

# 陕西省黄土丘陵沟壑区典型农林复合生产模式 能值评价及可持续性分析

梁悦琪<sup>1</sup>, 李硕<sup>2</sup>, 刘俊<sup>2</sup>, 路梦妍<sup>1</sup>, 韩新辉<sup>1</sup>

[1.西北农林科技大学 农学院(农业科学院),

陕西 杨凌 712199; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712199]

**摘要:** [目的] 揭示黄土丘陵沟壑区农林复合系统的资源利用效率与可持续性特征, 促进农林复合生产模式的优选与推广。[方法] 采用能值分析的理论与方法, 以陕西省延安市黄龙县核桃-紫苏、核桃-玉米、花椒-土豆、花椒-红豆 4 种典型农林复合模式为对象, 系统分析其能值投入产出结构、环境承载效应及可持续发展潜力。[结果] ① 4 种模式均高度依赖不可更新辅助能(占比 > 60%), 其中化肥与机械动力为主要投入, 当前生产模式仍依赖石化能源支撑; 可更新环境资源的投入占比 24% 以上, 且以雨水势能和雨水化学能为主。表明当地水资源相对匮乏, 作物种植高度依赖自然降水。② 4 种生产模式中, 本地环境资源的贡献程度有限(能值自给率 ESR 为 0.26~0.31); 环境压力显著(环境承载率 ELR 为 1.78~2.35), 且净能值产出率(EYR)为 1.45~5.90, 整体偏低, 显示该地区复合系统生产效率与生态友好性亟待提升。③ 花椒-红豆模式表现突出, 其能值产出率(EYR)为 5.90, 能值可持续发展指数(ESI, 2.55)与能值/环境可持续指标(E/ESI, 0.67)显著高于其他模式与陕西省均值。该优势源于红豆作为豆科植物的多重生态功能——高太阳能值转化率、固氮效应与资源协同优势。核桃-玉米模式因高秆作物竞争导致能值利用效率最差。[结论] 在黄土丘陵区及其他类似生态脆弱区, 应优化农林复合种植辅助能结构、推广豆科植物间作模式。

**关键词:** 能值分析; 农林复合; 可持续性评价; 陕西省黄龙县; 黄土丘陵区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0316-10

中图分类号: S181

**文献参数:** 梁悦琪, 李硕, 刘俊, 等. 陕西省黄土丘陵沟壑区典型农林复合生产模式能值评价及可持续性分析[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 316-325. Liang Yueqi, Li Shuo, Liu Jun, et al. Emery evaluation and sustainability analysis of typical agroforestry production models in loess hilly and gully region of Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 316-325. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.034; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.034.

## Emery evaluation and sustainability analysis of typical agroforestry production models in loess hilly and gully region of Shaanxi Province

Liang Yueqi<sup>1</sup>, Li Shuo<sup>2</sup>, Liu Jun<sup>2</sup>, Lu Mengyan<sup>1</sup>, Han Xinhui<sup>1</sup>

[1. College of Agronomy (Agricultural Research Institute), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712199, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712199, China]

**Abstract:** [Objective] The resource utilization efficiency and sustainability characteristics of agroforestry systems in hilly and gully loess areas were analyzed to optimize and promote agroforestry production models. [Methods] The theory and method of emery analysis were used to systematically analyze the emery input-output structure, environmental carrying effect, and sustainable development potential of four typical complex agroforestry models in Huanglong County, Yan'an City, Shaanxi Province, namely: walnut-purple perilla, walnut-maize, chinese pepper-potato, and Chinese pepper-red bean. [Results] ① All four modes were highly dependent on nonrenewable auxiliary energy (accounting for > 60%), with fertilizers and mechanical power as the main inputs.

收稿日期: 2024-11-06

修回日期: 2025-05-25

采用日期: 2025-05-26

资助项目: 陕西省自然科学基金项目“毛乌素沙地固沙林枯落物化学质量衰变对土壤有机碳库形成的调控机理”(2023-JC-ZD-10); 陕西秦岭北麓主体山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目(K4050523035)

第一作者: 梁悦琪(2001—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为农林复合系统及其综合效益。Email: liangyq@nwfau.edu.cn。

通信作者: 韩新辉(1980—), 女(锡伯族), 新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州人, 博士, 教授, 主要从事农林复合系统功能等方面的研究。Email: hanxinhui@nwsuaf.edu.cn。

The current production mode still relies on petrochemical energy support; The investment in renewable environmental resources accounts for over 24%, with rainwater potential energy and rainwater chemical energy being the main sources. This indicates that local water resources are relatively scarce and that planting relies heavily on natural rainfall. ② Among the four production modes, the contribution of local environmental resources was limited (emergy self-sufficiency ratio, ESR, 0.26~0.31); The significant environmental pressure (environmental loading ratio, ELR, 1.78~2.35) and overall low net emergy yield ratio (EYR, 1.45~5.90) indicated that the production efficiency and ecological friendliness of the composite system in this region urgently need to be improved. ③ However, the Chinese pepper-red bean model showed outstanding performance, with EYR (5.90), emergy sustainability index (ESI, 2.55), and emergy per unit sustainability index (E/ESI, 0.67) were significantly higher than those of the other models and the average for Shaanxi Province. The analysis found that this advantage stems from the multiple ecological functions of red beans as leguminous plants with high solar energy conversion rate, nitrogen fixation efficiency, and resource synergy advantages. In contrast, the walnut-maize model displayed the worst energy utilization efficiency, owing to competition from tall crops. [Conclusion] In the loess hilly region and other similarly ecologically fragile areas, the auxiliary energy structure of agroforestry intercropping should be optimized, and the model of intercropping leguminous plants should be promoted.

**Keywords: emergy analysis; agroforestry; sustainability evaluation; Huanglong County of Shaanxi Province; loess hilly region**

农林复合生产模式通过将农业和林业有机结合,从而提高土地利用效率,促进生态平衡,增加经济收益,实现可持续发展,在保障粮食安全,提高生态经济效益等方面具有积极效应<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着一系列因地制宜政策的实施,农林复合模式在各地区呈现出多样化和差异化的发展特征<sup>[4]</sup>。然而,现有研究大多集中于单一指标的分析探讨,如:土壤理化性质、固碳效应的评估等,而对于农林复合系统整体生产功能与综合效益的研究缺乏全面系统的认知<sup>[5-8]</sup>。这种研究视角的局限性制约了农林复合发展模式的探索及适宜地区的科学甄选与广泛推广。因此,迫切需要对农林复合生产关键环节与整体系统进行全面、系统的评估。研究可明确农林复合系统的生态效益和经济社会效益,从而为推动区域农业资源环境的可持续利用及农业的高质量发展提供科学评判依据。

能值分析法最早于1977年由美国生态学家Odum提出,他将生态经济系统中流动和储存的不同能量及物质归结为统一标准的能值——太阳能,奠定了全球各个时空尺度和类型的生态系统评价的基础,成为衡量自然与人类社会系统之间相互作用的可行途径<sup>[9-11]</sup>。近年来,能值分析方法在农业领域得到广泛应用,如丁豪等<sup>[12]</sup>采用能值分析法,分析了郟城县1978—2019年种植业生产系统可持续发展指数的变化趋势,探究了郟城县种植业生产系统的可持续发展水平;邹志刚等<sup>[13]</sup>运用能值分析的方法,对云南省蒙自市4种典型种植模式进行对比分析,为当地经济建设提供新的建议;Zou Zhigang等<sup>[14]</sup>对中国西南地区喀斯特地区的7种典型农林复合种植模式的

