

# 陕西省荒漠化土地治理综合效益评价

刘菁, 麻菁

(陕西省防护林建设工作站, 陕西 西安 710082)

**摘要:** [目的] 对近年来陕西省荒漠化防治综合效益进行分析和评价, 为该省制定防治荒漠化政策和发展规划, 保护、改良和合理利用资源、实现可持续发展提供科学参考。[方法] 基于陕西省 2011—2022 年荒漠化治理中人工造林种草等相关数据, 根据相关标准规定和前人研究经验, 选择相应的生态、经济和社会效益计算指标和计算方法, 进行综合评价。[结论] 陕西省荒漠化土地治理累计推广人工造林面积达  $8.36 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 2011—2022 年期间, 荒漠化综合防治工作在阻挡粉尘, 防风固沙, 提高土壤保氮量、保磷量和保有机量, 涵养水源, 固碳释氧等方面发挥了重要作用; 同时, 在碳汇林、饲草、造林种草节支、种子、果品、林下经济、“林(草)光”互补、生态旅游和森林康养 8 个方面经济效益突出, 累计带动就业人数达 1.5 万人, 农民累计收入达 8 亿元。[结论] 陕西省荒漠化综合防治对改善自然环境效益显著, 也增加了就业机会、吸纳剩余劳动力、缓解就业压力, 促进了人与自然和谐共生发展。

**关键词:** 荒漠化防治; 人工造林; 监测和评价; 综合效益; 陕西省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0305-11

中图分类号: X820.3, S157.2

**文献参数:** 刘菁, 麻菁. 陕西省荒漠化土地治理综合效益评价[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 305-315. Liu Jing, Ma Jing. Comprehensive benefits evaluation of desertification land management in Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 305-315. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.024; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.024.

## Comprehensive benefits evaluation of desertification land management in Shaanxi Province

Liu Jing, Ma Jing

(Shaanxi Province Shelter Forest Construction Workstation, Xi'an, Shaanxi 710082, China)

**Abstract:** [Objective] The comprehensive benefits of desertification prevention and control in Shaanxi Province over the years were monitored and evaluated, in order to provide a scientific reference for the formulation of relevant policies and development plans in Shaanxi Province, as well as the protection, improvement, and rational utilization of resources to achieve sustainable development. [Methods] Based on monitored data related to artificial afforestation and grass planting in desertification control in Shaanxi Province from 2011 to 2022, and in accordance with relevant standards and previous research experience, corresponding indicators and methods for calculating ecological, economic, and social benefits were selected for comprehensive evaluation. [Results] The cumulative area of artificial afforestation promoted in desertification land management in Shaanxi Province reached  $8.36 \times 10^5 \text{ hm}^2$  hectares. During the period from 2011 to 2022, the comprehensive prevention and control of desertification played an important role in blocking dust, windbreak and sand fixation, improving soil nitrogen and phosphorus retention, increasing soil organic matter retention, conserving water sources, fixing carbon and releasing oxygen. At the same time, outstanding economic benefits were achieved in eight aspects: carbon sequestration forests, forage grass, cost saving from afforestation and grass planting, seeds, fruits, agroforestry, complementary “forest (grass) - solar” systems, ecotourism and forest-based wellness programs. The cumulative employment reached

收稿日期: 2025-02-19

修回日期: 2025-06-19

采用日期: 2025-06-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“抚育间伐调控黄土丘陵区刺槐人工林水分养分机理研究”(41771556)

第一作者: 刘菁(1978—), 女(汉族), 陕西省渭南市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事防护林建设、管理和荒漠化防治方面的工作。Email: 53309527@qq.com。

通信作者: 麻菁(1998—), 女(汉族), 陕西省三原县人, 硕士, 工程师, 主要从事防护林建设、管理和荒漠化防治方面的工作。Email: majing2629@163.com。

15 000 people, and the cumulative income of farmers reached 800 million yuan. [Conclusion] The comprehensive prevention and control of desertification in Shaanxi Province has significant benefits in improving the natural environment, increasing employment opportunities, absorbing surplus labor, alleviating employment pressure, and promoting harmonious coexistence and development between humans and nature.

**Keywords: desertification prevention and control; artificial afforestation; monitor and evaluation; comprehensive benefit; Shaanxi Province**

中国是世界上荒漠化面积最大、受影响人口最多、风沙危害最严重的国家之一<sup>[1]</sup>,荒漠化问题制约着经济和社会发展<sup>[2-3]</sup>。陕西省是中国荒漠化土地分布广泛、面积较大、危害严重的省份之一,也是荒漠化土地重点监测区<sup>[4]</sup>。陕西省持续开展荒漠化土地治理和防沙治沙重点工作,省市县各级政府部门采取一系列行之有效的政策和措施,依托实施退耕还林(草)、天然林资源保护、“三北”防护林建设、京津风沙源治理、水土流失治理、旱作节水农业示范等国家重点生态工程和地方生态建设项目,有效减少陕西省荒漠化土地面积。中国国家领导人在内蒙古自治区巴彦淖尔市召开的加强荒漠化综合防治和推进“三北”等重点工程建设座谈会,进一步强调了荒漠化防治的重要意义,并将“三北”工程上升为国家重大战略。全国上下高度重视,从顶层设计、项目谋划、施工建设等全过程推进系统治理、综合治理。陕西省随即出台了《陕西省荒漠化综合防治和黄河“几字弯”攻坚战行动方案》。在此背景下,“三北”工程6期建设的重要性再次提高。对一个地区荒漠化防治效益进行综合评价,能够定量定性分析工作成果,更好地为下一步决策提供参考依据。国内对于生态工程的效益评价研究日益增加,从研究对象看,有围绕某项生态工程、跨地区范围、行政区划范围内的生态工程建设成效展开研究,如刘艳等<sup>[5]</sup>针对甘肃省积石山区开展退耕还林工程生态效益评价,王睿等<sup>[6]</sup>、展秀丽等<sup>[7]</sup>从库布齐沙漠东缘、青海湖流域等跨地区范围,以层次分析法和模糊评价法评价防沙治沙生态效益,李晓格<sup>[8]</sup>、张彩南<sup>[9]</sup>对榆林市市域范围内的荒漠化治理工程综合效益开展研究;从研究目标看,有建立各类生态工程综合效益评价方法和模型的研究,如王海燕等<sup>[10]</sup>基于国家水土保持重点工程,采用频度分析法筛选评价指标、层次分析法确定评价指标权重,建立综合评价模型,刘玘玘等<sup>[11]</sup>渭洛河夹槽地带为研究区,建立基于熵权物元法的沙荒地整治综合效益评价模型。目前,陕西省范围内基于各项林草生态工程的荒漠化防治综合效益评估的研究较少。鉴于此,本研究基于陕西省2011—2022年各项工程实施的人工造林种草等相关监测数据,结合相

