

宁夏沙区人工固沙林生态系统碳汇潜力及碳汇提升路径研究

陈选择

中卫市自然资源局 宁夏 中卫 755000

摘要：宁夏沙区人工固沙林的碳储量集中分布于植被层、土壤层和根系层，其中土壤碳库所占比例最大。各组分碳累积量受树种特性、林龄阶段及干旱胁迫等因素的共同制约。随着林龄增长，不同固沙林之间碳汇潜力的分化趋于明显。尚未造林的沙地虽仍具有一定增汇空间，但水分、养分与温度等环境因子限制了其碳汇功能的实际发挥。后续需依据立地条件，推进水分调控与土壤改良，借助退化林修复和耐旱乡土树种优选来优化林分结构；同时强化风蚀治理，完善良种苗木储备体系，分类落实增汇措施，以缓解气候因素的制约，稳步提升区域人工固沙林的长期碳汇能力。

关键词：宁夏沙区；人工固沙林；碳储量；碳汇潜力；碳汇提升路径

引言：宁夏沙区在我国西北地区占据着重要生态屏障的地位，人工固沙林作为这一区域进行荒漠化治理、生态修复时的主要植被类型，在碳循环、碳中和方面有着重要作用。因为受到干旱半干旱气候的影响，该区域固沙林生态系统的碳储量分布跟碳汇特征呈现出显著的地域特殊性。为了弄清楚其碳汇功能，本文从植被、土壤、根系这三个层次对宁夏沙区人工固沙林的碳储量与碳密度分布特征展开分析，评估现有林地与未利用沙地的碳汇潜力，同时识别出水分、养分等关键限制因子。

1 宁夏沙区人工固沙林生态系统碳储量与碳密度特征

1.1 植被层碳储量

宁夏沙区人工固沙林植被层的碳储量是由乔木层、灌木层、草本层、枯落物层这四个部分共同组成的。当中乔木层是植被碳库的关键部分，随着林龄逐年持续增长，其生物量碳密度呈现出逐渐上升的趋势。不同树种因为生长速率有差别且生物量分配策略也不相同，因此它们的碳累积特征各不相同。灌木层在宁夏沙区人工固沙林中所占比例高，拿柠条这种主要的固沙灌木来说，经过长时间的根系发育、地上部分生长，积累了比较可观的碳储量。草本层单株生物量相比于乔木和灌木要低，但其覆盖度高且更新速度快，在人工固沙林演替后期，能够对生态系统碳汇功能的维持起到一定的补充功效。枯落物层作为植被碳库向土壤碳库转化的过渡时期，其碳储量能够体现凋落物输入与分解的平衡关系，对地表碳循环过程有着调节作用。

1.2 土壤层碳储量

在宁夏沙区的人工固沙林生态系统里，土壤层属于碳储量最大的碳库，它是由有机碳、无机碳这两部分所构成的。土壤有机碳密度在垂直剖面上呈现出表层富集这样的特点，表层的含量能够达到流动沙丘的数倍之多。当深度不断增加的时候，有机碳密度会逐渐下降，不过在深层土壤当中依然存有数量颇为可观的碳素。各个层次碳储量的差异，体现出了植被恢复进程中有机质输入在土壤剖面上的分配格局。土壤无机碳在干旱区碳库中占据着一定的比例，对于宁夏沙区碳储量的贡献不容小觑，它的形成和土壤母质特性、降水条件、成土过程等诸多因素紧密相关^[1]。

1.3 根系层碳储量

根系层具有连接植被地上部分与土壤碳库的功能，在宁夏沙区人工固沙林碳循环方面意义颇为重大。细根于根系当中最为活跃，其周转速度较快且分解率较高，它的碳密度对凋落物输入量、土壤有机碳补充速度有着直接的影响作用。粗根主要发挥支撑与运输的功能，碳储量较大不过周转比较缓慢，是根系碳库的主要构成部分。根土比是反映植物碳分配策略的关键指标，不同树种、不同林龄的人工固沙林根土比存在明显差异，致使碳在各组分间的分配格局有所不同。随着固沙年限增加，根系生物量不断累积，根土比的变化趋势体现出植被在长期适应干旱环境时碳分配策略的调整情况。2024年，针对宁夏中部干旱带固沙植被区的有机碳储量及潜力进行了精细估算研究，持续推进过程中为根系层碳储量的精确量化提供了方法支撑。2025年启动的荒漠化防治国际合作项目，预计每年能够新增碳汇约407吨二氧化碳