能值和经济效益进行了研究,发现在苹果模式和梨模式间作作物会产生更高的经济效益。可见,能值分析法不仅能够为农业生态系统的评价和可持续发展提供科学依据,还能够为农业产业结构的调整和优化提供有力支撑。

陕北黄土高原是北方半干旱生态脆弱区的重要组成部分,也是黄土高原的核心区域以及黄河流域的重要生态屏障区,具有显著的生态脆弱性<sup>[15]</sup>。为兼顾“生态优先,绿色发展”理念,该区域亟需促进农业生态产品价值转化,实现农业增效增收,推动乡村振兴和共同富裕。然而,黄土高原经济发展和生态资源占比存在明显的地域分异特征,生态产品人均供给水平不高,农业资源生态化、产业化转化率较低的问题制约着该区域生态资源的价值化<sup>[16]</sup>。因此,针对流域生态系统的能值分析,诸多学者在不同时间与空间尺度上开展了多层次的研究与讨论。栗兴等<sup>[17]</sup>以永和县为案例,定量分析该县2000—2015年农业生态系统的能值投入产出情况,结果显示16年间永和县可持续发展能力整体处于较低且不稳定的状态;董晓佳等<sup>[18]</sup>研究定西市2008—2012年农业系统的能值投入与产出结构及主要能效指标,发现其农业生态经济系统的可持续发展能力有所下降,呈现消费型经济系统的特征;王金照等<sup>[19]</sup>通过比较陕北和关中农户苹果产业生态系统能值,发现陕北地区主要依赖购买的有机能值投入,而关中地区几乎完全依赖自然资源能值投入;王红红等<sup>[20]</sup>人针对黄土高原农户果业系统的能值分析表明,此系统资源利用率不高,具有较强发展潜力。尽管已有研究在不同时空尺度

对该流域农业或林业系统的价值进行评估,但对典型农林复合生态系统尚缺乏整体化的能值综合评价。

黄龙县隶属于陕西省延安市,地处黄土高原典型丘陵沟壑区。近年来黄龙县依托其区位优势,引导农民大力发展核桃及花椒种植,截至目前,全县核桃面积  $1.10 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,总产量 8 400 t,产值  $1.26 \times 10^8$  元,花椒产值  $1.30 \times 10^7$  元。

本研究聚焦于黄龙县,通过大量走访调研,最终确定 4 种典型的农林复合生态模式,分别是核桃-紫苏、核桃-玉米、花椒-土豆、花椒-红豆,利用生态模式能值分析评估模型,综合评价黄龙县不同农林复合种植模式能值生产功能与效益及其可持续性发展潜力,为推动该区域生态农业经济可持续发展及优化农林配置模式提供科学依据与评价方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究样地位于陕西省延安市黄龙县,地处  $35^\circ 24'05'' - 36^\circ 02'01''\text{N}$ ,  $109^\circ 38'49'' - 110^\circ 16'49''\text{E}$ 。属黄土高原丘陵沟壑区,总面积约  $2\ 752 \text{ km}^2$ ,平均海拔 1 100 m,年平均降水量 561.4 mm,无霜期平均 180 d,属季风型大陆性山地气候,冬季寒冷干燥,夏

季温暖多雨,年平均气温  $9.4^\circ$ 。该区域地处陕北构造盆地的最南边沿,属沟壑纵横的黄土地貌类型。森林覆盖率 87%,林草覆盖率达 92%,拥有植物 1 012 种,动物 225 种,建成了该区生态农业“特色产品库”,及以核桃、花椒等为主导的现代生态农业产业体系。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 系统界定

通过面上调查、农户访问、采样分析等方法,在研究区域内确定 4 种典型的农林复合模式,统计其整个系统所需的能量和物质,并进行 3 次选地调研。通过能值转换系数,将系统内涵盖的能量与物质转化成等价的太阳能值,从而进行能值分析<sup>[10-11]</sup>。

(1) 归纳各系统的结构、边界及内容。在走访调查的基础上,以农户所经营的农林复合范围作为系统边界,以 2022 年和 2023 年 2 个完整农林复合种植模式的生产年度作为调研期,采用单位面积 ( $1 \text{ hm}^2$ ) 数据为研究系统内平均水平,量化其能值投入与产出,评估系统的生产发展特性。本研究以一个完整的生产过程为周期,对生产过程中的各种平均投入、生产过程等进行详细记录,统计典型农林复合种植模式及种植比例(表 1)。

表 1 黄龙县典型农林复合种植模式及种植比例

Table 1 Planting ratio and planting mode of typical agroforestry models in Huanglong County

种植模式	种树		种植作物		种植模式
	面积占比/%	株行距/m	面积占比/%	种植密度(株/ $\text{m}^2$ )	
核桃-紫苏	66.7	5.0×4.0	33.3	8	带状间作
核桃-玉米	75.0	5.0×4.0	25.0	6	带状间作
花椒-土豆	66.7	2.5×2.5	33.3	8	带状间作
花椒-红豆	53.3	2.5×2.5	46.7	30	带状间作

(2) 绘制系统能值图。根据农林复合生产模式的内部环境及其与自然生态系统的相互关系,确定系统与外部的能量及物质交换情况,将系统运行与整体结构用绘图的形式表达(图 1)。

(3) 汇总能值分析。将系统中涵盖的所有能量及物质,通过能值转换率转化为统一的能值标准,再进行计算分析。本研究的能值分析基于全球能值基准值 ( $9.44 \times 10^{24} \text{ sej/a}$ ),并将人力劳动作为可更新有机能值,机械动力作为不可更新辅助能,纳入到分析过程。研究所含的能值转换率参照蓝盛芳等<sup>[11]</sup>、邓建等<sup>[21]</sup>、陆燕花<sup>[22]</sup>的文献,由于不同文献采用的能值基准值不同,将其进行换算,以得到本研究所采用的能值转换率。资源投入和产出的能值计算方法参照文献<sup>[11,23]</sup>。

(4) 构建能值分析指标体系。利用能值流分类,

对数据进行整理与汇总,并选取能值自给率(ESR)在内的 7 个能值指标,以反映整体的能值投入构成、投入水平及利用效率、系统可持续性等,通过剖析和对比这些能值指标,对系统进行详尽的评估,借此对模式的改进和发展提出相关的建设性建议。

#### 1.2.2 数据来源

能值分析主要包括对该模式 2022 年和 2023 年的投入与产出进行统计并计算,能值研究中所用数据来源:①实地调研所得 4 种系统平均数据。包括种植模式、系统总投入与产出等;②政府公开的统计数据。包括黄龙县人民政府气象信息网以及陕西省科学技术厅信息网的全年日照时长、年平均降水量、风速、土壤侵蚀模数等在线数据;③文献资源。源自中国知网 CNKI 文献库,包括蓝盛芳等<sup>[11]</sup>、邓健等<sup>[21]</sup>、陆燕花等<sup>[22]</sup>、王钰等<sup>[24]</sup>的研究结果;④实测数据。对

