

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.

# 风沙活动对人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林土壤碳氮含量的影响

马全林<sup>1ab</sup>, 尚雯<sup>2</sup>, 王新友<sup>3</sup>, 马婧<sup>4</sup>, 詹科杰<sup>1b</sup>, 王多泽<sup>1b</sup>

(1. 甘肃省治沙研究所 a. 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地, b. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730070; 2. 西北民族大学, 甘肃 兰州 730030; 3. 甘肃广播电视大学, 甘肃 兰州 730030; 4. 中国农业大学 草业科学与技术学院, 北京 100193)

**摘要:** 风沙活动及其物质输移是关键的陆地地表过程,对沙地生态系统影响显著。以石羊河下游民勤县不同林龄人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林为研究对象,研究了固沙造林对0—1 m深度土壤碳氮含量的影响以及风蚀和降尘引起的碳氮含量变化特征,探讨了风沙活动对人工梭梭林土壤碳氮库的影响。结果表明:35 a人工梭梭林0—1 m和0—5 cm土壤有机碳储量较流动沙丘分别增长2.5倍和4.6倍,土壤氮储量分别增长3.3倍和5.3倍。地表风沙流被人工梭梭林截留引起的碳氮输入速率5年平均值分别为 $1.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,占35 a林地0—1 m土壤有机碳氮固定速率的2.2%和1.8%,占0—5 cm土壤有机碳氮固定速率的21.5%和24.9%。在人工梭梭林下垫面上,降尘引起的碳氮输入速率5年平均值分别为 $2.47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,占到35 a林地0—1 m土壤有机碳氮固定速率的4.7%和3.5%,占0—5 cm土壤有机碳氮固定速率的45.7%和48.1%,是地表风沙流的近2倍。人工梭梭林对风沙流活动的削减作用显著促进了沙漠土壤有机碳氮的积累,在0—5 cm层更为明显。

**关键词:** 风蚀; 降尘; 人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林; 土壤有机碳; 全氮

**文章编号:** 1000-694X(2022)01-071-08

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00127

**中图分类号:** S158; P512.2+1

**文献标志码:** A

## 0 引言

在干旱和半干旱地区,土壤疏松干燥,风场强劲有力且频繁,风蚀是影响该区土壤碳水平和碳分配格局的重要因素。风蚀是风力作用下地表物质发生位移的现象,包含土壤起沙、空间输移和沉降淀积3个阶段<sup>[1]</sup>。作为土地沙漠化的主要过程,风蚀会将地表富含有机质的土壤吹走,直接造成当地土壤有机碳库储量的减小<sup>[2]</sup>。对于干旱半干旱区的易风蚀土地进行固沙造林或封禁保护,可以有效减缓风蚀、增加土壤碳吸存<sup>[3]</sup>。其中人工固沙造林可以通过覆盖部分地表、分解风力、阻挡输沙等途径对地表土壤风蚀产生影响<sup>[4-5]</sup>。一方面,强烈的风沙运动引起固沙林风蚀,造成一定程度的碳损失<sup>[6]</sup>;另一方面,固沙林的生长发育和演替还可以改变地表粗

糙度,有效控制沙尘,地上立木又能拦截大气降尘颗粒物<sup>[7]</sup>,通过在固沙林地表累积一定的富含有机质的土壤粉粒和黏粒<sup>[8]</sup>,减缓或者“补偿”风蚀效益,进而提高土壤有机碳固存量<sup>[9]</sup>。固沙林引起的沙尘量及其拦截的颗粒物粒径分布有显著差异,就拦截降尘量而言,乔木林地>天然草地。因此,对固沙林的风蚀和降尘规律开展研究,可为干旱区脆弱生态系统人工植被生态保护与恢复的规划提供数据支撑<sup>[7]</sup>。

石羊河流域下游属于典型的生态脆弱带,生态环境恶化<sup>[10]</sup>、沙源众多和冬春季冷空气活动频繁<sup>[11]</sup>。干旱少雨、空气状态不稳定、植被稀疏以及缺水 and 滥垦造成的疏松地表物质使该地区成为中国境内强沙源区,也是入境沙尘暴的必经之路<sup>[12]</sup>。

收稿日期:2021-06-19; 改回日期:2021-10-09

资助项目:国家自然科学基金项目(32160410, 31660232); 国家重点研发计划项目(SQ2016YFHZ020617); 甘肃省科技重大专项(18ZD2FA009); 甘肃省青年科技人才托举工程项目

作者简介:马全林(1974—),男,甘肃陇西人,博士,研究员,主要从事荒漠化防治与生态恢复研究。E-mail: mql925@126.com

通信作者:尚雯(E-mail: shenwem24@163.com); 马婧(E-mail: mjtwiseven@163.com)

