

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.

# 石羊河流域人工防护林碳效益估算

王新友<sup>1,2</sup>, 马全林<sup>1</sup>, 王耀琳<sup>1</sup>

(1.甘肃省治沙研究所 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃广播电视大学,甘肃 兰州 730030)

**摘要:** 人工植被建设具有显著的碳汇作用,是固定 CO<sub>2</sub>以缓解气候变化的最有效措施。为揭示固沙造林对沙漠生态系统碳汇的影响,以甘肃省森林资源二类清查数据(2016年)为基础,应用CBP(Carbon Benefits Project)碳计量模型工具,研究了干旱地区石羊河流域人工防护林的碳效益。结果表明:石羊河流域人工固沙林当前总碳储量为0.81 Tg,价值2.03亿元;每公顷年固碳0.45 Mg,价值113.13元;在0~100 a时间尺度上,最大固碳潜力为2.19 Tg,价值5.51亿元。绿洲防护林当前的总碳储量是2.51 Tg,价值6.31亿元;每公顷年固碳5.2 Mg,价值1307.28元;在0~50 a时间尺度上,最大固碳潜力是3.03 Tg,价值7.62亿元。在0~100 a时间尺度上,石羊河流域人工固沙林的碳效益呈快速增长(0~25 a)-急速下降(25~30 a)-缓慢下降(35~100 a)的向上单峰型变化趋势。绿洲防护林的碳效益随林龄在0~50 a时间尺度上呈持续增加的变化趋势。固沙林的衰败死亡是降低人工固沙林碳效益的重要因素,随着年死亡率从2.5%降低到2.0%、1.0%、0%,39 a林龄的人工固沙林碳效益(总碳储量、碳密度和固碳速率)分别增长1.51、2.54、3.56倍。“退耕还林”措施显著提升人工固沙林碳效益,“退耕还林”66 667 hm<sup>2</sup>、133 334 hm<sup>2</sup>下39 a林龄的人工固沙林碳储量分别增长6.27、25.59倍,碳密度分别增长2.50、6.44倍,固碳速率分别增加2.67、6.67倍。因此,固沙造林是增加沙漠生态系统碳汇的有效措施,提升人工固沙林碳汇效益的主要途径就是保证其生长发育,避免衰败和死亡。为了避免将来变成典型的碳源,增加温室气体排放,石羊河流域人工固沙林亟待科学保育和重新恢复。

**关键词:** CBP碳计量模型; 碳储量; 固碳速率; 人工固沙林; 人工防护林

文章编号: 1000-694X(2020)04-197-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00057

中图分类号: S713

文献标志码: A

## 0 引言

在人类活动和全球气候变化双重胁迫下,土地利用方式在不同时空尺度发生快速变化并剧烈地改变着地表覆盖状态,对气候系统产生了深远影响,是全球气候变化的重要驱动因素<sup>[1]</sup>。造林和再造林作为土地利用方式和陆地管理活动,不仅能提高森林覆盖率,也能增加陆地碳储量,是增加碳汇、减缓全球气候变暖的重要措施<sup>[2]</sup>。在广阔的“三北”地区,为了维持荒漠生态系统稳定、防止沙漠化,中国营造了大面积的人工固沙林<sup>[3]</sup>。人工固沙林作为荒漠生态系统的重要组成部分,具有控制风沙灾害、防治荒漠化等功能<sup>[4]</sup>,在改善和促进区域生态恢复方面发挥着核心作用,已成为干旱区治理沙化土

地最持久、最有效和最经济的措施。正确认识和评价人工固沙林的效益与价值是管理好人工固沙林的基础,而人工固沙林生态效益的定量评价已成为当前研究的热点<sup>[3]</sup>,但是对人工固沙林碳效益的研究明显不足<sup>[3,5]</sup>。前期研究普遍认为人工固沙林有一定的碳效益作用,而且碳效益随林龄而变化<sup>[6-7]</sup>。然而,现有的研究多在局部区域对单一树种进行储碳量研究或者碳汇源的判断,针对人工固沙林时间序列上碳储量动态估计和情景模拟预测少见报道。石羊河流域是中国最早开展固沙造林的地区之一,人工固沙林的林龄长、面积大、树种多样,是开展人工固沙林碳效益研究的理想区域。CBP(Carbon Benefits Project)碳计量模型是在全球环境基金(Global Environmental Facility, GEF)资助下,由科

收稿日期:2020-01-03; 改回日期:2020-06-29

资助项目:国家自然科学基金项目(31660232);甘肃省科技重大专项(18ZD2FA009);甘肃省基础研究创新群体项目(145RJIA335)

作者简介:王新友(1981—),男,甘肃静宁人,博士,副教授,主要从事荒漠生态学研究。E-mail: 254950602@qq.com

通信作者:马全林(E-mail: mql925@126.com)

罗拉多州立大学(Colorado State University, CSU)在现有的不同复杂的碳计量工具基础上,为全球环境基金和其他的可持续土地管理(Sustainable land management, SLM)项目开发的,能够测量、监测、模拟和预测农田、草地、林地和荒漠等土地利用类型碳储量变化的模块化系统,是量化土地利用碳效益的便捷、有效工具。该工具通过在初始情景(Initial Land Scenario)、基线情景(Baseline Scenario)和项目情景(Project Scenario)下的比较,分析计算土地利用变化后产生的碳效益<sup>[8-9]</sup>。本文拟以国家二类森林资源清查的固沙林面积(2016年)为基础,利用CBP碳计量模型对石羊河流域人工固沙林的碳效益进行定量评价,以期揭示典型干旱区人工固沙林碳效益的变化规律及其影响因素,为人工固沙造林营造、管护、修复以及生态功能评价提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