关标准规定和前人研究经验,选择生态、经济和社会效益相应的计算指标和计算公式进行计算评价。效益评价结果对陕西省制定防治荒漠化政策和发展规划,保护、改良和合理利用国土资源、实现可持续发展具有重要的学术价值和现实意义。

## 1 研究区概况

本研究主要监测陕西省荒漠化土地范围内实施的荒漠化治理工程的生态、经济、社会效益。陕西省荒漠化土地主要分布在榆林市定边县、靖边县、横山区、榆阳区、神木市、府谷县、佳县、米脂县、子洲县、绥德县、清涧县和延安市的吴起县共12个县(区),集中于北部长城沿线及其附近地区,地理坐标介于东经 $107^{\circ}14'$ — $110^{\circ}36'$ ,北纬 $37^{\circ}57'$ — $39^{\circ}35'$ ,东西长约420 km,南北宽约120 km。荒漠化土地所在区域大部分属温带半干旱和亚湿润干旱气候,其特点为气候干燥,日照充足,冷热变化剧烈,风大,霜期时间长,具有明显的大陆性气候和沙地气候特征。陕西省荒漠化地区年均降雨量在400 mm以下,年平均温度 $9\sim 10^{\circ}\text{C}$ 左右。自1999年第1次开展荒漠化和沙化土地综合监测至2019年第6次监测,20 a间,陕西省荒漠化土地由 $3\,113\,551.7\text{ hm}^2$ 减少至 $2\,650\,197.2\text{ hm}^2$ ,总面积减少 $463\,354.5\text{ hm}^2$ ,占陕西省土地总面积的比例由14.59%下降至12.89%,平均每年减少 $23\,167.73\text{ hm}^2$ ,荒漠化治理成效显著。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

数据来源于陕西省防护林建设工作站、陕西省林业调查规划院、榆林市林草局、延安市林业局、榆林市年鉴、延安市年鉴等。数据内容涉及2011—2022年荒漠化土地治理中人工造林、新增碳汇林经济林、人工种草、草原围栏、退化草原改良等年度统计数据(表1)。

此外,荒漠化地区种子采种数量、特色经济林推广面积的数据来源于榆林市林草局和延安市林业局,因2011—2013年未做详细统计,此处引用2014—2021年数据。灌木平茬推广面积、光伏规模数据来

源于榆林市林草局和延安市林业局,生态旅游人数和收入来源于榆林市年鉴和延安市年鉴。造林种草

工程实施过程中带动就业人数数据、典型案例来源于榆林市林草局和延安市林业局。

表 1 陕西省 2011—2022 年荒漠化地区累计新增人工林推广面积

Table 1 Cumulative newly promoted artificial forest area in desertification areas of Shaanxi Province from 2011 to 2022

年份	累计人工造林面积/10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup>	乔灌面积/10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup>	灌草基地/hm <sup>2</sup>	人工饲草/hm <sup>2</sup>	草原围栏/hm <sup>2</sup>	退化草原改良/hm <sup>2</sup>
2011	8.0	3.6	0	0	0	0
2012	11.8	3.8	0	0	0	0
2013	19.2	7.1	225	2 355	0	0
2014	24.2	4.9	351	1 280	0	0
2015	28.1	3.7	151	1 361	0	0
2016	32.0	3.8	0	1 429	0	0
2017	36.2	4.0	0	1 194	0	0
2018	46.9	10.6	0	1 121	0	0
2019	55.6	8.5	0	1 729	0	0
2020	68.4	12.6	0	1 742	0	0
2021	76.9	5.4	0	0	24 120	4 824
2022	83.6	5.2	0	0	7 839	3 316

注:数据为根据陕西省荒漠化地区 2011—2022 年造林种草项目建设成果数据统计。

2.2 指标选取与计算公式

参照《森林生态系统服务功能评估规范(GB/T 38582—2020)》,结合前人研究基础,选择相应的生

态效益和经济效益指标及计算公式,社会效益主要从人居环境改善方面进行评价。具体计算公式详见表 2—3。

表 2 生态效益计算指标及公式

Table 2 Indicators and formulas for ecological benefits calculation

效益指标	计算公式	公式说明
阻挡粉尘效益	$G_x = A \times 12$	$G_x$ 为森林可吸附或阻挡粉尘; $A$ 为人工造林种草面积(hm <sup>2</sup> ); $T$ 为森林生态系统每 1 hm <sup>2</sup> 可阻挡或者吸附粉尘量。参考《陕西荒漠化地区 2023 年国土绿化试点示范项目实施方案》,以 12 t/hm <sup>2</sup> 计
防风固沙效益	$G_{固沙} = A \cdot E$	$G_{固沙}$ 为防风固沙量; $E$ 为多年平均风蚀模数以 18.27 t/(hm <sup>2</sup> ·a)计 <sup>[12]</sup>
保育土壤效益	$G_N = G_{固沙} \cdot N$ $G_P = G_{固沙} \cdot P$ $G_M = G_{固沙} \cdot M$	$G_N$ , $G_P$ 和 $G_M$ 分别为减少氮流失量、磷流失量和有机质流失量(t/a); $N$ , $P$ , $M$ 分别为 0—10 cm 土层土壤全氮、全磷、有机质含量(%),分别根据本研究实测值 0.015%, 0.017%, 0.45% 计
涵养水源效益	$G_{涵养} = 10A \times (P_{水} - E - C)$	$P_{水}$ 为当地降水量(mm/a); $E$ 为林分蒸散量(mm/a); $C$ 为林分快速地表径流(mm/a)。其中多年平均降水以 405 mm/a 计;林分蒸散量为 295 mm/a <sup>[13]</sup> ,快速地表径流以 0 mm/a
固碳释氧效益	$G_{固碳} = G_{植被固碳} + G_{土壤固碳}$ $G_{植被固碳} = 1.63 R_{碳} \cdot A \cdot B_{年} \cdot F$ $G_{土壤固碳} = A \cdot S_{土壤} \cdot F$ $C_{dw} = a \cdot D_b$	$G_{固碳}$ 为评估林分生态系统年固碳量(t/a); $G_{植被固碳}$ 为评估林分年固碳量(t/a); $G_{土壤固碳}$ 为评估林分对应的土壤年固碳量(t/a); $R_{碳}$ 为二氧化碳中碳的含量,即 27.27%; $B_{年}$ 为实测林分净生产力(t/hm <sup>2</sup> ); $F$ 为森林生态系统服务修正系数; $S_{土壤}$ 为单位面积实测林分土壤的固碳量[t/(hm <sup>2</sup> ·a)]。林分固碳量和氧气释放量计算方法参考《森林生态系统服务功能评估规范》(GB/T 38582—2020) <sup>[14]</sup> ,土壤固碳速率约为植被固碳速率的 0.91 倍 <sup>[15-16]</sup>

