

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.034

杨凯博,张瑞琦,王进鑫,等.渭北黄土高原不同类型人工林的生态效益评价[J].水土保持学报,2024,38(1):357-367.

YANG Kaibo, ZHANG Ruiqi, WANG Jinxin, et al. Ecological benefit evaluation of different types of artificial forests on the Weibei-loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 357-367.

渭北黄土高原不同类型人工林的生态效益评价

杨凯博^{1,2}, 张瑞琦^{1,2}, 王进鑫^{1,2}, 白立强³

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,陕西 杨凌 712100;

3.陕西省林业科学院森林保护研究所,西安 710000)

摘 要: [目的] 构建适应渭北黄土高原人工林资源与生态服务功能特点的人工林生态效益评价方法,阐明不同类型人工林建设对该地区东部、中部、西部生态环境的影响,为准确量化与科学评估不同类型、不同区域人工林的生态服务功能,优化林分结构、制定人工林生态补偿强度标准及准确计量评估人工林碳汇,将“绿色颜值”转化为“生态价值”提供理论依据。[方法] 在构建渭北黄土高原生态林、生态经济林、经济林有效面积计算模型的基础上,采用典型区域调查、测定与森林二类调查资料和计量参数等收集相结合的方法,计算分析了 3 种不同类型,东部、中部、西部不同区域人工林涵养水源、固碳释氧、保育土壤和净化大气的生态效益。[结果] (1)渭北黄土高原不同类型人工林的生态效益为生态林>经济林>生态经济林;生态效益中涵养水源价值量最高,保育土壤与固碳释氧效益次之,净化大气的价值量最低。(2)人工林单位面积生态效益为经济林>生态林>生态经济林。(3)不同区域人工林生态效益为中部>东部>西部。[结论] 生态林和经济林在生态效益中发挥着重要作用,提高它们所占比重能显著提高人工林的生态效益。为提高西部人工林生态效益,生态林应加强疏林改造、未成林抚育和灌木林封育;同时适度发展经济林,方可有效提升西部乃至整个渭北黄土高原人工林的生态效益。

关键词: 渭北黄土高原;生态林;生态经济林;经济林;生态效益

中图分类号: S718.56 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)01-0357-11

Ecological Benefit Evaluation of Different Types of Artificial Forests on the Weibei-loess Plateau

YANG Kaibo^{1,2}, ZHANG Ruiqi^{1,2}, WANG Jinxin^{1,2}, BAI Liqiang³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 3. Institute of Forest Protection, Shaanxi Academy of Forestry Sciences, Xi'an 710000, China)

Abstract: [Objective] To construct ecological benefit evaluation methods adapted to the characteristics of local plantation resources and ecological services, and clarify the impacts of different types of plantation construction on the ecological environment in the eastern, central and western parts of the region. It provides a theoretical basis for accurately quantifying and scientifically evaluating the ecological service function of the plantation in different regions, optimizing the stand structure of the plantation, formulating the ecological compensation intensity standard of the plantation, accurately measuring and evaluating the carbon sink of the plantation, and transforming the “green appearance level” into “ecological value”. [Methods] In the construction of the loess plateau ecological forest, ecological economic forest, economic forest of weihe effective area calculation model based on the investigation and determination of typical area and forest survey to collect data and measurement parameters, such as the method of combining calculation analysis of the

收稿日期:2023-04-19

修回日期:2023-05-22

录用日期:2023-10-11

网络首发日期(www.cnki.net):2023-12-05

资助项目:陕西省林业科学院“黄河流域生态保护修复及提质增效关键技术创新团队”项目(SXLK2020-0305);蒲城石质山地植被恢复技术示范与推广项目(K4030220254);国家重点研发计划项目(2017YFC0504402)

第一作者:杨凯博(1996—),男,硕士研究生,主要从事植被恢复与重建研究。E-mail:912077602@qq.com

通信作者:王进鑫(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事旱区人工林生态系统水分运移调控与生态恢复理论研究。E-mail:jwang118@126.com

different types, different regions of the eastern, central and western plantation water conservation, carbon sequestration release oxygen, conservation of soil and purify the atmosphere of ecological benefits. [Results] (1) The ecological benefits of different types of plantation in Weibei Loess Plateau were ecological forest > economic forest > ecological economic forest; The value of water conservation is the highest, the value of soil conservation and carbon fixation and oxygen release is the second, and the value of air purification is the lowest. (2) The ecological benefits per unit area of plantation were economic forest > ecological forest > ecological economic forest. (3) The ecological benefits of plantation were in the middle > East > west. [Conclusion] Ecological forest and economic forest play an important role in the ecological benefits, and increasing their proportion can significantly improve the ecological benefits of plantations. In order to improve the ecological benefits of plantations in Weibei-loess plateau, ecological forest should strengthen the transformation of sparse forest, the cultivation of virgin forest and the sealing of shrubland. At the same time, moderate development of economic forest can effectively improve the ecological benefits of artificial forest in the west and even the whole Weibei Loess Plateau.

Keywords: Weibei-Loess Plateau; ecological forest; ecological economic forest; economic forest; ecological benefits

Received: 2023-04-19

Revised: 2023-05-22

Accepted: 2023-10-11

Online(www.cnki.net): 2023-12-05

渭北黄土高原水土流失严重,是制约当地生态、经济、社会发展的重要因素。近几十年来,为了改善区域生态环境、提高植被覆盖率、帮助人民脱贫致富,该地区先后实施了三北防护林体系建设、山川秀美和退耕还林(草)等林业生态工程,在保持水土、涵养水源、改善区域生态环境中发挥了重要作用。然而,该地区人工林的生态服务功能效益底数不清,致使提质增效的一些政策措施针对性不强^[1-2]。特别是随着我国生态补偿制度的逐步推进,如何确立客观公正、符合实际的水土保持生态补偿强度标准已成为关键问题。故对不同类型人工林的生态服务功能及其产生的生态效益进行科学评估与量化,已成为当前亟待解决的首要问题。

国内外众多学者对森林生态效益评价曾开展过大量研究,其中评价指标体系构建是关键部分^[3-5]。前人^[6]将森林价值总值集中在 7 个指标;美国农业部建立了水质、土壤质量、水调节等评价指标^[7]。侯元兆等^[8]认为,森林资源价值主要见于涵养水源、防风固沙、净化大气 3 个方面;康永祥等^[9]通过涵养水源、保育土壤、固碳释氧等 6 个方面对陕西森林进行了生态效益研究;李艳春^[10]选取净化水质等指标在铁西自然保护区进行森林生态效益研究;柴济坤^[11]从涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化大气环境、生物多样性保护几个方面对内蒙古南木林区森林资源的生态效益进行了评估研究。

