试验研究

库布其沙漠东缘防风固沙灌木林碳储量的分布格局及影响因素

侯永胜[1,2], 张 平[1,2], 王树森[1,2], 周艾荣[1,2], 杨振奇[3], 高志豪[1,2]
(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.旱区水工程生态环境全国重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3.水利部牧区水利科学研究所,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要: [目的]探究库布其沙漠东缘3种防风固沙人工灌木林碳储量及其分布格局,为西部地区荒漠生态系统碳汇功能评估及生态恢复策略的制定提供数据支持。[方法]以鄂尔多斯市展旦召的柠条(*Caragana korshinskii*)灌木林、沙柳(*Salix cheilophila*)灌木林、羊柴(*Corethrodendron fruticosum*)灌木林为研究对象,通过野外调查与试验分析相结合的方法,系统阐明库布其沙漠东缘防风固沙灌木林生态系统碳密度及其影响因素。[结果]①在防风固沙灌木林中,柠条林生态系统碳密度最高,其次为沙柳林和羊柴林。二者在造林后较未造林沙地分别提高了157.71%,102.40%和24.82%。土壤层是各灌木林生态系统中的主要碳库,贡献了89.1%~96.0%的碳密度。②3种防风固沙灌木林中,柠条林和沙柳林中各组分碳密度依次为:根系>枝条>叶,其中根系所占比例分别为68.75%和45.72%,而羊柴林中各组分碳密度依次为:枝条>根系>叶,其中枝条比例48.47%,其次为根系40.49%。③土壤层碳密度方面,柠条林和沙柳林集中于0—20 cm表层,且随土层深度的增加而降低,而羊柴林和未造林沙地则集中于中下层(20—60 cm)。④相关性和冗余分析结果表明,全氮(TN)和速效磷(AP)是影响库布其沙漠东缘灌木林碳密度的核心驱动因子。[结论]在建植防风固沙灌木林时,选择柠条林更有利于促进生态系统碳储量的增加。在造林过程中需对防风固沙灌木林添加氮肥。

关键词: 灌木林; 碳密度; 生态系统; 分布格局; 土壤理化性质
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0001-10 **中图分类号:** S718.55

文献参数: 侯永胜, 张平, 王树森, 等.库布其沙漠东缘防风固沙灌木林碳储量的分布格局及影响因素[J].水土保持通报,2026,46(3):1-10. Hou Yongsheng, Zhang Ping, Wang Shusen, et al. Distribution pattern and influencing factors of carbon storage in windbreak and sand-fixing shrub forests on eastern edge of Kubuqi Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):1-10.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.026 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.026**

Distribution pattern and influencing factors of carbon storage in windbreak and sand-fixing shrub forests on eastern edge of Kubuqi Desert

Hou Yongsheng[1,2], Zhang Ping[1,2], Wang Shusen[1,2], Zhou Airong[1,2], Yang Zhenqi[3], Gao Zhihao[1,2]
(1.*College of Desert Control and Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 2.*State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 3.*Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia*, 010020, *China*)

Abstract: [Objective] The carbon storage and distribution patterns of three typical windbreak and sand-fixing shrub forests at the eastern margin of Kubuqi Desert were investigated in order to provide a scientific basis for evaluating carbon sink functions in desert ecosystems and formulating ecological restoration strategies in western China. [Methods] Taking *Caragana korshinskii*, *Salix cheilophila*, and *Corethrodendron fruticosum* shrub forests in the Zhandanzhao area of Ordos City, Inner Mongolia Autonomous Region, as research subjects, and

收稿日期:2025-10-25 **修回日期:**2025-12-24 **采用日期:**2025-12-26
资助项目:内蒙古科技创新揭榜挂帅项目"灌木造林与经营碳汇方法学研发与应用"(2024LKY-TH01); 内蒙古自治区科技兴蒙行动重点专项"鄂尔多斯市典型生态修复模式固碳能力评估及提质增效技术研究"(2022EEDSKJXM003)
第一作者:侯永胜(1997—),男(汉族),内蒙古自治区呼和浩特市人,硕士研究生,研究方向为荒漠化地区林业碳汇。Email:982505416@qq.com。
通信作者:王树森(1970—),男(汉族),内蒙古自治区赤峰市人,博士,教授,博士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。Email:wsswtt@126.com。

combining field investigation with experimental analysis, this study systematically revealed the carbon density and its influencing factors in windbreak and sand-fixing shrub forest ecosystems on the eastern edge of the Kubuqi Desert. [Results] ① In windbreak and sand-fixing shrub forests, *C. korshinskii* exhibited the highest carbon density, followed by *S. cheilophila* and *C. fruticosum*, with increases of 157.71%, 102.40%, and 24.82%, respectively, compared to non-afforested sandy land. The soil layer served as the primary carbon pool, contributing 89.1%～96.0% of the ecosystem carbon density. ② In the three types of windbreak and sand-fixing shrub forests, carbon density in *C. korshinskii* and *S. cheilophila* followed the sequence: roots > branches > leaves, with roots accounting for 68.75% and 45.72%, respectively. In contrast, *C. fruticosum* showed the pattern: branches > roots > leaves, with branches contributing 48.47% and roots 40.49%. ③ Regarding soil carbon density, carbon density in *C. korshinskii* and *S. cheilophila* ecosystems concentrated predominantly in the 0—20 cm surface layer and decreased with soil depth, while *C. fruticosum* and non-afforested sandy land showed higher concentrations in middle and lower layers (20—60 cm). ④ Correlation and redundancy analyses identified soil total nitrogen (TN) and available phosphorus (AP) as the key driving factors influencing carbon density in shrub ecosystems on the eastern edge of the Kubuqi Desert. [Conclusion] For the establishment of windbreak and sand-fixing shrub forests, selecting *C. korshinskii* is more effective for enhancing ecosystem carbon storage, and nitrogen fertilization should be applied to windbreak and sand-fixing shrub forests during afforestation.