表 3 经济效益计算指标及公式

Table 3 Indicators and formulas for economic benefit calculation

效益类型	效益指标	计算公式	公式说明
碳汇林效益	乔木林碳储量	$C_{FQ} = C_L + C_{dw} + C_F$ $C_{dw} = a \cdot D_b$	$C_{FQ}$ 为乔木林固碳量; $C_L$ , $C_D$ 分别为样地内枯落物、枯死木有机碳含量; $C_{dw}$ 为林地生物质碳储量,其中, $a$ , $b$ 为树种特定常数, $D$ 为立木胸径,本项目优势树种主要为油松、刺槐、杨树、樟子松、侧柏等,其生物量方程参考《中国森林生态系统碳储量:生物量方程》; $C_F$ 为林地土壤有机碳储量。实际调查中,评估区样地内枯落物、枯死木较少,在计算中该项碳储量占比极少,计算碳储量时 $C_L$ , $C_D$ 设置为0,各评估小班土地利用未发生变化,计量小斑边界不变,则 $C_F$ 为0
	灌木林碳储量	$C_{SH} = B_{SH} \cdot A_{SH} \cdot C_F$	$C_{SH}$ 为灌木碳储量(t); $B_{SH}$ 为单位面积生物量( $t/hm^2$ ),评估采用实测值 $17.98 t/hm^2$ [17-18]; $A_{SH}$ 为灌木林推广面积; $C_F$ 为灌木平均含碳系数,采用实测灌木林生物量含碳率。国际上灌木林含碳系数为0.45~0.55,IPCC推荐的灌木林、经济林含碳率的平均值为0.50,评估灌木林含碳率以0.5计
	土壤碳储量	$C_S = A_i \cdot C_i \cdot \rho \cdot T / 10$	$C_S$ 为土壤有机碳储量; $A_i$ 为 <i>i</i> 地类面积; $C_i$ 为0—30 cm土层土壤有机碳含量( $g/kg$ ); $\rho$ 为0—30 cm土层土壤容重( $g/cm^3$ ); $T$ 为土层深度,即0—30cm; 10为单位转化系数
	$A = A_{推广面积} \cdot S$ $C_{新增总产量} = C_{新增产量} \cdot A$ $C_{新增产值} = M_{碳} \cdot C_{新增产量}$ $C_{节约成本} = C_{节约成本} \cdot A$ $C_{纯收益} = C_{新增产值} + C_{节约成本} - C_{投资}$	$A_{推广面积}$ 为项目实施所推广的面积; $A$ 为有效推广面积; $C_{新增产量}$ 为单位面积新增产量; $C_{新增总产量}$ 为通过造林提高成活率新增碳储量; $M_{碳}$ 为单位千克碳储量的价格; $C_{节约成本}$ 为提高成活率所减少的补植等节约的成本; $C_{节约成本}$ 为累计总节约成本; $C_{纯收益}$ 为新增纯收入; $S$ 为保收系数,以0.9计。 $C_{投资}$ 为项目实施产生的费用,包括造林成本和推广费用。碳汇价格以每吨183元计。乔木林成本价为7 500元/ $hm^2$ ,灌木为3 600元/ $hm^2$ 计	
优质饲草效益	人工饲草总产量=单位面积饲草产量× $A$ 人工饲草总产值=人工饲草总产量×单位面积干草价格 同等条件下天然饲草总产量=单位面积饲草产量× $A$ 同等条件下天然饲草总产值=同等条件下天然饲草总产量×单位面积干草价格 新增总产值=人工饲草总产值-同等条件下天然饲草总产值 新增生产费=饲草面积×单位面积新增生产费 新增纯收益=新增总产值-新增生产费-推广费用	参考《榆阳区草地年平均产值测算报告》,市场调查每1 kg干草价1.5元;同等条件下天然林每亩干草的单产量为829.95 kg/ $hm^2$ 。项目考察中人工饲草单产量12 000 kg/ $hm^2$ ,每年刈割2茬,退化草原改良每亩产量以450 kg计,其余参考人工饲草产量。其中草种基地、人工饲草基地、草原围栏和退化草原改良的保收系数以0.9计。此外,饲草基地成本为7 500元/ $hm^2$ ,人工饲草基地投资为2 400元/ $hm^2$	
林草种子效益	种子收益= $A \times$ 产量×单价 种子纯收益=种子收益-成本-推广费用 投资收益率=纯收益/推广费用	主要以花棒、羊柴、沙蒿、沙打旺、柠条、紫穗槐、侧柏等种子平均价格计,为41元/kg。成本价格以种子出售价格的10%计	
特色经济林效益	果品收益=推广面积×产量×单价 果品纯收益=种子收益-成本-推广费用	在果品收入中,果品收入在经济林种植3 a后开始计算其经济效益。鲜果平均单产750 kg/ $hm^2$	

续表 3 (Continued table 3)

效益类型	计算公式	公式说明
灌木平茬效益	$X_{\text{新增产量}} = X_{\text{单位面积产量}} \cdot A$ $X_{\text{新增产值}} = M \cdot X_{\text{新增产量}}$ $X_{\text{节支}} = D_{\text{节约成本}} \cdot A$ $X_{\text{纯收益}} = X_{\text{新增产值}} + X_{\text{节支}} - X_{\text{生产}}$	<p><math>X_{\text{新增产量}}</math> 为灌木平茬残余物新增产量 (kg); <math>X_{\text{单位面积产量}}</math> 为灌木平茬单位面积残余物新增产量 (kg); <math>M</math> 为灌木平茬后每 1 hm<sup>2</sup> 的价格; <math>X_{\text{新增产值}}</math> 为灌木平茬新增产值; <math>X_{\text{节支}}</math> 为灌木平茬后植被提高成活率新增的经济效益 (元); <math>D_{\text{节约成本}}</math> 为灌木平茬后单位面积节约的成本 (元)。 <math>X_{\text{纯收益}}</math> 为灌木平茬新增的纯收益 (元); <math>X_{\text{生产}}</math> 为灌木平茬新增的生产费用 (元)。灌木主要有沙棘、柽柳、沙柳、紫穗槐、柠条、花棒、羊柴等。其中柽柳单产量以 30 000 枝计, 单位产值达 45 000 元/hm<sup>2</sup>, 成本以 3 900 元/hm<sup>2</sup> 计; 平茬沙柳平均收集生物质原料 18 t/hm<sup>2</sup>, 生物质原料收购价 150 元/t。灌木每 4a 刈割 1 次, 草本每年 3 次<sup>[19]</sup>。项目效益分析时刈割的灌草主要用于饲草, 采用每 4 a 刈割 1 次进行计算</p>
林(草)光互补效益	$E_M = H_A \times \frac{P_{AZ}}{E_s} K \times 0.56 \text{元/度}$	<p><math>E_M</math> 为上网发电量经济效益 (kW·h); <math>H_A</math> 为水平面太阳能总辐射 (kW·h/m<sup>2</sup>); <math>E_s</math> 为标准条件下的辐照度 (常数=1 kW·h/m<sup>2</sup>); <math>P_{AZ}</math> 为组件安装容量 (kWp)<sup>[20]</sup>。其中水平面太阳能总辐射参考《2022 年中国风能太阳能资源年景公报》, 陕西省 2022 年水平面总辐照量 1 459.7 kW·h/m<sup>2</sup>; 系统总效率以 85% 计<sup>[20]</sup></p>
生态旅游效益	新增纯收益=新增总产值-成本-推广费用	生态旅游依据陕西荒漠化地区年度政府工作报告和统计年鉴数据中的旅游收入计算。
林下经济效益	新增纯收益=新增总产值-成本-推广费用-科研费	林下经济依据陕西荒漠化地区年度政府工作报告和统计年鉴数据中林业产值的 3% 计算。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态效益

