尔藏卓玛, 马瑞, 张富, 等. 复合型治沙措施对土壤碳氮储量的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4):275-284.

XIE Gazangzhuoma, MA Rui, ZHANG Fu, et al. Effects of compound sand control measures on soil carbon and nitrogen storage[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):275-284.

复合型治沙措施对土壤碳氮储量的影响

谢尔藏卓玛¹, 马瑞¹, 张富¹, 刘腾¹, 张睿杰¹, 谢爱萍²

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 2. 甘肃林业职业技术大学, 甘肃 天水 741020)

摘要: [目的] “机械沙障+梭梭”是沙区常见的复合治沙措施, 为探究生态垫沙障+梭梭(EI+H)、塑料网沙障+梭梭(Pc+H)、编织袋沙障+梭梭(Wn+H)、草方格沙障+梭梭(Gs+H)与黏土沙障+梭梭(Cy+H)措施区的土壤碳氮储量变化特征。[方法] 选择民勤沙咀墩规模精准固沙造林示范区5种措施布设区土壤为研究对象, 以流动沙丘+梭梭人工林地土壤为对照(CK), 测定分析土壤碳氮储量及其与电导率、pH、体积质量、水分体积分数等理化因子的相关性。[结果] 1) 5种治沙措施对土壤电导率、水分体积分数和体积质量产生显著影响($p < 0.05$), 但对土壤pH影响不显著($p > 0.05$), 在不同土层间土壤理化因子有显著差异($p < 0.05$)。2) 土壤有机碳质量分数随土层深度增加逐渐降低, 于0~10 cm土层达到最大值; 土壤全氮质量分数则呈先上升后下降趋势, 在40~60 cm土层达到峰值。3) 5种治沙措施均对土壤有机碳储量和全氮储量产生显著影响($p < 0.05$)。土壤碳固持速率整体呈上升态势, 其中Gs+H治沙措施下的碳固持速率达到最高, 氮固持速率则表现为先上升后下降。4) 治沙措施对土壤有机碳储量、全氮储量及碳、氮固持速率的影响存在极显著影响($p < 0.01$), 土层深度对土壤有机碳储量、全氮储量及碳、氮固持速率的影响也较为显著($p < 0.05$), 且治沙措施与土层深度的交互作用对土壤有机碳储量、全氮储量及碳、氮固持速率具有显著影响, 且各指标间存在显著相关性。[结论] Gs+H治沙措施在改善土壤性质和提升碳相关指标方面表现最优, 为干旱半干旱地区沙化土地的生态修复和治理提供重要的科学依据与实践参考。

关键词: 荒漠土壤; 阻沙固沙措施区; 土壤碳氮储量; 土壤碳氮固持速率

中图分类号: S714.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0275-10

Effects of Compound Sand Control Measures on Soil Carbon and Nitrogen Storage

XIE Gazangzhuoma¹, MA Rui¹, ZHANG Fu¹, LIU Teng¹, ZHANG Ruijie¹, XIE Aiping²

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Forestry Voctech University, Tianshui, Gansu 741020, China)

Abstract: [Objective] "Mechanical sand barrier+*Haloxylon ammodendron*" is a widely used composite sand-fixing measure in desert regions. This study aims to investigate the variation characteristics of soil carbon and nitrogen stocks in areas under five different measures: ecological barriers+*Haloxylon ammodendron* (EI+H), plastic net barriers+*Haloxylon ammodendron* (Pc+H), woven bag barriers+*Haloxylon ammodendron* (Wn+H), straw checkerboard barriers+*Haloxylon ammodendron* (Gs+H), and clay barriers+*Haloxylon ammodendron* (Cy+H). [Methods] Soil samples collected from areas under five different measures in Minqin Shazuidun precision sand-fixing afforestation demonstration area were selected as the research objects. The soil in mobile sand dune+*Haloxylon ammodendron* plantation was used as the control (CK). Soil carbon and nitrogen stocks and their correlation with physicochemical properties such as electrical conductivity, pH, bulk density, and soil moisture content were measured and analyzed. [Results] 1) The five sand-fixing measures significantly affected soil electrical conductivity, soil moisture content, and bulk density ($p < 0.05$), but showed no significant

收稿日期: 2025-03-05

修回日期: 2025-04-08

录用日期: 2025-05-07

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-03

资助项目: 中央林业改革发展资金项目[甘林规函(2022)263号]; 科技厅科技专员专项(24CXGE006); 甘肃省重点人才项目(2022RCXM039); 甘肃省水利厅技术服务项目(20240316000001); 国家自然科学基金项目(31460221)

第一作者: 谢尔藏卓玛(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 13020706867@163.com

通信作者: 马瑞(1977—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: mar@gsau.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

effect on soil pH ($p > 0.05$). Significant differences existed in soil physicochemical properties among different soil layers ($p < 0.05$). 2) The mass fraction of soil organic carbon (SOC) gradually decreased with increasing soil depth, reaching its maximum in the 0–10 cm layer. The mass fraction of total nitrogen showed an initial increase followed by decrease, peaking in the 40–60 cm soil layer. 3) All five sand-fixing measures significantly affected SOC and total nitrogen storage ($p < 0.05$). The carbon sequestration rate showed an increasing trend, with the Gs+H measure achieving the highest rate. The nitrogen sequestration rate initially increased then decreased. 4) The effects of sand-fixing measures on SOC storage, total nitrogen storage, and carbon and nitrogen sequestration rates were extremely significant ($p < 0.01$). Additionally, soil depth significantly affected these parameters ($p < 0.05$). The interaction between sand-fixing measures and soil depth had a significant effect on SOC storage, total nitrogen storage, and carbon and nitrogen sequestration rate. Significant correlations existed among all measured indicators. [Conclusion] The sand-fixing measure of Gs+H demonstrates optimal performance in improving soil properties and carbon-related indicators, which provides crucial scientific evidence and practical guidance for ecological restoration and management of desertified lands in arid and semi-arid regions.