Keywords: shrub forest; carbon density; ecosystems; distribution pattern; soil physicochemical properties

地处内蒙古高原西南部、黄河“几”字弯南岸的库布其沙漠,是中国第7大沙漠,也是距离京津冀地区最近的重要沙源区之一。其作为向典型草原区过渡的生态交错带,具有极高的环境敏感性,是阻止沙漠向东扩张,保护黄河及华北平原生态安全的关键缓冲区。历史上的过度放牧、垦殖和不合理水资源利用,加剧了该区域的荒漠化进程。面对这一困境,近几十年来,在中国生态文明建设战略指引下,库布其沙漠展开了规模浩大的生态修复工程,实施了包括人工植被种植(乔、灌、草相结合),沙障铺设(草方格、网格沙障等),自然封育保护,生态补水和土壤改良等在内的一系列综合恢复措施[1]。经过不懈努力,库布齐生态治理已收获“全球荒漠化治理典范”的赞誉,局部区域出现了“绿进沙退”的可喜局面[2]。在此期间,库布其沙漠出现了大面积的防风固沙灌木林[3],这些灌木林不仅具有防风固沙,改善土壤,涵养水源等生态功能,还蕴藏着显著的碳汇潜力[4]。因此,开展库布其沙漠东缘防风固沙灌木林碳储量研究,对于准确评估该区域生态系统碳汇功能、制定科学合理的生态恢复和管理策略具有重要意义。

现阶段,针对库布其沙漠防风固沙灌木林的研究主要集中于土壤质量[5]、群落结构[6]、植被覆盖度[7]、土壤微生物和土壤呼吸等[8]方面,对灌木林生态系统碳密度的探究还较为缺乏。尽管安达、赵婷、张岑和刘文军等学者[9-12]对库布其沙漠柠条、沙柳、羊柴和中间锦鸡儿等人工灌木林的生物量和碳储量进行了测定和估算,且部分研究还构建了相应的生物量模型,但是这些研究局限于对某种或某几种类型灌木生物量或碳储量的测定,缺少对草本、枯落物和土壤碳库的测定,没有对生态系统不同层次的碳密度同时进行测定,导致灌木生态系统碳储量的估算仍有较大的不确定性,并且对灌木林生态系统碳密度关键影响因子的探寻也缺乏深入研究。基于此,本研究拟以库布其沙漠东缘防风固沙灌木林(柠条林、沙柳林、羊柴林)为研究对象,通过野外调查、样品采集和实验室分析,对比分析不同防风固沙灌木林各层次生物量、碳储量之间的分布特征,并综合分析各层次之间的碳储量与其土壤因子的相关关系,旨在量化库布其沙漠东缘防风固沙灌木林生态系统碳储量,揭示库布其沙漠东缘防风固沙灌木林碳储量的分布格局,探讨土壤理化性质对灌木林碳储量分布的影响,为准确评估库布其沙漠东缘灌木林生态系统碳汇功能和区域生态恢复提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

样地设置于内蒙古鄂尔多斯市造林总场展旦召分场银肯沙作业区,地处库布其沙漠东缘,为典型半干旱温带大陆性气候区。该区域气候极端性显著,1月均温低至-17.4 ℃,7月均温最高达33.5 ℃,昼夜温差悬殊;年均日照时长约3 000 h,年均气温介于6.1～7.1 ℃,无霜期为135～150 d。降水呈现显著季节性特征,年均降水量310.3 mm,其中7—9月降水比例超全年总量的60%。当地植被以草本与小灌木植物居多,主要物种有沙蓬(*Agriophyllum pungens*)、

长芒草(*Stipa bungeana*)、羊草(*Leymus chinensis*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、羊柴(*Corethrodendron fruticosum*)、沙柳(*Salix cheilophila*)和柠条(*Caragana korshinskii*)等。

1.2　样地调查及样品采集

于2024年7—8月在鄂尔多斯市造林总场展旦召分场区内选取柠条林、沙柳林和羊柴林设置典型地段布设试验调查样地,并设置未造林沙地作为对照(表1),之后在各样地分别设置3个20 m×20 m的标准样方,采用五点法在每个灌木样方内设置1 m×1 m的草本调查样方与0.25 m×0.25 m的枯落物样方,共计12个灌木标准样方,60个草本样方及60个枯落物样方。样方布设完毕后,对标准样地内灌木的株高、冠幅、基径等核心生长指标进行实测记录,基于上述测树因子的统计结果,在每个样地中筛选3株生长状况良好,测树因子与该样地灌木林平均水平相似的植株作为标准木。将标准木采用全挖法伐倒,按照枝、叶、根进行分类。用刷子去除泥土和砾石等无机物后使用天平分别测量鲜重;草本层样品采用全部收获法获取地上和地下样品,并分别进行称重;枯落物层样品也采用全部收获法,收集枯落物样方内的所有枯落物并进行称重。将以上获取样品按比例带回实验室。土壤样品与植被样品和枯落物样品同步收集,在各标准株一侧用剖面法采集土壤样品,每个样点分0—10,10—20,20—40,40—60 cm土层进行环刀取样。每层有3个重复[13]。

表1　样地基本信息统计结果汇总

Table 1　Statistical summary of basic information for sample sites

灌木林类型	林龄/a	株行距/m	平均株高/cm	平均冠幅/cm	海拔高度/m
柠条林	21	2×2	228.62±77.11	176.31±111.48	1 258
沙柳林	21	2×2	236.52±56.29	237.12±82.40	1 259
羊柴林	21	采用飞播模式播种,无固定株行距	65.64±15.57	34.43±14.37	1 260
未造林沙地					1 230

1.3　植物与土壤样品测定

1.3.1　植被生物量测定

将灌木层、草本层与枯落物层采集的样品置于105 ℃干燥箱中处理30 min进行杀青,调整温度至65 ℃烘干至重量恒定,最后使用精度为0.01 g天平测量重量,以获取生物量数据[14-19]。

1.3.2　植被含碳率测定

测得生物量后将灌木层、草本层和枯落物层样本用粉碎机磨碎,过0.1 mm筛后用自封袋保存,用来测定含碳率。灌木层、草本层和枯落物层含碳率的测定均采用重铬酸钾硫酸法(湿烧法)[20]。

1.3.3　土壤样品测定

土壤容重、总孔隙度采用环刀法测定;土壤pH值采用pH测试仪测定;土壤含水率采用烘干称量法测定;全氮采用半微量凯氏定氮法测定;铵态氮采用氯化钾提取后,通过靛酚蓝比色法测定;土壤硝态氮采用氯化钙溶液浸提后测定;全磷采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定;土壤速效磷采用全自动化学分析仪测定;全钾含量采用氢氧化钠熔融测定;土壤速效钾采用火焰分光光度计测定[16]。

1.4　生物量及固碳量计算

1.4.1　灌木层生物量的计算

在确定的研究样地内,以20 m×20 m为标准样方面积,逐块统计样地内灌丛实际株数,结合实测的标准木单株生物量数据,通过株数与单株生物量的乘积换算,得到单位面积灌木层生物量(kg/hm^2)。

1.4.2　草本层和枯落物层生物量(kg/hm^2)的计算

草本层取样采用1 m×1 m标准样方,枯落物层采用0.25 m×0.25 m标准样方,分别测定样方内生物量鲜重并经烘干处理后,按样方面积与公顷面积的换算比例,推算得到单位面积草本层和枯落物层生物量。

