

DOI: 10.20103/j.stxb.202503030454

张典典, 郑华, 张世栋, 张建. 秦岭生态资产实物量账户变化特征及其驱动因素——基于 SEEA-EA 框架. 生态学报, 2025, 45(24): 11948-11960.
Zhang D D, Zheng H, Zhang S D, Zhang J. Changes in physical accounts of ecological assets and their driving factors in the Qinling Mountains: based on the SEEA-EA framework. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 11948-11960.

秦岭生态资产实物量账户变化特征及其驱动因素 ——基于 SEEA-EA 框架

张典典^{1,2}, 郑 华^{2,*}, 张世栋^{2,3}, 张 建^{2,4}

1 郑州大学河南先进技术研究院, 郑州 450003

2 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081

4 重庆科技大学管理学院, 重庆 401331

摘要: 生态资产是人类福祉与经济发展的重要根基, 全面了解生态资产存量的范围、状况及其变化, 对于评估区域可持续发展能力具有重要意义。基于 SEEA-EA 框架, 以生态资产丰富的秦岭地区为对象, 构建生态资产存量账户(范围账户、状况账户), 并结合趋势分析方法, 探究秦岭地区 2000—2020 年生态资产状况时空变化特征, 同时利用地理探测器分析其驱动因素。结果表明: 秦岭地区 2000 年生态资产范围账户主要包括森林(55.75%)、农田(28.03%)和草地(14.06%), 2020 年森林资产范围增至 60.43%, 而农田和草地资产范围分别减至 23.78% 和 12.51%, 退耕还林政策是生态资产范围账户变化的主要驱动因素; 秦岭地区生态资产状况呈现出“中部较高, 南北较低”的分布特征, 2000—2020 年秦岭地区 53.78% 的生态资产范围呈现较显著或显著改善, 农田和草地生态资产状况因土壤肥力下降、景观破碎化等因素而略有下降, 森林、水体、城镇及裸地生态资产状况整体提升, 但它们的物理指标、化学指标或功能指标在局部地区仍呈退化趋势。驱动因素分析显示, 自然因子对生态资产状况变化具有较强影响, 其中年均降水的独立解释力最强($q>0.35$)。生态工程、城镇化以及人口密度对秦岭生态资产状况产生突出的交互影响。通过构建多维度生态资产评估体系, 不仅验证了 SEEA-EA 框架在复杂山地区的适用性, 更重要的是揭示了生态资产“量-质-构”协同演变的规律及其驱动机制。研究成果可为制定差异化的生态资产管理策略提供直接依据: 在秦岭南部分部应加强降水调控, 北部需严格控制城镇扩张, 中部则要重点维持生态工程实施成效。本研究建立的方法体系和技术路径, 对于我国其他生态脆弱区开展生态资产核算与管理工作具有重要的参考价值。

关键词: 生态资产; 实物量核算; 生态资产范围; 生态资产状况; 生态系统核算

Changes in physical accounts of ecological assets and their driving factors in the Qinling Mountains: based on the SEEA-EA framework

ZHANG Diandian^{1,2}, ZHENG Hua^{2,*}, ZHANG Shidong^{2,3}, ZHANG Jian^{2,4}

1 Henan Institute of Advanced Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450003, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China

4 School of Management, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

Abstract: Ecological assets serve as a fundamental basis for human well-being and economic development. A comprehensive understanding of the scope, condition, and changes in ecological asset stock is crucial for assessing regional sustainability. Based on the SEEA-EA framework, this study focused on the ecologically rich Qinling Mountains and constructs an

基金项目: 国家自然科学基金专项项目(72349001)