##### 3.1.1 阻挡粉尘效益

由表 4 可知, 2011—2022 年, 陕西省荒漠化地区人工造林种草阻挡粉尘效果呈明显的线性上升趋势。人工林阻挡粉尘的生态经济效益突破了 90 亿元。

##### 3.1.2 防风固沙效益

通过计算 2011—2022 年陕西省荒漠化地区退耕还林固沙量(表 5), 退耕还林显著降低了陕西荒漠化地区风沙天气数量, 年防风固沙总量随时间呈明显线性增长趋势, 平均每年以 1.32 倍速率增加; 2022 年防风固沙总量增长率最低, 仅是上年度的 1.08 倍。整体来看, 陕西荒漠化地区各项生态工程实施可显著改善区域风沙天气, 累计固沙量达 9.05×10<sup>7</sup> t。

##### 3.1.3 保育土壤效益

通过分析陕西省荒漠化地区 2011—2022 年森林保氮量、保磷量和保有机质量(图 1), 结果表明, 森林累计保氮量、保磷量和保有机质量分别达到 1.20×10<sup>4</sup> t, 1.40×10<sup>4</sup> t, 3.66×10<sup>5</sup> t, 平均每年以 1.29 倍的速率增加。其中, 2011—2014 年, 森林保育土壤能力增长速

率最快; 2014 年之后增长率趋于稳定, 整体在 1.08~1.29 间波动。通过模型回归, 结果显示, 森林保氮量、保磷量和保有机质量均随时间呈明显线性增加趋势, 决定系数达 0.98。

表 4 陕西省荒漠化地区 2011—2022 年新增林草植被阻挡粉尘量

Table 4 Amount of dust blocked by newly added forest and grass vegetation in desertification areas of Shaanxi Province from 2011 to 2022

年份	阻挡粉尘/10 <sup>4</sup> t	生态经济效益/万元
2011	86.2	14 650.7
2012	127.4	21 662.4
2013	206.9	35 175.9
2014	261.4	44 436.9
2015	303.1	51 522.3
2016	345.5	58 726.5
2017	390.7	66 410.9
2018	506.3	86 071.2
2019	600.6	102 109.2
2020	738.8	125 600.3
2021	831.0	141 267.6
2022	902.4	153 415.0

表 5 陕西省荒漠化地区 2011—2022 年新增林草植被防风固沙量

Table 5 Windbreak and sand fixation capacity of newly added forest and grass vegetation in desertification areas of Shaanxi Province during 2011—2022

年份	固沙量/( $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	累计固沙量/( $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ )
2011	145.8	145.8
2012	215.6	361.4
2013	350.0	711.4
2014	442.2	1 153.6
2015	512.7	1 666.3
2016	584.4	2 250.7
2017	660.9	2 911.6
2018	856.5	3 768.1
2019	1 016.1	4 784.2
2020	1 249.8	6 034.0
2021	1 405.8	7 439.8
2022	1 526.6	8 966.4

### 3.1.4 涵养水源效益

人工造林种草是水源涵养的主要技术措施之一,被誉为“绿色水库”,是促进自然界水分良性循环的有效途径之一。根据计算(表 6),截至 2022 年,陕西荒漠化地区人工林累计调节水量突破  $4.90 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

### 3.1.5 固碳释氧效益

分析结果表明(图 2),陕西省荒漠化地区 2011—2022 年植被累计固碳量、释氧量分别为  $3.72 \times 10^7 \text{ t}$  和

$5.22 \times 10^7 \text{ t}$ ,其中 2019 年固碳量和氧气释放量相比上一年度增幅最高,分别达到  $9.62 \times 10^5 \text{ t}$  和  $1.35 \times 10^6 \text{ t}$ ,其次是 2017 年,分别为  $8.05 \times 10^5 \text{ t}$  和  $1.13 \times 10^6 \text{ t}$ ;2011 年最少,仅分别为  $2.67 \times 10^5 \text{ t}$  和  $3.75 \times 10^5 \text{ t}$ ;其余年份较上年度固碳释氧增长量相近,整体在  $2.87 \times 10^5 \sim 6.57 \times 10^5 \text{ t}$  和  $4.02 \times 10^5 \sim 9.21 \times 10^5 \text{ t}$  间波动。2011—2022 年本项目植被固碳量和氧气释放量模型回归表明,植被固碳量和氧气释放量随时间显著增加,决定系数达 0.97。

表 6 陕西省荒漠化地区 2011—2022 年新增林草植被水源涵养能力

Table 6 Water conservation capacity of newly added forest and grass vegetation in desertification areas of Shaanxi Province from 2011 to 2022 单位: $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$

年份	调节水量	累计调节水量
2011	79.0	79.0
2012	116.9	239.7
2013	189.7	429.4
2014	239.6	669.0
2015	277.8	946.8
2016	316.7	1 263.5
2017	358.1	1 621.6
2018	464.1	2 085.7
2019	550.6	2 636.3
2020	677.3	3 313.6
2021	761.7	4 075.3
2022	827.2	4 902.4

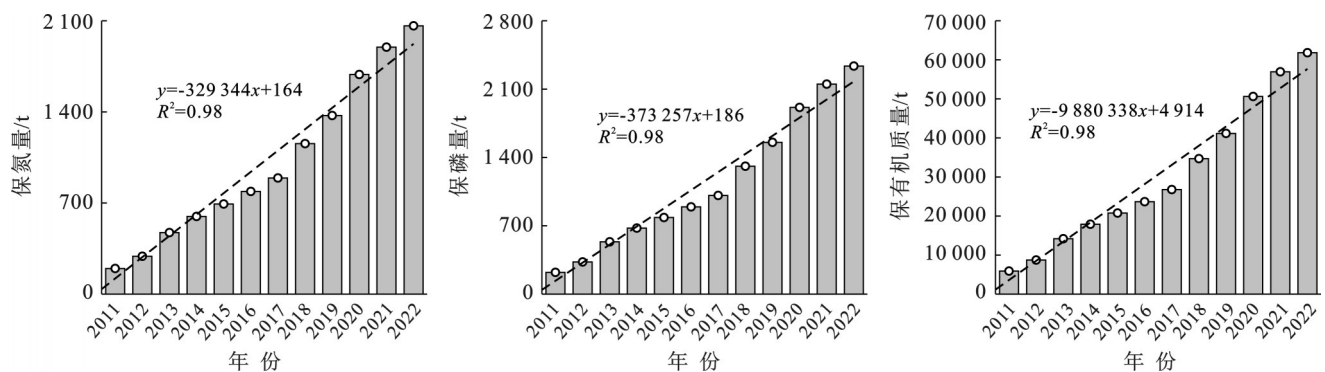


图 1 陕西省荒漠化地区 2011—2022 年新增林草植被保育土壤能力

Fig.1 Soil conservation capacity of newly added forest and grass vegetation in desertification areas of Shaanxi Province from 2011 to 2022