1.4.3　灌木层、草本层和枯落物层碳密度的计算

基于各层次实测生物量数据,结合测定的含碳率,通过生物量与含碳率的乘积,分别计算灌木层、草本层及枯落物层的碳密度。

1.4.4　土壤层碳密度的计算

土壤层碳密度计算公式为

$$\mathrm{SOC}=\sum_{i=z}^{n}D_i\cdot\theta_i\cdot C_i\times(1-\delta_i)\times 100 \qquad (1)$$

式中:SOC为土壤层碳密度(kg/hm^2);n为土层数;D_i为不同土层的厚度(cm);θ_i为土壤容重(g/cm^3);C_i为不同土层土壤有机含碳率(g/kg);δ_i为大于2 mm砾石含量(%)。由于研究区为风沙区,土壤由风沙土组成,实测砾石含量极少,故本研究中δ_i为0。

1.4.5　生态系统碳密度的计算

生态系统碳密度为各组分碳密度的总和,即通

过叠加灌木层、草本层、枯落物层及土壤层的碳密度数据，得到整个生态系统的碳密度。

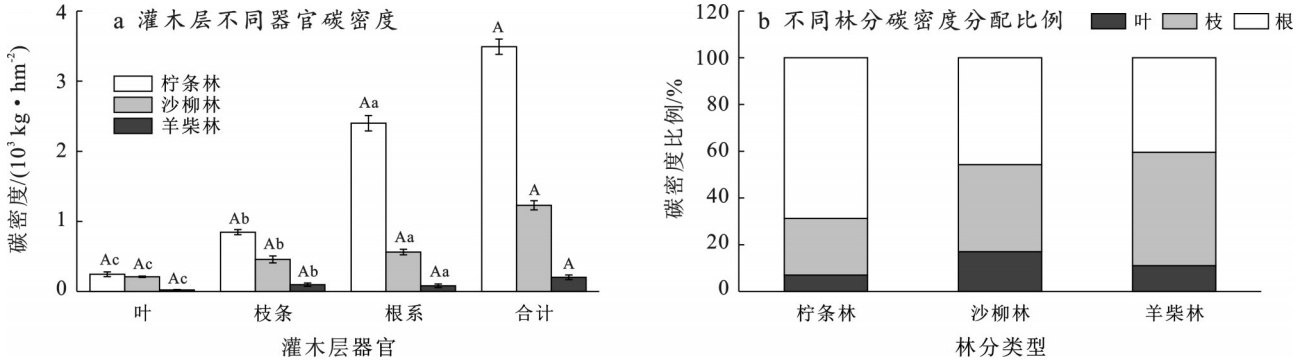
1.5 数据处理

利用Microsoft Excel 2021进行数据整理，运用SPSS 29.0对数据进行单因素方差分析（one-way ANOVA），采用最小显著差数法（LSD法）进行多重比较（$p<0.05$）；采用Pearson相关性系数法进行相关性分析，运用Canoco 5.0进行冗余分析，利用Origin 2024绘制相关图表。

2 结果与分析

2.1 不同灌木林灌木层碳密度及分配特征

由图1a可以看出，柠条林灌层碳密度最高，为3 491.32 kg/hm^2，其次为沙柳林1 229.21 kg/hm^2，羊柴林碳密度最低，为201.15 kg/hm^2，各灌木林灌木层碳密度差异显著（$p<0.05$）。在灌木层不同组织器官下，各灌木林碳密度也均表现为：柠条林＞沙柳林＞羊柴林。灌木层各器官碳密度分配特征如图1b所示。在柠条林和沙柳林中，根系碳密度显著高于其他组织器官（$p<0.05$），其碳密度占灌木层总碳密度的比例分别为68.75%和45.72%，各器官碳密度大小依次为：根系＞枝条＞叶，说明根系碳密度为灌木层碳密度的主要贡献者。而在羊柴林中，则是枝条碳密度所占灌木层碳密度的比例最大，为48.47%，其次为根系40.49%，最小为叶，占11.05%，但根系和枝条无显著差异（$p>0.05$）。



注：不同大写字母表示同一器官不同灌木林之间的碳密度差异显著（$p<0.05$）；不同小写字母表示同一灌木林不同器官之间碳密度差异显著（$p<0.05$）。

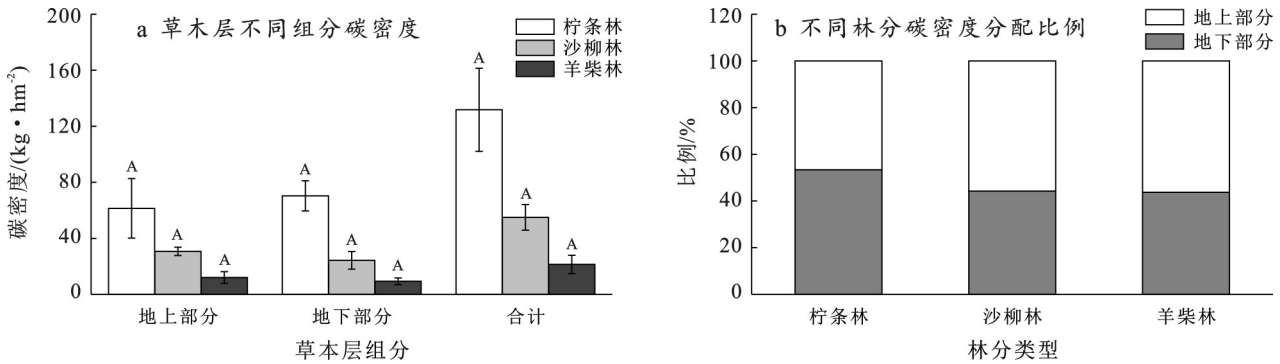
图1 不同类型灌木林灌木层碳密度及各器官碳密度分配特征

Fig.1 Carbon density of shrub layer in different shrub forests and allocation characteristics of carbon density among different organs

2.2 不同灌木林草本层碳密度及分配特征

由图2a可以看出，柠条林草本层碳密度最高，为131.58 kg/hm^2，其次为沙柳林54.99 kg/hm^2，羊柴林碳密度最低，为21.37 kg/hm^2，各灌木林草本层碳密度差异显著（$p<0.05$）。不管在草本层地上部分还是地下部分，各灌木林碳密度也均表现为：柠条林＞沙柳林＞羊柴林。

图2b为各灌木林草本层碳密度地上部分和地下部分分配特征，沙柳林和羊柴林草本层碳密度主要集中于地上部分，地上部分碳密度占草本层碳密度的比例分别为55.75%和56.27%。而柠条林则是地下部分所占比例较高，为53.39%。