土壤有机质含量进行实际测定。

1.2.3 计算方式

黄龙县典型农林复合模式能值分析指标含义及其计算表达公式详由表2。

1.2.4 采样及测定方法

在选取的4种系统间作区域内,随机设置3个

10 m×10 m 标准化采样区,采用“S”型采样法,采集0—10 cm 表土,混合作为代表土样。将采集后的样品均匀地分散在样品盘上,并置于室温风干后过2 mm 筛,弃去残体石砾。过筛后土样按四分法取出一部分研磨过0.25 mm 筛,采用K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>—H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>加热法测定土壤有机质含量。

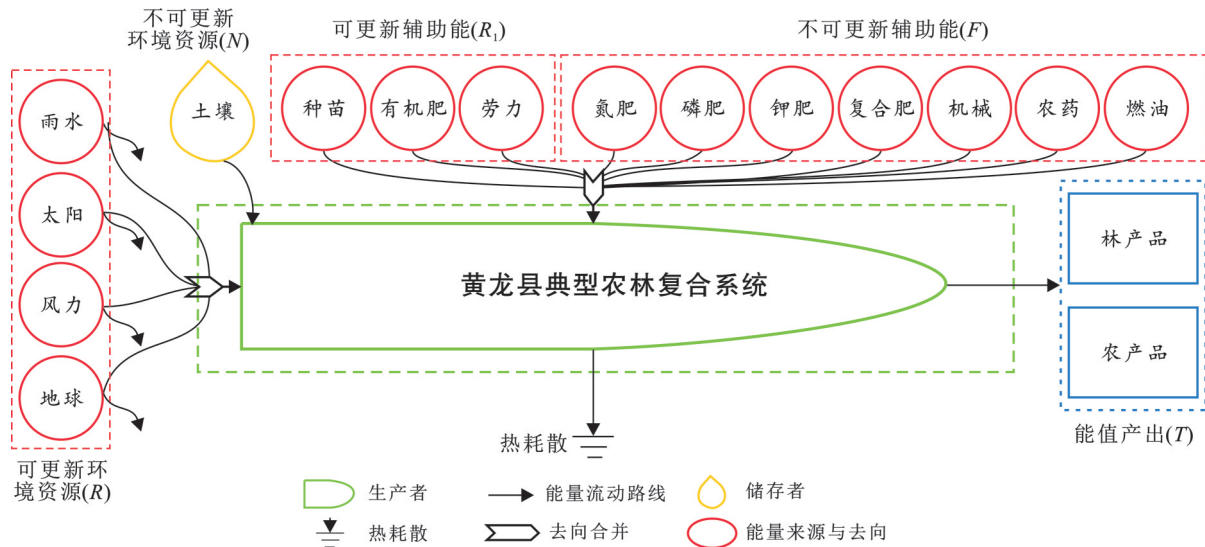


图1 典型农林复合种植模式能值图

Fig.1 Diagram of typical agroforestry model energy value

表2 黄龙县典型农林复合种植模式能值分析指标

Table 2 Emergy analysis indicators for typical agroforestry models in Huanglong County

指标	指标含义	计算表达公式
能值自给率 (ESR)	本地环境资源在系统生产所做的贡献程度	$ESR = (R + N) / T$
环境承载率 (ELR)	系统对环境的压力程度	$ELR = (N + F) / (R + R_1)$
能值产出率 (EYR)	产品竞争力和系统运转效率,衡量系统生产效率	$EYR = Y / (F + R_1)$
能值可持续发展指数 (ESI)	表征系统的发展潜力,反映了生态系统的可持续能力	$ESI = EYR / ELR$
能值投资率 (EIR)	自然对经济活动的容受力	$EIR = (R_1 + F) / (R + N)$
能值交换率 (EER)	反映了能值利用效率	$EER = Y / T$
能值/环境可持续指标 (E/ESI)	表征系统能值效率、对环境的压力和系统自组织能力	$E/ESI = ESR \times EYR / ELR$

2 结果与分析

2.1 农林复合种植模式能值投入结构分析

2.1.1 农林复合种植模式土壤有机质含量

核桃-紫苏、核桃-玉米、花椒-土豆、花椒-红豆复合模式的土壤有机质含量分别为23.8, 23.1, 27.2, 24.1 g/kg, 花椒-土豆的有机质含量较其余3种模式分别高出14.3%, 17.7%, 12.9%, 其余模式之间无明显差异。除花椒-土豆外,均低于全国耕层土壤有机质含量均值<sup>[25]</sup>(24.65 g/kg),但4种模式均高于黄土高原均值<sup>[26]</sup>(11.0 g/kg)。

2.1.2 环境资源能值投入

表3和图2显示,核桃-紫苏、核桃-玉米、花椒-土

豆、花椒-红豆复合模式的环境资源能值投入均值达到  $1.74 \times 10^{15}$  sej/hm<sup>2</sup>, 分别占系统总能值投入的30.9%, 26.8%, 26.1%, 26.3%, 表明核桃-紫苏对自然环境资源的利用程度高于其他3种模式,其中,以花椒为树种的复合模式对自然环境资源的利用程度小于以核桃为树种的复合模式。在这4种模式中,每1 hm<sup>2</sup>可更新环境资源的能值占总自然资源能值投入的比例均值为94.5%,且模式之间无显著差异。因4种模式同处于一个区域内,故可更新环境资源投入能值量相同,其中雨水势能和雨水化学能占比较大,表明雨水对黄龙县的种植至关重要。不可更新环境资源能值占系统总能值投入较少,即表土净损失对模式产能影响较小,且差异不显著。

2.1.3 辅助能值投入

可更新辅助能( $R_1$ )和不可更新辅助能( $F$ )投入的结构及比例情况,反映了系统对外部资源的依赖性程度。

由表 3 和图 3 可以看出,每 1  $hm^2$ 核桃-紫苏、核桃-玉米、花椒-土豆、花椒-红豆复合模式的辅助能值投入分别占总能值投入的 69.1%,73.2%,73.9%,73.7%,其中花椒-土豆的辅助能值投入比最大。4 种

模式的不可更新辅助能占辅助能投入的比例最大,分别为 90.3%,93.6%,92.7%,92.8%,且各模式均以化肥和机械动力的占比最大;可更新辅助能分别占辅助能投入的 9.7%,6.4%,7.3%,7.2%,各模式均以有机肥和劳力所占比例最大。其中紫苏的收获方式以人工采摘为主,因此核桃-紫苏复合模式的劳力占比较其他三者差异显著;玉米为机械收割,造成核桃-玉米的机械动能显著高于其他模式。