## 3.2 经济效益

### 3.2.1 碳汇效益

通过分析本项目 2011—2022 年陕西省荒漠化地区乔木林和灌木林人工林生态系统碳储量和经济效益可以看出(表 7),截至 2022 年森林生态系统累计碳汇量达  $4.74 \times 10^7 \text{ t}$ ,固碳价值达  $6.96 \times 10^5$  万元。通过

表 7 可以看出,碳汇林经济效益和纯收入呈明显线性增加趋势,其中 2012—2013 年碳汇收益较上一年碳汇收益最高,是上一年碳汇收益的 1.8~2.5 倍;在 2015—2022 年相比上年度增长平稳,整体以 1.3 倍增加。

### 3.2.2 优质饲草效益

优质饲草包括草种基地、人工饲草基地、草原围栏

和退化草原改良 4 部分。由表 8 可知,截至 2022 年,陕西荒漠化地区优质饲草累计推广面积达  $5.30 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。其中人工饲草基地累计推广面积达  $1.20 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,草种基地主要在 2013—2015 年推广,面积达  $727 \text{ hm}^2$ ,草原围栏和退化草原改良仅在 2021—2022 年涉及,累计达  $3.20 \times 10^4 \text{ hm}^2$  和  $8\ 000 \text{ hm}^2$ ,计算结果表明,

2011—2022 年陕西荒漠化地区草种基地、人工饲草基地、草原围栏和退化草原改良累计收益突破 7.1 亿元,新增纯收益达 6.6 亿元。其中 2010—2020 年其新增纯收益随时间呈明显线性增加趋势;2021 年随着草原围栏和退化草原改良技术实施,陕西荒漠化地区优质饲草新增纯收益显著增加,是上年度的 3.6 倍。

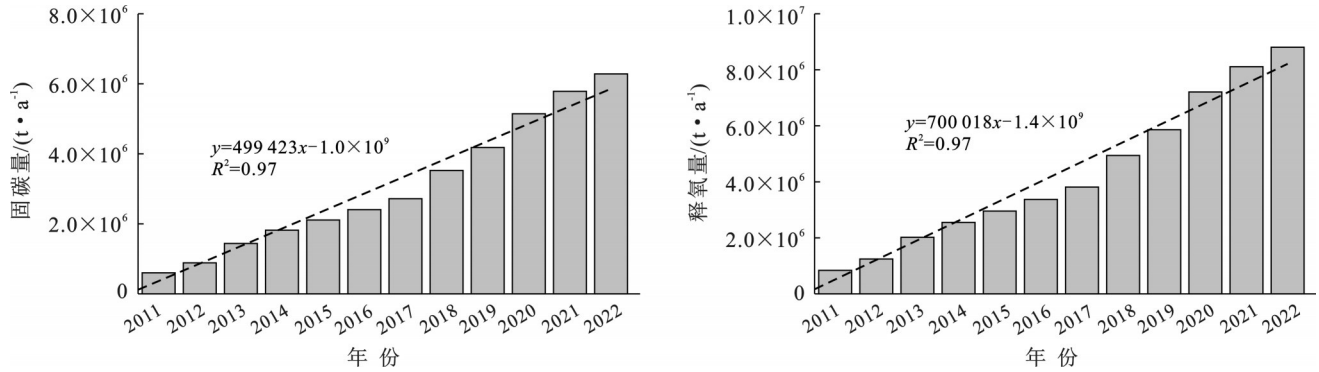


图 2 2011—2022 年陕西省荒漠化地区新增植被固碳、释氧动态变化  
 Fig.2 Dynamic changes in carbon sequestration and oxygen release by newly added vegetation in desertification areas of Shaanxi Province from 2011 to 2022

表 7 陕西省荒漠化地区 2011—2022 年新增碳汇林经济效益分析  
 Table 7 Economic benefit analysis of newly added carbon sequestration forests in desertification areas of Shaanxi Province from 2011 to 2022

时间	乔灌面积/ $10^4 \text{ hm}^2$	年度碳储量/ $10^4 \text{ t}$	新增碳汇收益/万元	新增产值/万元	节支/万元	新增纯收益/万元
2011	3.6	26.5	1 045.0	454.6	4 980.8	6 480.4
2012	3.8	50.1	3 459.8	1 505.0	5 346.6	10 311.4
2013	7.1	87.9	8 467.0	3 683.1	9 922.4	22 072.5
2014	4.9	138.1	15 751.7	6 852.0	6 833.3	29 437
2015	3.7	197.3	24 678.8	10 735.3	5 190.9	40 605
2016	3.8	264.3	35 033.5	15 239.6	5 293.3	55 566.4
2017	4.0	339.5	46 895.4	20 399.5	5 692.3	72 987.2
2018	10.6	439.8	63 335.8	27 551.1	14 834.5	105 721.4
2019	8.5	559.9	83 403.6	36 280.6	11 987.4	131 671.6
2020	12.6	707.3	108 488.4	47 192.4	17 668.6	173 349.4
2021	5.4	873.0	136 906.5	59 554.3	7 613.1	204 073.9
2022	5.2	1 051.3	167 624.8	72 916.8	7 203.8	247 745.4
合计		4 735.0	695 090.3	302 364.3	102 567.0	1 100 021.6

3.2.3 林草种子效益

陕西省 2014—2022 年荒漠化地区种子采种总量达到 4 337 万 kg,累计新增纯收益 5.79 亿元。其中,其他种子总量约为花棒、羊柴、沙蒿、沙打旺、柠条、紫穗槐和侧柏种子总量的 0.71 倍,达到  $1.99 \times 10^6 \text{ kg}$ ,新增纯收益达 4.0 亿元。柠条和紫穗槐种子产量位列第一和第二,产值达到了  $1.46 \times 10^6$  和  $3.50 \times 10^5 \text{ kg}$ ,新增纯收益分别为 38.5 和 8.4 万元(表 9)。值得一提的是,花棒的采种量为  $2.20 \times 10^5 \text{ kg}$ ,但产值和新增纯收益均位列第一位,分别为  $1.78 \times 10^7 \text{ kg}$  和 71.2 万元。