注：不同大写字母表示同一组分不同灌木林之间的碳密度差异显著（$p<0.05$）。

图2 不同灌木林草本层碳密度及碳密度分配特征

Fig.2 Carbon density of herbaceous layer in different shrub forests and allocation characteristics of carbon density

2.3　不同灌木林枯落物层碳密度特征

由表 2 可知,各灌木林中羊柴林的枯落物层碳密度最高,为 440.58 kg/hm^2,显著高于其他两种灌木林($p<0.05$),分别是柠条林和沙柳林的 2.68 和 4.71 倍。

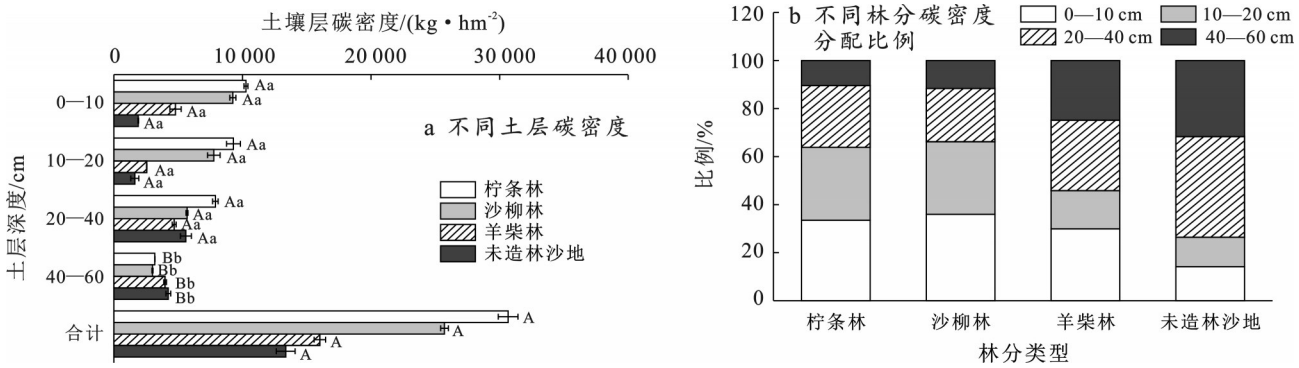
表 2　不同灌木林枯落物层碳密度
Table 2　Carbon density in litter layer of different shrub forests

灌木林类型	碳密度/(kg·hm^{-2})	标准差	显著性
柠条林	164.66	83.65	B
沙柳林	93.63	55.28	B
羊柴林	440.58	203.38	A

注:不同大写字母表示枯落物层不同灌木林碳密度之间差异显著($p<0.05$)。

2.4　不同灌木林土壤层碳密度及分配特征

由图 3a 可知,本研究中 3 种灌木林中土壤层碳密度依次为:柠条林(30 655.92 kg/hm^2)>沙柳林(25 708.64 kg/hm^2)>羊柴林(16 019.53 kg/hm^2),各灌木林土壤层碳密度差异显著($p<0.05$);且 3 种灌木林的土壤碳密度较未造林沙地(13 365.21 kg/hm^2)显著提升,分别增加了 129.37%,92.35% 和 19.86%。在相同土层下,不同样地间土壤碳密度差异显著($p<0.05$),在土层深度为 0—10 cm 和 10—20 cm 时,柠条林土壤碳密度均为最高,分别为 10 273.08 和 9 299.90 kg/hm^2,未造林沙地碳密度最低,分别为 1 898.65 和 1 629.87 kg/hm^2;在土层深度为 20—40 cm 时,柠条林土壤碳密度依旧最高,为 7 896.54 kg/hm^2,而羊柴林则变为最低,为 4 690.63 kg/hm^2;而在土层深度为 40—60 cm 时,羊柴林和未造林沙地的土壤碳密度表现较高,分别为 3 983.86 和 4 235.11 kg/hm^2,柠条林和沙柳林则表现较低,分别为 3 186.40 和 3 000.15 kg/hm^2。各样地土壤碳密度在不同土层间也存在显著差异($p<0.05$),柠条林和沙柳林的土壤碳密度随土层深度的增加呈现降低的趋势,均以 0—10 cm 土层碳密度最大,40—60 cm 土层最小;羊柴林土壤碳密度随土层深度的增加无明显规律;未造林沙地土壤碳密度则随土层加深呈现增加的变化趋势,0—10 cm 和 10—20 cm 土层碳密度较小,20—40 cm 和 40—60 cm 土层较大。通过图 3b 可以发现,柠条林和沙柳林的土壤碳密度主要集中于 0—20 cm 土层,0—20 cm 土层的土壤碳密度分别占土壤总碳密度的 63.85% 和 66.21%,呈现表层聚集现象;而羊柴林和未造林沙地的土壤碳密度则主要集中在 20—60 cm 土层,20—60 cm 土层的土壤碳密度分别占土壤总碳密度的 54.15% 和 73.60%。



注:不同大写字母表示同土层不同灌木林之间碳密度差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一灌木林不同土层之间碳密度差异显著($p<0.05$)。

图 3　不同灌木林土壤层碳密度及碳密度分配特征
Fig.3　Carbon density and its allocation characteristics in soil layer of different shrub forests

2.5　不同灌木林生态系统碳密度及分配特征

由表 3 可知,3 种灌木林中柠条林生态系统碳密度最高,为 34 443.78 kg/hm^2($p<0.05$),其次为沙柳林 27 051.02 kg/hm^2($p<0.05$),羊柴林最低,为 16 682.92 kg/hm^2($p<0.05$),3 种灌木林生态系统碳密度均显著高于未造林沙地(13 365.21 kg/hm^2)($p<0.05$),较未造林沙地分别提高了 157.71%,102.40% 和 24.82%。

如表 4 所示,各灌木林生态系统中土壤层碳密度均显著高于其他碳层($p<0.05$),其碳密度占生态系统碳密度的比例为 89.10%~96.00%,草本层占生态系统碳密度的比例均最低($p<0.05$),为 0.10%~0.40%;柠条林和沙柳林生态系统碳密度的空间分布格局均表现为:土壤层>灌木层>枯落物层>草本层,而羊柴林生态系统碳密度的空间分布格局则表现为:土壤层>枯落物层>灌木层>草本层。

2.6　不同灌木林生态系统碳密度与土壤理化性质的相关性分析

相关性分析表明(图 4),灌木层碳密度(SC)、草本层碳密度(HC)、土壤层碳密度(SOC)和生态系统

碳密度(ECD)分别与全氮(TN)、土壤含水量(SWC)呈极显著正相关($p<0.01$),灌木层碳密度(SC)和草本层碳密度(HC)与铵态氮(AN)呈极显著正相关($p<0.01$),土壤层碳密度(SOC)和生态系统碳密度(ECD)与铵态氮(AN)呈显著正相关($p<0.05$)。