有的学者对多个地区不同类型森林进行了生态

效益分析。ROGER^[12]对世界 12 个地区的森林资源效益采用模拟模型方法进行定量分析;XU 等^[13]应用能值分析评价了荒漠灌丛系统转变为人工林系统后生态系统服务的变化;GOUHARI 等^[14]认为,木材生产、薪材供应和碳汇是山区林业的重要效益;刘广全等^[15]应用国民经济评价法、土地级差收入理论和劳动节约理论等方法对渭北黄土高原生态经济型防护林建设模式示范区的综合效益进行了计量与评价;王秋贤等^[16]应用通用土壤侵蚀方程和植被指数模型对渭北黄土高原不同类型植被在保护表土、保持有机质、保持土壤养分 3 部分的生态效益进行过定量评估;已有学者^[17-20]参照《森林生态系统服务功能评估规范》和《退耕还林工程生态效益监测评估技术与管理规范》,结合当地森林条件选取不同指标,分别在北京、甘肃、延安、湖南等地区进行了生态系统服务功能价值或生态效益评估。

渭北黄土高原森林生态效益过去的研究主要集中在生态经济型防护林等某一类林分,并未以林种(防护林、特殊用途林、用材林、薪炭林、经济林)或类型(生态公益林、商品林)等为基础进行分类研究。同时,该地区存在着较大面积未计入有林地的灌木林、疏林、未成林以及农用地经济林,这部分林分在当地也发挥着重要的生态服务功能与效益。因此,本文基于渭北黄土高原人工林的特点,将其分为生态林、生态经济林和经济林 3 类,在构建不同类型人工林有效面积模型的基础上,比较不同类型、不同区域人工林的

生态效益,为科学评估该地区人工林的生态服务功能与效益、优化林分结构、完善人工林生态补偿政策提供科学依据。

1 研究区概况

渭北黄土高原地处关中平原向黄土高原过渡的地带,是以黄土塬为主的塬地沟壑地貌。该地区属半湿润气候区,温暖带落叶阔叶林带。年平均气温 9~13 ℃,年平均降水量 520~710 mm。区域森林植被以人工栽植为主,其中生态林 690 567.01 hm²,生态经济林 190 506.33 hm²,经济林 493 480.86 hm²。生态林以防护林为主,主要树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)等;生态经济林以用材林和经济灌木林为主,主要树种有油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)等;经济林主要有苹果(*Malus pumila* Mill.)、梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd.)、核桃(*Juglans regia* L.)等。草本植物主要有白茅(*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.)、白草(*Penisetum flaccidum* Griseb.)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)等。

渭北黄土高原东西跨度大,自然条件、植被状况具有明显差异。为了更为准确分析不同类型、不同区域人工林的生态效益,依据地理位置与气候特点将该地区分为东部、中部、西部 3 个区域。其中,东部包括白水、蒲城、富平、澄城、大荔、合阳、韩城市;中部包括长武、彬州、永寿、乾县、旬邑、淳化、宜君、印台、王益、耀州;西部包括陇县、千阳、麟游、岐山、扶风^[21-25]。为了增强外业调查的代表性,分别在东部的蒲城、中部的淳化和西部的陇县选设标准地,开展典型样地调查。

2 研究方法

2.1 渭北黄土高原人工林类型的划分

自 20 世纪 60 年代起,渭北黄土高原相继营造了大面积的人工林。按林种划分有防护林、薪炭林、经济林、用材林、特种用途林;按森林的主导功能划分有生态公益林和商品林。此外还有大面积未计入有林地的灌木林、疏林、未成林及农用地经济林(占比为经济林有效面积的 87.96%)。特别是在“三北”防护林体系建设中,该地区曾大力开展了“生态经济型”防护林体系建设,营造了大量既能保持水土、改善生态环境,又能产出一定林副产品、发挥经济效益的生态经济林。因此,为了客观、准确反映不同类型人工林的生态效益,本文将该地区人工林分为 3 个类型(表 1)进行分析评价。

表 1 渭北黄土高原人工林类型划分

Table 1 Division of plantation types in Weibei Loess Plateau

林地类型	人工林类型		
	生态林	生态经济林	经济林
有林地	防护林	✓	
	用材林		✓
	薪炭林	✓	
	经济林		✓
灌木林	特种用途林	✓	
	公益林类灌木林	✓	
	商品林类灌木林	✓	
疏林	公益林类疏林	✓	
	商品林类疏林	✓	
未成林	公益林类未成林	✓	
	商品林类未成林	✓	
果园	农用经济林		✓

2.2 基础数据来源

渭北黄土高原农用经济林的数据主要来自《2018 年陕西省统计年鉴》^[26]及各县市统计年鉴^[27-29];人工林的林种、树种、面积、蓄积量等数据主要来自《陕西省森林资源二类调查》^[30]与 2018 年《陕西省林地变更调查成果统计表》^[31];土壤 N、P、K、有机质含量,降雨量,二氧化硫、氮氧化物、氟化物等污染物治理费用等通过文献资料获得;土壤容重、含水量、林分生长、密度、郁闭度、盖度、枯落层厚度等指标通过对蒲城、淳化、陇县 3 个典型样地实地测定与调查取得。

2.3 评价指标选择

采用频度分析法筛选预选指标和专家打分法选取指标。

2.4 不同类型人工林有效面积计算模型构建

本文将森林分类与渭北黄土高原人工林现状相结合,引入生态功能系数与生态经济功能系数,通过专家打分构造判断矩阵,依照层次分析法确定权重的方法得出功能系数,构建不同类型人工林的有效面积计算模型。

2.4.1 生态林有效面积计算模型 生态功能系数是指尚未达到有林地标准的公益林类灌木林、疏林、未成林发挥生态作用的相对大小。层次分析法计算得出特征向量(2.10,0.58,0.32),最大特征根值 3.009,CI 为 0.005,随机一致性 RI 为 0.520,结果显示 CR 为 0.009<0.1,矩阵符合一致性检验要求。从而得出公益林类灌木林、疏林、未成林的生态功能系数分别是 0.70,0.19,0.11。因此,构建的生态林有效面积计

算模型为:

$$S_{ST} = S_F + S_T + S_{GG} \times 0.70 + S_{GS} \times 0.19 + S_{GW} \times 0.11 \tag{1}$$

式中: S_{ST} 为生态林有效面积(hm^2); S_F 为有林地中的防护林面积(hm^2); S_T 为有林地中的特种用途林面积(hm^2); S_{GG} 为公益林类灌木林面积(hm^2); S_{GS} 为公益林类疏林面积(hm^2); S_{GW} 为公益林类未成林面积(hm^2)。

2.4.2 生态经济林有效面积计算模型 生态经济功能系数指尚未达到有林地标准的商品林类灌木林、疏林、未成林发挥生态经济作用的相对大小。层次分析法计算得出特征向量(0.482,2.071,0.447),最大特征根值 3.01, CI 为 0.003,随机一致性 RI 为 0.520,结果显示 CR 为 $0.005 < 0.1$,矩阵符合一致性检验要求。从而得出商品林类灌木林、疏林、未成林的生态经济功能系数分别是 0.16,0.69,0.15。因此,构建的生态经济林有效面积计算模型为:

表 2 人工林生态效益各部分计量模型与参数取值

Table 2 Econometric models and parameter values of each part of plantation ecological benefit