收稿日期: 2025-03-03; 网络出版日期: 2025-09-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenghua@rcees.ac.cn

ecological asset stock account (including scope and condition accounts). Using trend analysis methods, we examined the spatiotemporal changes in ecological asset conditions from 2000 to 2020, and employed the geographical detector method to analyze driving factors. The results indicated that in 2000, the ecological asset scope in the Qinling Mountains primarily comprised forests (55.75%), farmland (28.03%), and grassland (14.06%). By 2020, the forest asset area had increased to 60.43%, while farmland and grassland had decreased to 23.78% and 12.51%, respectively, with the Grain-for-Green Program being the primary driver of these changes. The spatial distribution of ecological asset conditions exhibited a pattern of “higher in the central region, lower in the north and south.” From 2000 to 2020, 53.78% of the ecological asset area showed significant or highly significant improvement. However, the conditions of farmland and grassland slightly declined due to factors such as soil fertility loss and landscape fragmentation. In contrast, the conditions of forests, wetlands, urban areas, and bare land improved overall, though their physical, chemical, or functional indicators exhibited localized degradation..Driver analysis showed that natural factors had a strong influence on changes in ecological asset status, with average annual precipitation having the strongest independent explanatory power ($q > 0.35$). Ecological engineering, urbanization, and population density had prominent interactive effects on the ecological asset status of the Qinling Mountains. By constructing a multi-dimensional ecological asset assessment system, this study not only verified the applicability of the SEEA-EA framework in the complex mountainous region, but also revealed the synergistic evolution of ecological assets in terms of “quantity-quality-construction” and its driving mechanism. The results of this study provide a direct basis for the development of differentiated ecological asset management strategies: in the southern part of the Qinling Mountains, precipitation control should be strengthened; in the northern part of the mountains, urban expansion should be strictly controlled; and in the central part of the mountains, the effectiveness of ecological projects should be maintained. The methodological system and technical paths established in this study are important references for ecological asset accounting and management in other ecologically fragile areas in China.

Key Words: ecosystem asset; physical quantity account; ecosystem asset scope; ecosystem asset condition; ecosystem accounting

生态资产^[1]是指在一定时间、空间范围内和技术经济条件下可以给人们带来效益的生态系统,包括森林、草地、湿地、农田等。健康的生态资产和生物多样性是人类福祉与经济发展的重要根基。然而,工业化无序推进、资源过度开采、盲目城市化及不当农业活动,加之传统 GDP 核算体系忽视自然资本消耗和生态系统服务价值,导致生态资产受损,环境问题加剧,威胁可持续发展。为应对这一挑战,联合国《环境经济核算体系—生态系统核算》(System of Environmental-Economic Accounting-Ecosystem Accounting, SEEA-EA)提供了一个框架,将生态系统范围、状况和服务等信息与人类活动及相关受益者(家庭、企业和政府)相结合,以满足可持续发展政策制定的需求^[2]。

SEEA-EA 由联合国统计署于《环境经济核算体系》(SEEA)发展而来^[3],后者与国民经济核算体系(SNA)^[4]相衔接,用以分析环境与经济活动的关系。SEEA 中心框架(SEEA-CF)^[5]于 2012 年发布,主要关注自然资源、环境资产和剩余流量,继而在 2014 年推出《环境经济核算体系—实验性生态系统核算》(SEEA-EA)^[6],整合生物物理信息、衡量生态系统服务、跟踪生态资产变化并关联经济活动,因具有创新性和探索性被标注为“实验性”。2017 年联合国发布《SEEA 实验性生态系统核算—技术建议》^[7],推动了 SEEA-EA 发展。在完善方法与概念后,联合国于 2021 年推出 SEEA-EA^[8]进一步整合了实物量和价值量账户,形成了一套系统的环境经济核算框架。各国已纷纷开展生态资产核算,如澳大利亚建立包括自然资源评估在内的环境经济核算体系^[9],荷兰编制了生态系统物理账户和货币账户^[10],英国发布了 1997—2015 年生态系统服务账户^[11],加拿大统计局核算了农田、森林、湿地的范围^[12]和状况账户^[13],西班牙则探索森林生态资产自动化核算模型^[14]SEEA-EA 框架在许多国家得到应用和发展^[15]。《全球环境经济核算评估报告》显示,全球已有

69个国家实施环境经济核算^[16],但生态系统核算体系仍缺乏统一标准,数据质量、方法一致性等问题仍待解决。

中国生态资产核算始于绿色GDP核算^[17],2013年欧阳志云等提出生态系统生产总值(GEP)^[18]的概念与核算框架,并在多个城市开展试点。针对实物量核算,徐涵秋^[19]提出遥感生态指数(RSEI),结合绿度、热度、湿度、干度等维度评估生态环境质量。2024年,我国发布《生态资产核算技术指南》^[20],提出生态资产综合指数,以评估区域生态资产状况及变化。然而,国内生态资产核算体系指标相对单一,缺少基于SEEA-EA的案例研究,难以全面反映生态资产质量,亦不利于国际对比。