Keywords: desert soil; area under sand-fixing measures; soil carbon and nitrogen stock; soil carbon and nitrogen sequestration rate

Received: 2025-03-05

Revised: 2025-04-08

Accepted: 2025-05-07

Online (www.cnki.net): 2025-06-03

土壤碳氮是陆地生态系统养分的重要组成部分,影响植物生产力与生态系统的稳定性,其中,土壤是陆地生态系统中最大的碳储存库,其储量约为大气碳库的 3.3 倍^[1]、生物碳库的 4.5 倍^[2]。因此,土壤碳库的微小变化可能导致大气 CO₂ 浓度发生显著波动,进而影响全球气候变化和降水分布格局。据统计^[3],全球 1 m 土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)储量为 1 200~1 600 Pg C。土壤有机碳储量是植物和微生物生长所必需的物质能量来源,是影响土壤肥力、生产力和养分有效性的关键因素,对土壤理化特性具有重要调节作用^[4]。土壤氮元素是调节陆地生态系统生产力、结构和功能的关键性元素^[5]。干旱荒漠地区的土壤存在显著的“碳氮耦合”关系^[6],氮储量的增加有利于土壤有机碳储量的积累^[7],从而可利用氮素决定植物的生长及对 CO₂ 的持续吸收^[8],影响荒漠生态系统净初级生产力^[9]。而碳氮储量的增加有利于荒漠植物根系对土壤养分的吸收和利用,推动植物光合作用和其他生理代谢过程的进行,从而保证对土壤有机碳储量的蓄积,增加植物的营养供给^[10]。

石羊河流域下游属于典型的生态脆弱带,生态环境恶化、沙源众多、干旱少雨、空气状态不稳定、植被稀疏及缺水造成的疏松地表物质使该地区成为国内的强沙源区^[11]。有研究^[12]表明,近 30 a 来,全球陆地碳汇的变化趋势和年际变异主要来自干旱和半干旱生态系统。人工植被恢复作为干旱半干旱区退化生态系统修复的重要手段,对提升森林、灌丛、草地等生态系统土壤的碳氮储量已得到大量证实^[13]。近年来,有研究^[14]

发现,毛乌素沙地南缘不同固沙灌木群落中土壤碳氮变化草方格沙障+柠条对全氮的聚集范围大于其他灌木。王新源等^[15]在不同治沙措施对荒漠绿洲过渡带植物群落与土壤因子的影响的研究中得出,机械沙障与梭梭营造相结合的综合型治沙措施中群落数量特征和土壤养分改善幅度更明显;李玉强等^[16]在科尔沁沙地防沙治沙实践与生态可持续修复浅议中得出,布设沙障和造林显著提升沙漠化土地的土壤碳汇功能。但是,目前针对干旱荒漠地域阻沙固沙措施区土壤固持碳氮效益的研究较少,且现有研究^[17]仅局限于人工林土壤碳库的影响研究,而对机械沙障与梭梭人工林形成的复合措施区土壤碳氮储量特征的研究未见报道,需进一步探究。

在干旱地区沙漠化逆转进程中,机械沙障+梭梭人工林在土壤养分固持与生态修复方面作用显著,可有效提升土壤的碳固存能力,助力生态系统的恢复与稳定。

鉴于此,本研究以民勤沙咀墩规模精准固沙造林示范区流动沙丘+梭梭人工林地土壤(mobile sand dune, CK)为对照,以不同沙障+梭梭人工林地土壤为试验对象,即生态垫沙障(Ecological mat sand barrier+*Haloxylon ammodendron*, E1+H)、塑料网沙障(Plastic net sand barrier+*Haloxylon ammodendron*, Pc+H)、编织袋沙障(Woven bag sand barrier+*Haloxylon ammodendron*, Wn+H)、草方格沙障(Grass checkerboard sand barrier+*Haloxylon ammodendron*, Gs+H)及黏土沙障(Clay sand barrier+*Haloxylon*

ammmodendron, Cy+H),旨在揭示复合型固沙防护模式下土壤碳氮储量和碳氮固持速率特征及土壤环境因子对其影响,为干旱荒漠地域阻沙固沙措施区土壤碳汇效益评价提供具体的指标和数据支持,为荒漠地区防护沙障的设计、选择和优化提供理论指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省民勤县沙咀墩规模精准固沙造林示范区(38°05′~39°06′N,103°02′~104°02′E)(图1),海拔为1 297~1 389 m,是石羊河中下游防沙治沙林草综合治理项目的重点固沙造林区域,地处腾格里沙漠西缘的沙咀墩至土圈梁一带。东南面毗邻生态红线,西北侧靠近民勤绿洲。该区属于温带干旱荒漠气候,干旱缺水、蒸发强烈,风大沙多,年主导风向为西北风,平均风速为2.8 m/s。年平均降水量仅为113.2 mm,且集中在7—9月,平均蒸发量达2 604.3 mm,根据《中国气候区划名称与代码气候带和气候大区(GB/T 17297—1998)》^[18],研究区干燥度为23.04,属极干旱区。

1.2 样地选择及土样采集

2024年4月选取沙咀墩规模精准固沙造林示范区生态垫沙障(Ecological mat sand barrier+*Haloxylon*

ammmodendron, El+H)、塑料网沙障(Plastic net sand barrier+*Haloxylon ammmodendron*, Pc+H)、编织袋沙障(Woven bag sand barrier+*Haloxylon ammmodendron*, Wn+H)、草方格沙障(Grass checkerboard sand barrier+*Haloxylon ammmodendron*, Gs+H)及黏土沙障(Clay sand barrier+*Haloxylon ammmodendron*, Cy+H)5种复合型治沙措施区为样地(本研究区内机械沙障和梭梭均于2008年建设,每年定期对研究区内破损沙障开展修复与更换工作。本次样品采集期间,研究区沙障完整,无破损情况。),以上风向流动沙丘区域的梭梭人工林为对照(CK),共选取6个观测样地见表1。

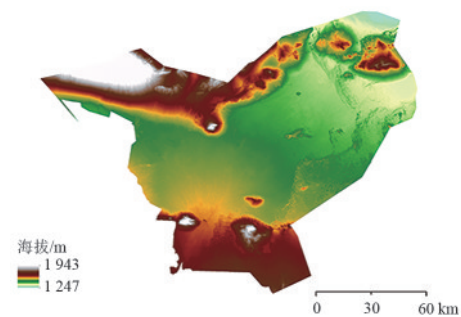


图1 研究区及样地位置

Fig. 1 Location of the study area and sample plots

表1 样地信息

Table 1 Information of sample plots

样地	经度(E)	纬度(N)	沙障规格/ (m×m)	沙障高度/ cm	梭梭株行距/ (m×m)	平均株高/cm	枯梢率/%
CK	103°26′40″	38°44′52″	-	-	2.0×2.0	124.15±6.35b	35
El+H	103°27′03″	38°45′07″	2.0×2.0	-	2.0×4.0	144.56±9.35a	28
Pc+H	103°26′55″	38°44′43″	1.0×1.0	10	2.0×2.0	135.71±8.37a	36
Wn+H	103°27′02″	38°44′52″	1.5×1.5	10	3.0×3.0	147.31±10.51a	33
Gs+H	103°26′45″	38°44′22″	1.0×1.0	15	2.0×2.0	151.58±11.24a	30
Cy+H	103°26′52″	38°44′01″	2.0×2.0	10	2.0×4.0	132.33±8.87a	25