2019 年的采种总量和新增纯收益均为最高值,分别达到  $8.10 \times 10^5 \text{ kg}$  和 1.3 亿元。

3.2.4 特色经济林效益

2014—2022 年陕西省荒漠化地区果品推总产量  $1.88 \times 10^8 \text{ kg}$ ,总经济效益 1.96 亿元,纯收益 1.77 亿元(表 10)。其中,杏子推广面积突破  $6.30 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,产量达  $4.68 \times 10^7 \text{ kg}$ ,面积与产量最大,经济效益和纯收益分别为 28 098 和 25 288 万元。红枣,推广面积、产量、分别为  $5.11 \times 10^4 \text{ hm}^2$  和  $3.82 \times 10^7 \text{ kg}$ ,经济效益和纯收益最大,分别为 61 060 和 54 954 万元。

表8 2011—2022年陕西省荒漠化地区新增优质饲草效益

Table 8 Benefits of newly added high-quality forage in desertification areas of Shaanxi Province from 2011 to 2022

年度	草种基地/hm <sup>2</sup>	人工饲草基地/hm <sup>2</sup>	草原围栏/hm <sup>2</sup>	退化草原改良/hm <sup>2</sup>	新增总产值/万元	新增纯收益/万元
2011	0	0	0	0	0	0
2012	0	0	0	0	0	0
2013	225	2 355	0	0	3 011	1 979
2014	351	1 280	0	0	1 905	1 336
2015	151	1 361	0	0	1 766	1 327
2016	0	1 429	0	0	1 668	1 326
2017	0	1 194	0	0	1 394	1 108
2018	0	1 121	0	0	1 309	1 040
2019	0	1 729	0	0	2 018	1 604
2020	0	1 742	0	0	2 034	1 617
2021	0	0	24 120	4 824	38 150	37 670
2022	0	0	7 839	3 316	17 944	17 095
合计					71 199	66 102

表9 2014—2021年陕西省荒漠化地区林草种子新增纯收益

Table 9 Additional net income from forest and grass seeds in desertification areas of Shaanxi Province from 2014 to 2021

单位:万元

年份	花棒	羊柴	沙蒿	沙打旺	柠条	紫穗槐	侧柏	其他
2014	7.4	4.8	3.2	2.7	9.4	1.7	0.4	2 075.9
2015	8.0	5.8	1.1	1.9	3.9	2.1	0.4	3 034.9
2016	7.4	2.3	1.8	1.0	3.2	0.7	0.3	1 708.7
2017	7.0	2.2	2.4	0	5.4	0	1.9	5 564.1
2018	12.8	8.4	2.1	0	5.9	0.8	1.9	6 779.4
2019	11.2	8.6	0	2.4	5.4	1.2	4.2	11 967.4
2020	11.6	0	0	0.1	2.7	0.9	0.3	8 907.7
2021	5.8	7.4	0	0.3	2.6	1.0	1.4	7 964.8
2022	0	0	0	0	2.6	1.3	1.5	9 314.8
合计					57 910.508			

### 3.2.5 灌木平茬效益

灌木平茬技术累计推广面积达  $1.98 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 新增纯收益达 127 533.3 万元, 其中沙柳新增纯收益整体较高, 达 78 579.2 万元; 平茬饲料中, 柠条饲草经济效益高达 31 328.0 万元, 其余饲草经济效益整体相近, 在 3 738.0~5 652.0 万元间波动(表 11)。

### 3.2.6 “林光互补”经济效益

通过对 2011—2021 年陕西省荒漠化地区获取的光伏项目数据进行参考, 根据其年发电量和林下灌草的占地面积, 分析陕西荒漠化地区“林光互补”总经济效益。光伏发电和灌草年收入情况详见表 12, 陕西荒漠化地区“林光互补”产业带来了巨大的经济效益。其中, 光伏发电累计经济效益突破 135 亿元, 2011—2013 年光伏发电经济效益不断增长。同时, 灌草资源在经济价值方面的效益累计达 7 476 万元, 且整体呈现逐年递增的趋势。

### 3.2.7 生态旅游效益

由图 3 可知, 陕西省荒漠化生态旅游区共接

待旅游人数 8 827 万人, 实现旅游综合收入达到 654 208.8 万元。其中, 2018 年接待人数首次突破 1 300 万人, 旅游综合收入高达 106 651.0 万元, 2019 年接待人数持续攀升达到 1 481 万人次, 旅游综合收入再创新高, 达到 116 159.0 万元。

### 3.2.8 林下经济效益

研究期内陕西省荒漠化地区林下经济逐步增涨, 累计总产值为 305 970 万元, 2017 年最高, 达到 36 240.0 万元, 随后进入稳定发展阶段, 呈现波动式先增后降的特点。

## 3.3 社会效益

### 3.3.1 创造就业机会, 增加农民收入, 促进乡村振兴

荒漠化土地治理过程中, 无论是在人工造林阶段、幼苗抚育阶段, 还是成林养护阶段, 森林碳库项目建设都需要大量的劳动力投入, 且劳动力雇用的持续性较强, 创造持久的就业机会, 增加农民收入, 有助于乡村振兴目标的实现。返乡创业农民工实现就近就业(创业)的同时, 又可以兼顾家庭, 有利于促进进城农民工回流, 能够较好地解决当前严重的农

村空心化问题。陕西省实施的“三北”防护林建设工程、京津风沙源工程、重要生态系统保护和修复工程等项目实施过程中绩效指标对带动就业人数做出明确要求。由图4可知,截至2022年,陕西荒漠化地区累计带动就业人数达1.5万人,农民累计收入达8亿元。其中,2022年带动就业人数最高,达到2 506人。人工植被建设的发展不仅提高了林农经济收入,对沙区人民福利和社会安定有着重要作用。以榆林市榆阳区赵家峁生态示范村为例,2013年实施京津风沙源流域治理项目,建设以设施果蔬、葡萄、山地苹果和酥梨为主的设施农业及时令水果采摘区;2014年实施国家京津风沙源二期治理移民搬迁项目,村集体经济全面发展。2017年该村开发生态旅游产业,形成春赏花、夏摘果、秋观叶、冬踏雪的自然景观,打造“美丽农田+景区参观+生态修复+学习实践+农事体验”一体化循环旅游体系,以游带产、以产促游,2017年,集体生态旅游纯收入达200万元,2018年达320万元,2022年达1 350万元,村集体从2018—2022年,5次累计分红646万元,户均分红2.9万元,人均分红1万元。村集体资产由2013年负债2万元到2022年底达8 500万元。

表10 陕西省荒漠化地区特色经济林果品推广面积和经济效益  
Table 10 Area of promotion and economic benefits of characteristic economic forest fruit products in desertification areas of Shaanxi Province