石羊河流域(36°29′—39°27′N, 101°41′—104°16′E)地处河西走廊的东部,东以乌鞘岭为分水岭,南至祁连山北麓,西部以大黄山一线与黑河流域为界,北部伸入巴丹吉林及腾格里沙漠的边缘。石羊河流域地形分为南部的祁连山地、中部的绿洲平原、北部的荒漠等几个地貌单元,整体呈现为南高北低,自西南向东北倾斜。北部的荒漠区,海拔1 300~1 500 m,属巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠的汇合地,年降水量<150 mm,年蒸发量2 000~2 600 mm,年均气温7.8~10.0℃,年风沙日数多,土地沙漠化严重。为控制风沙危害,在绿洲边缘营造了大面积的人工固沙林。人工固沙林中,乔木以沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、胡杨(*Populus euphratica*)为主,灌木有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)等,且灌木占绝大多数。石羊河流域人工固沙林主要是在绿洲外围建立的灌木固沙林,初始造林密度大约为1 650株·hm<sup>-2</sup>;绿洲防护林包括绿洲边缘乔木阻沙林带、农田防护林、“四旁”林、用材林等,初始造林的株行距3 m×4 m。受制于干旱缺水、土地贫瘠和含盐量高等严酷的自然条件以及人为干扰频发等原因,石羊河流域人工固沙林和绿洲防

护林均随林龄增加出现大面积的衰败和死亡现象。目前,退化人工固沙林残余密度约为400株·hm<sup>-2</sup>,多年平均年死亡率约为2.5%;考虑到绿洲防护林属于人工经营林分,有间伐和更新改造,平均年死亡率约为4%。

### 1.2 CBP碳计量模型

CBP碳计量模型包括4个子系统<sup>[8]</sup>——基于IPCC第一层级方法的土壤碳动态与温室气体排放评价的简明估算、基于IPCC方法的详细估算、基于Century模型的动态模型和社会经济评价影响评价系统。该项目由联合国环境规划署(UNEP)执行,已经在巴西、肯尼亚、尼日尔/尼日利亚和中国等国家获得了使用和推广<sup>[8]</sup>,得到全球环境基金(GEF)、联合国环境规划署、联合国开发计划署、世界银行等30余家机构的广泛认可。该项目的整体思路和决策树如图1所示。

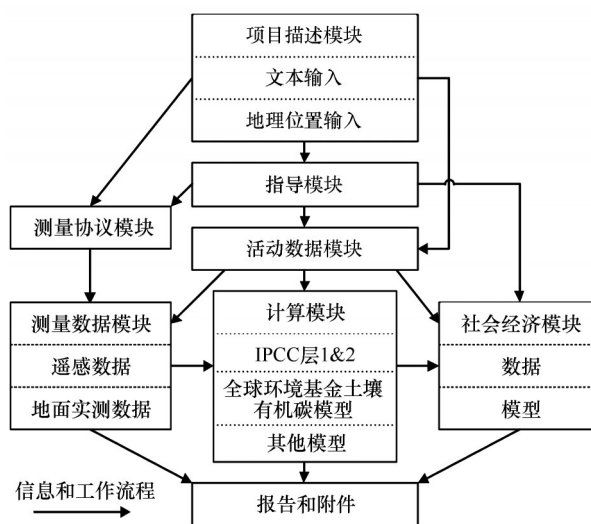


图1 CBP模型工具的基本结构图

Fig.1 The overview of CBP model tools

CBP碳计量模型碳库存评估包括不同土地利用的碳储量和碳净通量估算。建模过程中,需要向系统输入区域地理位置和面积、土地利用和植被类型、项目时间段和管理措施,并根据项目的规模、目标、阶段和可用的资源,选取CBP系统碳效益估算的方法。主要工作流程如图2所示。

### 1.3 数据来源与处理

本研究中,人工固沙林地的分布、面积数据来源于甘肃省森林资源二类清查数据(2016年)。研究区包括金昌的金川区、永昌县以及武威市的凉州

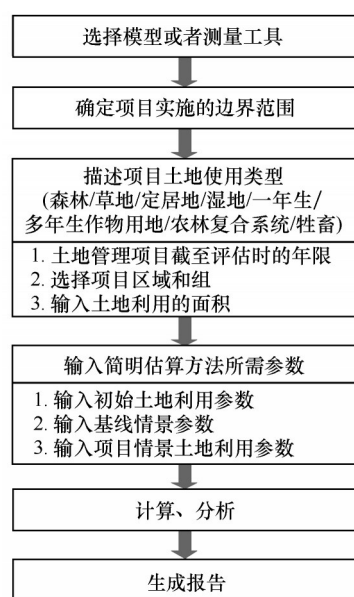


图2 碳效益估算流程图

Fig.2 The flowchart of the estimation of the carbon benefits

区、民勤县和古浪县(图3)。设定项目报告时间为39 a(1978—2016年)。

本研究利用CBP碳计量模型的简明估算方法(Simple assessment)评估石羊河流域人工固沙林的碳效益,研究中设置初始土地利用类型情景、基线情景和项目情景3个分析层次,其中,人工固沙林的初始土地利用类型是中度(严重)退化的荒漠草地,分布有流动沙丘和稀疏的沙生、盐生植物;基线情景是初始土地利用的延续状态,为持续退化的荒漠草地,未从事任何农业活动;项目情景是营造固沙林,由于采取封禁保护措施,不考虑放牧等人为干扰。绿洲防护林的初始土地利用类型是耕地,作物为小麦或草田轮作中的牧草作物;基线情景是初始土地利用的延续,持续作为农田;项目情景是建立人工防护林。