效益类型	计算模型	参数取值
涵养水源	$G_{调} = 10 \cdot S(P - E - C); G_{净} = 10 \cdot S(P - E - C)$ $U_{调} = C_{库} \cdot G_{调}; U_{净} = K \cdot G_{调}$ $U_{涵养水源} = U_{调} + U_{净}$	依据陕西省气象资料降水量($P, \text{mm/a}$)取各区域平均值,东部为 612.53,中部为 590.12,西部为 539.62;林分蒸散量($E, \text{mm/a}$)取平均值 350 ^[16] ;地表径流量($C, \text{mm/a}$)取 57.7 ^[16] ;参考陕西省水库工程费用资料,单位面积水库库容的修缮费用($C_{库}, \text{元}/\text{m}^3$)取 62.62;净化水的费用($K, \text{元}/\text{t}$)取 0.75 ^[9,32]
固碳释氧	$G_{植被固碳} = 1.63 \cdot R_{碳} \cdot S \cdot B_{年}; G_{土壤固碳} = S \cdot F_{土壤}$ $G_{氧气} = 1.19S \cdot B_{年}; U_{碳} = C_{碳}(G_{植被固碳} + G_{土壤固碳})$ $U_{氧} = G_{氧气} \cdot C_{氧}; U_{固碳释氧} = U_{碳} + U_{氧}$	林分净生产力 $[B_{年}, \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 取 5.76 ^[9,33] ;单位面积林分固碳量 $[F_{土壤}, \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 取 2.56 ^[9] ;单位固碳量的价值($C_{碳}, \text{元}/\text{t}$)取 50;单位质量氧气价格($C_{氧}, \text{元}/\text{t}$)取 969.8 ^[9]
保育土壤	$G_{固土} = S \cdot (X_2 - X_1); G_N = S \cdot N(X_2 - X_1)$ $G_P = S \cdot P(X_2 - X_1); G_K = S \cdot K(X_2 - X_1)$ $U_{固土} = G_{固土} \cdot C_{\pm}/\rho$ $U_{肥} = G_{固土} \cdot (NC_1/R_1 + PC_1/R_2 + KC_2/R_3 + MC_3)$ $U_{保育土壤} = U_{固土} + U_{肥}$	依据陕西省县市年鉴与文献 ^[9,27] ,有林地与无林地的土壤侵蚀模数 $X_1, X_2 [\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$,东部取 20,34,中部取 2,34.6,西部取 5,20;土壤的氮磷钾含量 N, P, K ,东部为 6.70%,0.07%,2.14%,中部为 6.66%,0.078%,1.869%,西部为 6.00%,0.62%,0.62% ^[16,24-25,33] ;依据陕西省工程实施报价资料,单位土方开采费($C_{\pm}, \text{元}/\text{m}^3$)取 50;土壤容重($\rho, \text{t}/\text{m}^3$)依据实测东部、中部、西部分别取 1.35, 1.29,1.32;依据中国化肥网资料,磷酸二铵化肥含氮量、含磷量以及氯化钾化肥含钾量 R_1, R_2, R_3 取 18%,46%, 50%,磷酸二铵化肥、氯化钾化肥、有机质价格 C_1, C_2, C_3 (元/t)取 400,3 800,800;依据各县市年鉴、陕西省森林资源二类调查与文献资料 ^[23-25] ,土壤有机质含量(M),东部、中部、西部分别取 0.95%,0.90%,0.70%
净化大气	$G_{污染物} = Q_{污染物} \cdot S \cdot 10^{-3}; G_{滞尘} = Q_{滞尘} \cdot S \cdot 10^{-3}$ $U_{污染物} = S \cdot K_{污染物} \cdot Q_{污染物}; U_{滞尘} = S \cdot K_{滞尘} \cdot Q_{滞尘}$ $U_{净化大气} = U_{污染物} + U_{滞尘}$	林分年吸收各种污染物质量 $Q_{二氧化硫}, Q_{氟化物}, Q_{氮氧化物}, Q_{重金属} (\text{t/a})$,分别取 0.12,0.000 5,0.38,0.066 ^[16] ;林分年滞尘物质质量($Q_{滞尘}, \text{t/a}$)取 0.001 6 ^[16] ;依据调查陕西省排污费用,治理费用 $K_{二氧化硫}, K_{氟化物}, K_{氮氧化物}, K_{重金属}, K_{滞尘} (\text{元}/\text{kg})$,分别取 600.00,495.90,600.00, 568.93,1 308.00

3 结果与分析

3.1 渭北黄土高原生态林的生态效益

3.1.1 涵养水源效益 由图 1 可知,渭北黄土高原生态林有效面积为 690 567.01 hm²,其涵养水源效益计算表明,调节水量物质量为 11.85 亿 m³/a,净化水质物质量为 11.85 亿 m³/a,涵养水源总价值量为 751.15 亿元/a。其中,东部、中部、西部调节水量的物质量分别为 3.08 亿,5.95 亿,2.82 亿 m³/a;净化水质的物质量分别为 3.08 亿,5.95 亿,2.82 亿 m³/a;涵养水源价值量分别为 195.12 亿,377.12 亿,178.91 亿元/a。结果表明,生态林涵养水源价值量大小为中部>东部>西部。其中,中部生态林的涵养水源价值量占生态林涵养水源价值量的 50.21%,是东部的 1.93 倍,是西部的 2.11 倍。

3.1.2 固碳释氧效益 由图 1 可知,固碳释氧效益计算表明,生态林的植物固碳与土壤固碳物质量为 353.47 万 t/a,释氧物质量为 473.18 万 t/a;固碳释氧价值量为 47.65 亿元/a。其中,东部、中部、西部固碳物质量分别为 76.94 万,166.98 万,109.55 万 t/a;释氧物质量分别为 103.00 万,223.53 万,146.65 万 t/a;固碳释氧价值量分别为 10.37 亿,22.51 亿,14.77 亿元/a。结果表明,固碳释氧价值量大小为中部>西部>东部。中部生态林固碳释氧价值量是西部的

1.52 倍,东部的 2.17 倍。其中,植物固碳价值量与土壤固碳价值量大小都为中部>西部>东部,植物固碳与土壤固碳价值量相当。

3.1.3 保育土壤效益 由图 1 可知,保育土壤效益计算表明,生态林的固土物质量为 1 594.98 万 t/a,保肥物质量为 133.53 万 t/a,保育土壤价值量为 119.34 亿元/a。其中,东部、中部、西部固土物质量分别为 210.45 万,1 063.50 万,321.03 万 t/a;保肥物质量分别为 18.75 万,91.54 万,23.24 万 t/a;保育土壤价值量分别为 17.12 亿,82.56 亿,19.66 亿元/a。结果表明,保育土壤价值量中部>西部>东部。其中,中部生态林的保育土壤价值量占生态林保育土壤价值量的 69.18%,是西部的 4.20 倍,东部的 4.82 倍。

