

石羊河流域干旱荒漠区人工梭梭林对土壤碳库的影响

尚雯^{1,2}, 李德禄¹, 魏林源¹, 马全林¹, 唐进年¹,
李银科¹, 张芝萍^{1,2}, 张卫星^{1,2}, 高松涛¹

(1. 甘肃省治沙研究所, 荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地, 兰州 730070;

2. 甘肃省治沙研究所, 甘肃临泽荒漠生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 临泽 734200)

摘要: 采用野外调查与室内分析相结合的方法, 研究石羊河流域民勤干旱沙区种植人工梭梭林 4, 13, 36 年后的土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC)、无机碳 (Soil inorganic carbon, SIC)、全氮 (Total nitrogen, TN) 和总碳 (soil total carbon, TC) 含量及储量变化特征。结果表明: 流动沙地种植梭梭后, 0—50 cm 层灌丛下和行间 SOC 和 TN 含量总体随造林年限增加而增加, 5—50 cm 层灌丛下 SIC 含量在 13 年梭梭林地最高。36, 13 年林地 0—50 cm 层灌丛下 SOC 和 TN 储量均高于行间, 而 13 年灌丛下 SIC 储量低于行间, 4 年灌丛下 5—50 cm 层 SOC、TN 和 SIC 储量均低于行间。0—50 cm 层土壤有机碳、无机碳、全氮储量增幅分别为 102.44%, 24.66%, 54.55%, 36 年林地 SOC 和 TN 储量随土层加深先降低后增加, 但 4, 13 年和流动沙地 SOC、SIC 和 TN 储量均随土层加深而增加。土壤有机碳占总碳比例随造林年限增加而增加。相关分析结果表明, 土壤颗粒组成、造林年限、土层深度等与土壤有机碳和全氮储量显著相关 ($P < 0.01$)。民勤干旱沙区造林提高了土壤碳库截存量, 并且随林龄增长而增长。

关键词: 干旱荒漠区; 沙地造林; 土壤有机碳; 土壤无机碳; 土壤全氮

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0191-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.030

Effect of Artificial *Haloxylon Ammodendron* Plantation on Soil Carbon Pools in Arid Desert Region of Shiyang River Basin

SHANG Wen^{1,2}, LI Delu¹, WEI Linyuan¹, MA Quanlin¹, TANG Jinnian¹,
LI Yinke¹, ZHANG Zhiping^{1,2}, ZHANG Weixing^{1,2}, GAO Songtao¹

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070; 2. Gansu Desert

Control Research Institute, Gansu Linze Desert Ecosystem Research Station, Linze, Gansu 734200)

Abstract: This study evaluated the effects of artificial *Haloxylon ammodendron* plantation on the concentrations and storages of soil organic carbon (SOC), soil inorganic carbon (SIC), total nitrogen (TN) and total carbon (TC) by field investigation and laboratory analysis in Minqin desert regions. And the ages of *H. ammodendron* plantations were 4, 13, and 36 years old, respectively. Results showed that the concentrations of SOC and TN in soils of 0—50 cm depth under shrubs and between shrubs both increased with the increasing of plantation age after afforestation, whereas the highest concentrations of SIC in 5—50 cm depth soil under shrubs were observed in 13-year-old plantations. Generally, the storages of SOC and TN were both higher under shrubs than those of between shrubs in 13- and 36-year-old plantations. However, the storage of SIC was less under shrubs than that between shrubs in 13-year-old plantations. And in the soils of 5—50 cm depth, the storages of SOC, SIC and TN were less under shrubs than those of between shrubs in 4-year-old plantations. In the soils of 0—50 cm depth, the storages of SOC, SIC and TN increased by 102.44%, 24.66% and 54.55%, respectively, after afforestation. Additionally, the storages of SOC and TN declined firstly and then increased with the increasing of soil depth in 36-year-old plantation, whereas the storages of SOC, SIC and TN all increased with the increasing of soil depth in shifting sandy land, 4- and 13-year-old plantations. Overall, the proportion of SOC to TC increased with increasing of afforestation age. Pearson's

收稿日期: 2018-01-02

资助项目: 甘肃省治沙研究所荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室(培育基地)开放基金项目(GSDC201505); 国家自然科学基金项目(31660232, 31660237); 甘肃省基础研究创新群体计划项目(1506RJIA155)

第一作者: 尚雯(1985—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: shenwem24@163.com

通信作者: 魏林源(1984—), 女, 助理工程师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: ybhwy@126.com

correlation analysis indicated that storages of SOC and TN were both significantly correlated with soil particle size distribution, soil bulk density, plantation ages and soil depth. Therefore, we concluded that afforestation in arid desert region largely improved the accumulation of soil organic carbon and total carbon pools, and the carbon storage of soil increased with the growth of forest age.

Keywords: arid desert region; afforestation in sandy land; soil organic carbon; soil inorganic carbon; total soil nitrogen

陆地表面的 40% 为干旱、半干旱地区, 这部分地区的土壤大多为盐碱性, 并含有大量的无机碳^[1-2]。干旱半干旱地区土壤无机碳库约占总碳库的 92%, 其中 77.8% 储存在干旱区, 14.2% 储存在半干旱区^[3]。土壤有机和无机碳库在全球碳储存、缓解大气 CO₂ 浓度升高过程中具有重要作用。然而, 较长尺度的全球变暖和不合理的土地利用/覆被变化进一步加剧了干旱区土地沙化、盐碱化等一系列问题, 加剧了土壤碳库损失。人工造林能有效控制生态脆弱区土壤侵蚀和土地退化, 是干旱半干旱区防治土地沙化的重要举措之一。与自然恢复相比, 人工造林可以快速储存大气 CO₂ 进入陆地生态系统碳库, 此外, 人工造林还可通过恢复地上植被、改善区域水热环境、改变微生物群落结构等方式影响土壤碳氮库。因此, 近年来围绕人工造林对土壤碳库影响的研究逐渐增多^[4-7]。已有研究^[4-6]认为干旱、半干旱区造林会增加土壤碳库储量, 但也有研究发现造林后土壤碳库储量呈先降低后增加的趋势^[7], 各区域气候、造林树种、土壤类型、造林年限、土层深度等的差异是造成上述研究结果不一致的主要原因^[7]。此外, 干旱半干旱地区土壤碳库主要以无机碳库为主^[1], 然而目前有关该区域的研究大多数针对人工造林对土壤有机碳库的影响, 有关人工植被恢复措施对土壤无机碳库影响的研究相对较少^[8]。

梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 是藜科梭梭属灌木, 抗旱、抗寒、耐瘠薄, 具有较高的生态经济价值, 是西北干旱沙区优良的造林树种^[9]。民勤地区沙漠化严重, 从 20 世纪 50 年代以来, 该区大范围引种和栽植梭梭用于防风固沙, 截至目前, 人工梭梭林面积近 9 万 hm², 占人工林总面积的 51.5%, 在当地固沙林中占主导地位^[10]。近年来学者围绕民勤人工梭梭降水截留^[11]、林木更新^[9]、防风固沙功能^[12]、光合与蒸腾^[13]、种群特征^[14] 等方面进行了一系列的研究。然而, 目前关于民勤梭梭种植对土壤碳库尤其是无机碳库影响的研究还较少, 并且因为有限的的数据, 无法准确估算干旱沙区人工造林的土壤碳库效益。据此, 本文对民勤地区 4, 13, 36 年人工梭梭林土壤碳、氮储量分配特征及其影响因子进行了研究, 为区域尺度上估算干旱沙区固沙林的人工固碳效应及碳平衡提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于巴丹吉林沙漠东南缘的民勤绿洲荒漠过渡带 (38°33'36"—38°34'25" N, 102°59'07"—103°59'07" E), 该区属于典型的温带大陆性荒漠气候, 年降水量 113 mm, 多集中在 7—9 月, 年蒸发量 2 644 mm, 年均气温 7.4 °C。地带性土壤为灰棕漠土, 非地带性土壤为风沙土、草甸土和草甸沼泽土^[10]。地带性植被为白刺 (*Nitraria tangutorum*)、沙拐枣 (*Calligonum mongolicum*)、沙米 (*Agriophyllum squarrosum*)、五星蒿 (*Bassia dasyphylla*)、猪毛菜 (*Salsola collina*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 和盐生草 (*Halogeton glomeratus*) 等。

2 研究方法

本研究以民勤治沙综合试验站附近不同年代 (4, 13, 36 年) 种植的梭梭人工群落为研究对象, 栽种年限由调查询问所得, 以相邻的流动沙丘为对照, 人工梭梭群落种植的株距为 3~4 m, 行距为 2~3 m, 带与主风向垂直。各年代种植的梭梭在种植前均为平缓的流动沙丘, 种植时行间有黏土沙障, 以固定流沙和提高栽植成活率, 各年代梭梭群落有轻度放牧现象。对每个年代的梭梭人工林, 分别选择 3 个分布在相邻沙丘上的 20 m×20 m 的小区作为研究样地, 同时选择 3 个邻近的流动沙丘作为对照样地, 共 12 个小区。

2.1 植被调查

2016 年 8 月, 在每个人工林小区内布设 3 条样带, 每条带上选择 6 株相邻的梭梭, 测定植株高度、冠幅和密度 (表 1), 然后在每个人工林小区和流动沙丘内, 调查 1 m×1 m 的草本样方 6 个, 记录高度、数量、物种组成和盖度。

2.2 土壤样品采集与分析

2016 年 8 月, 在每个流动沙丘小区内随机挖取 6 个土壤剖面, 每个剖面分 4 个层次 (0—5, 5—15, 15—30, 30—50 cm) 先采集环刀样, 之后再采集每层土样。4, 13, 36 年梭梭人工林小区在样带上取样, 同样按照 4 个层次 (0—5, 5—15, 15—30, 30—50 cm) 分 2 个部位取样: 灌丛下和行间。每个灌丛带上分别取 3 株个体灌丛下样组成 1 个混合样和相应行间 3 个点组成混合样, 同时每个部位的每层次采集环刀样。环刀

样带回实验室后烘干测定土壤容重(g/cm^3)。新鲜混合土样带回民勤治沙综合试验站实验室后分为 2 部分,一部分用烘干法测定土壤重量含水量(%),另一部分经风干过 2 mm 筛后用马尔文 2000 型激光粒度仪(Mastersizer2000—APA2000)测定土壤机械组成,用 1:2.5 土水比测定土壤 pH,用元素分析仪(Elementar vario macro cube, Germany)测定土壤有机碳、全氮和总碳含量,总碳含量减去有机碳含量得到无机碳含量。

因所采集土壤全部通过 2.0 mm 筛,因此,单位面积一定深度范围内土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC_s , kg/m^2)储量、无机碳(Soil inorganic carbon, SIC_s , kg/m^2)储量,全氮(Total nitrogen, TN_s , kg/m^2)储量和总碳(Total soil carbon, TC_s , kg/m^2)储量分别为各个土层储量之和,计算公式分别为:

$$\text{SOC}_s = \sum_{i=1}^n BD_i \times \text{SOC}_i \times D_i / 100 \quad (1)$$

$$\text{SIC}_s = \sum_{i=1}^n BD_i \times \text{SIC}_i \times D_i / 100 \quad (2)$$