为有效降低风蚀,保护农业生产及绿洲生态安全,从20世纪50年代始,选用梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为主要造林树种,经过几十年的栽植培育,民勤县人工梭梭林面积已超过4万 $\text{hm}^2$ <sup>[13]</sup>,成为石羊河流域人工固沙林的主体。目前,关于该区人工梭梭林物种多样性、空间结构及其防风作用<sup>[14-15]</sup>、土壤碳分布特征等方面的研究已取得较多成果<sup>[16]</sup>,也开展了梭梭构型对风速的影响、人工梭梭林配置模式风洞模拟试验等研究<sup>[17]</sup>,但对不同林龄梭梭林内风蚀与降尘引起的碳氮固存量时空变化缺乏具体深入的了解。

本文选取甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站4个林龄人工梭梭林为研究对象,通过量化人工梭梭林植被-土壤系统碳、氮密度和固定速率,掌握其随造林年限的动态变化过程和规律,揭示风蚀与降尘对人工固沙林碳汇的影响机制,以期干旱沙区人工固沙林的防风固沙效益和碳氮截存量研究提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区为石羊河下游的民勤县( $38^{\circ}05'—39^{\circ}06'N$ ,  $103^{\circ}02'—104^{\circ}02'E$ ),东、西、北三面被腾格里沙漠与巴丹吉林沙漠包围,属于温带荒漠气候,多年平均气温 $7.6^{\circ}\text{C}$ ,年降水量113.2 mm,年蒸发量2 604.3 mm,年均风速 $2.8\text{ m s}^{-1}$ ,主导风向为NW<sup>[12]</sup>,地带性土壤为灰棕荒漠土<sup>[18]</sup>。该区地表水资源由20世纪50年代的每年5.731亿 $\text{m}^3$ 减少到21世纪初期的1.0亿 $\text{m}^3$ 左右,在实施石羊河流域综合治理工程后提高到每年近3亿 $\text{m}^3$ 。近20年来,由于地下水的持续大规模过度开采利用和石羊河中上游水资源消耗提高,民勤绿洲及其边缘地区地下水埋深由1961年的2.21 m下降到目前的近20 m。在地下水位不断下降的背景下,人工梭梭林出现不同程度的衰败,造林年限比较长的梭梭林尤其严重<sup>[13]</sup>。因此,揭示不同林龄人工梭梭林土壤有机碳的动态变化,以及风力侵蚀对土壤碳再分配的影响是该区域防治风沙危害的重要研究内容。

## 2 试验设计

### 2.1 样地选取与设置

试验研究选择在位于石羊河下游的甘肃民勤

荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站进行。沿主风方向,分别在沙漠(3号塔)、沙漠绿洲过渡带(人工梭梭林,2号塔)、绿洲(1号塔)建成3座近地面沙尘观测系统,塔高50 m,1号塔与2号塔间隔3.8 km,2号塔与3号塔间隔4.5 km。每座塔均按相同垂直梯度(1—25 m以2 m为一个梯度,25—50 m以4 m为一个梯度)分别安装灯芯式垂直沙尘湿收集仪(甘肃省治沙研究所研制,专利号:ZL 200610105284.6)。同时,在沙漠(3号塔)、沙漠绿洲过渡带(人工梭梭林,2号塔)分别设置风沙流流量计(甘肃省治沙研究所研制,专利号:ZL 2006110105285.0),测定地表风蚀量<sup>[19]</sup>。风沙流流量计高50 cm,进沙口宽0.5 cm,能自动收集不同风向近地表0—50 cm层次内的风蚀量<sup>[19]</sup>。

在2号塔和3号塔之间的人工梭梭林(沙漠绿洲过渡带),按照就近优先的原则,沿流动沙丘—绿洲方向分别选择流动沙丘0 a、造林3 a、造林10 a、造林25 a和造林35 a人工梭梭林作为调查样地,各样地间距离约为500—1 000 m。各林龄梭梭林在营造前均为平缓的流动沙丘,造林时设置了黏土沙障,以固定流沙和提高栽植成活率。每一林龄人工梭梭林地分别设置3个10 m $\times$ 10 m调查样方,同时选择3个邻近白刺灌丛样方作为对照样地(CK,表1)。由于白刺灌丛是民勤沙区分布最广泛、最典型的自然植被类型,选择白刺灌丛作为对照样地可评判人工梭梭林土壤-植被系统的恢复程度。

### 2.2 植被调查和土壤取样

在生长茂盛期(8—9月),测定每个人工梭梭林和白刺灌丛样方内灌木植株高度与冠幅,计算密度、盖度(表1)。在每个人工梭梭林和白刺灌丛样方内调查1 m $\times$ 1 m的草本样方6个,记录草本植物高度、数量和盖度,之后将样方框内的草本植物齐地面刈割。在刈割干净的草本样方内挖取1个土壤剖面,每个剖面设置2个层次(0—5 cm和0—1 m),先采集环刀样品,之后再采集每层土样。环刀样品带回室内烘干后测定土壤容重,新鲜土样带回室内风干,用于测定土壤碳氮含量。