3.1.4 净化大气效益 由图 1 可知,净化大气效益计算表明,生态林吸收污染物物质量为 39.04 万 t/a,滞尘物质量为 0.10 万 t/a,净化大气价值量为 2.35 亿元/a。其中,东部、中部、西部吸收污染物物质量分别为 8.50 万,18.44 万,12.10 万 t/a;滞尘物质量分别为 0.02 万,0.05 万,0.03 万 t/a;净化大气价值量分别为 0.51 亿,1.11 亿,0.73 亿元/a。结果表明,净化大气价值量大小为中部>西部>东部。其中,吸收氮氧化物价值量>二氧化硫价值量>重金属价值量>滞尘价值量>氟化物价值量;吸收氮氧化物价值量是二氧化硫的 3.19 倍,是氟化物的 919.54 倍。

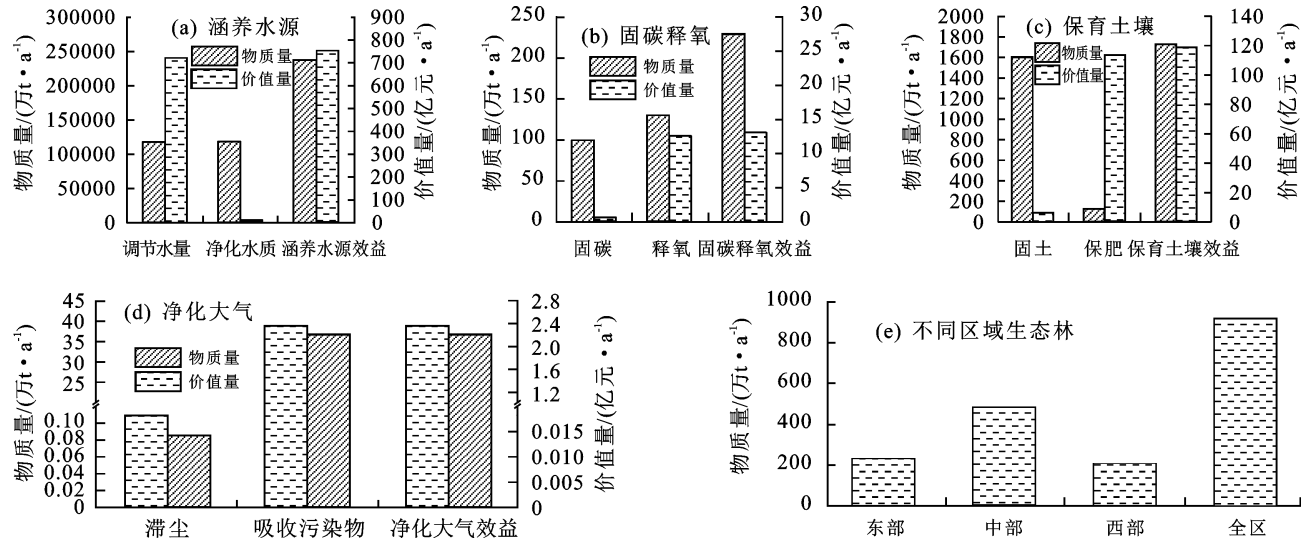


图 1 生态林的生态效益

Fig. 1 Ecological benefits of ecological forest

3.2 渭北黄土高原生态经济林的生态效益

3.2.1 涵养水源效益 由图 2 可知,生态经济林有效面积为 190 506.33 hm²,其中用材林面积为 172 406.66 hm²,薪炭林面积为 58.18 hm²。涵养水源效益计算表明,生态经济林的调节水量物质量为 2.98 亿 m³/a,净化水质物质量为 2.98 亿 m³/a,涵养水源价值量为 188.47 亿元/a。其中,东部、中部、西

部调节水量物质量分别为 0.18 亿,1.44 亿,1.36 亿 m³/a;净化水质物质量分别为 0.18 亿,1.44 亿,1.36 亿 m³/a;涵养水源价值量分别为 11.11 亿,91.08 亿,86.29 亿元/a。结果表明,涵养水源价值量大小为中部>西部>东部。其中,中部生态经济林的涵养水源价值量占生态经济林涵养水源价值量的 48.33%,是西部的 1.06 倍,东部的 8.20 倍。

3.2.2 固碳释氧效益 由图2可知,固碳释氧效益计算表明,生态经济林的植物固碳与土壤固碳物质质量为97.54万t/a,释氧物质质量为130.58万t/a,固碳释氧价值量为13.15亿元/a。其中,东部、中部、西部固碳物质质量分别为4.38万,40.33万,52.83万t/a;释氧物质质量分别为5.86万,53.99万,70.73万t/a;固碳释氧价值量分别为0.59亿,5.44亿,7.12亿元/a。结果表明,固碳释氧价值量大小为西部>中部>东部。生态经济林固碳释氧价值量中,西部是中部的1.31倍,东部的12.06倍。其中,植物固碳价值量与土壤固碳价值量大小都为西部>中部>东部。

3.2.3 保育土壤效益 由图2可知,保育土壤效益计算表明,生态经济林的固土物质质量为423.66万t/a,保肥物质质量为34.39万t/a,保育土壤价值量为30.39亿元/a。其中,东部、中部、西部固土物质质量分别为11.98万,256.85万,154.83万t/a;保肥物质质量

分别为1.07万,22.11万,11.21万t/a;保育土壤价值量分别为0.97亿,19.94亿,9.48亿元/a。结果表明,保育土壤价值量大小为中部>西部>东部。其中,中部生态经济林的保育土壤价值量占生态经济林保育土壤价值量的65.61%,是西部的2.10倍,东部的20.56倍。

3.2.4 净化大气效益 由图2可知,净化大气效益计算表明,生态经济林吸收污染物的物质质量为10.76万t/a,滞尘物质质量为0.029万t/a,净化大气价值量为0.646亿元/a。其中,东部、中部、西部吸收污染物物质质量分别为0.48万,4.45万,5.83万t/a;滞尘物质质量分别为0.001万,0.012万,0.016万t/a;净化大气价值量分别为0.029亿,0.267亿,0.350亿元/a。结果表明,净化大气价值量大小为西部>中部>东部。其中,吸收氮氧化物价值量>二氧化硫价值量>重金属价值量>滞尘价值量>氟化物价值量。