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

每个样地中设置3个面积为20 m×20 m的标准大样方,样方间距至少保持50 m距离,共计18个标准样方。在每个标准样方内,沿对角线布置3个1 m×1 m的小样方,在各小样方内,使用土工铲挖掘100 cm深的土壤剖面,并按0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm标准土层进行采样。采样时,借助环刀采集各土层土样,用于测定土壤水分体积分数与体积质量;然后用土工铲在各小样方采集6个土层土样,每个土层重复采样3次,装入已编号自封袋,带回实验室剔除杂质过筛风干后,测定土壤理化指标。

1.3 理化性质测定与分析

环刀样用于测定土壤体积质量(bulk density, BD),烘干法(105 °C,放置24 h)测定土壤水分体积分数(soil moisture content, SMC);利用电位法(水土比5:1、2.5:1)测定土壤电导率(electric conductivity, EC)

和土壤pH;采用重铬酸钾-浓硫酸氧化外加热法测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC);凯氏定氮法测定土壤全氮(total nitrogen, TN),每个土壤样品测定3次,取平均值作为分析数据,各指标计算^[19-20]公式为:

$$\text{SOC} = \text{SOM}/1.724 \quad (1)$$

$$\text{SOC}_s = \text{SOC} \times \text{BD} \times D_i \quad (2)$$

$$\text{TN}_s = \text{TN} \times \text{BD} \times D_i \quad (3)$$

式中: SOC为土壤有机碳质量分数, g/kg; SOM为土壤有机质质量分数, g/kg; 1.724为换算常数; SOC_s 为土壤有机碳储量, kg/m^2 ; BD为土壤体积质量, g/cm^3 ; D_i 为土壤层厚度, m; TN_s 为土壤氮储量, kg/m^2 ; TN为土壤全氮质量分数, kg/m^2 , 土壤碳、氮固持量为 SOC_s 、 TN_s 与CK的差值, kg/m^2 。土壤碳、氮固持速率由土壤碳、氮固持量除以措施实施年限, 单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[21]。本研究 中, 所有措施均布设于2008年, 实施年限统一为16a。

为更好地分析不同治沙措施下各理化因子的变化程度,采用离散系数进行描述,离散系数也被称为变异系数(coefficient of variation, CV),用于衡量数据的离散程度,在不同数据集平均值不同时,比标准差更能反映数据离散性^[22]。计算公式为:

$$CV = \sigma \div \mu \quad (4)$$

式中:CV为离散系数; σ 为样本标准差; μ 为样本平均值。

1.4 数据处理

采用Excel 2021软件对基础数据进行记录、汇总,并对数据进行相关性分析及绘制图表,运用IBM SPSS Statistics 27软件对研究数据进行处理及分析,应用单因素方差(one-way ANOVA)计算出平均值和标准差,比较不同沙障防护模式下土壤碳、氮及土壤理化性质等指标间的差异性,其中显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 复合治沙措施区土壤环境因子变化特征

由表2可知,与CK相比,5种不同治沙措施对0~100 cm土层土壤电导率、水分体积分数、体积质量影响显著($p<0.05$),离散系数分别为0.6%~12.6%、2.0%~10.9%、0.3%~2.8%,但对土壤pH影响不显著($p>0.05$),离散系数为0.07%~1.25%,且同一治沙措施不同土层深度间差异显著($p<0.05$)。E1+H、Pc+H、Wn+H、Gs+H、Cy+H 5种不同治沙措施显著提高0~100 cm土层土壤电导率、土壤水分体积分数、土壤体积质量的质量分数,分别在20~40、40~60、0~10 cm土层达到最大值。随着土层深度增加,土壤养分逐渐降低。经分析比较,5种不同治沙措施对土壤理化性质的影响依次为Gs+H>E1+H>Pc+H>Wn+H>Cy+H。

表2 不同治沙措施0~100 cm土层土壤理化性质指标

Table 2 Soil physicochemical properties in soil layers of 0-100 cm under different sand-fixing measures

治沙措施	土层深度/cm	电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	pH	水分体积分数/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	土壤体积质量/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
CK	0~10	235.67±20.65BCbc	8.68±0.02Aa	0.19±0.02Dd	1.51±0.01Cc
	10~20	226.67±14.57BCbcd	8.55±0.03BCb	0.21±0.01CDcd	1.56±0.01Bb
	20~40	292.67±9.29Aa	8.59±0.02Bb	0.24±0.02Cc	1.57±0.02ABb
	40~60	246.33±12.09Bb	8.55±0.02BCb	0.35±0.02Aa	1.57±0.01ABb
	60~80	222.33±6.11BCcd	8.47±0.03Cc	0.29±0.03Bb	1.57±0.01ABb
	80~100	209.67±4.16Cd	8.35±0.04Dd	0.22±0.01CDc	1.59±0.01Aa
E1+H	0~10	464.67±12.34Bb	8.41±0.07Aa	0.45±0.02BCc	1.51±0.02ABCab
	10~20	394.33±32.32Bc	8.41±0.03Aa	0.31±0.02Dd	1.56±0.01Aa
	20~40	406.33±43.66Bc	8.33±0.02Ab	0.33±0.02Dd	1.48±0.04BCbc
	40~60	626.00±38.69Aa	8.23±0.01Bc	0.57±0.03Aa	1.45±0.01Cc
	60~80	652.67±5.69Aa	8.17±0.04Bcd	0.50±0.02Bb	1.52±0.02ABab
	80~100	640.33±3.06Aa	8.14±0.02Bd	0.44±0.03Cc	1.54±0.03ABa
Pc+H	0~10	347.33±3.79Aa	8.68±0.02ABbc	0.32±0.03Bb	1.59±0.03Aab
	10~20	347.67±13.28Aa	8.81±0.11Aa	0.26±0.02Ac	1.61±0.04Aab
	20~40	336.67±21.08Aa	8.77±0.11Aab	0.33±0.02Bb	1.59±0.03Aab
	40~60	336.33±14.15Aa	8.66±0.03ABbc	0.42±0.02Aa	1.61±0.03Aa
	60~80	336.01±4.58Aa	8.57±0.05Bcd	0.41±0.02Aa	1.59±0.02Aab
	80~100	329.33±2.08Aa	8.53±0.03Bd	0.33±0.02Bb	1.56±0.01Ab
Wn+H	0~10	321.33±2.08Bb	8.37±0.06Ce	0.35±0.02Dd	1.56±0.01Cc
	10~20	254.67±3.79Cc	8.94±0.06Aa	0.29±0.0Ee	1.61±0.01Bb
	20~40	434.67±54.88Aa	8.49±0.08Cd	0.36±0.01Dd	1.56±0.01Cc
	40~60	232.67±6.66Cc	8.81±0.03Bb	0.55±0.02Aa	1.61±0.01Bb
	60~80	235.67±5.03Cc	8.79±0.04Bb	0.49±0.02Bb	1.59±0.01BCb
	80~100	224.67±4.04Cc	8.69±0.03Bc	0.43±0.02Cc	1.66±0.02Aa
Gs+H	0~10	265.02±2.01De	8.28±0.03ABb	0.35±0.02ABab	1.71±0.01Aa
	10~20	294.67±25.58Dd	8.34±0.03Aa	0.29±0.03Bc	1.67±0.04ABbc
	20~40	514.33±11.49Aa	8.22±0.01BCc	0.31±0.01Bbc	1.70±0.01Aab
	40~60	406.33±18.61Bb	8.19±0.02CDcd	0.37±0.01Aa	1.64±0.01Bd
	60~80	368.99±8.54Cc	8.16±0.03Dd	0.32±0.04ABbc	1.67±0.01ABcd
	80~100	350.33±6.66Cc	8.09±0.03Ee	0.24±0.01Cd	1.69±0.01Aab
Cy+H	0~10	892.00±4.58Bb	8.24±0.06Bd	0.23±0.02Dd	1.62±0.01Cc
	10~20	942.33±46.31Aa	8.31±0.04Bcd	0.24±0.01Dd	1.60±0.02Cc
	20~40	234.67±3.06Cc	8.59±0.06Ab	0.28±0.01Cc	1.65±0.01Bb
	40~60	234.67±7.23Cc	8.59±0.03Aa	0.41±0.02Aa	1.62±0.01Cc
	60~80	235.33±0.58Cc	8.49±0.03Aa	0.37±0.02Bb	1.68±0.01Aa
	80~100	232.98±5.29Cc	8.36±0.06Bc	0.31±0.02Cc	1.65±0.01ABb