植物物种丰富度指数的测定方法为: $R_0=S$ ,  $S$ 为样方中物种总数<sup>[20]</sup>。

### 2.3 风蚀和降尘测定

近地表风蚀量采用风沙流流量计测定。在位

表 1 民勤人工梭梭林演替变化特征

Table 1 Succession dynamics of the artificial sand-fixing *Haloxylon ammodendron* forest in Minqin County

指标	沙地造林年限/a					CK (白刺灌丛)
	0	3	10	25	35	
梭梭种群密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	0.0±0.0 <sup>d</sup>	2 125.0±55.4 <sup>a</sup>	650.0±67.1 <sup>b</sup>	625.0±55.9 <sup>b</sup>	400.0±31.6 <sup>c</sup>	0.0±0.0 <sup>d</sup>
梭梭种群高度/cm	0.0±0.0 <sup>e</sup>	103.2±9.1 <sup>d</sup>	315.1±13.7 <sup>a</sup>	172.5±8.9 <sup>c</sup>	216.7±26.0 <sup>b</sup>	0.0±0.0 <sup>e</sup>
梭梭种群盖度/%	0.0±0.0 <sup>d</sup>	20.7±1.3 <sup>b</sup>	29.0±2.5 <sup>a</sup>	14.1±2.1 <sup>c</sup>	10.7±0.4 <sup>c</sup>	0.0±0.0 <sup>d</sup>
植被盖度/%	7.6±2.1 <sup>d</sup>	22.2±1.1 <sup>b</sup>	30.3±3.1 <sup>ab</sup>	18.1±2.5 <sup>bc</sup>	23.3±5.2 <sup>b</sup>	36.8±6.4 <sup>a</sup>
梭梭种群盖度所占比例/%	0	93.2	95.7	77.9	45.9	0
物种丰富度	2	4	8	8	12	9

表中数字为均值±标准差。同一行不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

于人工梭梭林上风向的沙漠边缘(3号塔)和人工梭梭林内(2号塔)分别安装9个风沙流流量计,测定人工梭梭林带内外的风蚀量。每月或每次大风后,从不同方向进入风沙流流量计的沙粒由下部垂直安装的集沙桶收集,然后用密封塑料袋封装标记带回实验室,在125℃下烘干24 h后用电子天平称重,计算单位时间内0—50 cm高度风蚀量。

$$Q_s = \frac{W}{S \times t}$$

式中: $Q_s$ 表示一定时间段断面的风沙流速率( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ); $W$ 表示一定时间段内经过断面的绝对沙量( $\text{g}$ ); $S$ 代表风蚀经过断面的面积( $25\text{ cm}^2$ ); $t$ 表示风蚀测定的时段( $\text{d}$ )。

降尘量采用灯芯式沙尘垂直湿收集仪测定。每次沙尘暴及每月月底,在3座塔同时进行降尘采样,自下而上逐层换取灯芯式沙尘垂直湿收集仪上吸附沙尘的黏结膜,换下的黏结膜逐层编号,装在密封塑料袋带回实验室。为保证样品质量,采样尽量控制在1 h以内完成。在实验室将附着沙尘的黏结膜于125℃下烘干24 h后使用电子天平称重(精度为0.0001 g)。利用黏结膜采样前后的质量差值计算一个月的降尘量,得出每月不同高度的降尘量后计算一年中各月各高度采样均值的总量,得到年降尘量。

2.4 土壤粒度和碳氮含量测定

采集到的土壤剖面以及风蚀和降尘样品在室内风干后过2 mm筛,用马尔文2000型激光粒度仪(Mastersizer2000-APA2000)测定土壤粒度组成,用重铬酸钾氧化-外加加热法测定土壤有机碳含量,凯氏定氮法测定土壤全氮含量<sup>[21]</sup>。

2.5 统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS19.0 中的邓肯氏(Duncan)新复极差多重比较法对数据进行统计分析,采用 Excel 2020 软件进行绘图。

3 结果与分析

3.1 人工梭梭林土壤碳氮储量演变特征

石羊河流域人工梭梭林0—5 cm和0—1 m土壤有机碳储量随造林年限增加而增加(图1)。35 a人工梭梭林0—5 cm和0—1 m土壤有机碳储量分别达到0.22  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和2.48  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,是流动沙丘(0 a)的5.6倍和3.5倍,平均固碳速率分别为5.2  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和50.6  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,梭梭造林对土壤有机碳库的累积效应明显。与同区域的沙地天然稳定白刺灌丛植被(CK)相比,35 a人工梭梭林0—5 cm土壤有机碳储量已经达到白刺灌丛水平,但其0—1 m土壤有机碳储量均显著低于稳定发育阶段的白刺灌丛,只占白刺灌丛的29.4%,说明人工梭梭林土壤有机碳库的恢复是一个漫长的过程,在深层土壤碳库中更是如此。