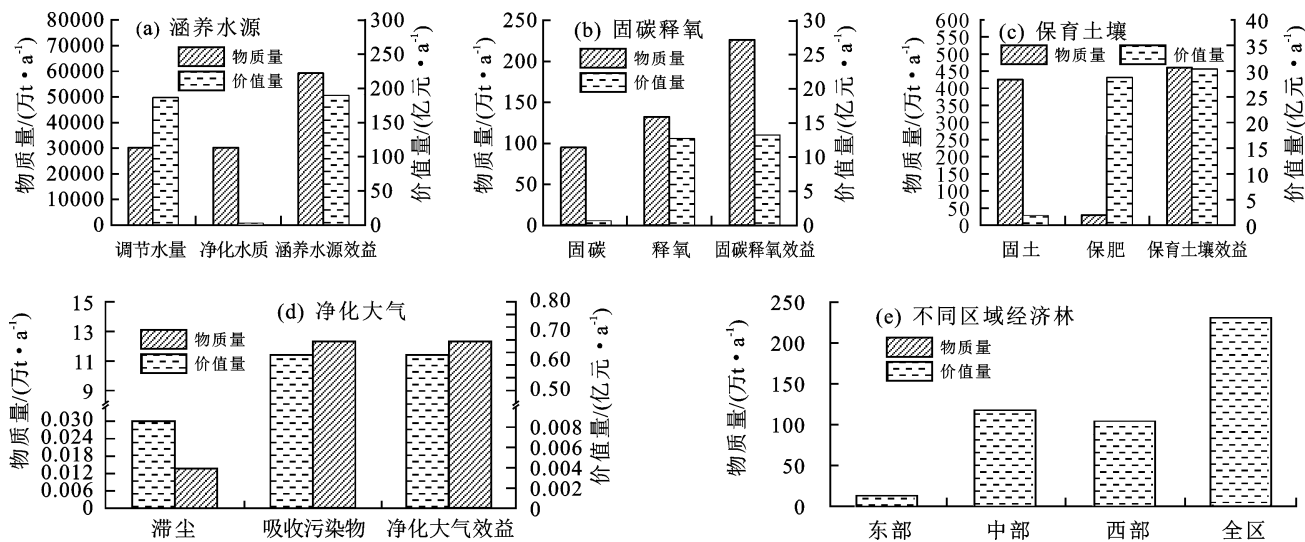


图2 生态经济林的生态效益

Fig. 2 Ecological benefits of ecological economic forest

3.3 渭北黄土高原经济林的生态效益

3.3.1 涵养水源效益 由图3可知,经济林有效面积为493 480.86 hm²,涵养水源效益计算表明,调节水量物质质量为9.13亿m³/a,净化水质物质质量为9.13亿m³/a,涵养水源价值量为578.26亿元/a。其中,东部、中部、西部调节水量物质质量分别为4.90亿,3.15亿,1.08亿m³/a;净化水质物质质量分别为4.90亿,3.15亿,1.08亿m³/a;涵养水源价值量分别为310.51亿,199.37亿,68.38亿元/a。

结果表明,涵养水源价值量大小为东部>中部>西部。其中,东部经济林的涵养水源价值量占经济林涵养水源价值量的53.70%,是中部的1.56倍,西部的4.54倍。

3.3.2 固碳释氧效益 由图3可知,固碳释氧效益

计算表明,经济林的植物固碳与土壤固碳物质质量为252.59万t/a,释氧物质质量为338.14万t/a,固碳释氧价值量为34.06亿元/a。其中,东部、中部、西部固碳物质质量分别为122.44万,88.28万,41.87万t/a;释氧物质质量分别为163.91万,118.17万,56.06万t/a;固碳释氧价值量分别为16.51亿,11.90亿,5.65亿元/a。

结果表明,固碳释氧价值量大小为东部>中部>西部。东部经济林固碳释氧价值量是中部的1.39倍,西部的2.92倍。其中,植物固碳价值量与土壤固碳价值量大小都为东部>中部>西部。

3.3.3 保育土壤效益 保育土壤效益计算表明,经济林的固土物质质量为1 019.84万t/a,保肥物质质量为87.11万t/a,保育土壤价值量为78.41亿元/a

(图 3c)。东部、中部、西部固土物质量为 334.90 万,562.24 万,122.70 万 t/a;保肥物质量为29.84 万,48.39 万,8.88 万 t/a;保育土壤价值量分别为 27.25 亿,43.65 亿,7.51 亿元/a。

结果表明,保育土壤价值量大小为中部>东部>西部(图 3e)。其中,中部经济林的保育土壤价值量占经济林保育土壤价值量的 55.67%,是东部的 1.60 倍,西部的 5.81 倍。

3.3.4 净化大气效益 由图 3 可知,净化大气效益

计算表明,经济林吸收污染物的物质量为 27.89 万 t/a,滞尘物质量为 0.077 万 t/a;净化大气价值量为1.67 亿元/a。其中,东部、中部、西部吸收污染物物质量分别为 13.52 万,9.75 万,4.62 万 t/a;滞尘物质量分别为 0.037 万,0.027 万,0.013 万 t/a;净化大气价值量分别为 0.81 亿,0.58 亿,0.28 亿元/a。

结果表明,净化大气价值量大小为东部>中部>西部。其中,吸收氮氧化物价值量>二氧化硫价值量>重金属价值量>滞尘价值量>氟化物价值量。

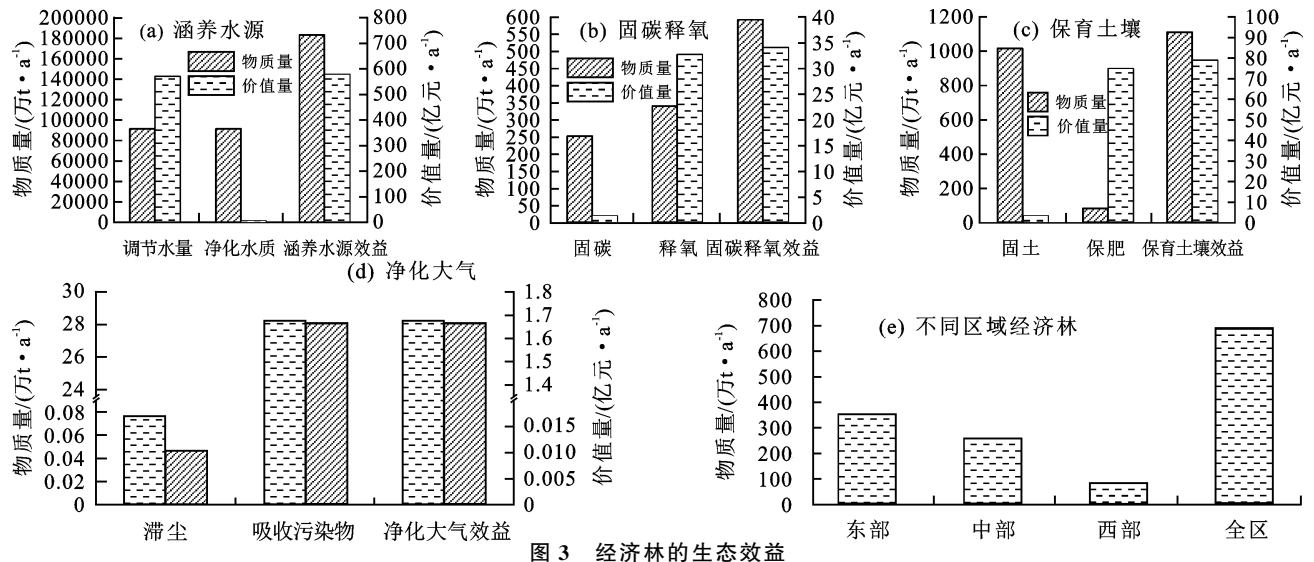


Fig. 3 Ecological benefits of economic forest

3.4 渭北黄土高原人工林单位面积生态效益

由表 3 可知,单位面积生态效益计算表明,渭北黄土高原人工林单位面积生态效益为 11.67 万元/hm²。其中,经济林最大,为 14.03 万元/hm²;生态林次之,为 11.32 万元/hm²;生态经济林最小,为 8.46 万元/hm²。经济林单位面积生态效益是生态林的 1.24 倍,是生态经济林的 1.66 倍。渭北黄土高原人工林中,中部单位面积生态效益最大,东部次之,西部最小;生态林中,中部单位面积生态效益最大,东部次之,西部最小;生态经济林中,中部单位面积生态效益最大,西部次之,东部最小;经济林中,东部单位面积生态效益最大,中部次之,西部最小。