注:同列不同大写字母为不同治沙措施相同土层间差异显著($p<0.01$);同列不同小写字母为不同治沙措施相同土层间差异显著($p<0.05$)。

2.2 复合治沙措施区土壤碳氮质量分数及碳氮比变化特征

由图 2 可知,从土壤剖面分布看,不同治沙措施中土壤碳质量分数随土层加深变化规律不完全一致,整体呈下降趋势。土壤碳质量分数为 0.05~5.66 g/kg,离散系数为 1.3%~43.3%。随着土层深度增加,土壤碳质量分数在 0~10、10~20、20~40 cm 土层中有显著差异 ($p < 0.05$),其中碳质量分

数在 0~10 cm 土层达到最大值。不同治沙措施中土壤氮质量分数随着土层加深整体呈先上升后下降趋势,测定氮数据为 0.03~0.44 g/kg,离散系数为 3.3%~26.4%,土壤氮质量分数在 40~60 cm 土层中达到最大值。不同治沙措施中土壤碳质量分数分别为 $Gs+H > Wn+H > El+H > Pc+H > Cy+H$,土壤氮质量分数为 $El+H > Cy+H > Gs+H > Pc+H > Wn+H$ 。

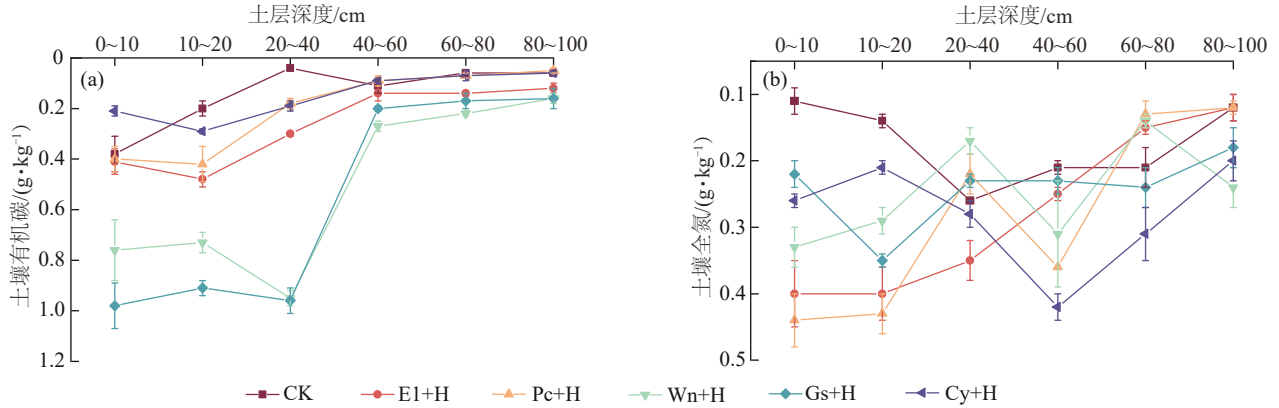


图 2 不同土层土壤碳、氮质量分数变化趋势

Fig. 2 Variation trends of soil carbon and nitrogen mass fraction in different soil layers

由图 3 可知,不同治沙措施下,土壤 $\omega(C):\omega(N)$ (碳氮比)为 0.17~27.72,其离散系数为 0.90%~46.95%。其中, $\omega(C):\omega(N)$ 在 $Gs+H$ 治沙措施下的 0~10 cm 土层深度处,变化极为显著,并且呈现出最高的数值;而在 CK 处理的 20~40 cm 土层深度时,同样变化显著,不过呈现的是最小值。对比不同治沙措施与 CK 措施发现,编织袋沙障($Gs+H$)相较于 CK 措施分别提升 2.67、1.24、9.42、6.63、0.68 倍。由此可以看出,土壤 $\omega(C):\omega(N)$ 在采用编织袋沙障($Gs+H$)的治沙措施中有着极为突出的显著变化。综合比较不同治沙措施下的碳氮比,其大小顺序依次为 $Gs+H > Wn+H > El+H > Pc+H > Cy+H$ 。

$Cy+H$ 5 种不同的治沙措施,对 0~100 cm 土层土壤 SOC_s (土壤有机碳储量)与 TN_s (土壤全氮储量)的影响显著 ($p < 0.05$)。相较于 CK 措施,5 种治沙措施明显提高 0~100 cm 土层的 SOC_s 。 SOC_s 随土层深度呈先增加后降低规律。 TN_s 整体呈先上升后下降趋势,在 40~60 cm 土层内, TN_s 达到最大值。分析可知,5 种不同治沙措施对 SOC_s 影响程度的大小依次为 $Gs+H > Wn+H > El+H > Pc+H > Cy+H$; 对 TN_s 影响程度的排序为 $Cy+H > El+H > Gs+H > Pc+H > Wn+H$ 。