表 1 不同林龄人工梭梭林地概况

造林年限	海拔/ m	经纬度	行间距/ m	株高/ m	冠幅/ m	密度/ (株· m^{-2})	灌丛下	行间
流动沙丘	1273	38°34'25" N, 103°59'07" E	0	0	0	0	沙米,虫实	沙米,虫实
4 年	1340	38°33'36" N, 103°01'30" E	2.18×4.10	1.16	1.07×1.04	0.09	沙米,盐生草	沙米,盐生草
13 年	1257	38°33'37" N, 102°59'50" E	2.18×3.42	1.60	1.45×1.36	0.11	五星蒿,盐生草	五星蒿,盐生草
36 年	1273	38°34'25" N, 102°59'07" E	3.17×2.77	1.53	1.20×1.13	0.04	五星蒿,黄花补血草	五星蒿,猪毛蒿

3.1 梭梭固沙林土壤理化性质

流动沙丘种植梭梭固沙林后,0—5 cm 层粗砂粒含量随造林年限增加逐渐下降(表 2),5—50 cm 层粗砂粒含量在造林 13 年后降到最低,然后逐渐升高。细砂粒含量则随造林年限增加而增加并在 13 年林地达到最大,之后下降。流沙造林提高了土壤黏粒含量,0—5 cm 层土壤黏粒含量从流动沙丘到 4,13,36 年林地灌丛下分别升高了 2.36,1.67,3.05 倍,行间分别升高了 2.44,2.08,3.25 倍。pH 总体随造林年限增加而下降,从流动沙丘 0—5 cm 层的 9.07 下降到 36 年林地的 8.39。

3.2 梭梭固沙林对土壤碳、氮含量的影响

由表 3 可知,灌丛下和行间土壤有机碳含量在 0—50 cm 层均随林龄增加而增加(行间 5—15 cm 除外),并随土层加深而下降。4 年林地土壤有机碳含量灌丛下低于行间,而 13,36 年林地灌丛下土壤有机

$$\text{TN}_s = \sum_{i=1}^n BD_i \times \text{TN}_i \times D_i / 100 \quad (3)$$

$$\text{TC}_s = \sum_{i=1}^n BD_i \times \text{TC}_i \times D_i / 100 \quad (4)$$

式中: BD_i 为第 i 层的土壤容重(g/cm^3); D_i 为第 i 层的土层厚度(cm); SOC_i 、 SIC_i 、 TN_i 和 TC_i 分别为第 i 层的 SOC, SIC, TN 和 TC 含量(g/kg); n 是土层数目;100 为转换系数。

2.3 数据统计与分析

采用 Excel 和 SPSS 18.0 中的单因素方差分析(显著性水平 $\alpha=0.05$)和相关分析对数据进行统计分析,采用 Excel 2010 软件进行绘图。

3 结果与分析

在流动沙丘和 4,13 年林地,植物种以沙米、虫实、五星蒿和盐生草等一年生草本植物为主,36 年林地开始出现黄花补血草、猪毛蒿等多年生草本植物,说明梭梭固沙林的种植给草本植物提供了一个适宜的生长环境,流动沙丘得以固定。此外,研究区梭梭冠幅、密度和株高均在 13 年林地最高。

碳含量高于行间;0—5 cm 层土壤无机碳含量在 36 年林地灌丛下最高(表 3),在 5—50 cm 层,13 年林地灌丛下土壤无机碳含量最高。4,13 年林地各土层无机碳含量总体表现为灌丛下低于行间,而 36 年林地灌丛下无机碳含量高于行间;土壤总碳含量分布特征与无机碳相近,36 年林地 0—5 cm 层土壤总碳含量显著高于其他 3 类样地,在 5—50 cm 层,土壤总碳含量在 13 年林地最高,但各林间差异不显著。4 年林地 0—30 cm 层土壤总碳含量灌丛下低于行间,而 36 年林地 0—50 cm 层土壤总碳含量均为灌丛下高于行间。

与土壤有机碳含量相似,0—50 cm 层全氮含量也随林龄增加而增加,13,36 年林地全氮含量随土层加深而降低,而 4 年林地和流动沙丘全氮含量随土层加深先降低再升高。土壤全氮含量在各林地中均为灌丛下高于行间。