近年来,学者们围绕生态资产核算的应用展开研究。郑华等人^[21]系统阐述GEP核算方法及政策应用,提出了未来对GEP应用的实现途径与展望。邱琼等人全面解读SEEA-EA^[22],并结合中国实际提出发展建议。对生态状况资产的核算多遵守SEEA-EA状况账户体系,并依循核算指南推荐进行指标选择。在全球化背景下,统一概念、构建适合本土的生态资产存量核算体系、开展区域案例研究,将有助于健全生态资产管理制度并推动可持续发展。随着遥感、站点监测及统计数据的积累,生态资产核算在数据可获得性上已具备一定基础。依托SEEA-EA存量账户核算逻辑,结合中国国情和区域特征构建指标体系,有望实现全面、多维的生态资产核算。

对生态资产变化的驱动因素分析多种多样,大致可分为非自然和自然两大类^[23-42]。非自然因素包含城镇化、国内生产总值、夜间灯光、人口密度、耕地边际化、产业结构等,主要与人类活动和经济发展相关,会改变土地利用方式、生态环境及资源压力等,进而影响生态资产状况。自然因素有高程、坡度、坡向、降水、气温、土地利用、蒸散发量、土壤类型、植被类型、风速等,通过影响生态资产分布、等,对生态资产产生作用。依托众多学者的研究,选取适当的驱动因子对生态资产变化进行分析十分重要。

基于此,本研究主要目标与思路如下:首先,依据SEEA-EA国际标准,开发本土化生态资产核算模型,构建范围和状况账户来表征生态资产存量与变化,并选取2000年秦岭地区进行案例研究;其次,结合生态资产变化趋势及区域政策,评估人类活动的方向与强度;最后,采用Theil-Sen趋势分析^[43]和Mann-Kendall检验^[38]识别生态资产显著变化区域,并用地理探测器^[44]解析生态资产状况变化的驱动因素。

1 研究区域

秦岭是我国重要的南北过渡区、气候敏感区和生态脆弱区,位于中部地区,横跨甘肃省、陕西省、河南省、四川省、湖北省和重庆市(图1),土地覆盖方式以森林、农田和草地为主,其面积占比分别为60.42%、23.68%和11.07%,而裸地和水体占比最小,占比均不足0.1%。此外,秦岭地区作为中国关键的生态屏障带与水源涵养区,其生态资产存量的稳定与否对黄河、长江流域生态环境及水资源供给起着举足轻重的作用。鉴于当前气

候变化与人类活动加剧,致使该地区生态屏障功能波动、生态效益下滑,故而对秦岭地区生态资产存量展开时空变化监测及驱动因素剖析极为关键。

2 研究方法及数据来源

SEEA-EA由五个核心账户组成:生态资产范围账户、生态资产状况账户、生态系统服务实物量账户、生态系统服务价值量账户、生态资产价值量账户^[45]。其中,生态资产范围账户和生态资产状况账户共同构成生态资产实物量账户,反映生态资产实物量的范围、组成、空间分布等的存量及其存量变化,是生态系统核算的起点和核心,是实施生态系统核算不可或缺的组成部分。

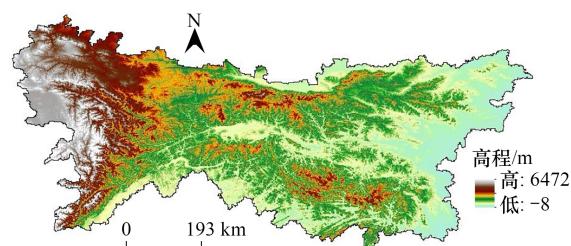


图1 秦岭地区数字高程图

Fig.1 Digital elevation map of the Qinling Mountains region

2.1 生态资产范围账户编制方法及数据来源

生态资产范围账户记录按生态系统类型划分的所有生态资产的面积和变化。根据秦岭地区区域资产特征以及政策实施情况,将生态资产分为六个类别,分别为森林、草地、农田、水体、裸地和城镇;根据生态资产变化方向以及政策实施情况确定范围账户具体会计分录(表 1)。本研究生态资产类型数据来自武汉大学杨杰教授团队制作的中国逐年土地覆盖数据集(<https://doi.org/10.5281/zenodo.8176941>),时间跨度为 2000 年,分辨率 30m。