数据分析处理使用Microsoft Excel 2010。碳储量和固碳速率的经济价值则根据造林成本法(251.40元每吨C)<sup>[10]</sup>计算。考虑到杨树的寿命大约40年,梭梭的寿命较长,部分可能达到100 a乃至数百年,因此,本文选取0~100 a作为研究的时间区间。

本文研究的碳储量包括土壤碳储量(0~30 cm深度土壤有机碳)和生物量碳储量。

## 2 结果与分析

### 2.1 石羊河流域固沙林现状

在石羊河流域,人工固沙林包括乔木林和灌木

林,以灌木林为主,呈带状或片状分布,总面积为46 046.93 hm<sup>2</sup>,占当地人工林(人工固沙林+绿洲防护林+经济林)总面积的58.66%。石羊河流域人工固沙林主要分布在金川区、永昌县、凉州区、民勤县和古浪县5个县区,其中金川区人工固沙林面积4.74 hm<sup>2</sup>,占人工固沙林总面积的0.01%;永昌县人工固沙林面积1 367.59 hm<sup>2</sup>,占人工固沙林总面积的2.97%;凉州区人工固沙林面积13 644.87 hm<sup>2</sup>,占人工固沙林总面积的29.63%;民勤县人工固沙林面积27 135.54 hm<sup>2</sup>,占人工固沙林总面积的58.93%;古浪县人工固沙林面积3 894.19 hm<sup>2</sup>,占人工固沙林总面积的8.46%(图4)。

根据2016年的调查数据,石羊河流域人工固沙林的灌木有梭梭、柠条、怪柳、沙拐枣、花棒等,占地39 281.77 hm<sup>2</sup>,占人工固沙林总面积的76.36%(表1)。就树种来看,造林面积最大的是梭梭,合计为31 644.22 hm<sup>2</sup>,占人工防护林总面积的61.51%;沙枣、杨属次之,分别占人工防护林总面积的13.23%和7.33%;花棒、怪柳、柠条、沙拐枣、其他乔木再次,分别占人工防护林总面积的5.63%、3.63%、2.69%、1.40%、1.05%;其余树种面积较少,占比皆不足1%。

### 2.2 人工防护林碳效益随林龄的变化

碳储量、碳密度和固碳速率的数值为负时表示温室气体负排放,即固碳;为正时表示为温室气体排放,即碳排放。按照平均年死亡率2.5%,计算当前石羊河流域人工固沙林的碳储量为0.81 Tg,固碳速率为0.45 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(表2)。根据造林成本法计算,石羊河流域人工固沙林当前碳储量总价值为2.03亿元;每公顷年固碳0.45 Mg,价值113.13元。石羊河流域人工固沙林的碳效益随林龄呈现向上单峰型变化趋势。在0~100 a时间尺度上,人工固沙林碳储量呈快速增大(0~25 a)—急速下降(25~30 a)—缓慢下降(35~100 a)的变化趋势。固碳速率随林龄的增长先增大后减小,在0~25 a上升46.15%,在25~30 a和35~100 a,分别下降62.11%和84.62%。

在0~100 a时间尺度内,人工固沙林的最大固碳潜力为2.19 Tg,是当前碳储量的2.71倍,固碳速率为1.9 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,固碳价值达5.51亿元。用CBP预测石羊河流域人工固沙林未来的固碳潜力,结果显示今后固碳总储量随时间逐渐减小,在80 a