石羊河流域人工梭梭林0—5 cm和0—1 m土壤氮储量随造林年限也持续增加(图2)。35 a人工梭梭林0—5 cm和0—1 m土壤氮储量分别达到0.025  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和0.378  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,是流动沙丘(0 a)的6.3倍和4.3倍,平均氮固定速率分别为0.60  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和8.30  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,梭梭造林对土壤氮的累积效应也较明显。与同区域的沙地天然稳定白刺灌丛植被(CK)相比,35 a人工梭梭林0—5 cm土壤氮储量略高于白刺灌丛,但0—1 m土壤氮储量显著低于白刺灌丛,只占白刺灌丛的48.1%,说明人工梭梭土壤氮



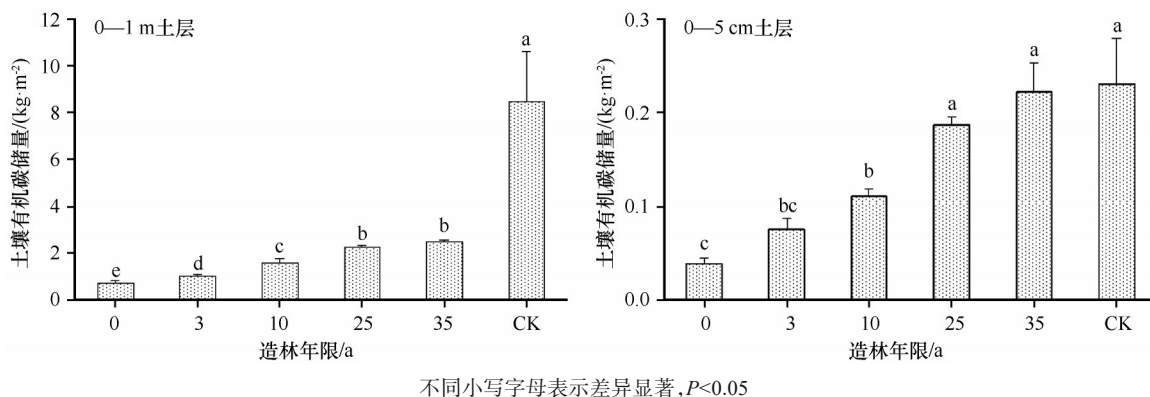


图1 人工梭梭林0—1 m和0—5 cm土壤有机碳储量动态变化(0 a表示流动沙丘, CK表示白刺灌丛,下同)

Fig.1 Dynamics of soil organic carbon storages in 0-1 m and 0-5 cm in artificial *Haloxylon ammodendron* (0 a represents mobile sand dune; CK represents *Nitraria tangutorum*)

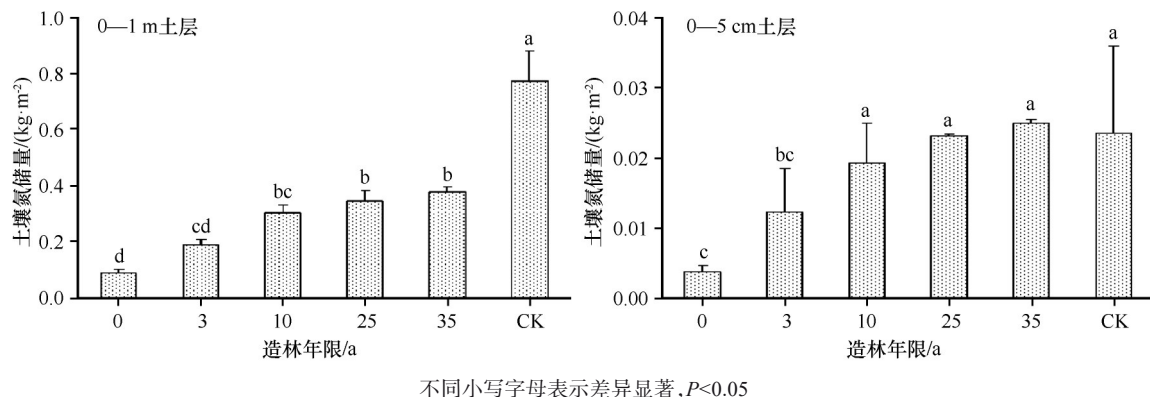


图2 人工梭梭林0—1 m和0—5 cm土壤氮储量的动态变化

Fig.2 Dynamics of soil total nitrogen storages in 0-1 m and 0-5 cm in artificial *Haloxylon ammodendron* (0 a represents mobile sand dune; CK represents *Nitraria tangutorum* shrub)

库的恢复不仅是一个漫长的过程,而且土壤氮恢复速度较土壤有机碳快。

### 3.2 风蚀对人工梭梭林土壤碳氮的影响

通过分析观测期风沙流流量计数据(2008—2012年),发现通过沙漠流入人工梭梭林系统的风蚀量引起的碳输入表现出明显的年际波动。最高年份2010年达到 $2.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,最低年份2012年为 $0.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,平均值 $1.38 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从梭梭林系统流出的风蚀量引起的碳输出同样波动明显(图3)。最高年份2010年和最低年份2009年分别为 $0.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.17 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,平均值 $0.27 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。地表风沙流通过人工梭梭林阻挡后,留存在梭梭林内的风蚀量引起的碳输入输出速率差值均值达 $1.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。人工梭梭林阻挡地表风沙流引起的碳固定速率分别占35 a梭梭林0—5 cm和0—1 m土壤碳固定速率的21.5%和2.2%。