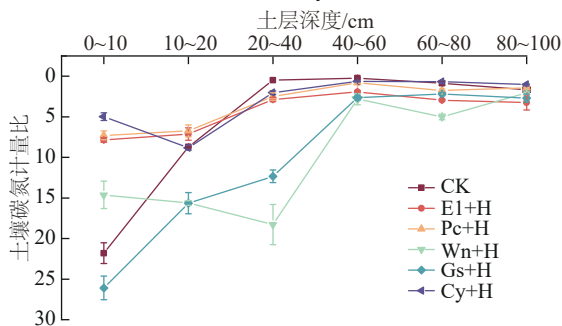


图 3 不同土层土壤碳氮计量比变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of soil carbon and nitrogen stoichiometry in different soil layers

2.3 复合治沙措施区土壤碳氮储量及固持速率变化特征

由图 4 可知, $El+H$ 、 $Pc+H$ 、 $Wn+H$ 、 $Gs+H$ 、

不同治沙措施的土壤碳固持速率总体呈上升趋势(图 5)。相较于 CK、 $Gs+H$ 措施下的土壤碳固持速率达到最大值,其数值达到 CK 的 4.2 倍。土壤氮固持速率的整体变化趋势为先升高后下降。其中,碳氮固持速率的变化趋势与土壤碳、氮储量的变化保持一致。碳固持速率在 $Gs+H$ 措施下最优; $Pc+H$ 和 $Cy+H$ 2 种措施中氮固持速率最优。

2.4 复合治沙措施区土壤碳氮特征因子的相关性

由表 3 可知,治沙措施对土壤有机碳储量、全氮储量及碳、氮固持速率影响极显著 ($p < 0.01$);土层深度对土壤有机碳储量、全氮储量及碳、氮固持速率影响显著 ($p < 0.05$)。治沙措施与土层深度交互作用对有机碳储量和碳固持速率影响极显著 ($p < 0.01$),对全氮储量和氮固持速率影响显著 ($p < 0.05$)。不同治沙措施对土壤碳氮储量及固持速率存在显著差异。

El+H 和 Pc+H 措施下的碳氮指标间存在极显著正相关 ($p < 0.01$), 碳储量与碳质量分数相关系数分别高达 0.97^{**} 、 -0.99^{**} , 显示碳氮协同积累特征; 而 Wn+H 和 Gs+H 沙障的碳氮相关性减弱, Cy+H 沙

障出现碳氮负相关但不显著 ($p > 0.05$)。固持速率指标中, El+H、Pc+H 的碳持率与氮质量分数保持正相关 ($p < 0.01$), 但 Gs+H 和 Cy+H 的固持速率与碳氮指标呈负相关(表 4)。

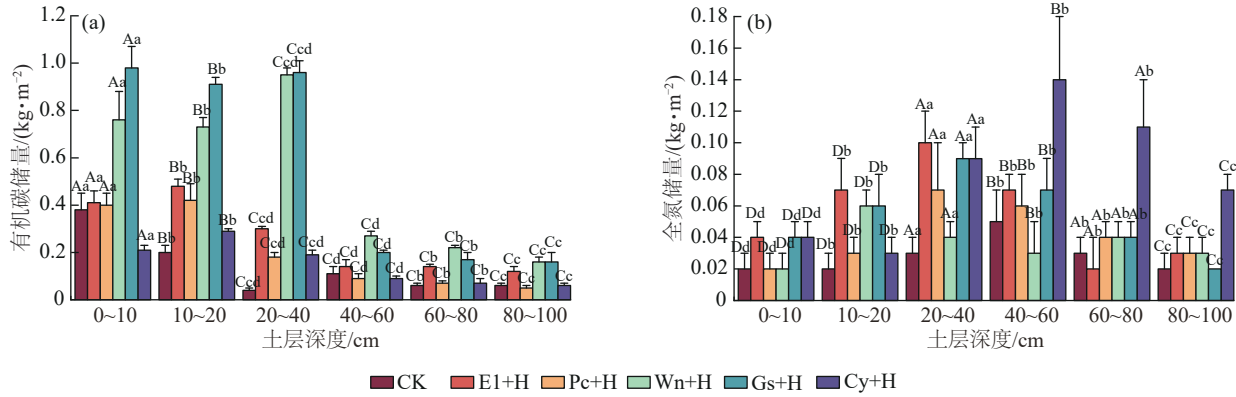
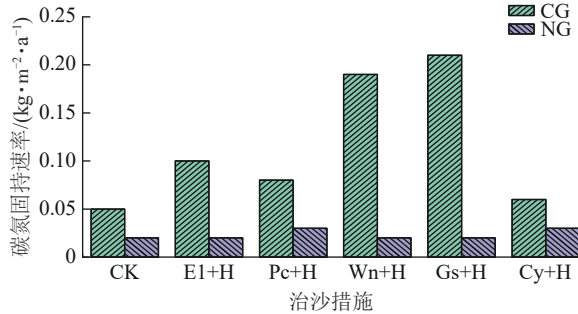


图 4 不同土层土壤碳、氮储量变化趋势

Fig. 4 Variation trends of soil carbon and nitrogen stocks in different soil layers



注: CG 为土壤有机碳固持速率; NG 为土壤全氮固持速率。

图 5 100 cm 土层深度土壤碳、氮固持速率变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of soil carbon and nitrogen sequestration rate in 1 m soil layer

表 3 复合型固沙措施区土壤碳氮储量及固持速率及相关因子的双因子方差分析 (F 值)

Table 3 Two-factor analysis of variance (F value) of soil carbon and nitrogen stock, sequestration rate, and related factors in areas under composite sand-fixing measures

指标	治沙措施	土层深度	治沙措施 × 土层深度
土壤有机碳储量	1 058.73 ^{**}	833.92 [*]	97.56 ^{**}
土壤全氮储量	104.51 ^{**}	26.99 [*]	20.83 [*]
碳固持速率	573.07 ^{**}	468.67 [*]	58.83 ^{**}
氮固持速率	30.08 ^{**}	6.56 [*]	6.85 [*]