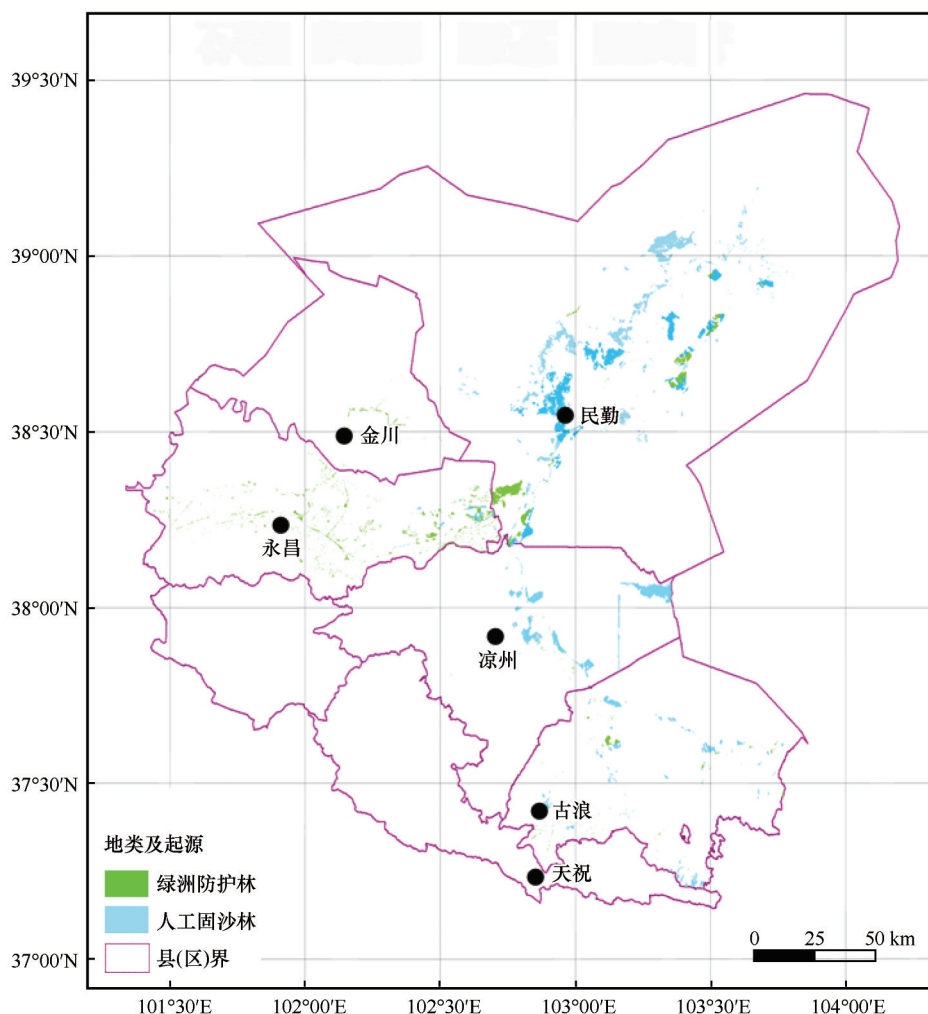


图3 石羊河流域人工防护林分布

Fig.3 The distribution map of sand-fixing plantation in Shiyang River Basin

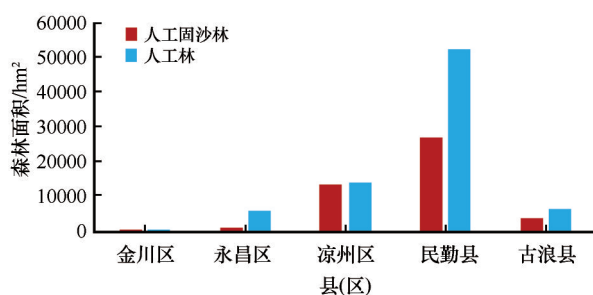


图4 石羊河流域各县(区)人工固沙林面积(数据来源:甘肃省森林资源二类清查数据)

Fig.4 Sand-fixing plantation distribution in counties/districts in Shiyang River Basin (Data from: Forest resources inventory data of Gansu Province)

之后从碳汇变成碳源,到100 a时达碳排放达0.44 Tg,排放速率为 $0.1 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

按照平均年死亡率为4%,估算石羊河流域绿洲防护林的碳效益在0~50 a时间序列上的结果如

表3所列。目前,绿洲防护林的碳储量是2.51 Tg,价值6.31亿元;每公顷年固碳5.2 Mg,价值1 307.28元;在0~50 a时间尺度上,最大固碳潜力是3.03 Tg,价值7.62亿元(表3)。绿洲防护林的碳效益随种植年限显著变化,在0~50 a时间尺度上,总碳储量和碳密度表现为持续增加,均增加3.15倍(表3)。碳密度逐渐增加,50 a峰值碳密度是10 a的3.85倍(表3)。固碳速率则逐年减小,从10 a时的 $6 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 逐步减小到50 a的 $5 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表3)。

### 2.3 人工防护林碳效益随死亡率的变化

在项目情景下,保持初始状态和上文相同,假设在围封、禁牧、禁伐、灌溉等保育措施管理下,人工固沙林的死亡率从实际情景的2.5%降低到2%、1%、0,重新进行CBP模型预测,结果如表4所列。在植被建设39 a时间尺度上,保育措施对人工固沙

表 1 石羊河流域人工防护林树种组成  
Table 1 Species composition of sand-fixing plantation  
in Shiyang River Basin

林种类型		面积/hm <sup>2</sup>	占林种 比例/%	占总人工防护 林的比例/%
乔木林	沙枣	6 808.72	55.98	13.23
	杨属	3 771.67	31.01	7.33
	胡杨	559.26	4.60	1.09
	榆树	483.89	3.98	0.94
	其他乔木	540.04	4.44	1.05
灌木林	梭梭	31 644.22	80.56	61.51
	花棒	2 894.59	7.37	5.63
	柠条	1 382.43	3.52	2.69
	怪柳	1 866.8	4.75	3.63
	沙拐枣	720.57	1.83	1.40
	枸杞	269.15	0.69	0.52
	其他灌木	540.04	1.28	0.98