碳当量。

2 宁夏沙区人工固沙林生态系统碳汇潜力评估

2.1 现有固沙林碳汇潜力

宁夏沙区当前人工固沙林的碳汇潜力，由于林龄结构存在差异，呈现出非常明显的分化状况。那些成熟林经过了多年的生长历程，植被生物量已然趋向稳定状态，相应的碳汇功能也近乎饱和。尽管单位面积固碳速率相较于中幼龄阶段有所下降，可在维持现有的碳库稳定性这一方面，依然有着无法替代的重要作用。中幼龄林正处在快速生长的时期，生物量积累速度比较快，具备较大的碳汇增长空间。随着林龄不断增长、林分结构持续改善优化，碳汇能力还有进一步提高的可能性。积极推动中幼林的抚育、退化林的修复工作，是提高森林生态系统质量、巩固碳汇功能的关键路径。

2.2 未利用沙地碳汇潜力

宁夏沙区还有不小面积的未利用沙地和沙化土地，给人工固沙林进一步扩展留出了空间。这些年荒漠化治理一直在往前推，未利用地向草地和林地转化的速度在加快，土地利用方式一变，区域碳储量也跟着往上涨。不同地方土壤质地、水分状况、植被本底这些条件差别挺大，碳汇增量也明显不一样，得针对不同类型的沙地来定差异化的固沙造林方案^[2]。博鳌亚洲论坛荒漠化防治国际合作项目在宁夏盐池县毛乌素沙地西南缘启动，总面积6500亩，总投资1500万元，用的是工程固沙加乔灌草结合的综合治理模式，设计了6种固沙技术组合。项目完成后，这片沙化土地的植被盖度预计能从30%提高到45%以上，每年新增碳汇量约407吨二氧化碳当量。

2.3 碳汇潜力的限制因子

宁夏沙区人工固沙林要把碳汇潜力充分释放出来，受好几个因素的制约，其中水分条件最要紧。这片区域是典型的干旱半干旱气候，降水少，年际变化也大。生长季中期若干旱持续，人工灌丛的碳汇能力就会被明显压下去。土壤水分不够，植被光合作用和生物量积累都受影响，整个生态系统的碳吸收效率跟着往下掉。养分条件是另一个重要制约。随着演替时间拉长，人工固沙植被里固氮植物的比例趋于下降，氮素限制越来越明显，植物生产力降下来，土壤有机质输入减少，土壤固碳能力也就跟着下来了。温度条件通过影响土壤微生物活性、有机质分解速率和植被生长周期这些途径，间接调控着生态系统的碳收支平衡^[6]。

3 宁夏沙区人工固沙林碳汇提升路径

3.1 基于立地条件优化的主动增汇技术

3.1.1 水分调控

水分是沙区人工固沙林碳汇功能最关键的限制因素。新造幼林定植初期根系浅、抗旱能力弱，通过配套水源工程在需水临界期补充灌溉，能明显提高造林成活率和保存率。国家重点研发计划“宁夏兴庆沙质盐碱地精准渗滤节灌控盐产能提升模式示范”项目已取得阶段性进展。集雨方面，通过微地形改造拦截天然降水，增加径流入渗，把更多雨水蓄到土壤里。节水灌溉方面，针对沙质盐碱地渗透性强、渗漏严重的特点，项目团队构建了工程、农艺、生物、管理相结合的综合治理模式，铺设滴灌管网，按需供水。示范区土壤盐分含量降低了39%—70%，灌溉水利用效率提高了22%—50.6%。水分调控的综合措施协同发力，为碳汇能力的持续提升提供了稳定的水分保障^[3]。

3.1.2 土壤地力提升

土壤地力是固沙林碳汇功能持续发挥的基础。有机物料施用方面，畜禽粪污、废弃枝条秸秆等农林废弃物经资源化利用后，可有效提升土壤有机质含量。贺兰县洪广镇欣荣村一处60亩沙地改良示范田，施用了土壤生物改良剂，有机质含量上升，pH值也得到改善。生物结皮恢复方面，人工生物土壤结皮快速治沙技术已成为沙化土地治理的重要路径。沙坡头站科研人员将荒漠蓝藻人工培育后接种至沙地表面，原本需要十到二十年才能形成的天然结皮，现在一年左右即可形成。盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站科研团队也在长期探索，先以草方格固定流沙，然后通过生物结皮技术逐步恢复土壤功能。这些土壤地力提升措施协同推进，为植被生长与碳固定创造了基础条件^[7]。

3.2 基于林分结构优化的长效增汇策略

3.2.1 退化林分补植与更新

退化林分补植和更新，是恢复人工固沙林碳汇能力的关键一招。针对林分质量往下掉、覆盖度降低这些问题，用补植补造、平茬复壮这些技术手段做系统性修复。2025年中卫市完成国土绿化任务118.22万亩，其中退化林修复18.95万亩，中幼林抚育5.45万亩。红寺堡区2025年罗山西麓退化林补植补造项目也在往前推，计划修复总面积96165.67亩，根据灌木林覆盖度分成了两种模式来补播：覆盖度20%到40%的地块补植93723.66亩，补播柠条种子27127.72千克；覆盖度20%以下的补植2442.01亩，补播柠条种子1897.45千克。补植更新遵循人工促进生态修复的原则，根据植被覆盖度科学确定补植密度，碳汇功能的持续发挥就有了保障^[4]。