注: **表示在 0.01 水平上呈极显著相关; *表示在 0.05 水平上呈显著相关。下同。

3 讨论

3.1 复合治沙措施区对土壤环境因子的影响机制

本研究发现, 相较于 CK、El+H、Pc+H、Wn+H、Gs+H、Cy+H 5 种治沙措施显著改变 0~100 cm

土层土壤电导率、水分体积分数和体积质量 ($p < 0.05$)。土壤电导率、水分体积分数和体积质量离散系数的变化表明, 不同治沙措施对各指标影响程度有别。刘任涛等^[23]在对宁夏盐池县境内东北部 10 km 处选择 6、15、24、36 a 种植的人工柠条林生长过程中土壤性质研究中发现, 柠条林龄对土壤 pH 产生显著影响 ($p > 0.001$), 随着柠条林龄增加, 土壤 pH 显著下降, 而土壤电导率和水分体积分数呈增加趋势。本研究中, 5 种治沙措施对土壤 pH 影响不显著 ($p > 0.05$), 离散系数为 0.07%~1.25%, 维持土壤酸碱平衡。不同治沙措施中土壤电导率呈增加趋势。可能是因为所选治沙材料和方法本身对土壤酸碱度影响微弱, 维持土壤酸碱平衡的相对稳定, 至于土壤电导率的升高, 可能与枯落物中可溶性盐的积累和沉积有关。水分体积分数的上升可能是由于沙障与梭梭人工林共同作用, 形成相对稳定的生态系统, 随着植被的生长和覆盖度的增加, 林内小气候得到改善, 空气湿度有所提高, 减少土壤水分向大气中散失, 有助于维持土壤的水分体积分数。

3.2 复合治沙措施区对土壤碳氮质量分数及碳氮比的影响机制

本研究中, 不同治沙措施下, 土壤碳质量分数随土层加深而递减, 有学者^[24]研究发现, 随土层深度增加, 有机碳增加的程度有所降低, 主要体现在 0~20、20~100 cm 土层土壤有机碳质量分数增加较少。土壤碳质量分数随土层的加深变化规律不完全一致, 整体呈下降趋势。原因可能是土层越深, 植物根系分布和养分来源越少, 出现“表聚效应”^[25]。

表 4 复合型固沙措施区土壤碳氮储量及固持速率与理化因子相关性

Table 4 Correlation between soil carbon and nitrogen stock, sequestration rate, and physicochemical factors in areas under composite sand-fixing measures

治沙措施	指标	SOC	TN	C:N	SOC _s	TN _s	CG
El+H	SOC						
	TN	0.84**					
	C:N	0.95**	0.64**				
	SOC _s	0.97**	0.91**	0.86**			
	TN _s	0.97**	0.90**	0.90**	0.99**		
	CG	0.12	0.62**	-0.14	0.32	0.28	
	NG	-0.14	0.29	-0.28	0.10	0.08	0.82**
Pc+H	SOC						
	TN	0.80**					
	C:N	0.98**	0.70**				
	SOC _s	0.99**	0.82**	0.98**			
	TN _s	0.96**	0.90**	0.92**	0.97**		
	CG	0.04	0.61**	-0.10	0.07	0.25**	
	NG	-0.36	0.21	-0.47*	-0.33	-0.17	0.83**
Wn+H	SOC						
	TN	0.42					
	C:N	0.87**	0				
	SOC _s	0.86**	0.11	0.97**			
	TN _s	0.87**	0.20	0.95**	0.99**		
	CG	-0.50*	0.48*	-0.62*	-0.47*	-0.39	
	NG	-0.48*	0.36	-0.57*	-0.47	-0.40	0.86**
Gs+H	SOC						
	TN	0.52*					
	C:N	0.94**	0.24				
	SOC _s	0.91**	0.42	0.89**			
	TN _s	0.90**	0.41	0.88**	1.00		
	CG	-0.67**	0.10	-0.77**	-0.45	-0.45	
	NG	-0.25	0.11	-0.24	-0.13	-0.14	0.56*
Cy+H	SOC						
	TN	-0.44					
	C:N	0.98**	-0.51*				
	SOC _s	0.95**	-0.37	0.92**			
	TN _s	0.80**	0	0.79**	0.86**		
	CG	-0.79**	0.86**	-0.81**	-0.68**	-0.34	
	NG	-0.61**	0.74**	-0.64**	-0.42	-0.17	0.88**

刘晓民等^[26]对内蒙古自治区鄂尔多斯市准格旗暖水乡圪秋沟流域(砒砂岩丘陵沟壑区)不同林分类型对土壤养分研究中发现,不同土层深度的土壤全氮质量分数均高于CK处理,本研究中,不同治沙措施下土壤全氮质量分数均高于CK处理。推测可能是梭梭与固氮微生物共生固氮,其枯枝落叶分解增氮;梭梭改善土壤环境,激活微生物促进氮转化,且沙障降低风速,减少土壤侵蚀,拦截含氮沙尘、改善水分条件,助力氮素转化留存。

土壤化学计量特征影响养分储存量土壤碳氮比 $[\omega(C):\omega(N)]$ 是评估有机质分解速率的关键指标,

与土壤有机质分解速率负相关^[27]。本研究中, $\omega(C):\omega(N)$ 随恢复时间延长而增加,在土层垂直方向降低,尹飞虎等^[28]在研究中提出,当植物残体的 $\omega(C):\omega(N)$ 比超过一定数值时,土壤有机碳的矿化过程因氮素营养不足而受到抑制。可能是由于植被恢复过程中,土壤碳、氮存在固存效应,同时表现出植被恢复对碳的截存和延缓大气CO₂浓度的升高。

3.3 复合治沙措施区对土壤碳氮储量及固持速率的影响机制

已有研究^[29]发现,在原始生境一致时,治沙措施是驱动环境过滤机制的主要策略,影响植被重建与分布。

5种治沙措施的土壤有机碳储量(SOC_s)高于CK,且随土层深度的增加先升后降,贾晓红等^[24]在研究干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤碳氮储量特征时发现,随着土层深度增加碳氮储量整体呈下降趋势,与本研究结果基本一致,可能是梭梭人工林生长时截获沙砾、积累凋落物,使得碳汇能力增加,碳氮元素在表层土壤中累积,但土层加深,土壤孔隙度减小,通气透水性减弱,不利于微生物对有机质的分解活动。

有研究^[30]表明,在干旱荒漠区种植人工固沙林能够促进土壤碳氮循环,提高土壤碳汇能力;李雅琼等^[21]在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站就不同改良措施对退化草原土壤碳氮储量的研究中发现,不同改良措施都深刻影响着土壤氮素的分布与转化,对土壤全氮储量具有较大的影响,本研究验证此观点,不同治沙措施下土壤全氮储量(TN_s)高于CK且呈上升趋势。原因可能是梭梭林生长使土壤有机质增加,氮素上升,固氮作用增加碳氮储量,促进植物生长,提升碳汇能力。固持速率由固持量与固持年限决定^[31],本研究中,土壤碳、氮固持速率整体呈上升趋势,碳汇能力逐步增强,但浅层土壤固持速率低。可能是由于研究区干旱多风、植被覆盖低、枯枝落叶少,影响碳氮循环,限制浅层土壤碳汇能力提升。