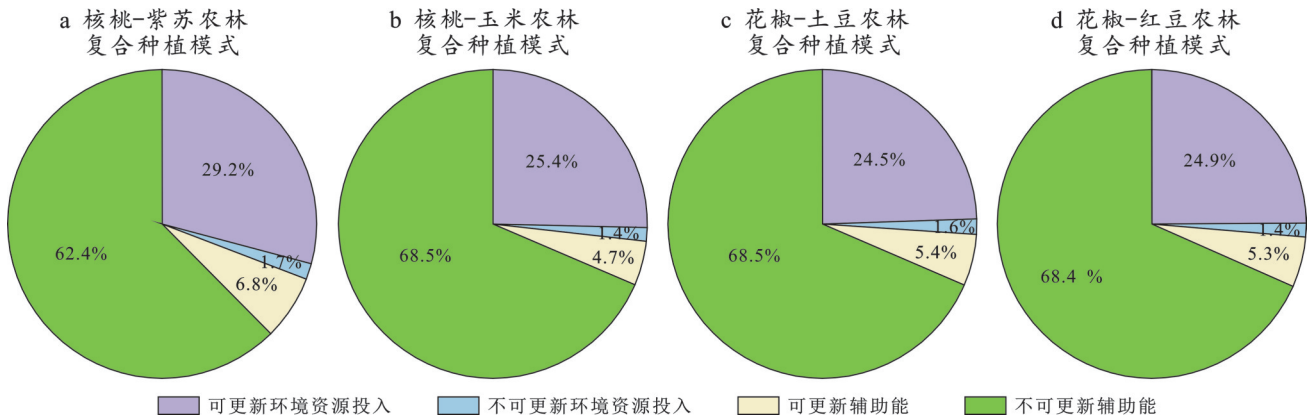


图 2 典型农林复合种植模式环境资源能值投入

Fig.2 Emergy input of environmental resources in typical agroforestry models

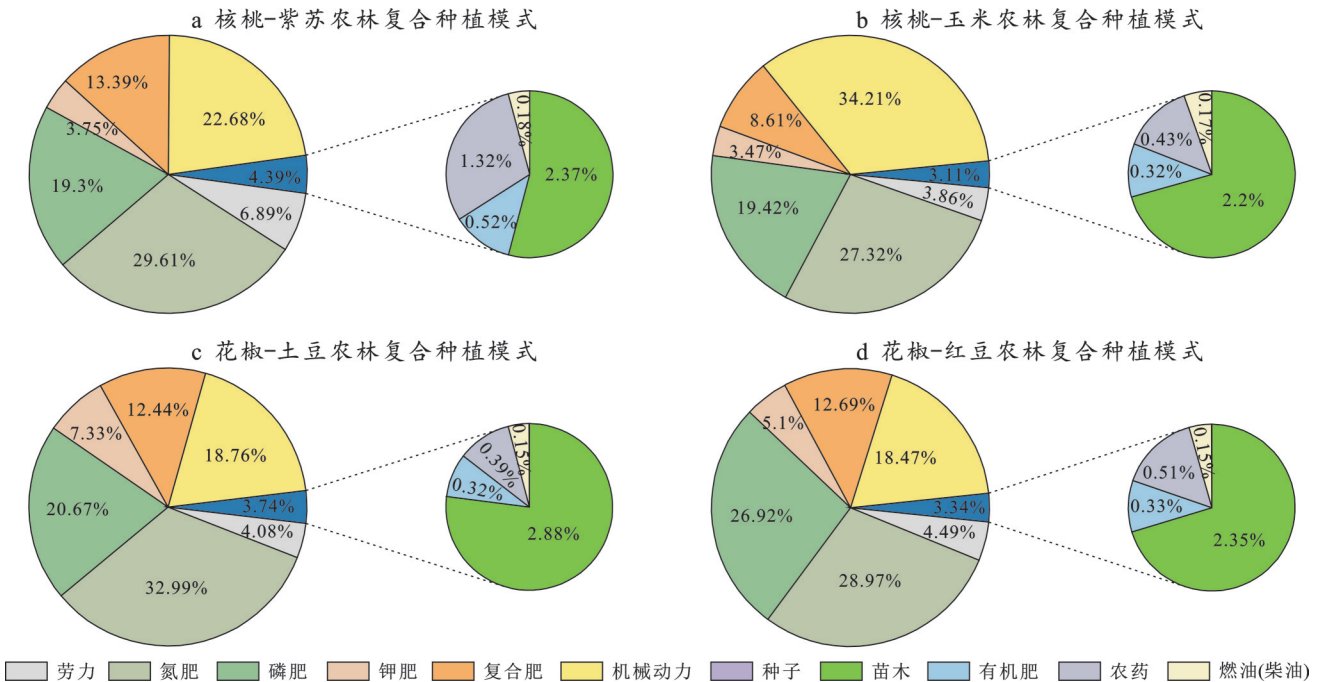


图 3 典型农林复合种植模式辅助能值投入

Fig.3 Auxiliary energy input for typical agroforestry models

2.2 农林复合种植模式能值产出结构

表 4 表明,核桃-紫苏、核桃-玉米、花椒-土豆、花椒-红豆复合模式的能值产出分别为  $7.24 \times 10^{15}$ ,  $6.85 \times 10^{15}$ ,  $8.32 \times 10^{15}$ ,  $2.86 \times 10^{16}$  sej/ $hm^2$ ,其中在花椒-红豆模式的能值产出中,因红豆作为豆类,其太阳能值转化率显著高于其他作物,达到了  $6.94 \times 10^5$

sej/a,红豆占比系统能值产出的 87.8%,导致整体系统能值产出较其他 3 种模式分别高 295.0%,317.5%,243.8%。

在核桃-紫苏复合模式中,核桃产出能值为  $5.53 \times 10^{15}$  sej/ $hm^2$ ,而在核桃-玉米复合模式中,产出能值为  $5.82 \times 10^{15}$  sej/ $hm^2$ ,较前者增长 5.2%;在花椒-土

豆复合模式中,花椒产出能值为  $3.98 \times 10^{15}$  sej/hm<sup>2</sup>,而在花椒-红豆复合模式中,产出能值为  $3.51 \times 10^{15}$  sej/hm<sup>2</sup>,较前者下降 11.8%。

在同一树种的不同农林复合种植模式中,树种

所栽培面积比例不同,若按同一树种单位面积的能值产出来看,核桃-紫苏的核桃产出较核桃-玉米多  $5.31 \times 10^{14}$  sej/hm<sup>2</sup>,花椒-红豆的花椒产出较花椒-土豆多  $6.18 \times 10^{14}$  sej/hm<sup>2</sup>。

表 3 不同农林复合种植模式平均投入的能值量化特征

Table 3 Quantitative characteristics of emergy value of average input in different agroforestry models