3.2.2 耐旱树种筛选与配置优化

耐旱树种筛选与合理配置，是保障固沙林碳汇长期

稳定的重要基础。坚持乡土树种优先,宁夏干旱区乡土树种抗旱性综合评价研究对主要乡土树种的抗旱能力做了系统评估,结果显示柠条、沙柳和花棒抗旱性均较强。沙枣作为宁夏典型的乡土树种,耐旱、耐盐碱,防风固沙能力也不错,适合配置在中间层,能增加林分层次结构、提高林分稳定性,增强防风固沙效果。适度营造沙枣林能够改善盐碱地的通透性和养分状况,对土壤酸碱度也能起到调节作用。经过多年持续治理,中卫市累计治理荒漠化土地已达304.17万亩,森林覆盖率从7.49%提高到9.43%。通过树种合理配置和林分结构优化,人工固沙林的碳汇功能能在更长时间尺度上保持稳定,并逐步提升。

3.3 基于气候风险防控的碳汇稳定保障

3.3.1 抗风蚀管理

风蚀是沙区土壤碳库流失的主要推手,抗风蚀管理是稳住碳汇的第一道防线。工程固沙和生物治沙搭配着来,风蚀量能明显往下降。2025年,腾格里沙漠东南缘长约153公里、宽10到38公里的区域完成了固沙锁边,宁夏境内的腾格里沙漠锁边工程自此全线贯通。麦草方格是宁夏独创的治沙技术,能固沙、防风,筑起一道生态屏障。2025年宁夏全区计划实施18个黄河“几字弯”攻坚战项目,建设规模超过200万亩,投入资金12.9亿元。工程措施和植被措施两块一起发力,地表抗风蚀能力大幅提升,土壤碳库算是给护住了^[5]。

3.3.2 极端气候应对与种苗保障

干旱和高温是沙区人工林面临的主要气候风险,种苗保障是应对极端气候的重要基础。宁夏已经形成了种苗生产、储备、调剂的完整链条。全区穗条储备量1871万根,可供造林苗木3亿株,良种苗木占比63%。已建成国有林场种苗保供基地14个,其中国家重点林木良种基地6个、自治区林木采种基地4个、林业保障性苗圃8个,全区良种和乡土树种苗木使用率达85%以上。种苗储备和

精细化管护配合起来,能有效减轻气候风险对固沙林碳汇功能的冲击,让碳汇效益持续稳定地发挥出来。

结束语:本文分析了宁夏沙区人工固沙林在植被、土壤及根系三个层次的碳储量分布情况,评估了现有林分与未利用沙地的碳汇潜力,确认水分、养分与温度是制约区域碳汇提升的主导因子。从立地条件、林分结构、气候风险防控三个方向,归纳了水分调控、地力提升、退化林修复、树种优化及风蚀治理等增汇途径,并结合区域治理实践验证了相关技术措施的效果。后续研究可在固沙造林模式优化、极端气候应对能力提升等方面进一步深化,从而更充分地挖掘沙区生态系统的碳汇潜力,为区域生态修复与碳汇目标实现提供支撑。

参考文献

- [1]张国军,马文涛,魏小燕,张虎威,王霄,陶清瑞,苏利平,张荣,王立明,肖培青,王志慧.宁夏水土保持措施碳汇能力现状评估[J].人民黄河,2025,47(4):120-126+140.
- [2]虎瑞,高艳红,张鹏,李小军.干旱沙区植被恢复与重建对碳循环关键过程的影响研究进展[J].中国沙漠,2025,45(3):60-71.
- [3]包玉斌,张慧娟,杨雪茹,王耀宗,李樵民,王科,胡胜.宁夏生态系统碳汇时空变化及潜力诊断分区[J].干旱区地理,2026,49(4):740-755.
- [4]杨雪琴,李建平,陈婧,连佳丽,韩翠,罗叙,赵莹.降水变化对荒漠草原生态系统碳氮储量及固持速率的影响[J].草业学报,2026,35(5):48-60.
- [5]徐昊文,黄亚浩,吴洋洋,贾振江,韩金朝,李王成.“双碳”视角下宁夏农田生态系统净碳汇时空演变及驱动因素[J].水土保持学报,2025,39(4):380-392.
- [6]董文煊.毛乌素沙区沙漠化防治人工林碳中和潜力与效益评估[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.
- [7]王新友,马全林,王耀琳.石羊河流域人工防护林碳效益估算[J].中国沙漠,2020,40(4):197-205.