3.4 复合治沙措施区对土壤碳氮相关性的影响机制

本研究揭示治沙措施对土壤有机碳储量、全氮储量及碳氮固持速率均具有极显著影响($p < 0.01$),证实科学治沙可有效调控土壤碳氮动态,对生态系统养分循环和转化具有关键作用^[32]。土层深度对各指标影响显著($p < 0.05$),凸显土壤垂直分异对碳氮储存的核心调控机制。值得注意的是,治沙措施与土层深度的交互效应呈梯度差异。对有机碳储量及碳固持速率表现为极显著影响($p < 0.01$),而对全氮储量和氮固持速率则为显著影响($p < 0.05$)。本研究揭示,E1+H和Pc+H沙障中,碳储量与氮储量相关系数超0.97**,呈极显著正相关,通过高强度碳氮协同积累,构建起稳定碳氮耦合网络。程燕明等^[33]在对宁夏盐池县四墩子行政村的荒漠草原区土壤碳、氮储量及固持速率的研究中发现,不同放牧方式下土壤碳储量与氮储量呈显著正相关($p < 0.05$)。可能是得益于植被根系分泌物与沙障物理阻隔的共同作用。根系分泌物刺激微生物活性,加速有机质转化;沙障减少侵蚀,促进有机质积累与稳定。本研究发现,Cy+H沙障里,碳质量分数与氮质量分数相关系数为-0.44,呈现碳氮负相关。与魏亚娟等^[34]在以吉兰泰荒漠区不同林龄人工梭梭林为研究对象,分析0~20、20~40、40~60 cm土层土壤有机碳质量分数(SOC)、全氮质量分数(TN),土壤有机碳与全

氮相关系数超0.73**,呈极显著正相关的结论相悖。可能是本研究特殊植被组合导致碳氮解耦机制,使碳分配策略改变。碳氮固持速率的异质性响应,彰显不同沙障措施生态阈值差异。Gs+H、Cy+H措施则出现资源分配制衡,碳持率与碳质量分数相关系数为-0.79**,或许是因为深层土壤碳饱和,或因氮素限制引发代谢补偿。

4 结论

5种治沙措施(E1+H、Pc+H、Wn+H、Gs+H、Cy+H)较CK显著改善0~100 cm土层土壤电导率、水分体积分数及体积质量($p < 0.05$),且在不同土层间土壤理化因子呈显著差异。土壤有机碳储量随土层深度递减(0~10 cm最高),全氮储量呈“峰形”分布(40~60 cm峰值)。治沙措施与土层深度交互作用显著影响碳氮固持动态,Gs+H措施表现最优,其碳固持速率达峰值,氮固持速率先升后降。研究证实治沙工程需构建多维度评估体系,协同优化治理措施与土壤垂直结构响应机制,为荒漠化治理提供科学依据。

参考文献:

- [1] 陈春宇,陈伏生,郑志宇,等.凋落物管理对杉木林土壤有机碳化学结构和热稳定性的影响[J].生态学杂志,2024,43(9):2641-2649.
CHEN C Y, CHEN F S, ZHENG Z Y, et al. Effects of litter management on chemical structure and thermal stability of soil organic carbon in a Chinese fir forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(9): 2641-2649.
- [2] 徐仁飞,王璐,邓磊,等.高寒沙区不同恢复年限青杨人工林土壤碳氮水变化特征[J].应用生态学报,2024,35(10):2657-2666.
XU R F, WANG L, DENG L, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, and water of *Populus cathayana* plantation along different vegetation restoration years in alpine sandy region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(10): 2657-2666.
- [3] ANANDKUMAR N, SOMASUNDARAM J, DANG Y P, et al. Soil inorganic carbon as a potential sink in carbon storage in dryland soils: A review[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1256-1256.
- [4] GHEBLEH M G, RUHOLLAH T, ASGHAR A J, et al. Using environmental variables and fourier transform infrared spectroscopy to predict soil organic carbon[J]. Catena, 2021, e202.
- [5] 敖伊敏,焦燕,徐柱.典型草原不同围封年限植被-土壤系统碳氮贮量的变化[J].生态环境学报,2011,20(10): 1403-1410.
AO Y M, JIAO Y, XU Z. The changes of carbon and

- nitrogen storage of plant-soil system of enclosure years in typical steppe [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(10): 1403-1410.
- [6] 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 等. 宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 [J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3401-3410.
NI Y X, HUANG Y M, NIU D, et al. Characteristics and coupling relationship of soil carbon and nitrogen transformation during in situ mineralization cultivation in forestlands in the mountain area of southern Ningxia [J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3401-3410.
- [7] WILLEM J G V, CHRIS K V, A B H, et al. Sequestering soil organic carbon: A nitrogen dilemma [J]. Environmental Science and Technology, 2017, 51(9): 4738-4739.
- [8] 高文礼, 陈晓楠, 伊力努尔·艾力, 等. 塔里木河下游生态输水对柽柳种群适应更新影响的研究进展 [J]. 生态科学, 2024, 43(1): 229-235.
GAO W L, CHEN X N, YILINUER·A L, et al. The effect of ecological water delivery on the adaptability and regeneration of *Tamarix* populations in the lower reaches of Tarim River [J]. Ecological Science, 2024, 43(1): 229-235.
- [9] 万胜, 张虎国, 易杭, 等. 不同龄级及林分密度天山云杉的碳储量及其分配特征 [J]. 森林与环境学报, 2024, 44(5): 521-529.
WAN S, ZHANG H G, YI H, et al. Carbon storage and distribution characteristics of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* natural forest at different age classes and stand densities [J]. Journal of Forest and Environment, 2024, 44(5): 521-529.
- [10] 木兰, 张璞进, 单玉梅, 等. 短期氮、水添加对放牧背景下荒漠草原短花针茅叶片属性的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(2): 522-534.
MU L, ZHANG P J, SHAN Y M, et al. Influence of short-term nitrogen and water addition on the leaf traits of *Stipa breviflora* in a desert steppe under different grazing intensities [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 522-534.
- [11] 孙涛, 贾志清, 刘虎俊, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带不同发育阶段白刺灌丛沙堆点格局特征 [J]. 林业科学, 2020, 56(7): 12-21.
SUN T, JIA Z Q, LIU H J, et al. Spatial pattern of points distribution of sandpiles of *Nitraria tangutorum* nebkhas at different developmental stages in desert-oasis ecotone of Minqin [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(7): 12-21.
- [12] 赵旋, 李耀辉, 康富贵, 等. “4.24”民勤特强沙尘暴过程初步分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 40-46.
ZHAO X, LI Y H, KANG F G, et al. Analysis on the strong sandstorm in minqin on April 24 [J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2012, 26(6): 40-46.
- [13] 李森, 李玲, 樊华, 等. 川西北高寒沙地不同生态治理模式下土壤碳氮磷储量及生态化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2567-2573.
LI S, LI L, FAN H, et al. Storage and ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus under different ecological restoration patterns in the alpine desertified grassland of northwestern Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2567-2573.
- [14] 赵朋波, 邱开阳, 谢应忠, 等. 毛乌素沙地南缘不同固沙灌木下土壤养分的空间异质性 [J]. 草地学报, 2021, 29(9): 2040-2048.
ZHAO P B, QIU K Y, XIE Y Z, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients under different sand-fixing shrubs in southern Mu Us sandy land, China [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(9): 2040-2048.
- [15] 王新源, 马立鹏, 程小云, 等. 不同治沙措施对荒漠绿洲过渡带植物群落与土壤因子的影响 [J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5869-5883.
WANG X Y, MA L P, CHENG X Y, et al. Effects of different sand control measures on plant communities and soil factors in the desertoasis ecotone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5869-5883.
- [16] 李玉强, 王旭洋, 郑成卓, 等. 科尔沁沙地防沙治沙实践与生态可持续修复浅议 [J]. 中国沙漠, 2024, 44(4): 302-314.
LI Y Q, WANG X Y, ZHENG C Z, et al. The practice on prevention and control of aeolian desertification and suggestion on the ecologically sustainable restoration in the Horqin sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(4): 302-314.
- [17] 王有良, 宋重升, 彭丽鸿, 等. 间伐对杉木人工林土壤碳氮及其组分特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 204-212.
WANG Y L, SONG C S, PENG L H, et al. Effects of thinning on soil carbon and nitrogen fractions in a *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 204-212.
- [18] 国家技术监督局. 中国气候区划名称与代码 气候带和气候大区: GB/T 17297—1998 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Names and codes for climate regionalization in China: Climatic zones and climatic regions: GB/T 17297—1998 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [19] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
LIU G S. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-114.