灌木层碳密度(SC)、土壤层碳密度(SOC)和生态系统碳密度(ECD)与速效磷(AP)呈极显著负相关($p<0.01$),草本层碳密度(HC)与速效磷(AP)呈显著负相关($p<0.05$)。

枯落物层碳密度(LC)与速效磷(AP)和总孔隙度(STP)呈显著正相关($p<0.05$),与全钾(TK)呈极显著负相关($p<0.01$)。

此外,酸碱度(pH)、全磷(TP)、速效钾(AK)、硝态氮(NN)与碳密度无显著相关性($p<0.05$)。

表3 不同灌木林生态系统碳密度特征

Table 3 Carbon density characteristics of different shrub forest ecosystems

灌木林类型	灌木层	草本层	枯落物层	土壤层	生态系统
柠条林	$3\,491.32\pm108.99^{Ab}$	131.58 ± 29.55^{Ac}	142.57 ± 83.81^{Bc}	$30\,655.92\pm765.57^{Aa}$	$34\,443.78\pm894.17A$
沙柳林	$1\,229.21\pm65.54^{Bb}$	54.99 ± 9.20^{Bc}	58.18 ± 40.27^{Bc}	$25\,708.64\pm301.21^{Ba}$	$27\,051.02\pm283.40^{B}$
羊柴林	201.15 ± 33.79^{Cb}	21.37 ± 6.57^{Bb}	440.88 ± 203.63^{Ab}	$16\,019.53\pm446.81^{Ca}$	$16\,682.92\pm661.90^{C}$
流沙地				$13\,365.21\pm732.06^{D}$	$13\,365.21\pm732.06^{D}$

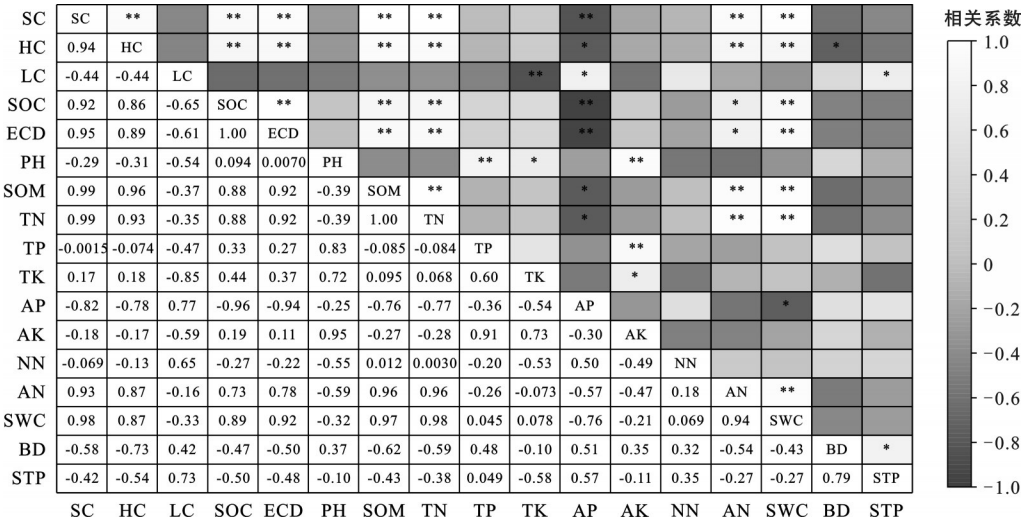
注:不同大写字母表示不同灌木林之间碳密度差异显著($p<0.05$)。

通过对不同防风固沙灌木林各层次碳密度与土壤理化性质的冗余分析发现,第一轴的解释率为85.06%,第二轴的解释率为13.52%,共解释了不同灌木林碳储量特征98.58%的变化,能够较好地解释土壤理化性质与不同灌木林碳密度之间的关系(图5)。从图5可以看出,灌木层碳密度(SC)、草本层碳密度(HC)、土壤层碳密度(SOC)和生态系统碳密度(ECD)均与全氮(TN)、铵态氮(AN)和土壤含水量(SWC)呈显著正相关,且影响大小表现为:全氮(TN)>土壤含水量(SWC)>铵态氮(AN),与速效磷(AP)呈显著负相关;而枯落物碳密度(LC)则与速效磷(AP)呈显著正相关,与全钾(TK)呈显著负相关。综上所述,速效磷(AP)和全氮(TN)是影响不同防风固沙灌木林各层次碳密度的重要驱动力。

表4 不同灌木林生态系统碳密度分配特征

Table 4 Carbon density allocation characteristics of different shrub forest ecosystems

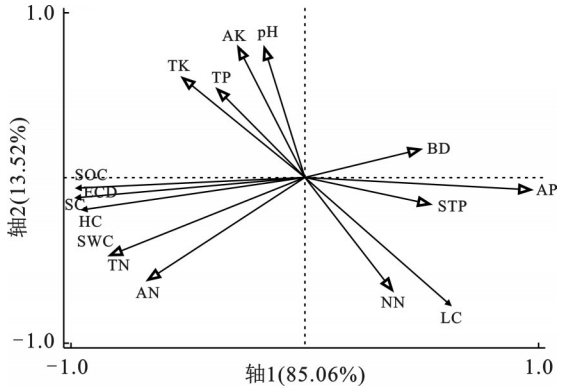
灌木林类型	碳密度/%			
	灌木层	草本层	枯落物层	土壤层
柠条林	10.14±0.25	0.38±0.09	0.41±0.24	89.10±0.14
沙柳林	4.54±0.28	0.20±0.03	0.22±0.15	95.04±0.18
羊柴林	1.21±0.17	0.13±0.04	2.64±1.14	96.02±1.22



注:①*表示$p<0.05$,显著相关;**表示$p<0.01$,极显著相关。②pH为酸碱度;SWC为土壤含水量;BD为土壤容重;STP为总孔隙度;TN为全氮;TP为全磷;TK为全钾;AP为速效磷;AK为速效钾;NN为硝态氮;AN为铵态氮;SC为灌木层碳密度;HC为草本层碳密度;LC为枯落物碳密度;SOC为土壤层碳密度;ECD为生态系统碳密度。

图4 不同灌木林碳密度与土壤物理化学性质的相关性

Fig.4 Correlation between carbon density and soil physicochemical properties in different shrub forests