项目	太阳能值 转换率/ (sej·a <sup>-1</sup> )	核桃-紫苏		核桃-玉米		花椒-土豆		花椒-红豆		参考文献
		原始数据/ (J·g <sup>-1</sup> )	能值/ (sej·hm <sup>-2</sup> )	原始数据/ (J·g <sup>-1</sup> )	能值/ (sej·hm <sup>-2</sup> )	原始数据/ (J·g <sup>-1</sup> )	能值/ (sej·hm <sup>-2</sup> )	原始数据/ (J·g <sup>-1</sup> )	能值/ (sej·hm <sup>-2</sup> )	
可更新环境资源投入		$1.64 \times 10^{15}$		$1.64 \times 10^{15}$		$1.64 \times 10^{15}$		$1.64 \times 10^{15}$		
太阳能	1.00	$5.02 \times 10^{13}$	$5.02 \times 10^{13}$	$5.02 \times 10^{13}$	$5.02 \times 10^{13}$	$5.02 \times 10^{13}$	$5.02 \times 10^{13}$	$5.02 \times 10^{13}$	$5.02 \times 10^{13}$	[11]
雨水势能	$1.00 \times 10^4$	$6.08 \times 10^{10}$	$6.08 \times 10^{14}$	$6.08 \times 10^{10}$	$6.08 \times 10^{14}$	$6.08 \times 10^{10}$	$6.08 \times 10^{14}$	$6.08 \times 10^{10}$	$6.08 \times 10^{14}$	[11]
雨水化学能	$1.80 \times 10^4$	$3.11 \times 10^{10}$	$5.60 \times 10^{14}$	$3.11 \times 10^{10}$	$5.60 \times 10^{14}$	$3.11 \times 10^{10}$	$5.60 \times 10^{14}$	$3.11 \times 10^{10}$	$5.60 \times 10^{14}$	[11]
风能	$1.50 \times 10^3$	$5.36 \times 10^{10}$	$8.05 \times 10^{13}$	$5.36 \times 10^{10}$	$8.05 \times 10^{13}$	$5.36 \times 10^{10}$	$8.05 \times 10^{13}$	$5.36 \times 10^{10}$	$8.05 \times 10^{13}$	[11]
地球循环能	$3.40 \times 10^4$	$1.00 \times 10^{10}$	$3.40 \times 10^{14}$	$1.00 \times 10^{10}$	$3.40 \times 10^{14}$	$1.00 \times 10^{10}$	$3.40 \times 10^{14}$	$1.00 \times 10^{10}$	$3.40 \times 10^{14}$	[11]
不可更新环境资源投入		$9.34 \times 10^{13}$		$9.15 \times 10^{13}$		$1.08 \times 10^{14}$		$9.52 \times 10^{13}$		
表土净损失	$7.40 \times 10^4$	$1.27 \times 10^9$	$9.34 \times 10^{13}$	$1.24 \times 10^9$	$9.15 \times 10^{13}$	$1.45 \times 10^9$	$1.08 \times 10^{14}$	$1.29 \times 10^9$	$9.52 \times 10^{13}$	[11]
可更新辅助能		$3.81 \times 10^{14}$		$3.02 \times 10^{14}$		$3.60 \times 10^{14}$		$3.48 \times 10^{14}$		
种子	$6.60 \times 10^4$	$7.50 \times 10^3$	$4.95 \times 10^8$	$1.87 \times 10^4$	$1.23 \times 10^9$	$3.75 \times 10^5$	$2.47 \times 10^{10}$	$4.20 \times 10^4$	$2.77 \times 10^9$	[21]
苗木	$6.03 \times 10^4$	$1.53 \times 10^9$	$9.23 \times 10^{13}$	$1.72 \times 10^9$	$1.04 \times 10^{14}$	$2.36 \times 10^9$	$1.42 \times 10^{14}$	$1.89 \times 10^9$	$1.14 \times 10^{14}$	[24]
有机肥	$2.70 \times 10^6$	$7.50 \times 10^6$	$2.03 \times 10^{13}$	$5.63 \times 10^6$	$1.52 \times 10^{13}$	$5.81 \times 10^6$	$1.57 \times 10^{13}$	$6.00 \times 10^6$	$1.62 \times 10^{13}$	[11]
劳力	$2.29 \times 10^5$	$1.17 \times 10^9$	$2.68 \times 10^{14}$	$7.97 \times 10^8$	$1.82 \times 10^{14}$	$8.83 \times 10^8$	$2.02 \times 10^{14}$	$9.52 \times 10^8$	$2.18 \times 10^{14}$	[21]
不可更新辅助能(F)		$3.51 \times 10^{15}$		$4.43 \times 10^{15}$		$4.59 \times 10^{15}$		$4.50 \times 10^{15}$		
氮肥	$3.80 \times 10^9$	$3.03 \times 10^5$	$1.15 \times 10^{15}$	$3.40 \times 10^5$	$1.29 \times 10^{15}$	$4.30 \times 10^5$	$1.63 \times 10^{15}$	$3.70 \times 10^5$	$1.41 \times 10^{15}$	[11]
磷肥	$3.90 \times 10^9$	$1.93 \times 10^5$	$7.51 \times 10^{14}$	$2.35 \times 10^5$	$9.18 \times 10^{14}$	$2.63 \times 10^5$	$1.02 \times 10^{15}$	$3.35 \times 10^5$	$1.31 \times 10^{15}$	[11]
钾肥	$1.10 \times 10^9$	$1.33 \times 10^5$	$1.46 \times 10^{14}$	$1.49 \times 10^5$	$1.64 \times 10^{14}$	$3.30 \times 10^5$	$3.63 \times 10^{14}$	$2.25 \times 10^5$	$2.48 \times 10^{14}$	[11]
复合肥	$2.80 \times 10^9$	$1.86 \times 10^5$	$5.21 \times 10^{14}$	$1.45 \times 10^5$	$4.07 \times 10^{14}$	$2.20 \times 10^5$	$6.16 \times 10^{14}$	$2.20 \times 10^5$	$6.16 \times 10^{14}$	[11]
农药	$1.60 \times 10^9$	$3.20 \times 10^4$	$5.12 \times 10^{13}$	$1.26 \times 10^4$	$2.01 \times 10^{13}$	$1.21 \times 10^4$	$1.94 \times 10^{13}$	$1.56 \times 10^4$	$2.50 \times 10^{13}$	[11]
燃油(柴油)	$6.60 \times 10^4$	$1.06 \times 10^8$	$7.01 \times 10^{12}$	$1.20 \times 10^8$	$7.94 \times 10^{12}$	$1.14 \times 10^8$	$7.51 \times 10^{12}$	$1.08 \times 10^8$	$7.10 \times 10^{12}$	[21]
机械动力	$7.50 \times 10^7$	$1.18 \times 10^7$	$8.82 \times 10^{14}$	$2.16 \times 10^7$	$1.62 \times 10^{15}$	$1.24 \times 10^7$	$9.29 \times 10^{14}$	$1.20 \times 10^7$	$8.96 \times 10^{14}$	[21]
合计		$5.75 \times 10^{15}$		$6.57 \times 10^{15}$		$6.82 \times 10^{15}$		$6.72 \times 10^{15}$		

表 4 不同农林复合种植模式产出的能值量化特征<sup>[22]</sup>

Table 4 Quantitative characteristics of emergy values for outputs of different agroforestry models