- [21] 李雅琼, 霍艳双, 赵一安, 等. 不同改良措施对退化草原土壤碳、氮储量的影响[J]. 中国草地学报, 2016, 38(5): 91-95.
LI Y Q, HUO Y S, ZHAO Y A, et al. Effects of different measures for improving degraded grassland on the soil carbon and nitrogen stocks in steppe of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(5): 91-95.
- [22] 宋双飞, 王杰, 黄文娟, 等. 不同龄级胡杨叶片解剖结构与与耐盐性的关联分析[J]. 生态学杂志, 2025, 44(5): 1448-1455.
SONG S F, WANG J, HUANG W J, et al. Leaf anatomical structure of *Populus euphratica* at different age classes and its correlation with saltresistance. [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(5): 1448-1455.
- [23] 刘任涛, 杨新国, 宋乃平, 等. 荒漠草原区固沙人工柠条林生长过程中土壤性质演变规律[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 108-112.
LIU R T, YANG X G, SONG N P, et al. Soil properties following growing process of artificial forests (*Cara-gana microphylla*) in desert steppe [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 108-112.
- [24] 贾晓红, 李新荣, 周玉燕, 等. 干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 938-945.
JIA X H, LI X R, ZHOU Y Y, et al. Storages and distributed patterns of soil organic carbon and total nitrogen during the succession of artificial sand-binding vegetation in arid desert ecosystem [J]. Environmental Science, 2012, 33(3): 938-945.
- [25] 李鹏, 刘晓君, 刘苑秋, 等. 红壤侵蚀区不同植被恢复模式土壤碳储量特征及其影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(1): 12-21.
LI P, LIU X J, LIU Y Q, et al. Characteristics and influencing factors of soil carbon stocks in different vegetation restoration models in red soil erosion areas [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(1): 12-21.
- [26] 刘晓民, 白嘉骏, 杨耀天, 等. 内蒙古坳沟流域不同林分类型对土壤养分含量的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 328-335.
LIU X M, BAI J J, YANG Y T, et al. Effects of different stand types on soil nutrient contents in Geqiugou watershed of Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 328-335.
- [27] 段露露, 乔芷瑛, 袁艳红, 等. 黄土高原刺槐林土壤化学计量特征和微生物元素利用效率的季节差异[J]. 生态学报, 2024, 44(15): 6584-6596.
DUAN L L, QIAO Z Y, YUAN Y H, et al. Seasonal differences of soil stoichiometric characteristics and microbial element utilization efficiency in *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6584-6596.
- [28] 尹飞虎, 李晓兰, 董云社, 等. 干旱半干旱区 CO₂ 浓度升高对生态系统的影响及碳氮耦合研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 235-244.
YIN F H, LI X L, DONG Y S, et al. Effect of elevated CO₂ on ecosystem and C-N coupling in arid and semi-arid region [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(2): 235-244.
- [29] 王安林, 马瑞, 马彦军, 等. 不同治沙措施对土壤细菌群落多样性及理化性质的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(5): 1359-1367.
WANG A L, MA R, MA Y J, et al. Effects of the different measure of sandification combatting on the diversity and physicochemical properties of soil bacterial communities [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(5): 1359-1367.
- [30] 尚雯, 李德禄, 魏林源, 等. 石羊河流域干旱荒漠区人工梭梭林对土壤碳库的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 191-198.
SHANG W, LI D L, WEI L Y, et al. Effect of artificial *Haloxylon ammodendron* plantation on soil carbon pools in arid desert region of Shiyang River basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 191-198.
- [31] 李建平, 陈婧, 谢应忠. 封育草地与弃耕地土壤碳氮固持及固持速率动态[J]. 草业学报, 2016, 25(12): 44-52.
LI J P, CHEN J, XIE Y Z. Dynamics of soil carbon and nitrogen sequestration and sequestration rate following long-term fencing of grasslands and abandoned farmlands [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(12): 44-52.
- [32] 王彦武, 孙浩峰, 于惠, 等. 民勤风沙区不同灌木林土壤质量综合评价[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 169-178.
WANG Y W, SUN H F, YU H, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of different shrubs in windy desert area of Minqin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 169-178.
- [33] 程燕明, 马红彬, 马菁, 等. 不同放牧方式对荒漠草原土壤碳氮储量及固持的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(10): 18-27.
CHENG Y M, MA H B, MA J, et al. Effects of different grazing patterns on soil carbon and nitrogen storage and sequestration in desert steppee [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(10): 18-27.
- [34] 魏亚娟, 汪季, 党晓宏, 等. 干旱荒漠区人工梭梭林土壤碳氮磷密度与生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 259-266.
WEI Y J, WANG J, DANG X H, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus densities and ecological stoichiometry characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantations in arid desert area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 259-266.