植被类型	推广面积/ hm <sup>2</sup>	产量/ 10 <sup>4</sup> kg	总经济效益/ 万元	新增纯收益/ 万元
红枣	51 137	3 816.3	61 060.0	54 954.0
海红果	1 698	126.8	4 056.0	3 650.0
核桃	21 675	1 617.6	32 352.0	29 116.0
苹果	50 523	3 770.4	30 163.0	27 146.0
沙棘	1 742	130.0	7 540.0	6 786.0
梨	408	30.5	244.0	219.0
杏	62 757	4 683.0	28 098.0	25 288.0
桃	14 024	1 046.6	6 279.0	5 651.0
李	670	50.0	300.0	270.0
山楂	144	10.8	64.0	57.0
文冠果	804	60.0	3 720.0	3 348.0
元宝枫	6	0.5	39.0	35.0
沙打旺	5 360	400.0	18 400.0	16 560.0
苜蓿	13 467	1 005.0	1 507.0	1 356.0
柠条	13 735	1 025.0	1 537.0	1 383.0
紫穗槐	13 768	1 027.5	1 541.0	1 386.0
合计	251 918	18 800	196 900	177 205

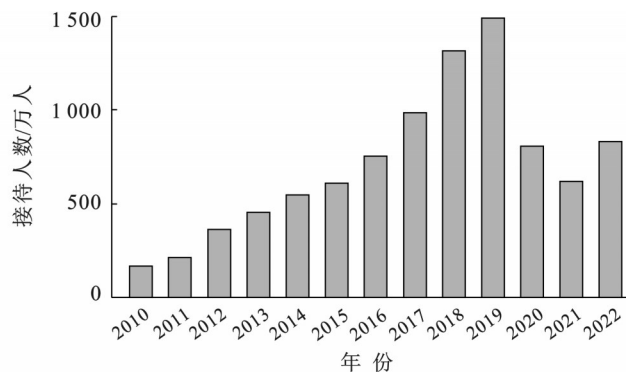


图3 2011—2022年陕西省荒漠化区生态旅游接待人数及收入

Fig.3 Number of ecotourism visitors and revenue in desertification areas of Shaanxi Province (2011—2022)

3.3.2 改善人居环境,提高人民群众安全感、幸福感

森林具有良好的固碳作用,也是最好的“空气净化器”,具有良好的社会服务功能。森林除了吸碳释氧,降低大气中二氧化碳浓度,还具有环境美化、疗养保健、吸收有毒物质、滞尘、降低噪声和调节气温等功能。林木散发出的萜烯类物质,可杀菌和治疗某些疾病,林内的负氧离子可促进新陈代谢,提高人体免疫力,宁静、清新的森林环境具有消除疲劳、镇静安神作用。陕西省实施的“三北”防护林建设工程、京津风沙源工程、重要生态系统保护和修复工程等项目实施过程中绩效指标对项目区群众满意度做出明确要求,各项项目的实施均是在群众满意、积极配合的情况下建设完成。这些项目的实施,有利于

带动当地基础设施建设和文化服务建设,提高人民群众的物质生活水平,丰富其精神文化生活,增加居民的安全感和生活质量的幸福感。

4 结论

陕西省荒漠化土地治理累计推广人工造林面积达  $8.36 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>。2011—2022年新增林草植被固碳释氧、阻挡粉尘量、防风固沙量、保育土壤和调节水源随时间呈明显线性增加趋势,其中累计固碳量和释氧量分别为  $3.72 \times 10^7$  t 和  $5.22 \times 10^7$  t; 累计阻挡粉尘量达  $5.350 \times 10^7$  t; 累计防风固沙量  $9.05 \times 10^7$  t; 森林累计保氮量、保磷量和保有机质量分别为  $1.20 \times 10^4$  t,  $1.40 \times 10^4$  t,  $3.66 \times 10^5$  t; 累计调节水源

$4.90 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。森林生态系统累计碳汇量达  $4.74 \times 10^7 \text{ t}$ , 固碳价值达 695 090.3 万元, 同时累计碳汇林纯收益达 1 100 021.6 万元, 节支 10.25 亿元; 优质饲草的累计推广面积达到  $5.30 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 草种基地、人工饲草基地、草原围栏和退化草原改良累计收益突破 7.1 亿元, 新增纯收益达到 6.6 亿元; 灌木平茬技术累计推广面积和新增纯收益分别为  $1.98 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 127 533.3 万元; 光伏发电累计经济效益达 135 亿元。

林草种子采种总量达到  $4.34 \times 10^7 \text{ kg}$ , 新增纯收益 5.79 亿元; 果品总产量  $1.88 \times 10^8 \text{ kg}$ , 总经济效益 2.0 亿元, 纯收益 1.8 亿元; 陕西荒漠化生态旅游区共接待旅游人数 8 827 万, 实现旅游综合收入达到 654 208.8 万元; 林下经济产值整体呈现出上升趋势, 累计总产值为 305 970 万元。荒漠化土地治理增强了公众的环境保护意识和可持续发展理念, 同时累计带动就业 1.5 万人, 形成人与自然和谐共生。

表 11 陕西省荒漠化地区灌木平茬用途及其经济效益分析

Table 11 Application and economic benefit analysis of shrub coppicing in desertification areas of Shaanxi Province

植被类型	植被用途	推广面积/ $\text{hm}^2$	产量/ ( $10^4 \text{ t}$ , 万枝)	新增总产值/ 万元	节支/万元	新增纯收益/ 万元
沙棘	饲料	348	0.3	390.0	98.8	462.8
沙柳	生物质能源	164 525	294.7	44 200.8	46 656.4	78 579.2
紫穗槐	饲料	2 836	2.1	3 175.5	804.5	3 768.3
柠条	饲料	23 584	17.6	26 400.0	6 688.0	31 328.0
花棒	饲料	3 015	2.3	3 375.0	855.0	4 005.0
羊柴	饲料	2 814	2.1	3 150.0	798.0	3 738.0
怪柳	枝条签字	1 206	54 000.0	5 400.0	342.0	5 652.0
合计				86 091.3	56 242.7	127 533.3

表 12 陕西省荒漠化地区“林(草)光互补”经济效益

Table 12 Economic benefits of “complementary forest (grass)-solar” system in desertification areas of Shaanxi Province

年份	光伏规模/ $10^4 \text{ kW}$	光伏占地面积/ $\text{hm}^2$	灌木林面积/ $\text{hm}^2$	发电效益/ 万元	灌草经济效益/ 万元	总经济效益/ 万元
2011	2.00	33	23	812	0.0	812
2012	3.00	50	35	2 031	0.0	2 031
2013	10.00	167	117	6 095	0.0	6 095
2014	33.00	552	386	19 508	0.0	19 508
2015	75.00	1 256	879	49 993	5.0	49 998
2016	267.45	4 479	3 135	158 702	37.0	158 739
2017	55.60	931	651	181 301	56.0	181 357
2018	65.95	1 104	773	208 107	189.0	208 296
2019	25.80	432	302	218 593	623.0	219 216
2020	15.00	33	23	224 690	1 455.0	226 145
2021	138.00	50	35	280 782	5 111.0	285 893
合计				1 350 614	7 476.0	1 358 090