项目	太阳能值转 换率/ (sej·a <sup>-1</sup> )	核桃-紫苏		核桃-玉米		花椒-土豆		花椒-红豆	
		原始数据/ (J·g <sup>-1</sup> )	能值/ (sej·hm <sup>-2</sup> )	原始数据/ (J·g <sup>-1</sup> )	能值/ (sej·hm <sup>-2</sup> )	原始数据/ (J·g <sup>-1</sup> )	能值/ (sej·hm <sup>-2</sup> )	原始数据/ (J·g <sup>-1</sup> )	能值/ (sej·hm <sup>-2</sup> )
核桃	$2.35 \times 10^4$	$2.36 \times 10^{11}$	$5.53 \times 10^{15}$	$2.47 \times 10^{11}$	$5.82 \times 10^{15}$				
紫苏	$2.70 \times 10^4$	$6.30 \times 10^{10}$	$1.70 \times 10^{15}$						
玉米	$2.70 \times 10^4$			$3.82 \times 10^{10}$	$1.03 \times 10^{15}$				
花椒	$2.35 \times 10^4$					$1.70 \times 10^{11}$	$3.98 \times 10^{15}$	$1.49 \times 10^{11}$	$3.51 \times 10^{15}$
土豆	$8.26 \times 10^4$					$5.25 \times 10^{10}$	$4.34 \times 10^{15}$		
红豆	$6.94 \times 10^5$							$3.62 \times 10^{10}$	$2.51 \times 10^{16}$
总产出能值(sej)		$7.24 \times 10^{15}$		$6.85 \times 10^{15}$		$8.32 \times 10^{15}$		$2.86 \times 10^{16}$	

2.3 农林复合种植模式能值指标及可持续性分析

在对黄龙县典型农林复合种植模式能值投入与产出数据分析的基础上,为深入分析 4 种典型农林

复合种植模式的发展特性与可持续性,针对研究区域的特性和已有的能值分析方法,选取了包括能值自给率(ESR)在内的 7 个关键指标来进行评估,并

构建不同农林复合种植模式的可持续性指标体系(表5)。

### 2.3.1 生态效应与生产效益特征

能值自给率(ESR)衡量本地环境资源在系统生产所做的贡献程度,即系统能自给自足的能力,ESR值越高,意味着系统的自给与支撑能力更突出,相应地对外部资源投入的依赖程度也越低<sup>[27]</sup>。其中核桃-紫苏的ESR最高,达到0.31,表明其自给能力相对较好,花椒-土豆和花椒-红豆的自给能力较差,为0.26,核桃-玉米模式与前两者基本相同。说明4种模式同处于黄龙县,本地资源环境输入的能量及能值相当,贡献程度差异较小。

表5 黄龙县农林复合种植模式能值分析  
Table 5 Emergy analysis of agroforestry planting mode in Huanglong County

指标	核桃-紫苏	核桃-玉米	花椒-土豆	花椒-红豆
能值自给率(ESR)	0.31	0.27	0.26	0.26
环境承载率(ELR)	1.78	2.33	2.35	2.31
净能值产出率(EYR)	1.86	1.45	1.68	5.90
能值可持续发展指数(ESI)	1.04	0.62	0.71	2.55
能值投资率(EIR)	2.24	2.73	2.84	2.80
能值交换律(EER)	1.29	1.06	1.24	4.35
能值/环境可持续指标(E/ESI)	0.32	0.17	0.19	0.67

净能值产出率(EYR)是衡量单位资源投入所获得的能值产出的关键指标。EYR越高,表明生态系统的生产效率和资源利用效率越高,从而在资源利用、产出效率、经济效益方面更具有优势<sup>[27]</sup>。4种模式种系统的EYR值分别为1.86,1.45,1.68,5.90,其中花椒-红豆的EYR远高于其他3种模式,且明显优于全国平均水平(3.219 9)和陕西地区平均水平<sup>[28]</sup>(2.399 4),表现出极高的能值产出效率。相比之下,其他3种模式系统的EYR低于上述平均水平,表明其单位资源投入的能值产出相对不足,生产效率和经济效益提升空间较大。但花椒-红豆模式的EYR值高与红豆的太阳能值转化率高有关。

环境承载率(ELR)反映生态系统对环境的压力程度,其值越大,表明生态系统所承受的环境压力越大。4种模式的ELR值分别为1.78,2.33,2.35,2.31,其中核桃-紫苏模式的ELR值最低,但4种模式均高于全国平均水平(0.903 5)和陕西地区平均水平(1.119 2)<sup>[28]</sup>,显示出各模式对环境的高压力。这表明黄龙县种植业的发展,主要依赖以化肥、机械和人工劳力为主的外部辅助能值投入,导致辅助能占比高,从而加重了对环境的压力。

### 2.3.2 经济效率指标

能值投资率(EIR)用于衡量生态环境对经济活动的承载力,直观和全面地衡量系统对所购买能值的依赖程度。4种模式的EIR分别为2.24,2.73,2.84,2.80。过高的EIR意味着辅助能值投入过多,增加生产成本,影响市场竞争力;而过低的EIR则表明辅助能值投入不足,使模式过多地依赖自然资源的投入<sup>[23]</sup>。其中,核桃-紫苏模式的EIR最低(2.24),但仍高于全球平均水平(2.00)<sup>[23]</sup>,表明4种模式均依赖较高比例的外部辅助能值投入。

能值交换律(EER)代表系统内外交换的能值比,即能值的利用效率。4种模式的EER值分别为1.29,1.06,1.24,4.35,其中花椒-红豆模式的EER值最高(4.35),显示其能值利用效率最优,其高EER值与红豆较高的太阳能值转化率密切相关。

### 2.3.3 系统发展可持续性和稳定性

能值可持续发展指数(ESI)是衡量系统可持续发展能力的指数,在生态系统中,较高的净能值产出率(EYR)与较低的环境负载率(ELR)通常意味着更高的可持续发展潜力,且当ESI小于1时,表示该系统为消费型经济系统<sup>[27]</sup>。4种模式的ESI值分别为1.04,0.62,0.71,2.55,花椒-红豆模式的ESI最高,表明其可持续发展能力最强,核桃-玉米与花椒-土豆模式的ESI值均低于1,表明这两类模式属于典型的消费型系统,不利于系统的可持续性发展。4种模式均低于全国平均水平(3.563 7)<sup>[28]</sup>,仅花椒-红豆模式高于陕西地区平均水平(2.143 8)<sup>[28]</sup>,表明花椒-红豆模式最具有可持续发展的能力。

能值/环境可持续指标(E/ESI)是衡量系统能值效率、对环境的压力和系统自组织能力。4种模式的E/ESI值分别为0.32,0.17,0.19,0.67,其中花椒-红豆模式的E/ESI值最高,表明其能值利用效率较高、对环境的压力较低,同时具备更强的自组织能力,在环境可持续性方面的贡献最为显著。

## 3 讨论

除花椒-土豆模式外,其余3种模式的土壤有机质含量均低于全国耕地均值,表明黄土高原地区的自然环境资源缺乏,土壤肥力差;但较黄土高原均值高<sup>[26]</sup>,表明农林复合种植模式对土壤肥力的改善具有积极效应,这与dos Santos J A等<sup>[29]</sup>、赵昌平等<sup>[30]</sup>的研究结果相同。因土壤有机质含量存在差异,导致4种模式表土净损失,即不可更新环境资源投入存在差异,但并不显著。