表 2 不同林龄人工梭梭林土壤理化性质

样地类型	土层深度/cm	200~2000 μm (粗砂粒)	20~200 μm (细砂粒)	2~20 μm (粉粒)	0.1~2 μm (黏粒)	pH	
流动沙丘	0-5	74.91±1.57a	19.81±1.45b	3.90±0.14c	1.38±0.05c	9.07±0.02b	
	5-15	71.51±3.06a	23.38±2.86c	3.73±0.30b	1.37±0.11a	9.06±0.02b	
	15-30	67.28±2.85a	27.50±2.79c	3.79±0.19a	1.44±0.07a	9.01±0.02b	
	30-50	71.96±2.89a	23.36±2.75c	3.44±0.22a	1.24±0.06a	9.04±0.03a	
4 年	灌丛下	0-5	62.10±3.61b	22.81±0.92b	11.83±2.51b	3.25±0.61b	9.06±0.16b
	5-15	71.11±1.73a	23.64±1.58c	3.85±0.23b	1.39±0.06a	9.09±0.05b	
	15-30	71.43±0.80a	23.74±0.72c	3.54±0.24a	1.29±0.08a	9.04±0.03b	
	30-50	74.58±1.65a	20.92±1.63c	3.30±0.17a	1.21±0.05a	9.03±0.03a	
行间	0-5	61.57±3.79b	22.97±1.07b	12.11±3.05b	3.36±0.76b	8.68±0.13c	
	5-15	62.88±6.79ab	25.33±1.29c	9.47±6.04a	2.31±1.08a	8.98±0.09b	
	15-30	69.30±1.99a	25.91±1.94c	3.47±0.22a	1.32±0.08a	9.06±0.02b	
	30-50	72.80±1.21a	22.28±1.18c	3.60±0.13a	1.32±0.05a	9.06±0.02a	
13 年	灌丛下	0-5	34.70±2.14c	55.33±2.75a	7.66±0.86bc	2.31±0.25bc	9.60±0.13a
	5-15	41.90±6.09c	48.48±5.65a	7.34±3.04ab	2.29±0.57a	9.53±0.04a	
	15-30	43.15±5.82c	51.28±5.69a	4.06±0.31a	1.52±0.16a	9.37±0.04a	
	30-50	44.77±5.54c	49.77±5.31a	3.95±0.16a	1.51±0.15a	8.93±0.04a	
行间	0-5	35.36±2.91c	51.21±3.40a	10.56±2.65b	2.87±0.70b	8.82±0.09b	
	5-15	45.44±6.56bc	47.14±6.21a	5.69±1.63ab	1.74±0.34a	9.16±0.10b	
	15-30	47.28±5.42bc	46.24±5.25ab	4.69±0.82a	1.80±0.25a	9.06±0.04b	
	30-50	46.97±5.80c	47.67±5.65a	3.92±0.18a	1.45±0.10a	8.98±0.03a	
36 年	灌丛下	0-5	30.13±4.33c	50.20±2.42a	15.46±1.82ab	4.21±0.41a	8.93±0.19b
	5-15	55.01±2.25b	36.80±1.97b	6.28±0.76ab	1.92±0.17a	9.07±0.10b	
	15-30	54.48±3.11b	38.80±3.15b	5.00±0.27a	1.72±0.03a	8.97±0.08b	
	30-50	57.36±3.24bc	36.46±3.16b	4.59±0.21a	1.59±0.06a	8.96±0.12a	
行间	0-5	26.39±3.86c	51.51±2.21a	17.61±1.77a	4.48±0.39a	8.39±0.10c	
	5-15	59.35±2.86b	34.03±2.48bc	4.86±0.47ab	1.76±0.11a	8.69±0.13c	
	15-30	62.00±3.37a	31.73±3.33bc	4.71±0.42a	1.56±0.09a	8.70±0.13c	
	30-50	59.10±4.12b	35.10±4.02b	4.23±0.18a	1.56±0.07a	8.90±0.04a	

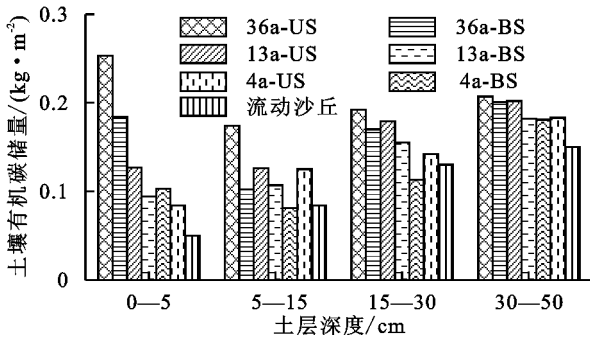
注:表中数据为平均值±标准误差;同一列相同土层不同小写字母表示差异性显著($P<0.05$)。下同。

表 3 不同林龄人工梭梭林地土壤有机碳、无机碳、总碳和全氮含量

样地类型	土层深度/cm	土壤有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	无机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	
流动沙丘	0-5	0.62±0.03e	3.62±0.17c	4.24±0.19c	0.17±0.01c	
	5-15	0.55±0.02b	3.01±0.18ab	3.57±0.19a	0.15±0.01b	
	15-30	0.59±0.02bc	2.69±0.22c	3.28±0.21a	0.14±0.01bc	
	30-50	0.52±0.02d	2.97±0.26b	3.49±0.25a	0.16±0.01b	
4 年	灌丛下	0-5	1.31±0.14d	4.88±0.50bc	6.19±0.60b	0.24±0.02bc
	5-15	0.52±0.05b	3.07±0.17b	3.59±0.16a	0.15±0.01b	
	15-30	0.49±0.06c	2.95±0.18bc	3.43±0.17a	0.16±0.01b	
	30-50	0.58±0.03cd	3.00±0.12b	3.58±0.13a	0.17±0.01b	
行间	0-5	1.14±0.22de	5.50±0.95ab	6.64±1.16b	0.21±0.03bc	
	5-15	0.80±0.20ab	3.83±0.99ab	4.63±1.18a	0.17±0.02ab	
	15-30	0.59±0.04bc	3.10±0.08abc	3.70±0.09a	0.12±0.01c	
	30-50	0.58±0.02bcd	2.93±0.11b	3.51±0.12a	0.15±0.01b	
13 年	灌丛下	0-5	1.86±0.17c	4.43±0.15bc	6.29±0.24b	0.35±0.02ab
	5-15	0.85±0.15ab	4.48±0.66a	5.33±0.79a	0.21±0.02a	
	15-30	0.80±0.06ab	3.32±0.16ab	4.13±0.17a	0.17±0.01ab	
	30-50	0.67±0.04abc	3.33±0.17ab	4.00±0.20a	0.19±0.01a	
行间	0-5	1.24±0.14de	4.85±0.35bc	6.08±0.44b	0.25±0.03bc	
	5-15	0.71±0.06b	3.43±0.21ab	4.14±0.18a	0.19±0.02ab	
	15-30	0.69±0.05b	3.54±0.22a	4.22±0.26a	0.15±0.01bc	
	30-50	0.63±0.03abc	3.50±0.15a	4.12±0.15a	0.15±0.01b	
36 年	灌丛下	0-5	3.39±0.26a	6.86±0.50a	10.24±0.62a	0.60±0.05a
	5-15	1.10±0.16a	3.67±0.10ab	4.77±0.23a	0.21±0.02a	
	15-30	0.88±0.08a	3.28±0.09ab	4.16±0.13a	0.20±0.02a	
	30-50	0.71±0.04a	3.24±0.09ab	4.05±0.12a	0.17±0.01ab	
行间	0-5	2.53±0.27b	6.33±0.58ab	8.87±0.81a	0.47±0.10a	
	5-15	0.67±0.08b	3.32±0.17ab	3.99±0.22a	0.19±0.01ab	
	15-30	0.78±0.05ab	2.91±0.13bc	3.69±0.13a	0.17±0.01ab	
	30-50	0.67±0.05ab	3.23±0.18ab	3.90±0.21a	0.16±0.02b	