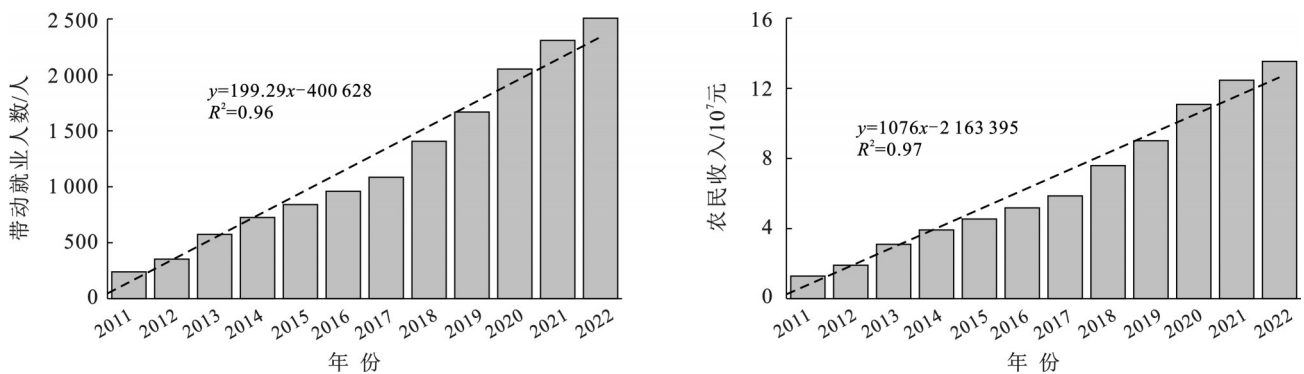


图 4 2011—2022 年陕西省荒漠化区新增人工造林累计带动就业人数

Fig. 4 Cumulative number of jobs created by newly added artificial afforestation in desertification areas of Shaanxi Province from 2011 to 2022

## 参考文献(References)

- [1] 李芹芳,潘悦,周森林.我国沙化土地现状及动态变化研究[J].林业资源管理,2019(5):12-17.  
Li Qinfang, Pan Yue, Zhou Senlin. Study on current status and dynamics of land prone to desertification in China [J]. Forest Resources Management, 2019 (5) : 12-17.
- [2] 杨晓晖,张克斌,慈龙骏.中国荒漠化评价的现状、问题及其解决途径[J].中国水土保持科学,2004,2(1):22-28.  
Yang Xiaohui, Zhang Kebin, Ci Longjun. Desertification assessment in China: The state-of-art, problems and solution measures [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004,2(1):22-28.
- [3] 高会军,姜琦刚,霍晓斌.陕北长城沿线沙质荒漠化遥感研究[J].自然资源学报,2005,20(3):471-475.  
Gao Huijun, Jiang Qigang, Huo Xiaobin. Remote sensing research of sandy desertification along the great wall in northern Shaanxi [J]. Journal of Natural Resources, 2005,20(3):471-475.
- [4] 张浩,余军,王锋,等.陕西省荒漠化、沙化土地监测与动态变化分析[J].西北林学院学报,2015,30(1):184-188.  
Zhang Hao, Yu Jun, Wang Feng, et al. Monitoring and dynamic analysis of desertification and sanded land of Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015,30(1):184-188.
- [5] 刘艳,温玉红,窦俊杰,等.甘肃省麦积区退耕还林生态效益评价[J].温带林业研究,2022,5(1):41-47.  
Liu Yan, Wen Yuhong, Dou Junjie, et al. Evaluation on ecological benefits of returning farmland to forest in Maiji District of Gansu Province [J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2022,5(1):41-47.
- [6] 王睿,杨国靖.库布齐沙漠东缘防沙治沙生态效益评价[J].水土保持通报,2018,38(5):174-179.  
Wang Rui, Yang Guojing. Evaluation of ecological benefit of combating desertification in east edge of Hobq Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(5):174-179.
- [7] 展秀丽,严平.青海湖流域防沙治沙生态效益现状评价及分析[J].中国沙漠,2012,32(6):1773-1778.  
Zhan Xiuli, Yan Ping. Assessment and analysis of ecological benefit of combating desertification around Qinghai Lake [J]. Journal of Desert Research, 2012,32(6) : 1773-1778.
- [8] 李晓格.防沙治沙工程效益的能值分析及其耦合协调研究:以陕西省榆林市为例[D].北京:北京林业大学,2022.  
Li Xiaoge. Energy value analysis and coupling coordination research on the benefits of sand prevention and control projects: A case study of Yulin City, Shaanxi Province [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [9] 张彩南.基于生态位理论的榆林市荒漠化防治工程综合效益评价及分析研究[D].北京:北京林业大学,2020.  
Zhang Cainan. Comprehensive Benefit evaluation and analysis research of desertification control project in Yulin City based on niche theory [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [10] 王海燕,丛佩娟,袁普金,等.国家水土保持重点工程效益综合评价模型研究[J].水土保持通报,2021,41(6):119-126.  
Wang Haiyan, Cong Peijuan, Yuan Pujin, et al. Comprehensive evaluation model of national key project benefits of soil and water conservation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(6):119-126.
- [11] 刘珏珏,赵雪,张旭,等.渭洛河夹槽地带沙荒地整治综合效益评价[J].水土保持通报,2018,38(4):345-349.  
Liu Honghong, Zhao Xue, Zhang Xu, et al. Comprehensive benefits evaluation of sand and waste land regulation in Weihe River and Luohe River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(4):345-349.
- [12] 于娜.毛乌素沙地生态系统服务时空格局及其驱动力分析[D].北京:北京林业大学,2018.  
Yu Na. Analysis of the Spatio-temporal pattern and driving forces of ecosystem services in Mu Us sandy land [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- [13] 冯伟.毛乌素沙地东北缘土壤水分动态及深层渗漏特征[D].北京:中国林业科学研究院,2015.  
Feng Wei. Dynamics of soil moisture and characteristics of deep leakage in northeast margin of Mu Us sandy land [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [14] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会.森林生态系统服务功能评估规范:GB/T 38582—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for Assessment of Forest Ecosystem Services: GB/T 38582—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [15] 黄玫,侯晶,唐旭利,等.中国成熟林植被和土壤固碳速率对气候变化的响应[J].植物生态学报,2016,40(4):416-424.  
Huang Mei, Hou Jing, Tang Xuli, et al. Response of vegetation and soil carbon accumulation rate for China's mature forest on climate change [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016,40(4):416-424.
- [16] 余光英.林业碳汇关键领域研究综述[J].林业经济,2024,46(9):78-96.  
Yu Guangying. Review on key areas of forestry carbon sequestration [J]. Forestry Economics, 2024,46(9) : 78-96.