根据风沙流流量计数据,通过沙漠流入梭

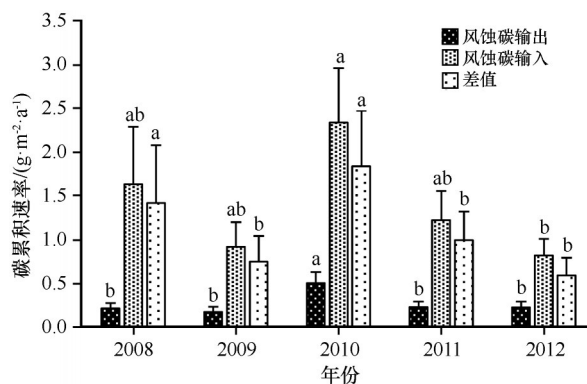
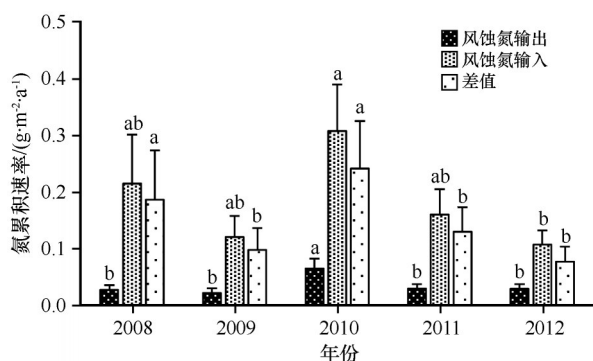


图3 风蚀引起的土壤碳储量变化特征

Fig.3 Variations of soil organic carbon stock caused by wind erosion

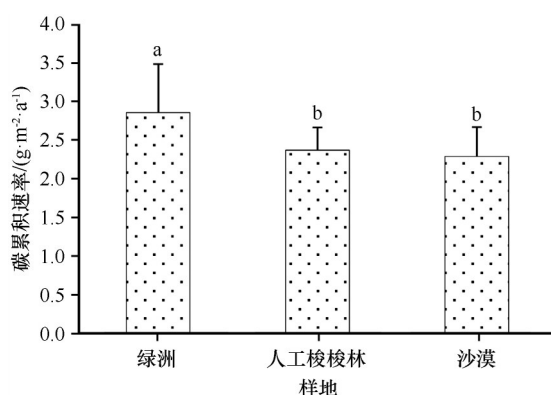
梭梭林系统的风蚀量引起的氮输入在2010年达 $0.31 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,2012年仅 $0.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,平均值 $0.18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。流出梭梭林系统的风蚀量引起的氮输出在2010年达 $0.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,2009年仅 $0.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,平均值 $0.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图4),与土壤有机碳变化趋势一致。地表风沙流通过人工梭梭林阻



不同小写字母表示差异显著,  $P < 0.05$

图4 风蚀引起的土壤氮储量变化

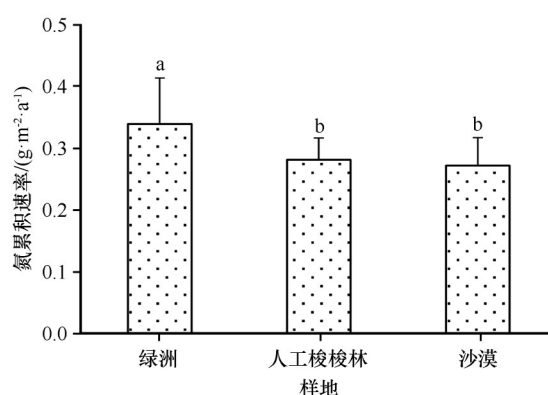
Fig.4 Variations of soil total nitrogen stock caused by wind erosion



不同小写字母表示差异显著,  $P < 0.05$

图5 不同下垫面条件降尘有机碳、氮输入特征

Fig.5 Variation characteristics of organic carbon and total nitrogen in dust fall with different underlying surface conditions and different heights



绿洲、人工梭梭林和沙漠下垫面因降尘引起的氮输入平均速率分别为  $0.76$ 、 $0.29$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $0.31$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 绿洲最高, 沙漠次之, 人工梭梭林最低(图5)。降尘引起的氮固定速率分别占35 a梭梭林0—5 cm和0—1 m土壤氮固定速率的48.1%和3.5%。