甘肃省森林资源二类清查数据。

林的碳效益影响显著:随着人工固沙林年均死亡率从 2.5%降低到 2.0%,总碳储量、碳密度和固碳速率增长 1.51 倍(表 4);随着人工固沙林年死亡率从 2.5%降低到 1.0%,总碳储量、碳密度和固碳速率增长 2.54 倍(表 4);当人工固沙林的死亡率为 0 时,相

比于 39 a 的人工固沙林,总碳储量、碳密度和固碳速率增长 3.56 倍(表 4),说明死亡率是影响碳效益的重要因素。

2.4 人工防护林碳效益随面积的变化

在石羊河流域,大规模的植被建设工程包括“三北”工程以及“退耕还林”等。退耕还林工程可以通过两个方面增加该地区陆地生态系统碳汇。一是“退耕”减少了该区域氮肥使用量,从而减少了 N<sub>2</sub>O 等农田温室气体的排放。二是“还林”进一步增加了沙地生态系统的植被面积,增加了地上植被和地下植被碳储量,进而提高了林地的碳储量。

本研究中假设造林同期,“退耕还林”的面积分别为 66 667 hm<sup>2</sup>和 133 334 hm<sup>2</sup>,在 39 a 尺度上进行估算,以期评估退耕还林工程对石羊河流域人工固沙林的影响。结果显示,“退耕还林”工程产生了巨大的碳汇效益(表 5)。“退耕还林”66 667 hm<sup>2</sup>、133 334 hm<sup>2</sup>,39 a 后,其碳储量分别是原有人工固沙林生态系统(46 056 hm<sup>2</sup>)39 a 时碳储量的 6.27、25.59 倍(表 5)。“退耕还林”66 667 hm<sup>2</sup>,39 a 后,能够使人工固沙林生态系统的碳密度和固碳速率分别增加 2.50、2.67 倍;“退耕还林”133 334 hm<sup>2</sup>,39 a 后,能够使人工固沙林生态系统的碳密度和固碳速率分别增加 6.44、6.67 倍(表 5)。

表 2 石羊河流域人工固沙林碳效益随林龄(0~100 a)的动态变化  
Table 2 The dynamic change of carbon benefits in sand-fixing plantation over 0-100 years in Shiyang River Basin

种植年限/a	总碳储量/Mg	碳密度/(Mg·hm <sup>-2</sup> )	固碳速率/(Mg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	不确定度/%
10	-600 140	-13	-1.3	28
15	-900 208	-20	-1.3	26
20	-1 200 280	-26	-1.3	24
25	-2 195 448	-48	-1.9	17
30	-995 113	-22	-0.72	24
35	-892 566	-19	-0.55	23
39	-810 504	-18	-0.45	23
50	-584 770	-13	-0.25	23
60	-379 610	-8.2	-0.14	22
70	-174 529	-3.8	-0.05	22
80	30 638	0.67	0.01	22
90	235 794	5.1	0.06	21
100	440 947	9.6	0.1	21

表3 石羊河流域绿洲防护林碳效益随种植年限(0~50 a)的动态变化

Table 3 The fluctuation of carbon benefits in man-made farmland shelterbelt over 0-50 years in Shiyang River Basin

种植年限/a	总碳储量/Mg	碳密度/(Mg·hm <sup>-2</sup> )	固碳速率/(Mg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	不确定度/%
10	-730 934	-60	-6.00	23
20	-1 461 874	-120	-6.00	18
30	-1 983 658	-163	-5.40	17
40	-2 505 442	-206	-5.20	17
50	-3 027 228	-249	-5.00	17

表4 不同死亡率情景下人工固沙林的固碳潜力

Table 4 Carbon sequestration potential of sand-fixing plantation under different mortality scenarios

年死亡率/%	总碳储量/Mg	碳密度/(Mg·hm <sup>-2</sup> )	固碳速率/(Mg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	不确定度/%
2.5	-810 504	-18	-0.45	23
2	-1 226 025	-27	-0.68	24
1	-2 056 905	-45	-1.1	24
0	-2 887 784	-63	-1.6	22

表5 退耕还林管理措施下的人工固沙林固碳潜力

Table 5 Carbon sequestration potential of sand-fixing plantation under Grain for Green Project management measures

退耕还林面积/hm <sup>2</sup>	总碳储量/Mg	碳密度/(Mg·hm <sup>-2</sup> )	固碳速率/(Mg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	不确定度/%
66 667	-5 082 256	-45	-1.2	18
133 334	-20 737 708	-116	-3	21

3 讨论

3.1 人工固沙林的碳效益及其变化

石羊河流域人工固沙林碳效益在25 a时达到最大总碳储量(2.19 Tg)和最大碳密度(48 Mg·hm<sup>-2</sup>),这缘于10 a时生长达到顶峰,之后逐渐出现退化,林木碳储量在25 a左右达到最大,而土壤碳储量也有显著增加,从而使其碳效益显著。25 a之后,随着植被增长,地下水位下降等引起土壤水分含量下降,导致固沙林大面积退化并死亡,碳效益在25~30 a急速下降;在30~70 a缓慢下降;在80~100 a,人工固沙林基本完全死亡。随着人工固沙林的枯死和逐步分解,由于强烈的风蚀作用,植被和土壤结皮遭到破坏,人工固沙林逐渐失去固碳功能,并由碳汇转变成碳源。因此,石羊河流域人工固沙林的碳效益在0~100 a时间尺度上的变化趋势呈向上单峰型。