3.3 梭梭固沙林对土壤有机碳(SOC)储量的影响

沙地造林显著提高了0—50 cm层土壤有机碳储量,并随造林年限增加而增加(图1)。36,13年林地灌丛下土壤有机碳储量在各土层均高于行间,4年林地0—5 cm层灌丛下土壤有机碳储量高于行间,5—50 cm土层灌丛下低于行间。各林地土壤有机碳储量与流动沙丘在0—15 cm层差异显著,在15—50 cm层差异不显著,说明沙地造林对土壤有机碳的增长在表层0—15 cm最为明显,而在亚表层影响较小。36年林地灌丛下和行间土壤有机碳储量随土层加深先降低后增加,而13,4年林地灌丛下和行间土壤有机碳储量随土层加深逐渐升高。总体而言,流动沙丘造林使0—50 cm层土壤有机碳储量从0.41 kg/m²增加至0.83 kg/m²。



注:US表示灌丛下;BS表示行间。下同。

图1 民勤绿洲边缘人工梭梭林土壤有机碳储量分布

3.4 梭梭固沙林对土壤无机碳(SIC)储量的影响

由图2可知,0—5 cm层土壤无机碳储量在36年林地最高,但在5—50 cm土层,13年林地无机碳储量最高,4,36年次之,流动沙丘最低。各林地灌丛下和行间无机碳储量均随土层加深而增加。36年林地灌丛下无机碳储量在各土层均高于行间,13,4年林地灌丛下无机碳储量则低于行间,流沙造林后,0—50 cm层土壤无机碳储量从2.23 kg/m²增加至2.78 kg/m²。

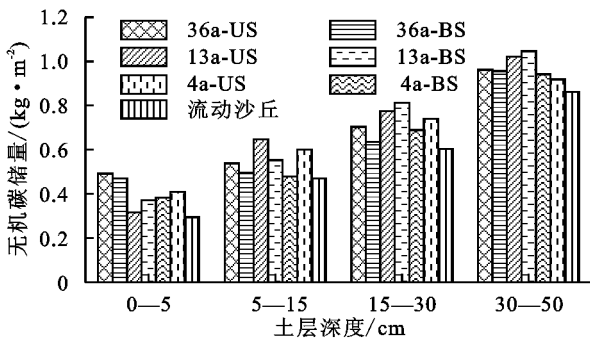


图2 民勤绿洲边缘人工梭梭林土壤无机碳储量分布

3.5 梭梭固沙林对土壤全氮(TN)储量的影响

人工造林也明显提高了土壤全氮储量(图3)。0—30 cm层全氮储量在36年林地最高,13,4年次之,流动沙丘最低。36年林地灌丛下和行间全氮储量随土层加深先降低后增加,而流动沙丘,4,13年林地全氮储量均随土层加深逐渐增加。各林龄人工林

0—50 cm层全氮储量总体均为灌丛下高于行间,流沙造林使0—50 cm层土壤全氮储量从0.11 kg/m²增加至0.17 kg/m²。

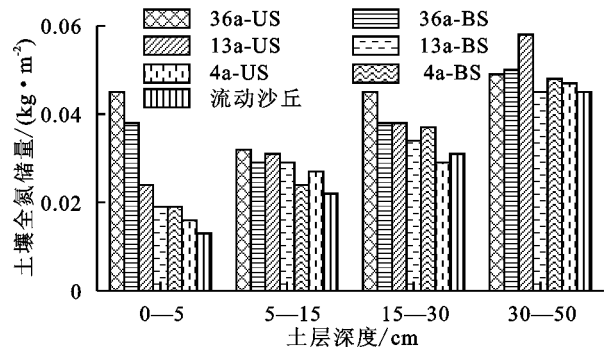


图3 民勤绿洲边缘人工梭梭林土壤全氮储量分布

3.6 梭梭固沙林对土壤总碳(TC)储量的影响

人工植被恢复过程中,0—50 cm层土壤总碳储量增加幅度为12.46%~33.24%(图4)。0—5 cm层土壤总碳储量随林龄增加呈先升高后轻微下降最后大幅增加的走势,与土壤无机碳储量变化一致;5—50 cm层总碳储量随林龄增加而增加并在13年林地达到最大,之后下降。

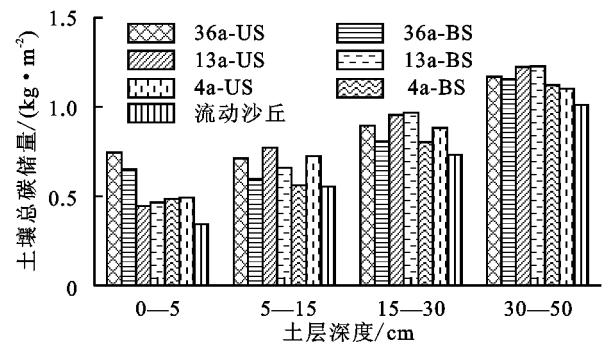


图4 民勤绿洲边缘人工梭梭林土壤总碳储量分布

随造林年限增加,0—50 cm层无机碳储量占总碳储量的比例逐渐从84.32%下降至76.53%,有机碳储量占总碳储量的比例则逐渐从15.68%增加至23.47%(图5)。13,36年林地0—50 cm层灌丛下土壤有机碳储量占总碳储量比例均高于行间。