注:实心和空心箭头分别表示响应变量和解释变量。

图 5　不同灌木林碳密度与土壤物理化学性质的冗余分析

Fig.5　Redundancy analysis of carbon density and soil physicochemical properties in different shrub forests

3　讨　论

3.1　土壤层碳密度

土壤碳储量是陆地生态系统中的最大碳库[17]。本研究结果显示,土壤层对各灌木林生态系统碳密度的贡献远超植被层(灌木层、草本层和枯落物层),这与干旱半干旱区植被碳汇研究结论一致。例如,Conti G 等[14]在阿根廷半干旱查科森林中发现,土壤碳储量占生态系统总碳储量的 80% 以上,与本研究(土壤层碳密度比例 89.1%～96.0%)高度相似;也与张建华等[18]在东灵山地区典型灌丛碳密度分配格局研究中发现的荆条和绣线菊灌丛生态系统碳密度均以土壤层碳密度比例最大(94.96% 和 91.54%)相似,这表明干旱半干旱区灌木林生态系统的碳汇功能主要依赖土壤碳积累。防风固沙灌木林在降水稀少、蒸发强烈的自然环境下,植被生物量积累慢,使植被碳库储量低于土壤碳库[10],而土壤碳库接收凋落物和根系分泌物的碳输入[18],最终形成土壤碳库主导碳储存格局。

本研究发现在荒漠地区进行植被恢复后,对土壤碳密度的提升效果要远高于种植植被所带来的碳密度变化。例如,柠条林、沙柳林和羊柴林的土壤层碳密度相较于未造林沙地(13 365.21 kg/hm^2)分别提高了 17 290.71,12 343.43 和 2 654.32 kg/hm^2,而柠条林、沙柳林和羊柴林植被层碳密度只有 3 622.90,1 284.20 和 222.52 kg/hm^2。传统碳汇能力评估常侧重植被生物量碳,但从本研究结果来看,荒漠生态修复的主要碳汇能力体现在土壤碳储量的提升,这就要求在沙地灌木林的碳汇能力评估中重视土壤在植被恢复中的碳储量的提升。此外,柠条林和沙柳林土壤碳密度均随着土层深度的增加而降低,这与梁启鹏等[19]和舒洋等[20]的研究结论一致。柠条林和沙柳林表层土壤(0—20 cm)碳密度分别占整个土壤层的 63.85% 和 66.21%,这是因为植物根系、动植物残体和凋落物等分解形成的有机质首先进入土壤表层,使得表层土壤有机碳密度高于深层土壤[21]。另外,表层土壤聚集了大量根系,根系分泌物也形成大量的根际沉积碳,以上因素是土壤有机碳表面富集的主要因素[22]。但同时也发现,未造林沙地的土壤碳密度则集中于中下层(20—60 cm),这主要是由于未造林沙地缺乏植被覆盖,表层土壤易受风蚀作用影响,有机碳难以在表层积累,同时,风沙活动可能将表层有机碳向下层迁移,导致碳密度在中下层较高[23],因此,对沙区灌木林表层土壤进行有效的防护十分必要。

3.2　生态系统碳密度

库布其沙漠东缘防风固沙灌木林中,柠条林、沙柳林和羊柴林生态系统碳密度远低于中国北方温带灌丛生态系统碳密度(69 800.00 kg/hm^2)[24]。这与郭玉东[15]在库布其沙漠对人工灌木林(柠条、沙柳、羊柴、沙棘)的研究结果(该地区人工灌木林生态系统碳密度为 13 100.00～35 400.00 kg/hm^2)相似。导致上述现象发生的主要原因包括:①荒漠地区降水稀少、极端温度频现等自然因素,会抑制植物光合效率,限制植被生物量积累,进而减少土壤碳库的碳源补给[23];②该地区的水热条件会抑制土壤微生物活性,降低凋落物腐殖化效率,延长有机碳转化周期,最终降低土壤碳积累速率[24];③该类型的土壤以风沙土为主,缺乏黏粒等胶结物质,且风沙活动频繁,既削弱土壤对有机碳的固持能力,又加剧表层土壤碳流失[25-26]。

研究还发现各灌木林生态系统碳密度较未造林沙地均有不同程度的提升,这也佐证了王娟[27]对半干旱区沙地小叶锦鸡儿和黄柳人工灌木林碳汇功能研究中所提到的“灌木是荒漠化地区植被恢复的主要植被类型,大面积栽植灌木林,一方面,可防止土地沙化,另一方面,增强了沙地的固碳能力”的观点。防风固沙灌木林营建直接增加植被碳储量,同时灌木凋落物持续向土壤输入有机碳,推动土壤碳库积累[21];在间接保碳方面,灌木冠层可降低近地表风速,显著减少风沙侵蚀导致的有机碳流失[28];此外,凋落物分解释放的养分与根系分泌物可改善土壤黏结性,增强土壤保水保肥能力,而土壤微环境的优化又进一步促进植被生长,增加生物量与凋落物输入,进一步增加土壤碳储量。

3.3　土壤理化性质对灌木林碳密度的影响

研究发现,各灌木林碳密度与土壤理化性质之

间存在不同程度的联系[29]，说明土壤理化性质对库布其沙漠东缘灌木林碳密度的影响及限制作用较大。本研究发现，全氮（TN）和速效磷（AP）含量是影响该地区灌木林碳密度的关键驱动因子。灌木层碳密度（SC）、草本层碳密度（HC）、土壤层碳密度（SOC）和生态系统碳密度（ECD）均与全氮（TN）和土壤含水量（SWC）呈显著正相关（$p<0.01$），与速效磷（AP）呈显著负相关。这与鲁艺等[30]对嫩江沙地人工林生态系统碳储量进行研究时所得出的人工林生态系统碳储量主要受全氮或有机质所促进的观点，以及与叶小曼等[31]对黄土丘陵区典型森林生态系统碳储量及其影响因素进行研究时得出速效磷和速效钾是影响人工林森林生态系统碳储量的主要驱动因子的结论相吻合。氮是植物光合作用与生物量积累的关键：一方面全氮（TN）含量提升可显著提高灌木光合效率，增加地上（茎、叶）与地下（根系）生物量积累，进而通过凋落物与根系残体输入提升土壤有机碳[32]；另一方面，全氮（TN）适度的输入可促进分解性微生物的活性，加速凋落物分解为腐殖质，减少土壤碳流失[33]。速效磷是土壤中可直接被植物吸收利用的磷形态[34]，土壤中速效磷（AP）含量过高会抑制植物正常生长，致使磷在植物体内过量积累，严重干扰酶活性，同时抑制根系向深层延伸，引发根系生物量比例显著下降，致使植物生物量增长停滞甚至衰退，碳储量随之减少，进而导致土壤碳源补充不足，同时加剧风蚀情况，进一步削弱土壤碳库的保存能力[35]。