本研究人工固沙林固碳速率在25 a时达到最大,为1.9 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。而基于CBP模型,Wang等<sup>[9]</sup>在甘肃景泰盐碱地人工枸杞林碳效益的研究中发现,在10 a尺度上,人工枸杞林的固碳速率为

12.9 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,是本研究中同龄人工固沙林(1.3 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)的6.79倍,表明人工固沙林的固碳速率小于人工经济林的。盐碱地人工枸杞林采取灌溉栽培,属于集约化管理,生物量较高,从而固存了较多的有机碳。

本研究中,35 a林龄的人工固沙林碳密度为19 Mg·hm<sup>-2</sup>,和撒哈拉沙漠灌丛草地(27.2 Mg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[11]</sup>差异不大,远大于中国灌木荒漠(6 Mg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[12]</sup>、阿拉善荒漠(1.87 Mg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[13]</sup>、科尔沁沙地31 a小叶锦鸡儿灌丛(11.148 Mg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[14]</sup>和毛乌素沙地油蒿灌丛(0.1683~2.2404 Mg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[15]</sup>,可能与地域、树种及林龄采用的测算方法差异有关。另外,本研究中人工固沙林碳密度较大,可能原因是有乔木林且灌溉,以及以消耗大量地下水为代价。同时,该值小于内盖夫沙漠边缘35 a地中海松人工林(65±12 Mg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[16]</sup>、北京-天津沙源地等地10 a的防风固沙林碳密度(33.8 Mg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[17]</sup>,主要是因为气候、水热条件以及人工抚育等影响了人工固沙林的生长发育,该区域干旱缺水导致其生物碳储量和土壤碳储量较低。

可见,石羊河流域的人工固沙林固碳潜力较

高,这进一步说明石羊河流域的人工固沙林不仅能够阻止沙漠化进程,而且有巨大的固碳潜力,有助于减缓大气 $\text{CO}_2$ 浓度的增加及全球气候变化,是干旱地区固定大气 $\text{CO}_2$ 于沙地植被和土壤中的有效途径<sup>[7]</sup>。

### 3.2 人工固沙林碳效益的影响因素

人工林的碳汇作用影响因素有林龄、保护管理措施<sup>[2,4,6]</sup>等。人工固沙林的碳效益随林龄而变,大部分学者认为固沙林土壤总有机碳和全氮等含量随林龄延长而增加<sup>[18-19]</sup>。本研究中,人工固沙林的碳储量在0~25 a快速增长,25~30 a急速降低,35~100 a缓慢下降,这和Fan等<sup>[6]</sup>的研究结果相似,人工梭梭固沙林在改良土壤方面可以分为快速生长的初始阶段(0~10 a)、稳定阶段(10~30 a)和相对明显的恢复阶段(40~50 a),土壤有机质在植被建设40 a后才开始显著增加。本研究中,人工固沙林的平均固碳速率随林龄先增大后减小,25 a时为 $1.9 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,50 a时为 $0.25 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,这和Yang等<sup>[4]</sup>在腾格里沙漠的研究结果相近;该研究表明人工固沙林的平均固碳速率在造林后的20 a最高( $0.3 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ),47 a后达到稳定值( $0.2 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )<sup>[4]</sup>。

死亡率是影响人工固沙林碳效益的主要因素。林木死亡引起人工固沙林生产力下降,导致人工固沙林地力衰退,生态系统功能逐渐退化,影响人工林生态系统的持续稳定发展,从而影响人工固沙林生态系统的植被碳和土壤有机碳储量。另外,在石羊河流域,过度开发利用导致地下水位下降,大面积人工固沙林衰败死亡,必然引起固碳能力的减弱<sup>[20]</sup>。

围封是干旱区最常用的植被恢复措施,是影响人工固沙林碳效益的重要因素。在沙区,围封保护能够增加植物生长量、物种丰富度和植株密度,能促进退化固沙灌木林的恢复,是沙漠生态系统恢复与增汇的常见手段<sup>[21]</sup>。本研究中,所有人工林均采取了围封手段,但是在石羊河中下游,极度干旱恶劣的生态环境仍导致人工林有较高的死亡率,从而降低了该地区土壤有机质含量。以“退耕还林”为典型代表的生态建设工程,由于其显著的碳汇效益<sup>[3]</sup>,在中国温室气体减排和全球气候变暖减缓方面贡献巨大。本研究中,干旱沙区封育和造林等保育措施能够显著增加人工固沙林的碳效益,这和前人的研究结果一致<sup>[4]</sup>。另外,本研究表明造林对人

工林生态系统碳汇的影响大于围封,这和前人在沙区的研究结论一致<sup>[21]</sup>。刘任涛等<sup>[22]</sup>在宁夏盐池沙地的研究表明,围封恢复对于植被系统稳定性的恢复质量优于人工灌丛固沙造林恢复措施。在本研究中,造林措施的作用大于围封,究其原因,主要是该区域干旱缺水、地下水位太低等恶劣的自然环境导致其在围封后,林地土壤水分不足,植被生长不良。此外,已有研究报道造林能显著降低土壤水分水平,但是自然恢复对土壤水分没有显著影响,因而自然恢复是保持干旱半干旱地区土壤水分稳定的较好选择<sup>[23]</sup>,而人工林的自然恢复有望在增强生态系统固碳潜力方面发挥重要作用<sup>[17]</sup>。荒漠生态系统的恢复和重建本身就是一个复杂的过程,石羊河流域人工固沙林自然恢复的质量如何,以及自然恢复后的碳效益如何,仍是一个需要进一步研究的课题。