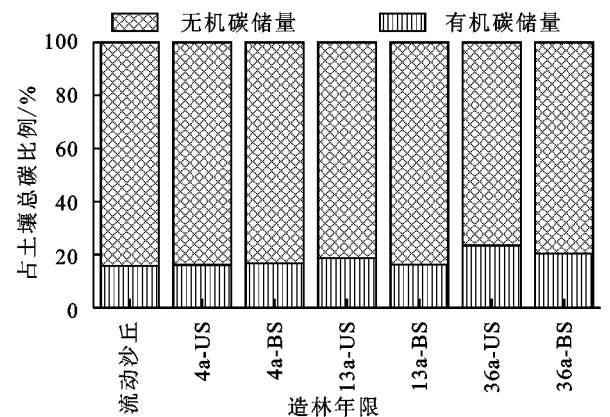


图5 不同林龄梭梭林土壤有机碳、无机碳储量在总碳储量中的分配比例

3.7 人工固沙林土壤碳、氮储量与理化性质的关系

由表 4 可知,有机碳储量与颗粒组成、造林年限、土层深度和层位呈极显著正相关关系($P < 0.01$);全氮储

量与造林年限和土层深度间呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与速效磷和层位间呈显著相关关系($P < 0.05$);无机碳储量和总碳储量与土壤水分、速效磷间呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。

表 4 土壤理化性质相关系数矩阵

指标	有机碳储量	全氮储量	无机碳储量	总碳储量	土壤水分	容重	pH	速效磷	粗砂粒	细砂粒	粉粒	黏粒	造林年限	土层深度	层位
有机碳储量	1														
总氮储量	0.738**	1													
无机碳储量	0.620**	0.690**	1												
总碳储量	0.734**	0.743**	0.988**	1											
土壤水分	0.137	0.111	0.200**	0.200**	1										
土壤容重	-0.265**	-0.091	-0.007	-0.058	-0.349**	1									
pH	-0.128	-0.027	-0.062	-0.079	0.015	0.112	1								
速效磷	-0.021	-0.150*	-0.278**	-0.245**	-0.066	-0.052	0.114	1							
粗砂粒	-0.289**	-0.065	0.025	-0.035	-0.199**	0.570**	0.055	-0.230**	1						
细砂粒	0.203**	0.111	-0.007	0.033	0.227**	-0.574**	0.159*	0.146*	-0.897**	1					
粉粒	0.265**	-0.061	-0.033	0.024	0.012	-0.176*	-0.423**	0.237**	-0.526**	0.096	1				
黏粒	0.244**	-0.084	-0.079	-0.020	0.028	-0.217**	-0.431**	-0.244**	-0.567**	-0.152*	0.979**	1			
造林年限	0.453**	0.301**	0.046	0.129	0.083	-0.469**	-0.246**	-0.035	-0.430**	-0.426**	0.147*	0.182*	1		
土层深度	-0.400**	-0.229**	0.048	-0.037	-0.066	0.487**	0.079	-0.044	0.579**	-0.579**	-0.187*	-0.231**	-0.919**	1	
层位	-0.226**	-0.188*	-0.062	-0.099	0.093	0.099	-0.221**	-0.062	0.194**	-0.201**	-0.048	-0.071	-0.217**	0.501**	1

注:**表示极显著相关($P < 0.01$);*表示显著相关($P < 0.05$)。

4 讨论

4.1 造林对土壤有机碳和全氮储量的影响

研究区 4,13,36 年梭梭人工林 0—50 cm 层土壤有机碳和全氮含量和储量总体随林龄增加而增大,表层(0—5 cm)最明显(表 3,图 1,图 3),这与前人^[5,15]在干旱半干旱地区种植人工林的研究结果一致,说明人工种植灌木明显提高了民勤干旱沙区土壤碳汇功能。流动沙丘种植梭梭固沙林后,植被地上部分数量和种类增加(表 1),有效降低了近地面风蚀和沙粒的移动,使沙面微环境得到改善,疏松的沙土和相对稳定的沙面环境给植被的入侵和生长创造了条件^[16]。随着造林年限的增加,沙面基本固定,人工植物群落环境开始形成,此时入侵的植物种类逐渐增加,植被盖度和物种个体数也随之增加,群落环境相比流动沙丘有了明显改善,黄花补血草等多年生草本开始出现,伴随有五星蒿等一年生草本,物种数量增多,受损生态系统得以有效固定,土壤粉粒和黏粒含量随造林年限的增加而增加(表 2),土壤之间的黏结力变强,能截存更多的养分进入土壤。相关分析结果表明,土壤全氮储量和有机碳储量间存在显著相关关系(表 4),说明土壤氮的管理对于提高土壤碳库具有很大潜力^[17],而土壤水分与有机碳和全氮储量相关均不显著(表 4),说明民勤沙区水分对土壤碳氮储量的分布影响较小,这可能与当地较低的年降水量(113 mm)有关。另外,随造林年限增加,固沙表面逐渐形成的

土壤微生物结皮的固碳、固氮作用也进一步增加了土壤碳储量,0—50 cm 层土壤有机碳含量和储量因此提高^[18]。灌丛下土壤有机碳和全氮含量和储量高于行间(表 3,图 1,图 3),这与前人^[5]的研究结果一致。李香真等^[19]在内蒙古锡林浩特退化草地的研究发现,小叶锦鸡儿诱导了退化草地恢复过程中土壤有机质和全氮含量在空间上的分异,致使灌丛内土壤有机质和全氮含量显著高于灌丛外。民勤沙地种植梭梭固沙林后,灌木的定植和生长稳定了下垫面,削弱了风沙流活动,细颗粒物在灌木周围沉积,灌木叶片对降尘的截获又通过灌丛雨和灌丛茎流在灌丛下得以积累。其次,小叶锦鸡儿灌木林的生长发育极大地改变了退化沙地景观异质性,景观廊道由相对“平直”变得更“曲折”^[19],灌丛更有利于吸收风蚀作用携带的土壤细粒物质和草本植物种子,并使这些“物质流”在灌丛下储存,在保护物种多样性的同时,灌木林的遮蔽作用也为草本植物提供了较为良好的生长发育的环境,灌木基部的土壤结构因此得以改善,并富集大量的有机质和其他营养元素,从而在灌丛附近形成“肥岛”效应^[20]。