表 3 人工林单位面积生态效益

Table 3 Ecological benefit per unit area of plantation				
分布地区	生态林	生态经济林	经济林	人工林
东部	11.69	2.73	14.84	12.40
中部	13.04	12.74	14.81	13.48
西部	8.51	7.55	10.00	8.49
全区	11.32	8.46	14.03	11.67

3.5 渭北黄土高原人工林生态效益综合分析

3.5.1 不同类型人工林生态效益分析 依据人工林

生态效益分析,渭北黄土高原人工林生态效益为 1 845.55 亿元/a。其中,生态林生态效益价值量最大,为 920.49 亿元/a,占人工林生态效益的 49.88%;经济林次之,为 692.40 亿元/a,占 37.52%;生态经济林最小,为 232.66 亿元/a,占 12.60%(图 4)。生态林生态效益价值量是经济林生态效益价值量的 1.33 倍,是生态经济林生态效益价值量的 3.96 倍,说明生态林在渭北黄土高原人工林生态服务功能中发挥着极其重要的作用。从不同类型人工林单位面积生态效益来看,经济林单位面积生态效益最大。因此,适当增加经济林在人工林中的比重,有利于提升人工林的生态效益。

3.5.2 不同区域人工林生态效益分析 在人工林生态效益中,中部最大,为 855.53 亿元/a,占人工林生态效益的 46.36%;东部次之,为 590.90 亿元/a,占 32.02%;西部最小,为 399.12 亿元/a,占 21.62%(图 5)。从不同区域人工林单位面积生态效益来看,中部人工林单位面积生态效益最大,为 13.48 万元/hm²;东部次之,为 12.40 万元/hm²;西部最小,为 8.49 万元/hm²。因此,提升西部区域人工林单位面积生态效益,是增强西部乃至渭北黄土高原人工林生态效益的关键。

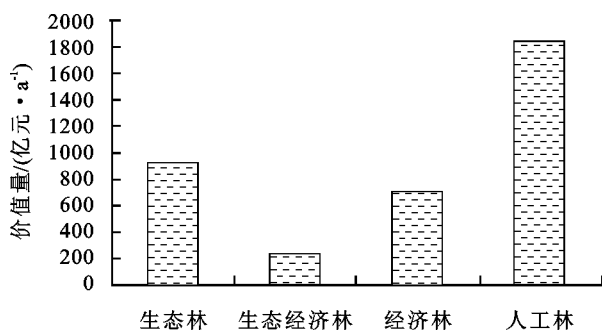


图 4 不同类型人工林的生态效益

Fig. 4 Ecological benefits of different types of plantation

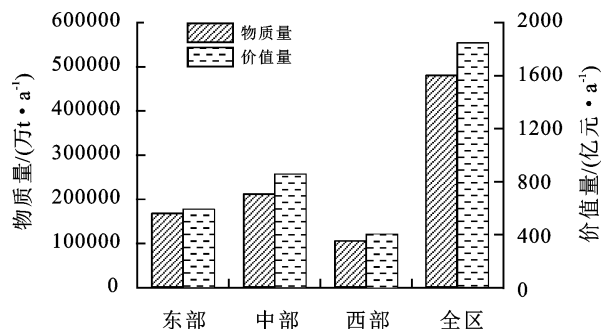


图 5 不同区域人工林生态效益

Fig. 5 Ecological benefits of plantations in different regions

4 讨论

4.1 不同类型人工林生态效益

在涵养水源、固碳释氧、保育土壤、净化大气 4 个生态服务功能中，渭北黄土高原人工林以涵养水源效益占比最大，这与刘胜涛等^[33]在陕西省退耕还林生态效益研究、刘增力等^[34]在北京自然森林保护区生态效益研究及赖亚飞等^[35]在黄土高原丘陵沟壑区进行退耕还林生态效益研究中的结果一致；保育土壤与固碳释氧效益占比次之，净化大气效益占比最低，这与刘胜涛等^[33]在陕西省退耕还林生态效益研究得出净化大气效益大于保育土壤效益与固碳释氧效益的结果有所不同，这除了与两者净化大气效益的内涵有所不同外，也与人工林所处的生长发育阶段、林下植被与枯落物累积状况有关。因为退耕还林相对时间较短，大多数林分尚处于幼龄或中龄林阶段，保育土壤与固碳释氧效益尚未充分发挥，因此净化大气效益相对较高。

依据人工林生态效益分析，渭北黄土高原不同类型人工林中以生态林生态效益最大，占人工林生态效益的 49.88%，这不仅与生态林在人工林中有效面积占比高(50.24%)有关，也与渭北黄土高原生态林的林分特征密切相关。与经济林和生态经济林相比，生态林林分密度大、郁闭度高、枯枝落叶层厚，为充分发挥人工林生态效益奠定了基础。其中涵养水源效益、保育土壤效益与固碳释氧效益占生态林生态效益的 99.75%，是生态效益的主要组成部分。生态林单位

面积生态效益小于经济林，大于生态经济林，其原因据分析与生态林主要分布于沟坡，坡度大、立地条件相对较差，管理较为粗放，且疏林和未成林所占比例较大有关，这与康永祥等^[9]生态服务功能研究中对于单位面积生态效益的研究结果一致。因此，对于生态林可以通过加强疏林改造、未成林抚育，增加防护林与特殊用途林面积；提升抚育管理水平与投入，在生态林面积不变的基础上进一步提高生态林有效面积占比，从而提升生态林的生态效益。

生态经济林的生态效益最小，只占 12.60%，除了与生态经济林在人工林有效面积中占最小(13.86%)有关外，也与渭北黄土高原生态经济林的林分组成与结构单一有关，这与吴旭等^[36]在黄土丘陵区沙棘、油松和刺槐光合生理特性及其环境适应性研究中，对于沙棘林的分析结果相一致。其中涵养水源效益、保育土壤效益与固碳释氧效益占生态经济林生态效益的 99.73%，是生态经济林生态效益的主要组成部分。渭北黄土高原生态经济林基本上为纯林，结构单一。其中以商品林类未成林占比最高，其次是用材林、灌木林，商品林类疏林也占有一定比例，加之管理水平低下，土壤 N、P、K、有机质含量较低、土壤容重较大，净生产力低下是生态效益最小的主要原因。可以通过对现有未成林的抚育，增加生态经济林在人工林有效面积中的比占；通过林分改造，使纯林转化为混交林，提高地表覆盖度；加强林分管理，提升林下土壤 N、P、K、有机质含量以弥补产品采收所带来的林地养分失衡，进而提高生态经济林的生态效益。