## 4 讨论

### 4.1 造林对土壤碳氮库的影响

研究区流动沙丘栽植人工梭梭后0—1 m深土壤碳、氮储量显著增加(图1、2), 且土壤碳氮储量随造林年限增加而增加, 这与其他人在沙地人工林的研究结果一致<sup>[16]</sup>, 说明植被恢复对沙地土壤碳、氮库有显著提升作用, 人工梭梭林龄越长, 地表凋落物和草本植物越多, 梭梭根系能够将吸收到的养分输送到各个土壤剖面, 因此0—1 m深土壤碳、氮储量随造林年限增加而增加, 且0—5 cm层的土壤碳、

挡后, 留存在梭梭林内的风蚀量引起的氮输入输出速率差值均值达  $0.15$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。人工梭梭林阻挡地表风沙流引起的氮固定速率分别占35 a梭梭林0—5 cm和0—1 m土壤氮固定速率的24.9%和1.8%。

### 3.3 降尘对人工梭梭林土壤碳氮的影响

以地面5 m以上层次降尘核算, 绿洲、人工梭梭林和沙漠下垫面因降尘引起的碳输入平均速率分别为  $2.85 \pm 0.65$ 、 $2.37 \pm 0.47$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $2.29 \pm 1.11$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 绿洲最高, 人工梭梭林次之, 沙漠最低(图5)。降尘引起的碳固定速率分别占35 a梭梭林0—5 cm和0—1 m土壤碳固定速率的45.7%和4.7%。

氮增幅高于0—1 m。此外, 35 a人工梭梭林0—1 m深土壤有机碳储量  $2.48$   $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 低于全国土壤碳储量平均水平 ( $10.53$   $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )<sup>[22]</sup>, 更低于全国森林土壤有机碳储量均值  $19.35$   $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[23]</sup>, 主要原因在于民勤地区干旱少雨, 蒸发强烈, 凋落物分解缓慢, 部分成熟林中梭梭出现衰败现象, 能够输送给土壤的养分也少, 导致土壤碳储量低于其他地区。

### 4.2 风蚀对人工林土壤碳氮库的影响

研究期内, 2010年通过沙漠流入人工梭梭林系统的风蚀量引起的碳输入和输出分别为  $2.33$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $0.50$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 留存在梭梭林内的沙尘引起的碳输入速率(差值)均值达  $1.12$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图3), 说明成熟人工梭梭林能有效阻止沙漠地区风蚀引起的沙尘迁移, 降低对土壤碳库的危害<sup>[24]</sup>。姬生勋等<sup>[25]</sup>在山东鲁西北风沙区的研究也表明, 人工固沙林5 a植被地风蚀约等于沙尘积累量, 达到蚀

积平衡或微度风蚀,而8 a植被建设地主要体现为沙尘堆积,土壤风蚀深度随种植年限的增长而降低。王强强等<sup>[26]</sup>通过室内风洞模拟不同配置固沙林的防风效果,发现在 $7.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (当地起沙风速 $\geq 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[19]</sup>)的试验风速下,两行一带式的梭梭固沙林1—3 cm高度平均风速降幅为55.82%,林带内风速急剧降低,风蚀减少,细颗粒物能更多地聚集在梭梭灌丛下不被吹蚀,进而起到固碳增汇的作用。此外,观测期间人工梭梭林阻挡地表风沙流引起的碳固定速率分别占35 a梭梭林0—5 cm和0—1 m土壤碳固定速率的21.5%和2.2%(图3),氮固定速率占24.9%和1.8%(图4),说明风蚀引起的碳、氮累积速率在浅表层较高,这与其他人在沙地的研究结果一致。丁肇龙<sup>[27]</sup>通过运用 $^{137}\text{Cs}$ 观测新疆不同土地利用类型风蚀对土壤有机碳再分配的影响,发现固定沙地中 $^{137}\text{Cs}$ 分布虽较深,最深达到14 cm,但其0—2 cm处的 $^{137}\text{Cs}$ 质量活度都很高,且 $^{137}\text{Cs}$ 质量活度与土壤有机碳极显著正相关( $P<0.01$ )。这是因为固定沙地植被多为灌丛,与本研究区类似,虽然灌丛分布稀疏,但其根系能固定土壤,且因为灌丛的“肥岛效应”,根系周围能聚集较多的结皮、一年生和多年生草本植物,增加了地表粗糙度,减少了风沙流对地表土壤颗粒的吹蚀,部分风沙堆积在灌丛周边,从而导致 $^{137}\text{Cs}$ 在地表富集。因此,风蚀引起的碳、氮输入在0—5 cm层高于0—1 m。

从年际变化上看,5年来风蚀在时间上有很强的变异性,但整体趋于减小和稳定,这符合本地区沙尘暴日数在20世纪80年代中期至21世纪前14年减少的规律<sup>[11]</sup>。但本研究中风蚀引起的碳、氮变化趋势均呈“N”字形结构(图3、4),可能是研究时间不够长,还没有表现出该地区沙尘暴日数5—6年的准周期变化<sup>[11]</sup>。此外,从梭梭林系统流出的风蚀引起的碳输出平均值为 $0.27\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (图3),低于中国因风力侵蚀所致的西北地区土壤有机碳平均流失速率( $10\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )<sup>[1]</sup>,也小于在新疆固定沙地的土壤有机碳流失速率( $3.60\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )<sup>[27]</sup>。人工固沙林能够有效降低风速,促使风蚀携带的细颗粒物尽可能多地沉降在林区内,因此土壤有机碳流失速率较低。与此同时,尽管风沙流流量计能自动收集不同风向近地表0—50 cm层次内的风蚀量,但测定的风蚀产物并不能保证被完全捕获,因此推算人工梭梭林实际捕获的风蚀产物应该高于风沙流流量计获得的数据。