本研究仅探讨了土壤理化性质对灌木林碳密度的影响机制，未纳入地形因子（如海拔、坡度、经纬度）、灌木林结构参数（如株高、冠幅、栽植密度）及气候因子（如降水、温度、湿度）的系统性分析。鉴于此，后续研究需整合地形、林分结构与气候等多元变量，深入探究多因素交互作用对灌木林碳密度的影响机制，以全面解析其驱动要素，进而提出更具针对性的优化策略。

4 结 论

（1）在荒漠区建植防风固沙灌木林可显著提高生态系统碳密度。造林后各灌木林生态系统碳密度较未造林沙地提高24.82%～157.71%，提升能力大小顺序为：柠条林＞沙柳林＞羊柴林。土壤层是各灌木林生态系统中的主要碳库，贡献了89.1%～96.0%的碳密度。

（2）3种防风固沙灌木林中，柠条林和沙柳林中灌木层各组分碳密度依次为：根系＞枝条＞叶，而羊柴林则依次为：枝条＞根系＞叶。土壤层碳密度方面，柠条林和沙柳林的土壤碳密度集中于0—20 cm表层，且随土层深度的增加而降低，而羊柴林和未造林沙地的土壤碳密度则集中于中下层（20—60 cm）。

（3）相关性和冗余分析表明，速效磷（AP）和全氮（TN）是影响库布其沙漠东缘灌木林碳密度的核心驱动因子。除枯落物层外，其他各层次碳密度均与全氮（TN）呈显著正相关（$p<0.01$），与速效磷（AP）呈显著负相关（$p<0.01$）。

综上所述，在该地区进行防风固沙灌木林建植时应优先选择柠条锦鸡儿作为防风固沙树种，可更有效促进土壤有机碳的固存与积累，提升区域碳汇效益；同时在植被恢复过程中应进行合理氮肥管理，以加快该地区植被生物量的积累速度。

参考文献（References）

[1] Ma Qimin, Long Yinping, Jia Xiaopeng, et al. Vegetation response to climatic variation and human activities on the Ordos Plateau from 2000 to 2016 [J]. Environmental Earth Sciences, 2019,78(24):709.

[2] 滕玲.第24个“世界防治荒漠化与干旱日”特别报道：聚焦国家沙漠（石漠）公园 中国抗沙前线“百园大战”[J].地球，2018(7):36-40.
Teng Ling. Special Report on the 24th World Day to Combat Desertification and Drought: Focus on the “Hundred Gardens War” on the front line of China’s sand control in national desert (stone desert) park [J]. The Earth, 2018(7):36-40.

[3] 谢宗强，唐志尧.中国灌丛生态系统碳储量的研究[J].植物生态学报，2017,41(1):1-4.
Xie Zongqiang, Tang Zhiyao. Studies on carbon storage of shrubland ecosystems in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017,41(1):1-4.

[4] 李韫玮，贝淑华.对我国碳汇林业发展之思考[J].中国林业经济，2020(3):42-45.
Li Yunwei, Bei Shuhua. Thoughts on the development of carbon sequestration forestry in China [J]. China Forestry Economics, 2020(3):42-45.

[5] 王浩伊，王海勇，邢燕红，等.库布齐沙漠典型灌木群落土壤生态化学计量特征[J].生态学杂志，2026,45(4):1226-1235.
Wang Haoyi, Wang Haiyong, Xing Yanhong, et al. Soil ecological stoichiometric characteristics of typical shrub communities in the Kubuqi Desert [J]. Chinese Journal of Ecology, 2026,45(4):1226-1235.

[6] 马阔东.库布齐沙地东缘不同沙地类型植被生产力及物种多样性的研究[D].甘肃 兰州：甘肃农业大学，2009.
Ma Kuodong. Study on vegetation productivity and species diversity of plant community in different kinds of sandy land in the east section of Kubqi [D]. Lanzhou,

Gansu: Gansu Agricultural University, 2009.

[7] 姜志伟,杨智博,杨清,等.2000—2022年库布齐沙漠植被覆盖度时空变化及其驱动因子[J].中国沙漠,2025,45(5):124-133.
Jiang Zhiwei, Yang Zhibo, Yang Qing, et al. Temporal and spatial variation of vegetation cover in Kubuqi Desert from 2000 to 2022 and its driving factors [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(5):124-133.

[8] 张立欣,段玉玺,王博,等.库布齐沙漠不同人工固沙灌木林土壤微生物量与土壤养分特征[J].应用生态学报,2017,28(12):3871-3880.
Zhang Lixin, Duan Yuxi, Wang Bo, et al. Characteristics of soil microorganisms and soil nutrients in different sand-fixation shrub plantations in Kubuqi Desert, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(12):3871-3880.

[9] 安达.库布齐沙漠典型灌木林及其生物量空间分布[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
An Da. Typical shrub forests and their spatial distribution of biomass in Kubuqi desert [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[10] 赵婷.达拉特旗主要乔木和灌木碳储量分析[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
Zhao Ting. Carbon stock analysis of main trees and shrubs in Dalateqi [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University,2023.

[11] 刘文军,刘志勇,郭金伟,等.库布齐沙漠中段典型人工林分生物量与生产力分析[J].防护林科技,2016(12):42-45.
Liu Wenjun, Liu Zhiyong, Guo Jinwei, et al. Biomass and productivity of typical plantation in middle part of Kubuqi Desert [J]. Protection Forest Science and Technology, 2016(12):42-45.

[12] 张岑.人工平茬沙柳固碳能力的研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
Zhang Cen. Research on the carbon sequestration of planted stumping *Salix psammophila* [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.

[13] 李树宝,张丽娜,王树森,等.森林经营方式对不同林龄落叶松林枯落物及土壤水源涵养能力的影响[J].森林工程,2023,39(2):12-21.
Li Shubao, Zhang Lina, Wang Shusen, et al. Effects of forest management methods on litter and soil water conservation capacity of *Larix principis-rupprechtii* plantation of different ages [J]. Forest Engineering, 2023,39(2):12-21.

[14] Conti G, Enrico L, Casanoves F, et al. Shrub biomass estimation in the semiarid Chaco forest: A contribution to the quantification of an underrated carbon stock [J]. Annals of Forest Science, 2013,70(5):515-524.

[15] 郭玉东.库布齐沙漠地区人工灌木林生物量与碳密度研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
Guo Yudong. Study on biomass and carbon density of artificial shrubbery in Kubuqi Desert area [D].Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.

[16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[17] Schulze E D, Freibauer A. Environmental science: Carbon unlocked from soils [J]. Nature, 2005, 437(7056):205-206.