渭北黄土高原经济林的生态效益小于生态林，大于生态经济林，占 37.52%。其中涵养水源效益、保育土壤效益与固碳释氧效益占经济林生态效益的 99.76%，是经济林生态效益的主要组成部分，与王丹丹^[37]对陕北黄土区经济林生态效益研究结果相似。由于经济林生长的立地条件好，地势平缓，地表径流量小，水土流失强度低，涵养水源效益较高；同时经济林人工抚育管理投入大，土壤 N、P、K、有机质含量较高，土壤容重较小，保育土壤效益也较高。但经济林林分密度小，郁闭度相对较低，可以通过增加地面有机覆盖进一步减少地表径流、增强涵养水源和保持水土能力，进一步提高其生态效益。

4.2 不同区域人工林生态效益

从渭北黄土高原东部、中部和西部 3 个区域来看，中部人工林的生态效益最大，占全区人工林生态效益的 46.36%。其中涵养水源效益、保育土壤效益与固碳释氧效益占中部人工林生态效益的 99.77%。尽管中部年平均降雨量小于东部，但其人工林有效面

积远大于东部与西部,特别是中部的生态林占比高,分别是东部和西部的2.17,1.52倍,且中部生态林中防护林、特殊用途林和公益类灌木林的成林面积均最大,远大于东部和西部,为中部人工林生态效益的发挥奠定了基础。除此之外,也与生态林林分郁闭度大、林分结构合理、枯枝落叶层相对较厚,涵养水源效益和保育土壤效益较高有关^[38]。

东部人工林的生态效益占全区人工林生态效益的32.02%,大于西部,小于中部。其中涵养水源效益、保育土壤效益与固碳释氧效益占东部人工林生态效益的99.78%。尽管东部人工林有效面积最小,但经济林有效面积占比大,分别是中部和西部的1.39,2.92倍。由于经济林单位面积生态效益远大于生态林和生态经济林,致使东部人工林的生态效益大于西部。同时东部区域年平均降雨量最大,且地表径流系数较小,人工林涵养水源效益也高于西部。然而,东部地区公益林类未成林面积最大,分别是中部和西部的1.10,1.31倍,故可以通过未成林抚育,加大公益林类未成林的管护使其尽快成林^[39],增加生态林有效面积,进一步提升东部人工林的生态效益。

渭北黄土高原西部人工林生态效益最小,占人工林生态效益的21.62%。其中涵养水源效益、保育土壤效益与固碳释氧效益占西部人工林生态效益的99.66%。西部人工林生态效益最小,不仅与西部人工林有效面积最小,特别是单位面积生态效益最大的经济林有效面积最小有关外,也与该区降雨量小、径流系数相对最大,导致涵养水源效益低,土壤侵蚀模数较大,保育土壤效益小有关。同时,尽管西部人工林有效面积不是最小,但单位面积生态效益最低的生态经济林有效面积占比最大,分别是东部和中部的12.06,1.31倍,这也是造成西部人工林生态效益最小的重要原因。通过对人工林结构的分析发现,西部地区公益林类疏林面积、商品林类疏林面积及商品林类未成林面积均最大,经济林面积最小。可以通过疏林改造、未成林抚育等人为管理措施,增加生态林和生态经济林成林面积;通过科学经营模式,适度加快经济林发展,提升经济林生态效益^[40],从而有效提升西部人工林生态效益。

5 结论

(1)依据渭北黄土高原地区人工林的特点,分别构建了生态林、生态经济林、经济林有效面积计算模型,使得该地区人工林生态效益核算结果更符合区域实际。

(2)人工林生态效益大小为生态林>经济林>生态经济林。生态林生态效益价值量最高,在渭北黄土

高原人工林生态服务功能中发挥着主要作用。生态效益中涵养水源价值量最高,保育土壤与固碳释氧效益次之,净化大气的价值量最低。涵养水源与保育土壤效益在生态效益中发挥着关键作用。

(3)人工林单位面积生态效益大小为经济林>生态林>生态经济林,经济林在提高生态效益中发挥着重要作用,可以通过提高经济林面积在人工林有效面积中的比重,来提高当地人工林生态效益。

(4)不同区域人工林生态效益大小为中部>东部>西部。西部人工林生态效益最小,可以通过疏林改造、未成林抚育和灌木林封育等措施,提高生态林有效面积所占比重;同时适度发展经济林,方可有效提升西部乃至整个渭北黄土高原人工林生态效益。

参考文献:

- [1] 纪平,邵全琴,王敏,等.中国三北防护林工程第二阶段生态效益综合评价[J].林业科学,2022,58(11):31-48.
JI P, SHAO Q Q, WANG M, et al. Monitoring and assessment of ecological benefits of the shelter forest program in the three-north region during 2001—2020[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(11): 31-48.
- [2] 张顺祥.渭北黄土高原刺槐人工林健康评价经营计算机辅助系统的构建[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
ZHANG S X. Construction of computer-aided system for health evaluation and management of *Robinia acacia* plantation in Weibei Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [3] 施昆山.当代世界林业[M].北京:中国林业出版社,2001.
SHI K S. Contemporary world forestry [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001.
- [4] 韦惠兰,张可荣.自然保护区综合效益评估理论与方法:甘肃白水江国家级自然保护区案例研究[M].北京:科学出版社,2006.
WEI H L, ZHANG K R. Theory and method of comprehensive benefit assessment of nature reserves: A case study of Baishuijiang National Nature Reserve in Gansu Province [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [5] 邵全琴,刘树超,宁佳,等.2000—2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估[J].地理学报,2022,77(9):2133-2153.
SHAO Q Q, LIU S C, NING J, et al. Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000—2019 using remote sensing[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(9): 2133-2153.
- [6] BATEMAN I J. Household willingness to pay and farmers' willingness to accept compensation for establishing a recreational woodland[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 1996, 39(1): 21-44.
- [7] DURIANCIK L F, BUCKS D, DOBROWOLSKI J P, et al. The first five years of the Conservation Effects As-