#### 4.3 降尘对人工林土壤碳氮库的影响

张锦春等<sup>[12]</sup>通过调查民勤沙尘源区近地面降尘特征,发现民勤地区沙尘天气频度分布和强度变化影响垂直降尘时空分布,该区降尘主要发生在近地面25 m的范围内,最大降尘出现在近地面1 m处,占25 m范围内降尘总量的10.7%;而25 m以上的降尘量则较小,且基本趋于稳定。降尘空间分布随观测高度增加而减小。此外,降尘量月变化明显,春季3、4月降尘量可达 $9.5\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,且出现频次大,夏季6月降尘量明显减小,降尘频次也下降,降尘量与民勤沙尘天气事件分布相一致<sup>[12]</sup>。在垂直截面上,由于林冠层气流涡流能够引发气流垂直运动,导致垂直截面上降尘量增大<sup>[12]</sup>,因而在人工梭梭林的林冠高度,降尘引起的碳、氮量变化也最大。

风力侵蚀引起沙尘颗粒迁移和沉积进而导致土壤有机碳在地域间的再分布<sup>[28-29]</sup>,对区域土壤碳循环和碳库的影响重大<sup>[1,30]</sup>。一方面,强烈的风沙运动势必引起固沙林的风蚀,造成一定的碳氮库损失<sup>[6]</sup>。另一方面,固沙林的生长发育和演替不仅改变了地面粗糙度,而且固沙林能有效控制沙尘,地上立木又能够拦截大气降尘颗粒物<sup>[7]</sup>,从而在植被地土壤表面累积一定的富含有机质的粉粒和黏粒<sup>[8]</sup>,向土壤固存有机碳和氮<sup>[9]</sup>。为此,维持人工固沙林的合理生长和保持生物多样性,是增强固碳效益的有效途径<sup>[10]</sup>。

## 5 结论

梭梭造林不仅是干旱沙区实现防风固沙的有效措施,同时也能提高沙地土壤有机碳氮储量,35年生人工梭梭林0—1 m和0—5 cm土壤有机碳储量较初始造林地流动沙丘分别增长2.5倍和4.6倍,土壤全氮储量分别增长3.3倍和5.3倍。而且,人工梭梭林土壤有机碳氮受风蚀和降尘风沙活动的影响较大,其中风蚀拦截引起的碳氮输入速率分别占35年生人工梭梭林0—1 m土壤有机碳氮固定速率的2.2%和1.8%,占0—5 cm土壤有机碳氮固定速率的21.5%和24.9%;降尘引起的碳氮输入速率分别占35年生人工梭梭林0—1 m土壤有机碳氮固定速率的4.7%和3.5%,占0—5 cm土壤有机碳氮固定速率的45.7%和48.1%。综上所述,风蚀拦截和降尘能有效促进沙地土壤碳、氮积累,对表层0—5 cm的土壤碳氮固存作用更为明显,且降尘促进作用强于风蚀拦截。