研究结果表明,黄龙县农林复合种植模式资源

投入产出构成特征具有一定的相似性,普遍依赖不可更新辅助能(占比 $>60\%$ ),且以化肥和机械动力为主。其表明该地区农林复合种植模式高度依赖外界资源投入,自身发展可持续性较差,对环境的影响也更负面。例如化肥的大量使用会对本地土壤造成退化,使得农作物产量下降,同时多余的营养元素会随着降水流失,造成地下水的环境污染<sup>[31]</sup>,此类情况在黄土高原沟壑区果业生态系统中较为普遍<sup>[20]</sup>。可更新环境资源投入占总能值投入的 $24\%$ 以上,且以雨水势能和雨水化学能为主,表明该地区农林复合种植模式极其依赖自然降雨,水资源相对匮乏,与针对黄土高原典型流域种植业发展模式的研究结果<sup>[21]</sup>相同。黄龙县的降水集中于7—9月,与该研究中种植作物需水期几乎吻合,表明该地区多选择与气候相适配的作物种植,可以减少生态系统对于灌溉的需求。在种植管理措施中,建议增加有机肥的使用频率和施用量,减少无机肥的使用,从而降低对不可更新辅助能的依赖,提升可更新辅助能的投入占比;重视资源和空间的合理利用,调整农、林各自所占比例以及选择适合的树种和农作物,设计合理的土地管理措施和农林复合种植模式。例如花椒-红豆组成的农林复合种植模式。4种模式的不可更新环境资源能值占系统总能值投入较少,即表土净损失对系统产能影响较少,且表土净损失占比较其余研究<sup>[21]</sup>较少,说明农林复合种植模式对于土壤流失具有一定的保护作用。

在环境承载效应以及可持续发展潜力方面,农林复合种植模式的能值自给率(ESR)普遍偏低,而环境承载率(ELR)则相对较高,说明这些模式对环境的压力较大,当地农林系统对外部资源的高依赖性,符合邓健等<sup>[21]</sup>对黄土高原典型流域种植业发展模式的研究结果。而不同的种植模式在净能值产出率(EYR)和能值可持续发展指数(ESI)上存在明显差异。其中花椒-红豆复合模式的EYR和ESI远高于其他模式,表明这种复合模式具有更好的生产效率和可持续性,这可能与红豆作为豆科植物,具有良好的固氮效应与较高的太阳能值转化率,可以改善土壤质量、减少化肥投入、提升复合系统能值产出有关,且中高密度间作豆科植物,可以提升果树叶片氮含量,促进果树生长<sup>[32]</sup>。同时,作为矮秆植株的红豆,与花椒复合种植的空间配置,优化了光热资源利用。在核桃-玉米复合模式中,由于玉米作为高秆植物,易抢占光能资源,抑制了核桃的生长发育,导致该模式的各项指标表现较差。甚至会造成核桃果实品质、产量、口感降低,因此,成龄核桃园不适宜与玉

米间作<sup>[33]</sup>,建议在核桃幼龄期阶段与玉米间作,可有效提高土地利用效率,避免高秆作物与林木的遮荫效应,实现“林-农”协同增益。此外,紫苏的矮秆特性使其与核桃兼容性更佳,但劳力投入过高(占比 $9.7\%$ )限制了其推广潜力。综上所述,在选取作物品种时,要充分考虑各作物的生长习性与相互关系,以求谋取资源最大利用以及环境的可持续发展,可优先考虑在该地区推广豆科间作模式。

## 4 结论

黄龙县4种模式均高度依赖不可更新辅助能(占比 $>60\%$ ),其中化肥与机械动力为主要投入,当前生产模式仍依赖石化能源;可更新环境资源的投入占 $24\%$ 以上,且以雨水势能和雨水化学能为主,表明当地水资源相对匮乏,种植极其依赖自然降水。总体来看,4种生产模式中,本地环境资源的贡献程度有限(ESR为 $0.26\sim 0.31$ );环境压力显著(ELR为 $1.78\sim 2.35$ )且净能值产出率整体偏低(EYR为 $1.45\sim 5.90$ ),显示该地区复合系统生产效率与生态友好性亟待提升。然而,花椒-红豆模式表现突出,其EYR( $5.90$ ),ESI( $2.55$ )与E/ESI( $0.67$ )显著高于其他模式与陕西省均值,该优势源于红豆作为豆科植物的多重生态功能——高太阳能值转化率、固氮效应与资源协同优势。这一种植模式在该地区具有较高的适宜性,这对与黄龙县类似的生态环境脆弱区都具有一定的普适性。

未来研究可进一步聚焦于该模式的种间关系、空间格局优化以及对土壤理化性质的影响,以完善其生态与经济效益,为黄土丘陵区及其他生态脆弱区农林复合种植模式的优化与推广提供更多科学依据。

## 参考文献(References)

- [1] de Brito Quadros Gonçalves C, Schlindwein M M, do Carmo Martinelli G. Agroforestry systems: A systematic review focusing on traditional indigenous practices, food and nutrition security, economic viability, and the role of women [J]. Sustainability, 2021, 13(20): 11397.
- [2] 潘康乐, 郭梁, 陈欣, 等. 农林复合生态系统服务功能研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(12): 1535-1544.  
Pan Kangle, Guo Liang, Chen Xin, et al. Advance in the research on agroforestry ecosystem services [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(12): 1535-1544.
- [3] 王建鑫, 罗小锋, 刘在洲, 等. 长江经济带农田生态价值时空变化及影响因素分析[J]. 中国生态农业学报(中英