- essment Project[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 63(6): 185-197.
- [8] 侯元兆, 王琦. 中国森林资源核算研究[J]. 世界林业研究, 1995, 8(3): 51-56.
HOU Y Z, WANG Q. Study on forest resources accounting in China[J]. World Forestry Research, 1995, 8(3): 51-56.
- [9] 康永祥, 刘建军, 康博文, 等. 陕西省森林生态系统服务功能及其评估[M]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2010.
KANG Y X, LIU J J, KANG B W, et al. Forest ecosystem service function and its assessment in Shaanxi Province[M]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University Press, 2010.
- [10] 李艳春. 铁西自然保护区森林生态效益价值评估的研究[J]. 林业勘查设计, 2020, 49(2): 79-81.
LI Y C. Study on evaluation of forest ecological benefit value in Tiexi nature reserve[J]. Forest Investigation Design, 2020, 49(2): 79-81.
- [11] 柴济坤. 南木林区森林资源生态效益价值评估的研究[D]. 兰州: 兰州财经大学 2016.
CHAI J K. Research on the evaluation of ecological benefit value of forest resources in Nanmu Forest Area [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Finance and Economics, 2016.
- [12] ROGER A S. Economics of forestry[J]. Journal of Forest Economics, 2003, 9(3): 241-243.
- [13] XU Z H, WEI H J, DONG X B, et al. Evaluating the ecological benefits of plantations in arid areas from the perspective of ecosystem service supply and demand-based on emergy analysis[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 705: e135853.
- [14] GOUHARI S, FORREST A, ROBERTS M. Cost-effectiveness analysis of forest ecosystem services in mountain areas in Afghanistan[J]. Land Use Policy, 2021, 108: e105670.
- [15] 刘广全, 唐德瑞, 罗伟祥. 黄土高原渭北生态经济型防护林体系综合效益计量与经济评价[J]. 西北林学院学报, 1997, 12(2): 25-30.
LIU G Q, TANG D R, LUO W X. Evaluation on comprehensive benefits eco-economical protection forest system on Weibei Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 1997, 12(2): 25-30.
- [16] 王秋贤, 孙根年, 任志远. 渭北高原植被保土保肥生态效益的计量研究[J]. 资源科学, 2002, 24(5): 58-63.
WANG Q X, SUN G N, REN Z Y. Calculation on vegetation's soil and fertilization conservation benefits in Weibei Plateau[J]. Resources Science, 2002, 24(5): 58-63.
- [17] 鲁绍伟, 李少宁, 刘逸菲, 等. 北京市退耕还林生态效益评估[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6170-6181.
LU S W, LI S N, LIU Y F, et al. Ecological benefit evaluation of the Grain for Green Project in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6170-6181.
- [18] 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 Y, WEN Y H, DOU J J, 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.
- [19] 杨致远, 刘琪璟, 秦立厚, 等. 延安市退耕还林工程生态效益评价[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 259-266.
YANG Z Y, LIU Q J, QIN L H, et al. Ecological benefit assessment of the Grain for Green Project in Yan'an[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 259-266.
- [20] 罗佳, 黎蕾, 姜芸, 等. 湖南省森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态科学, 2022, 41(4): 70-77.
LUO J, LI L, JIANG Y, et al. Evaluation of service function of forest ecosystem in Hunan Province[J]. Ecological Science, 2022, 41(4): 70-77.
- [21] 朱芬萌. 陕西黄土高原生态环境重建技术对策研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
ZHU F M. Study on technical countermeasures of ecological environment reconstruction on Loess Plateau in Shaanxi[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2001.
- [22] 苟斌. 渭北黄土高原抗旱造林技术研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
GOU B. Research on drought-resistant afforestation technology in Weibei Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008.
- [23] 宋西德. 渭北黄土高原 2 种景观及其界面的生态特征研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
SONG X D. Ecological characteristics of two landscapes and their interfaces in Weibei Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008.
- [24] 易亮, 李凯荣, 张冠华, 等. 渭北黄土高原经济林地土壤养分特征研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 186-190.
YI L, LI K R, ZHANG G H, et al. Research on soil nutrients characteristics of economic forest in Weibei Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(2): 186-190.
- [25] 于泽群, 刘金良, 杨婷婷, 等. 渭北黄土高原侧柏人工林种子雨和种子库研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 85-92.
YU Z Q, LIU J L, YANG T T, et al. Seed rain and soil seed bank of *Platycladus orientalis* plantation in Weibei Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, 42(6): 85-92.
- [26] 陕西省统计局. 2018 年陕西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
Shaanxi Provincial Bureau of Statistics. 2018 Shaanxi statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.

- [27] 咸阳市统计局.2018年咸阳统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018.
Xianyang Statistical Bureau.2018 Xianyang statistical yearbook [M]. Beijing:China Statistics Press,2018.
- [28] 铜川市统计局.2018年铜川统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018.
Tongchuan Municipal Bureau of Statistics.2018 Tongchuan statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press,2018.
- [29] 宝鸡市统计局.2018年宝鸡统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018.
Baoji Bureau of Statistics.2018 Baoji statistical yearbook [M]. Beijing:China Statistics Press,2018.
- [30] 陕西省林业局.陕西省森林资源二类调查[Z].陕西省林业局,2010.
Forestry Bureau of Shaanxi Province. Second class survey of forest resources in Shaanxi Province[Z]. Shaanxi Forestry Bureau,2010.
- [31] 陕西省林业局.陕西省林地变更调查成果统计表[Z].陕西省林业局,2018.
Shaanxi Forestry Bureau. Statistical table of survey results of forest land change in Shaanxi Province[Z]. Shaanxi Forestry Bureau,2018.
XU Y X. Evaluation on ecological benefits of returning farmland to forest in Baoji City[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2017,37(6):248-255.
- [33] 刘胜涛,牛香,王兵,等.陕西省退耕还林工程生态效益评估[J].生态学报,2018,38(16):5759-5770.
LIU S T, NIU X, WANG B, et al. An ecological benefit assessment of the Grain for Green Project in Shaanxi Province[J].Acta Ecologica Sinica,2018,38(16):5759-5770.
- [34] 刘增力,胡理乐,闫伯前,等.北京市自然保护地生态效益及其影响因素[J].生态学报,2022,42(24):10060-10071.
LIU Z L, HU L L, YAN B Q, et al. Ecological benefit evaluation and influencing factors analysis of the Protected Areas in Beijing[J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(24):10060-10071.
- [35] 赖亚飞,朱清科.黄土高原丘陵沟壑区退耕还林(草)工程实施综合效益评价:以陕西省吴起县为例[J].西北林学院学报,2009,24(3):219-223.
LAI Y F, ZHU Q K. Assessment on the comprehensive benefits of converting farmland to forest project in loess hilly regions: A case study of Wuqi County, Shaanxi Province[J].Journal of Northwest Forestry University,2009,24(3):219-223.
- [36] 吴旭,唐亚坤,陈晨,等.黄土丘陵区沙棘、油松和刺槐光合生理特性及其环境适应性[J].生态学报,2019,39(21):8111-8125.
is, and Robinia pseudoacacia in the Loess hilly region of China [J].Acta Ecologica Sinica,2019,39(21):8111-8125.
- [37] 王丹丹.陕北黄土区退耕经济林综合效益评价[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
WANG D D. Evaluation on comprehensive benefit of returning farmland to economic forest in loess area of northern Shaanxi [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2010.
- [38] 杨晓毅,李凯荣,李苗,等.陕西省淳化县人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究[J].水土保持通报,2011,31(3):194-201.
YANG X Y, LI K R, LI M, et al. Forest structure and diversity of Robinia pseudoacacia L. plantations in Chunhua County of Shaanxi Province[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2011,31(3):194-201.
- [39] 周美超.清水河县公益林生态效益评价[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
ZHOU M C. Ecological benefit evaluation of public welfare forest in Qingshuihe County [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2018.
- [40] 刘跃钧,蒋燕锋,葛永金,等.锥栗-多花黄精不同复合经营模式经济生态效益评价[J].经济林研究,2020,38(4):72-81.
LIU Y J, JIANG Y F, GE Y J, et al. Economic and ecological benefits evaluation of different compound management modes of Castanea henryi and Polygonatum cyrtonema[J].Non-wood Forest Research,2020,38(4):72-81.