地面植被对SOC的影响机制不同,树种还会通过矿化作用影响土壤养分的释放,因此不同的树种会影响SOC的保持和固存<sup>[24]</sup>。近年来的研究报道指出,考虑到人工造林的长期环境效益,应根据当地降水量、地下水和地形条件、整个景观的系统稳定性,以及目标区域的生态适宜性,来选择合适的树种。当树种和初始土地pH值相配时,可能潜在地增加土壤肥力或者提高生态系统生产力<sup>[25]</sup>。因此,树种的选择对人工固沙林的碳效益有重要影响。本研究中,在0~50 a时间尺度上,绿洲防护林的碳密度于50 a时达到最大( $249 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );而人工固沙林的碳密度在25 a时达到最大(仅为 $48 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),之后快速下降,逐渐由碳汇变成碳源,并在100 a时碳排放密度达到 $9.6 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。这符合防护林多为杨树且速生、成林快的规律,以及绿洲防护林属于人为经营管控,有灌溉、间伐和更新。固沙林多为梭梭,尽管寿命可达百年,有一定的固碳潜力,但是缺少灌溉等经营管理,导致其绝大多数枯死,所以在100 a时表现出明显的碳排放。此外,绿洲防护林的最大碳密度是固沙林最大碳密度的5.19倍,绿洲防护林的固碳效益明显高于人工固沙林,这是因为不同树种的固碳能力和树种引起的森林类型有差异<sup>[26]</sup>,也说明树种选择是植被建设中必须考虑的管理措施。

综合考虑林龄、死亡率和“退耕还林”措施的影响对石羊河流域人工固沙林碳效益受生长发育和演替决定。为此,本研究认为提升人工固沙林碳汇效益的主要途径就是保证人工固沙林的生长发育,



避免衰败和死亡。为了避免将来变成典型的碳源,增加温室气体排放,石羊河流域人工固沙林亟待科学保育和重新恢复。应该根据本研究结果指导植被建设,避免碳储量急速上升后再急速下降。碳储量的快速增长会消耗大量水分,尤其是杨树等高耗水性植物,需要考虑植被承载力进行合理的配置密度以保证水资源的合理利用。因此,应该考虑生态系统的可持续性,合理的密度和植被承载力。本文的结果也说明了这一点,35 a后的植被密度可能是合理的,在人工林建设初期采用这一密度,生态系统可能具有更高的可持续性。

## 4 结论

基于CBP模型测算的石羊河流域人工固沙林的碳储量目前为0.81 Tg,价值为2.03亿元;最大潜力可达2.19 Tg,价值达5.51亿元;绿洲防护林当前的总碳储量是2.51 Tg,价值6.31亿元;在0~50 a时间尺度上最大潜力可达3.03 Tg,价值7.62亿元;固沙造林是增加沙地生态系统碳汇的有效措施。在0~100 a时间尺度上,石羊河流域人工固沙林的碳效益呈快速增长(0~25 a)—急速下降(25~30 a)—缓慢下降(35~100 a)的向上单峰型变化趋势;绿洲防护林的碳效益随林龄在0~50 a尺度上呈持续增加的变化趋势。林龄、死亡率和“退耕还林”的管理措施是影响石羊河流域人工固沙林碳效益的重要因素。为避免变成碳源并提升和维持石羊河流域人工固沙林碳效益,需要加强人工固沙林的营造、管护和退化林的修复。

## 参考文献:

- [1] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309: 570–574.
- [2] 史军, 刘纪远, 高志强, 等. 造林对陆地碳汇影响的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(2): 58–67.
- [3] Lu F, Hu H F, Sun W J, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039–4044.
- [4] Yang H T, Li X R, Wang Z R, et al. Carbon sequestration capacity of shifting sand dune after establishing new vegetation in the Tengger Desert, northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 478: 1–11.
- [5] 张学斌, 石培基, 罗君. 基于生态系统服务价值变化的生态经济协调发展研究: 以石羊河流域为例[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(1): 268–274.
- [6] Fan B L, Zhang A P, Yang Y, et al. Long-term effects of xerophytic shrub *Haloxylon ammodendron* plantations on soil properties and vegetation dynamics in northwest China[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(12): e0168000.
- [7] 马全林, 徐丽恒, 陈芳, 等. 干旱区沙漠化逆转过程植被—土壤碳储量的恢复演变规律研究[J]. *地球科学前沿*, 2018, 8(1): 48–59.
- [8] Milne E, Paustian K, Easter M, et al. Estimating the carbon benefits of sustainable land management projects: the carbon benefits project component A[C]//2010 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Soil solutions for a Changing World. Brisbane, Australia. Congress Symposium 4: Greenhouse gases from soils. 2010: 73–75.
- [9] Wang Y L, Zhao C Y, Ma Q L, et al. Carbon benefits of wolfberry plantation on secondary saline land in Jingtai oasis, Gansu: a case study on application of the CBP model[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 157: 303–310.
- [10] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探: 以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. *应用生态学报*, 2000(4): 2–5.
- [11] Woomer P L, Touré A, Sall M. Carbon stocks in senegal's sahel transition zone[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(3): 499–510.
- [12] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change[J]. *Climatic Change*, 2001, 49(3): 339–358.
- [13] 张冬梅. 阿拉善荒漠灌木群落碳收支及影响因子分析研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [14] 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.
- [15] 李春萍. 内蒙古毛乌素沙地不同生境油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)灌丛地碳动态研究[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2006.
- [16] Grünzweig J M, Lin T L, Rotenberg E, et al. Carbon sequestration in arid-land forest[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(5): 791–799.
- [17] Liu X P, Zhang W J, Cao J S, et al. Carbon sequestration of plantation in Beijing-Tianjin sand source areas[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(10): 2148–2158.
- [18] 李娇. 毛乌素沙地榆林沙区典型固沙林地碳汇效应与机制研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [19] 孙特生, 李文彦, 刘继亮. 黑河中游荒漠绿洲人工梭梭土壤养分特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(5): 179–185.
- [20] Li X J, Li X R, Wang X P, et al. Changes in soil organic carbon fractions after afforestation with xerophytic shrubs in the Tengger Desert, northern China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(2): 184–195.
- [21] Li Y Q, Zhao X Y, Wang S K, et al. Carbon accumulation in the bulk soil and different soil fractions during the rehabilitation of desertified grassland in Horqin Sandy Land (Northern China)