- 文), 2024, 32(3): 505-517.
- Wang Jianxin, Luo Xiaofeng, Liu Zaizhou, et al. Spatial-temporal variation and influencing factors of farmland ecological value in the Yangtze River economic belt [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(3): 505-517.
- [4] 吴恒, 朱丽艳, 王海亮, 等. 新时期林下经济的内涵和发展模式思考[J]. 林业经济, 2019, 41(7): 78-81.
- Wu Heng, Zhu Liyan, Wang Hailiang, et al. Thinking on connotation and development mode of non-timber forest-based economy in the new era [J]. Forestry Economics, 2019, 41(7): 78-81.
- [5] Do V H, La N, Mulia R, et al. Fruit tree-based agroforestry systems for smallholder farmers in northwest Vietnam: A quantitative and qualitative assessment [J]. Land, 2020, 9(11): 451.
- [6] Pan Jiachen, Chen Shuotong, He Dejun, et al. Agroforestry increases soil carbon sequestration, especially in arid areas: A global Meta-analysis [J]. Catena, 2025, 249: 108667.
- [7] 陈义勇, 翁学煌, 贾黎明. 基于文献计量的国内外林下经济研究进展[J]. 林产工业, 2024, 61(4): 85-92.
- Chen Yiyong, Weng Xuehuang, Jia Liming. Research progress of domestic and foreign non-timber forest-based economy research based on bibliometrics [J]. China Forest Products Industry, 2024, 61(4): 85-92.
- [8] 解婷婷, 单立山, 张鹏. 不同水分条件下杨树-玉米复合系统凋落物分解特性[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 8041-8049.
- Xie Tingting, Shan Lishan, Zhang Peng. Litter decomposition characteristics of poplar-maize agroforestry system under different water conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 8041-8049.
- [9] Chen Wei, Liu Wenjing, Geng Yong, et al. Recent progress on emergy research: A bibliometric analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 1051-1060.
- [10] ODUM H T. Energy analysis [J]. Science, 1977, 196(4287): 261.
- [11] 蓝盛芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- Lan Shengfang. Energy analysis of ecological economic system [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [12] 丁豪, 李宗新, 张文君, 等. 基于能值分析的种植业生产系统可持续发展水平评价: 以山东省郯城县为例[J]. 江西农业学报, 2023, 35(6): 200-206.
- Ding Hao, Li Zongxin, Zhang Wenjun, et al. Evaluation of sustainable development level of planting production system based on emergy analysis: A case study of Yuncheng County, Shandong Province [J]. Acta Agricul-  
turae Jiangxi, 2023, 35(6): 200-206.
- [13] 邹志刚, 张浩, 曾昭霞, 等. 云南断陷盆地喀斯特4种典型种植模式的能值分析[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2641-2650.
- Zou Zhigang, Zhang Hao, Zeng Zhaoxia, et al. Emergy analysis of four typical planting modes in karst faulted basins of Yunnan Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2641-2650.
- [14] Zou Zhigang, Zeng Fuping, Wang Kelin, et al. Emergy and economic evaluation of seven typical agroforestry planting patterns in the karst region of southwest China [J]. Forests, 2019, 10(2): 138.
- [15] 任历, 董欣, 徐琰雨, 等. 生态脆弱区乡村人居环境系统韧性特征及影响因素分析: 以陕北黄土高原为例[J/OL] (2024-12-12). 中国农业资源与区划, <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20241212.1100.002>.
- Ren Li, Dong Xin, Xu Yanyu, et al. Study on the spatial and temporal evolution characteristics of the resilience of rural habitat system in ecologically fragile areas and mechanism of influence: Taking the Loess Plateau of northern Shaanxi as an example [J/OL] (2024-12-12). Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20241212.1100.002>.
- [16] 张青峰, 吴发启, 王力, 等. 黄土高原生态与经济系统耦合协调发展状况[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1531-1536.
- Zhang Qingfeng, Wu Faqi, Wang Li, et al. Coupling coordinated development of ecological-economic system in Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1531-1536.
- [17] 栗兴, 郭青霞. 基于能值的黄土梁峁丘陵区农业生态系统可持续发展研究: 以山西省永和县为例[J]. 中国农学通报, 2018, 34(21): 91-100.
- Li Xing, Guo Qingxia. Sustainable development of agro-ecosystem in hilly ridge areas of loess hills based on emergy: A case of Yonghe County, Shanxi Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(21): 91-100.
- [18] 董晓佳, 张仁陟, 张军, 等. 定西市农业生态经济系统能值分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(5): 106-113.
- Dong Xiaojia, Zhang Renzhi, Zhang Jun, et al. Study on emergy analysis of Dingxi agriculture eco-economic systems [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2015, 50(5): 106-113.
- [19] 王金照, 尚宗元, 王忠贤, 等. 陕北和关中农户苹果产业生态系统能值分析[J]. 林业经济, 2010, 32(3): 94-98.
- Wang Jinzhao, Shang Zongyuan, Wang Zhongxian, et al. Energy value analysis comparison of farmers' apple industry ecosystem in central and northern Shaanxi [J].

- Forestry Economics, 2010, 32(3):94-98.
- [20] 王红红, 吴发启, 李荣标. 黄土高原沟壑区农户果业生态系统的能值分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(7):64-70.  
Wang Honghong, Wu Faqi, Li Rongbiao. Energy analysis of apple fruit industry ecosystem in the Loess Plateau [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2008, 36(7):64-70.
- [21] 邓健, 赵发珠, 韩新辉, 等. 黄土高原典型流域种植业发展模式的能值分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5):1576-1584.  
Deng Jian, Zhao Fazhu, Han Xinhui, et al. Emergy analysis on different planting patterns of typical watersheds in Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5):1576-1584.
- [22] 陆燕花, 李广, 马维伟, 等. 农牧交错带复合生态经济系统的能值分析:以甘肃省定西市为例[J]. 草地学报, 2020, 28(6):1673-1681.  
Lu Yanhua, Li Guang, Ma Weiwei, et al. Emergy analysis on complex ecological economic system of agro-pastoral transitional zone: A case of Dingxi in Gansu [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(6):1673-1681.
- [23] 曾巧云. 基于能值分析的广西壮族自治区农业生态经济系统研究[D]. 广西南宁:广西大学, 2022.  
Zeng Qiaoyun. Study on agricultural eco economic system of Guangxi Zhuang autonomous region based on emergy analysis [D]. Nanning, Guangxi: Guangxi University, 2022.
- [24] 王钰, 吴发启, 彭小瑜, 等. 黄土丘陵区山地立体种养循环生产能流特征与经济效益分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2):199-206.  
Wang Yu, Wu Faqi, Peng Xiaoyu, et al. Analysis of economic efficiency and energy flow characteristics of a circular and integrated agriculture model in the loess hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S2):199-206.
- [25] 廖文强. 福建省龙岩市土壤质量评价及其空间分布特征[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(18):165-170.  
Liao Wenqiang. Soil quality assessment and spatial distribution characteristics in Longyan City of Fujian Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(18):165-170.
- [26] 夏梦洁. 黄土高原旱地残留肥料氮及夏季休闲期间的去向[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2019.  
Xia Mengjie. Residual nitrogen fertilizer in dryland of the Loess Plateau and its fate during summer fallow [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2019.
- [27] 杨世成, 吴永常, 陈学渊, 等. 土地利用变动视角下农业生态系统能值发展探析:以陕西大荔为例[J]. 广东农业科学, 2022, 49(6):155-168.  
Yang Shicheng, Wu Yongchang, Chen Xueyuan, et al. Study on emergy development of agro-ecosystem from the perspective of land use changes: Taking Dali County of Shaanxi Province as an example [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(6):155-168.
- [28] Hu Jiangfeng, Lyu Jingjing, Zhang Xinyuan. Evaluating agricultural sustainability and green GDP in China: An emergy analysis [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(24):16735.
- [29] dos Santos J A, de Deus dos Santos A, Costa C R, et al. Fractions of organic matter and soil carbon balance in different phases of an agroforestry system in the cerrado: A ten-year field assessment [J]. Soil Systems, 2024, 8(2):44.
- [30] 赵昌平, 王景燕, 龚伟, 等. 四川盆北地震重灾区农林复合模式的土壤培肥改土效果[J]. 中国农业科学, 2016, 49(15):2999-3009.  
Zhao Changping, Wang Jingyan, Gong Wei, et al. Soil amendment and enrichment efficiency of agro-forestry models in serious earthquake region of northern Sichuan basin [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(15):2999-3009.
- [31] 史常亮, 李赟, 朱俊峰. 劳动力转移、化肥过度使用与面源污染[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(5):169-180.  
Shi Changliang, Li Bin, Zhu Junfeng. Rural labor transfer, excessive fertilizer use and agricultural non-point source pollution [J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(5):169-180.
- [32] 安庆蓉, 赵西宁, 赵连豪, 等. 黄土高原间作大豆对幼龄果园土壤水分及氮素累积的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5):152-159.  
An Qingrong, Zhao Xining, Zhao Lianhao, et al. Effects of intercropping soybean on soil water and nitrogen accumulation in young orchards on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):152-159.
- [33] 叶春秀, 苏康妮, 马雨荷, 等. 核桃-玉米间作对核桃果实品质及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(10):1365-1373.  
Ye Chunxiu, Su Kangni, Ma Yuhe, et al. Effect of walnut-corn intercropping on fruit quality and yield of walnut [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(10):1365-1373.