本研究中,流动沙丘造林使得 0—50 cm 层土壤有机碳储量从 0.41 kg/m² 增加至 0.83 kg/m²,全氮储量从 0.11 kg/m² 增加至 0.17 kg/m²(图 1,图 3),与科尔沁沙地造林的结果相近^[21],但低于 Gao 等^[8]在宁夏盐池流动沙地杨树人工林的调查结果。研究^[4,22]发现,造林对土壤碳氮储量的影响与造林树种、造林年限、研究区气

候、土地利用类型等密切相关。民勤沙地造林前的土地覆被方式与 Gao 等^[8]在宁夏地区的一致,均为流动沙地,但是本研究中的造林树种为梭梭灌木,Gao 等^[8]的造林树种为银白杨,不同树种人工林的密度和遮蔽作用、林下草本植被组成和数量,以及能够供应给土壤的凋落物数量均存在较大差异。此外,民勤地区年降雨量 113 mm,远低于 Gao 等^[8]所在的宁夏地区年降雨量(275 mm),较低的降雨量限制了凋落物的分解,致使研究区土壤有机碳储量较低。

从流动沙丘到 36 年人工林地,表层土壤有机碳储量占整个剖面土壤有机碳储量的比例逐渐上升(图 5),说明土壤有机碳逐渐向表层聚集,这可能与梭梭根系的生长发育动态及地表微生物结皮数量有关。造林初期,人工林内表土层的细颗粒物物质和枯落物极易被风沙吹走,难以固定。伴随着沙丘固定年限的增加,表土层土壤微生物结皮逐渐发育,这些结皮能高效利用干旱地区的小量降雨^[23],使结皮中的微生物活跃起来,并能长期捕获和积累降尘和降水中的细颗粒物进入表土层^[18],提高了表土层对养分的循环利用。另外,土壤微生物结皮也能固定少量氮进入土壤养分库^[24],土壤氮含量也因此在表土层富集,这种现象在 36 年梭梭人工林中表现最为明显。

4.2 造林对无机碳储量的影响

土壤无机碳多为次生碳酸盐,其形成转化周期较长,是大气 CO₂ 重要的碳汇过程^[25]。本研究中,沙地造林提高了土壤无机碳储量,0—5 cm 层的无机碳储量在 36 年人工林地最高,而在 5—50 cm 层,无机碳储量在 13 年人工林最高(图 2)。相关分析结果表明,无机碳与有机碳、全氮储量间存在极显著正相关关系(表 4),说明有机碳增加的同时也促进了无机碳增加。在 0—50 cm 的土壤剖面中,各林地 0—15 cm 层土壤无机碳储量占整个土壤剖面的比例较低,约为 33%~38%(图 2),说明表层土壤存在一定程度的脱钙现象,可能是由于土壤微生物分解了表层部分有机碳并释放出了 CO₂,造成 0—15 cm 层 CO₂ 分压大,梭梭造林后土壤 pH 下降,促进了碳酸盐分解^[25]。此外,表层沙土结构疏松,也有利于无机碳向下层淋溶迁移,进而引起梭梭林地表层土壤无机碳储存能力下降。在不同层位间,13,4 年梭梭灌丛下无机碳储量低于行间,而 36 年梭梭灌丛下无机碳储量高于行间(图 2),说明固沙植被的生长发育过程可以促进 0—50 cm 层土壤无机碳储量在灌丛下和行间更均匀分布,这可能与梭梭林的辐射效应有关^[26]。固沙植被发育过程中行间土壤水分条件的改善和土壤有机物质的增加改变了碳酸盐的数量(表 4),此外,梭梭根系向行间延伸也增加了行间土壤盐分的输入,进而

改变灌丛下和行间土壤无机碳储量。

本研究中,土壤无机碳储量(0—50 cm)为 2.23~2.78 kg/m²(图 2),远低于前人^[25]在干旱、半干旱地区的研究结果,说明民勤干旱沙区可以从大气中固定的 CO₂ 较少。从流动沙地到 36 年林地,有机碳储量占总碳储量比例从 15.68%增加到 23.47%,而无机碳储量占总碳储量比例从 84.36%下降到 76.56%(图 5),说明沙地人工造林后有更多的碳酸盐被分解利用,进一步降低了土壤无机碳截存量,这与 Sartori 等^[27]的研究结果一致。另外,流动沙丘造林后,无机碳储量逐渐升高并在 13 年林地达到最大,之后又下降,这与 Gao 等^[8]在宁夏盐池沙漠区造林的研究结果不同。Gao 等^[8]发现,沙地种植杨树后,0—100 cm 层土壤无机碳储量持续升高,而 Sartori 等^[27]在半干旱荒漠地区的研究结果发现造林后土壤无机碳储量呈下降趋势。随造林年限的延长,土壤 CO₂ 分压和水分状况发生变化,土壤有机碳和无机碳发生溶解的逆过程,土壤有机碳分解所产生的 CO₂ 有一部分最终转化为沉积性碳酸盐^[28];同时,土壤可以固定大气或土壤中的 CO₂ 并合成碳酸盐,重力水淋溶造成表层土壤脱钙,土壤无机碳含量和储量因此增加^[29]。

4.3 造林对土壤总碳储量的影响

本研究中,固沙梭梭林 0—5 cm 层土壤总碳储量与有机碳储量一致,总体随造林年限增加而增加(图 4),可能是有机碳的“表聚性”弥补了无机碳的脱钙现象,致使表层土壤总碳与有机碳变化规律一致^[25]。随造林年限增加,无机碳占总碳储量比例逐渐下降,而有机碳占总碳储量比例逐渐上升并在 36 年灌丛下达到最高(图 5),说明沙地固定能提高土壤有机碳占总碳库的比例。此外,尽管造林提升了有机碳占土壤总碳储量的比例,但是研究区土壤无机碳占总碳比例仍然高于有机碳所占比例,表明研究区土壤碳库仍以无机碳库为主。