[18] 张建华,周晓阳,马卉,等.北京东灵山地区典型灌丛碳密度分配格局[J].生态学报,2025,45(5):2346-2354.
Zhang Jianhua, Zhou Xiaoyang, Ma Hui, et al. Carbon density and its spatial distribution pattern of typical shrublands in Mt. Dongling, Beijing, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(5):2346-2354.

[19] 梁启鹏,余新晓,庞卓,等.不同林分土壤有机碳密度研究[J].生态环境学报,2010,19(4):889-893.
Liang Qipeng, Yu Xinxiao, Pang Zhuo, et al. Study on soil organic carbon density of different forest types [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(4):889-893.

[20] 舒洋,周梅,赵鹏武,等.兴安落叶松人工林土壤碳密度分布特征研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(6):44-52.
Shu Yang, Zhou Mei, Zhao Pengwu, et al. Distribution of plantation soil carbon density in *Larix gmelinii* forest [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017,45(6):44-52.

[21] 朱建佳,戴尔阜,郑度,等.会同森林生态实验站磨哨林场森林碳密度及分配特征[J].自然资源学报,2016,31(11):1871-1880.
Zhu Jianjia, Dai Erfu, Zheng Du, et al. Carbon density and allocation of forest ecosystems of Moshao forest farm at Huitong National Research Station of Forest Ecosystem [J]. Journal of Natural Resources, 2016,31(11):1871-1880.

[22] 廖娇娇,窦艳星,安韶山.黄土高原不同植被群落多样性与土壤有机碳密度关系研究[J].水土保持研究,2022,29(4):75-82.
Liao Jiaojiao, Dou Yanxing, An Shaoshan. Relationship between vegetation community diversity and soil organic carbon density on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):75-82.

[23] 张弘释,李耀,田丽慧.沙漠土壤碳储量及其影响因素

研究进展[J].青海农林科技,2024(3):51-55.
Zhang Hongshi, Li Yao, Tian Lihui. Review of study progress on soil carbon storage and its influencing factors in sandy land [J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2024(3):51-55.

[24] 郭焱培,杨弦,安尼瓦尔·买买提,等.中国北方温带灌丛生态系统碳、氮、磷储量[J].植物生态学报,2017,41(1):14-21.
Guo Yanpei, Yang Xian, MOHHAMOT Anwar, et al. Storage of carbon, nitrogen and phosphorus in temperate shrubland ecosystems across northern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017,41(1):14-21.

[25] Zhang Xueqi, Chen Yaning, Zhang Qifei, et al. Potential evapotranspiration determines changes in the carbon sequestration capacity of forest and grass ecosystems in Xinjiang, northwest China [J]. Global Ecology and Conservation, 2023,48:e02737.

[26] 曹成有,朱丽辉,蒋德明,等.科尔沁沙地不同人工植物群落对土壤养分和生物活性的影响[J].水土保持学报,2007,21(1):168-171.
Cao Chengyou, Zhu Lihui, Jiang Deming, et al. Effects of artificial sand-fixation communities on soil nutrients and biological properties in Horqin sandy land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(1): 168-171.

[27] 王娟,姚云峰,郭月峰,等.科尔沁沙地南缘小叶锦鸡儿和黄柳灌丛生态系统碳汇动态研究[J].生态环境学报,2015,24(11):1785-1790.
Wang Juan, Yao Yunfeng, Guo Yuefeng, et al. The carbon sink dynamic research on the *Caragana microphylla* and *Salix gordejevii* shrub ecosystem in the southern edge of Horqin sandland [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015,24(11):1785-1790.

[28] 王娟.半干旱区沙地小叶锦鸡儿和黄柳人工灌木林碳汇功能研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
Wang Juan. Study on carbon sink function of *Caragana microphylla* and *Salix chinensis* artificial shrubs in semi-arid sandy land [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.

[29] 郭玉伟,梁晶,伍海兵,等.鲁西黄泛平原不同林龄杨树人工林碳储量分布格局及影响因素分析[J].植物研究,2025,45(2):241-253.
Guo Yuwei, Liang Jing, Wu Haibing, et al. Ecosystem carbon storage distribution and influencing factors in different-aged *Poplar plantations* in the Yellow River floodplain in western Shandong, China [J]. Bulletin of Botanical Research, 2025,45(2):241-253.

[30] 鲁艺,牟长城,高旭,等.林型和林龄对嫩江沙地人工林生态系统碳储量影响规律研究[J].北京林业大学学报,2023,45(10):16-27.
Lu Yi, Mou Changcheng, Gao Xu, et al. Effects of forest type and stand age on ecosystem carbon storage of plantations in Nenjiang sandy land of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10):16-27.

[31] 叶小曼,魏天兴,于欢,等.黄土丘陵区典型森林生态系统碳储量及其影响因素[J].生态学杂志,2025,44(5):1409-1416.
Ye Xiaoman, Wei Tianxing, Yu Huan, et al. Carbon storage and influencing factors of typical forest ecosystems in loess hilly region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025,44(5):1409-1416.

[32] 马全林,尚雯,王新友,等.风沙活动对人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林土壤碳氮含量的影响[J].中国沙漠,2022,42(1):71-78.
Ma Quanlin, Shang Wen, Wang Xinyou, et al. Influence of sand blown activity on soil organic carbon and total nitrogen in artificial *Haloxylon ammodendron* plantations in arid desert regions [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(1):71-78.

[33] 赵洪贤,刘鹏,史曼英,等.毛乌素沙地典型固沙植物黑沙蒿和赖草叶片氮分配对最大净光合速率的影响[J].植物生态学报,2025,49(3):460-474.
Zhao Hongxian, Liu Peng, Shi Manying, et al. Effect of leaf nitrogen allocation on maximum net photosynthetic rate of two common sand-fixing species, *Artemisia ordosica* and *Leymus secalinus*, in Mu Us sandy land [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2025, 49(3):460-474.

[34] 方昭.模拟氮沉降下荒漠草原生态系统稳定性和碳循环过程对磷添加的响应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2024.
Fang Zhao. Responses of ecosystem stability and carbon cycle processes in desert steppe to phosphorus addition under simulated nitrogen deposition [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.

[35] 么中元,张乃莉,崔喜艳.火烧和施氮对内蒙古半干旱草原土壤微生物群落碳源利用潜力的影响[J].草地学报,2014,22(4):713-721.
Yao Zhongyuan, Zhang Naili, Cui Xiyan. Impacts of fire and N addition on microbial C utilization potential in a semi-arid grassland of Inner Mongolia [J]. Acta Agrestia Sinica, 2014,22(4):713-721.