- [J]. Polish Journal of Ecology, 2015, 63(1): 88–101.
- [22] 刘任涛, 朱凡. 人工与自然恢复方式对流动沙地土壤与植被特征的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 1–7.
- [23] Deng L, Yan W M, Zhang Y W, et al. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from northern China[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 366: 1–10.
- [24] Prietzel J, Bachmaan S. Changes in soil organic C and N stocks after forest transformation from Norway spruce and Scots pine into Douglas fir, Douglas fir/spruce, or European beech stands at different sites in Southern Germany[J]. Forest Ecology and Management, 2012, 269: 134–148.
- [25] Hong S B, Piao S L, Chen A P, et al. Afforestation neutralizes soil pH[J]. Nature Communications, 2018, 9: 520.
- [26] 李琬婷, 杨艺宁, 程小毛, 等. 昆明市16种道路绿化树种秋季固碳释氧能力研究[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(4): 76–82.

## Carbon benefits evaluation of the artificial shelter forest in the Shiyanghe River Basin

Wang Xinyou<sup>1,2</sup>, Ma Quanlin<sup>1</sup>, Wang Yaolin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Radio & TV University, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** Artificial vegetation construction is considered effective options for carbon dioxide sequestration to mitigate the impact of climate change. Based on the CBP (Carbon Benefits Project) carbon measurement model, the efficiency of artificial shelter forest in Shiyanghe River Basin in carbon sequestration was studied using the secondary inventory data of forest resources in Gansu Province (2016). The results show that the total carbon storage of sand-fixing plantation in Shiyanghe River Basin is 0.81 Tg C, with a value of 203 million RMB. The annual carbon sequestration per hectare is 0.45 Mg, with a value of 113.13 RMB. The maximum carbon sequestration potential is 2.19 Tg C on the 0–100 years scale, with a value of 551 million RMB. The total carbon storage of oasis shelterbelt in Shiyang River Basin is 2.51 Tg C, with a value of 631 million RMB. The annual carbon sequestration per hectare is 5.2 Mg, with a value of 1307.28 RMB. The maximum carbon sequestration potential is 3.03 Tg C on the 0–50 years scale, with a value of 762 million RMB. On the 0–100 years scale, the carbon sequestration benefits of the sand-fixing plantation in Shiyang River basin changed significantly with the planting years. The carbon storage showed rapid growth (0–25 years), rapid decline (25–30 years), slow decline (35–100 years), with an upwardly unimodal-type change trend. The carbon sequestration benefits of the oasis shelterbelt in Shiyang River basin showed sustained growth. The death rate is the most important factor affecting carbon sequestration efficiency of the plantation in Shiyang River Basin. With the annual death rate dropped from the rates of 2.5% to 2%, 1% and 0, after 39 years, its carbon benefits are respectively 1.51, 2.54 and 3.56 times that of the original sand-fixing plantation in the 39th year. The management measures of Grain for Green Project can significantly improve the carbon sequestration efficiency of the plantation in Shiyang River Basin. With the Grain for Green Project progressing at the area of 66 667 hm<sup>2</sup> and 133 334 hm<sup>2</sup>, after 39 years, its carbon reserves are respectively 6.27 and 25.59 times, its carbon density are respectively 2.50 and 6.44 times, its carbon sequestration rate are respectively 2.67 and 6.67 times that of the original sand-fixing plantation in the 39th year. Therefore, sand fixation afforestation is an effective measure to increase carbon sink of desert ecosystem. It is necessary to strengthen the management and protection of sand-fixing plantation and the restoration of degraded forest to maximize its carbon benefit and avoid becoming a typical carbon source in the future.

**Key words:** CBP (Carbon Benefits Project) carbon measurement model; carbon storage; carbon sequestration rate; sand-fixing plantation; artificial shelter forest