表 1 秦岭地区生态资产范围账户会计分录

Table 1 Accounting entries for the scope of ecosystem assets in the Qinling region

核算项目 Accounting items	变化方向 Direction of change	核算项目 Accounting items	变化方向 Direction of change
生态工程 Ecological engineering	退耕还林/草 Meadow restoration 草地恢复 Reclaim agricultural land Urbanization	农田-森林/草地 Other-Water body Other-Cropland Other-Township	森林退化 Ecological degradation 草地退化 Wetland degradation 其他 Else
			森林-草地 Water body-Land Other-Cropland
			草地-裸地 Wetland-Land
			水体-草地/裸地

2.2 生态资产状况账户编制方法及数据来源

生态资产状况是指按生态资产的非生物、生物和景观特征来表征生态资产的质量。生态资产状况帐户提供了结构化方法来记录和汇总描述生态资产特征及其变化的数据。采用三步法构建生态资产状况值:

第一步:选择合适变量,根据 SEEA-EA 对特征变量进行选择与分类,变量入选标准:① 关联性(对生态资产的状况变化有科学解释),② 通用性(达成共识的规范性变量),③ 可靠性(指标准确、可靠和可重复),④ 简单性(指标尽可能简单),⑤ 可用性(指标涵盖研究的空间和时间范围)。

依据《SEEA 实验性生态系统核算一技术建议》^[7]、相关文献^[9—15]以及专家建议,选取变量(表 2),生态资产状况指标的数据来自表 2 指标栏右上角的参考文献,并进行归一化处理,计算公式如下;

$$I_i = (V - V_L) / (V_H - V_L) \quad (1)$$

第二步:以生态资产类型为类目,确定适当权重聚合为条件指标,例如算术平均值、面积加权,为了全面评估生态资产,本文选取算术平均值确定权重,计算公式如下;

$$C_i = \sum (I_i \times \frac{1}{k_i}) \quad (2)$$

第三步,可通过应用适当的聚合方法,例如面积加权法,对多个生态资产或多个指标的生态资产状况进行综合核算,本文选取面积加权法确定权重;

$$C = \sum (C_i \times S_i) \quad (3)$$

式中, I_i 为第 i 类生态资产的变量, V 变量现状值, V_L 变量最低值, V_H 变量最高值, C_i 为第 i 类生态资产状况值, k_i 为第 i 类生态资产选取变量个数, C 为生态资产综合状况值, S_i 为第 i 类生态资产面积占比。

2.3 生态资产状况变化驱动力分析方法及数据来源

采用地理探测器法监测生态资产状况变化的主要驱动因素。该方法能够揭示各因子对现象的解释驱动能力,有因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器和生态探测器等四个模块^[44]。本文运用因子探测器以及交互作用探测器两个模块,对秦岭生态资产状况值变化进行驱动力分析。

因子探测器,主要通过 q 值来衡量自变量(驱动因子)对因变量(状况值)。 q 值介于 0—1 之间, q 值越大,表明自变量对因变量的影响越强,反之影响越弱。其计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

表 2 秦岭地区生态资产状况值指标及其数据来源

Table 2 Condition indicators of ecosystem assets and their data sources in the Qinling region