## 参考文献:

- [1] 胡云峰,王绍强,杨风亭. 风蚀作用下的土壤碳库变化及在中国的初步估算[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 760-769.
- [2] 朱孟郡,严平,宋阳,等. 风蚀作用下农田土壤碳损失的估算[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 226-229.
- [3] Lal R, Follett R F, Kimble J, et al. Managing U.S. Cropland to sequester carbon in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 54(1): 374-381.
- [4] 王翔宇,原鹏飞,丁国栋,等. 不同植被覆盖防治土壤风蚀对比研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 38-41.
- [5] Jia H, Gang W, Li G, et al. Wind erosion control utilizing standing corn residue in northeast China[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 153: 112-119.
- [6] Ma Q L, Fehmi J S, Zhang D K, et al. Changes in wind erosion over a 25-year restoration chronosequence on the south edge of the Tengger Desert, China: implications for preventing desertification [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(9): 463.
- [7] 闫德仁,黄海广,薛博. 浑善达克沙地大气降尘颗粒物特征研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(1): 87-92.
- [8] Dong X W, Zhang X K, Bao X L, et al. Spatial distribution of soil nutrients after the establishment of sand-fixing shrubs on sand dune[J]. Plant Soil and Environment, 2009, 55(7): 288-294.
- [9] Zhao H L, Guo Y R, Zhou R L, et al. The effects of plantation development on biological soil crust and topsoil properties in a desert in northern China [J]. Geoderma, 2011, 160 (3/4): 367-372.
- [10] 王涛,陈广庭,钱正安,等. 中国北方沙尘暴现状及对策[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 322-327.
- [11] 杨晓玲,丁文魁,王鹤龄,等. 河西走廊东部沙尘暴气候特征及短时预报[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 449-457.
- [12] 张锦春,赵明,方峨天,等. 民勤沙尘源区近地面降尘特征研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(3): 17-21.
- [13] 陈芳,纪永福,张锦春,等. 民勤梭梭人工林天然更新的生态条件[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1691-1695.
- [14] 常兆丰,李易珺,张剑辉,等. 民勤荒漠区4种植物的防风固沙功能对比分析[J]. 草业科学, 2012, 29(3): 358-363.
- [15] 王彦武,罗玲,张峰,等. 民勤县绿洲边缘固沙林防风蚀效应研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4): 64-70.
- [16] 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.
- [17] 徐高兴,徐先英,王立,等. 梭梭不同密度与配置固沙效果风洞模拟实验[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 189-195.
- [18] 姚增旺,褚建民,吴利禄,等. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭树干液流的时滞特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2339-2346.
- [19] 王自龙,赵明,王立,等. 民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流流量的观测[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(4): 851-856.
- [20] 黄先寒,兰国玉,杨川,等. 海南不同栽培模式下橡胶林灌草物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 115-120.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 30-49.
- [22] 王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
- [23] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [24] 赵明,詹科杰,杨自辉,等. 民勤沙漠-绿洲低空沙尘暴结构特征研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(2): 234-242.
- [25] 姬生勋,刘玉涛,董智,等. 黄泛平原风沙区不同造林年限林地土壤风蚀与理化性质的变化[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 158-161, 167.
- [26] 王强强,唐进年,杨自辉,等. 不同配置固沙林的防风阻沙效果[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 177-184.
- [27] 丁肇龙. 新疆准东地区风蚀对土壤有机碳的影响: 基于<sup>137</sup>Cs示踪技术[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [28] Goossens D. The granulometrical characteristics of a slowly-moving dust cloud[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1985, 10(4): 353-362.
- [29] 苏永中,赵文智. 土壤有机碳动态: 风蚀效应[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2049-2054.
- [30] 罗万银,董治宝. 风蚀对土壤养分及碳循环影响的研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2005, 24(4): 75-83.

## Influence of sand blown activity on soil organic carbon and total nitrogen in artificial *Haloxylon ammodendron* plantations in arid desert regions

Ma Quanlin<sup>1a,b</sup>, Shang Wen<sup>2</sup>, Wang Xinyou<sup>3</sup>, Ma Jing<sup>4</sup>, Zhan Kejie<sup>1b</sup>, Wang Duoze<sup>1b</sup>

(1.a.State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating / b.Gansu Minqin National Station of Desertification Pasture Ecology System Research, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China; 2.Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China; 3.Gansu Radio & Television University, Lanzhou 730030, China; 4.College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Wind activity and its material transportation are the key terrestrial progresses, which have significant impact on sandy land ecosystem. In this study, the artificial *Haloxylon ammodendron* plantations in Minqin County at the lower reaches of Shiyang River were selected as research objects, we evaluated effects of sand fixation afforestation on soil carbon and nitrogen at 0–1 m depth, and change characteristics of carbon and nitrogen caused by wind erosion and dustfall. Our aim was to explore the effects of wind activity on soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) storages in artificial plantations. The results showed that SOC storages in 0–1 m and 0–5 cm increased by 2.5 and 4.6 times, and TN storages in 0–1 m and 0–5 cm increased 3.3 and 5.3 times in 35-year-old *H. ammodendron* plantations compared to mobile sand dunes, respectively. The 5-year averaged carbon and nitrogen input rates caused by near-surface wind-blown intercepted by artificial *H. ammodendron* plantations were  $1.12 \text{ g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$  and  $0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ , accounting for 2.2% and 1.8% of SOC and TN fixed rates in 0–1 m, and 21.5% and 24.9% of SOC and TN fixed rates in 0–5 cm in 35-year-old *H. ammodendron* plantations, respectively. The 5-year averaged carbon and nitrogen input rates caused by dustfall intercepted by artificial *H. ammodendron* plantations were  $2.47 \text{ g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$  and  $0.29 \text{ g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ , accounting for 4.7% and 3.5% of SOC and TN fixed rates in 0–1 m, and 45.7% and 48.1% of SOC and TN fixed rates in 0–5 cm in 35-year-old *H. ammodendron* plantations, respectively. The carbon and nitrogen fixed by dustfall activity was nearly twice that of near-surface wind-blown. Our results conclude that the reduction of artificial *H. ammodendron* plantations on sand blown activity activity can significantly promote SOC and TN accumulation in 0–1 m soil layer in sandy land, which was more obvious in 0–5 cm soil layer.

**Key words:** wind erosion; dustfall; artificial *Haloxylon ammodendron*; soil organic carbon; total nitrogen