5 结论

(1)民勤干旱沙地种植梭梭后,土壤有机碳和全氮含量随造林年限的增加而增加,而无机碳含量在 13 年林地最高。13,36 年梭梭人工林土壤有机碳、无机碳和全氮含量在灌丛下高于行间,说明沙地造林明显提高了民勤干旱沙区土壤碳汇功能,并且在表层的灌丛下更为明显。

(2)流动沙丘造林使得 0—50 cm 层土壤有机碳储量、无机碳储量和全氮储量分别增加了 102.44%,24.66%,54.55%。土壤有机碳储量与土层深度、造林年限、细砂粒含量、全氮和总碳储量间呈极显著正相关关系,与土壤水分相关不显著。土壤无机碳储量

与总碳储量及土壤水分间相关显著,与其他因子相关不显著。说明退化沙地恢复过程中,细颗粒组分及造林年限等对土壤有机碳储量的截存起到了很大的促进作用,而总碳储量和土壤水分是影响无机碳储量截存的主要因子。

(3)随固沙时间延长,土壤总碳储量呈上升趋势,其中有机碳占总碳比例逐渐升高,无机碳占总碳比例逐渐下降,说明沙地人工造林能提升 0—50 cm 层土壤总碳库量。

参考文献:

- [1] Oldfield S. Deserts: The living drylands [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 2004.
- [2] 王志刚,王忠媛,李彦. 干旱区盐碱土剖面无机碳组分分布特征[J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 631-636.
- [3] Eswaran H, Reich P, Kimble J. Global carbon stocks. In: Lal R, Kimble J, Eswaran H, Stewart B (eds) Global climate change and pedogenic carbonates [M]. Boca Raton: Chemical Rubber Company Press, 2000.
- [4] Berthrong S T, Píneiro G, Jobbágy E G, et al. Soil C and N changes with afforestation of grasslands across gradients of precipitation and plantation age [J]. Ecological Application, 2012, 22(1): 76-86.
- [5] Li Y Q, Chen Y P, Wang X Y, et al. Improvements in soil carbon and nitrogen capacities after shrub planting to stabilize sand dunes in China's Horqin Sandy Land [J]. Sustainability, 2017, 9(4): 662.
- [6] Shang W, Li Y Q, Zhao X Y, et al. Effects of *Caragana microphylla* plantations on organic carbon sequestration in total and labile soil organic carbon fractions in the Horqin sandy land, northern China [J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(5): 688-700.
- [7] Deng L, Shanguan Z P. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China [J]. Land Degradation & Development, 2016, 28(1): 151-165.
- [8] Gao Y, Tian J, Pang Y, et al. Soil inorganic carbon sequestration following afforestation is probably induced by pedogenic carbonate formation in northwest China [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1282.
- [9] 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.
- [10] 赵鹏,徐先英,屈建军,等. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭群落与水土因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1496-1505.
- [11] 徐先英,严平,郭树江,等. 干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 141-145.
- [12] 常兆丰,李易珺,张剑挥,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.
- [13] 张晓燕,褚建民,孟平,等. 环境因子对民勤绿洲荒漠过渡带梭梭人工林蒸散的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2390-2400.
- [14] 张锦春,王继和,安富博,等. 民勤天然梭梭种群特征初步研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1124-1128.
- [15] Su Y Z, Wang X F, Yang R, et al. Effects of sandy desertified land rehabilitation on soil carbon sequestration and aggregation in an arid region in China [J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91: 2109-2116.
- [16] 曹成有,蒋德明,骆永明,等. 小叶锦鸡儿防风固沙林稳定性研究[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1178-1186.
- [17] 贺少轩,韩蕊莲,梁宗锁. 黄土高原丘陵沟壑区草地恢复对土壤碳氮库的影响[J]. 科学通报, 2015, 60(20): 1932-1940.
- [18] 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.
- [19] 李香真,张淑敏,邢雪荣. 小叶锦鸡儿灌丛引起的植物生物量和土壤化学元素含量的空间变异[J]. 草业学报, 2002, 11(1): 24-30.
- [20] 张华,何红,李锋瑞,等. 科尔沁沙地灌木对风沙土壤的生态效应[J]. 地理研究, 2005, 24(5): 708-716.
- [21] 尚雯,李玉强,王少昆,等. 科尔沁沙地流动沙丘造林后表层土壤有机碳和轻组有机碳的变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2069-2074.
- [22] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, et al. Change in soil carbon following afforestation [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1/3): 241-257.
- [23] 李新荣,贾玉奎,龙利群,等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 4-11.
- [24] Charley J L, Cowling S W. Changes in soil nutrient status resulting from overgrazing and their consequences in plant communities of semi-arid areas [J]. Ecological Society of Australia, 1968, 3: 28-38.
- [25] 党珍珍,王凯博,周正朝,等. 黄土丘陵区人工刺槐林恢复对土壤碳库动态的影响[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1082-1087.
- [26] 刘任涛,朱凡. 荒漠草原区不同年限柠条林表层土壤碳分布及影响因素[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 19-24.
- [27] Sartori F, Lal R, Ebinger M H, et al. Changes in soil carbon and nutrient pools along a chronosequence of poplar plantations in the Columbia Plateau, Oregon, USA [J]. Agriculture, Ecosystem & Environment, 2007, 122: 325-339.
- [28] 孙国峰,陈阜,肖小平,等. 轮耕对土壤物理性状及水稻产量影响的初步研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 109-113.
- [29] 邓彩云,王玉刚,牛子儒,等. 开垦年限对干旱区土壤理化性质及剖面无机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 254-259.