类型 Typology	类别 Form	指标 Indicator	指标解释 Interpretation of indicators	权重 Weights
森林 Forest	非生物	物理	土壤含水量 ^[14]	指土壤中所含水分的数量, 表征土壤水分状况
	生物	组成	林龄 ^[6]	是森林资源调查和森林经营管理的重要指标
		结构	NDVI ^[6]	即归一化植被指数, 表征植被健康程度
农田 Corpland	非生物	功能	NPP ^[13]	即净初级生产力, 表征生态系统生产力
		景观	平均斑块面积 ^[46]	斑块面积/斑块个数, 表征景观破碎化程度
		物理	土壤含水量 ^[14]	指土壤中所含水分的数量, 表征土壤水分状况
草地 Glasslands	生物	化学	TN ^[47]	指土壤中以有机化合物形态存在的氮素, 表征土壤肥力
		结构	NDVI ^[6]	即归一化植被指数, 表征植被健康程度
		功能	NPP ^[13]	即净初级生产力, 表征生态系统生产力
裸地 Bare	景观	景观	平均斑块面积 ^[46]	斑块面积/斑块个数, 表征景观破碎化程度
		物理	土壤含水量 ^[14]	指土壤中所含水分的数量, 表征土壤水分状况
		化学	TN ^[47]	指土壤中以有机化合物形态存在的氮素, 表征土壤肥力
城镇 Urban	生物	结构	NDVI ^[6]	即归一化植被指数, 表征植被健康程度
		功能	NPP ^[13]	即净初级生产力, 表征生态系统生产力
		景观	平均斑块面积 ^[46]	斑块面积/斑块个数, 表征景观破碎化程度
水体 Water	非生物	物理	不透水面 ^[48]	不透水面扩张率, 表征城市建设活动的活跃程度
		化学	臭氧 ^[49]	平流层臭氧浓度, 表征空气质量
		生物	性别比 ^[50]	反映地区人口在性别维度上的分布状态, 表征人口结构
水体 Water	景观	功能	就业率 ^[50]	就业人口/劳动年龄人口, 表征劳动力市场利用程度
		物理	透明度 ^[51]	反映了湿地中杂质对光线透过的阻碍程度, 表征水质
		化学	PH ^[52]	水的酸碱度, 表征水质
	景观	景观	平均斑块面积 ^[46]	斑块面积/斑块个数, 表征景观破碎化程度

NDVI: 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; NPP: 净初级生产力 Net Primary Productivity; TN: 总氮 Total Nitrogen; PH: 酸碱度 Pondus Hydrogenii

式中, $h=1, 2, \dots, L$ 为因变量 Y 和自变量 X 的分类数; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别为不同分级的区域和全区域内的方差。

交互探测器, 揭示两个因子在影响因变量 Y 方面的交互作用, 探究不同因素相互作用下对状况值的驱动効力, 不同 q 值范围对应的交互作用分为 5 种类型^[44]。

根据秦岭地区在核算周期内生态资产变化方向以及区域实施政策的考虑, 本文选取政策(生态工程、农田开垦、城镇化)、经济(人口密度、夜间灯光指数)、自然(年均降水、年均气温)等(表 3)共 7 种典型驱动因子作为自变量 X , 研究区状况值作为因变量 Y , 探究 2000 年秦岭地区生态资产状况值变化的驱动机制。7 种驱动因子的数据来自表 3 驱动因子栏右上角的参考文献。

3 结果与分析

3.1 秦岭地区生态资产范围账户及变化

2000 年秦岭地区生态资产范围账户主要包括农田(28.03%)、森林(55.75%)、草地(14.06%)、水体

(0.63%)、裸地(0.07%)和城镇(1.46%)(表4)。2000—2020年,秦岭地区生态资产发生突出变化,具体表现为:农田和草地分别减少4.25%、1.55%,森林增加4.68%,湿地和城镇分别增加0.26%和0.93%(表4)。

表3 秦岭地区生态资产状况变化驱动因子及数据来源

Table 3 Driving factors of ecosystem asset condition changes and their data sources in the Qinling region

	驱动因子 Driving factor		指标解释 Interpretation of indicators
政策因子 Policy factor	生态工程 ^[46]	X1	生态工程(退耕还林/草等)政策对状况值的驱动作用
	农田开垦 ^[46]	X2	农田开垦对状况值的驱动作用
	城镇化 ^[50]	X3	城镇化政策对状况值的驱动作用
经济因子 Economic factor	人口密度 ^[53]	X4	人口分布疏密程度对状况值的驱动作用
	夜间灯光指数 ^[54]	X5	经济发展状况对状况值的驱动作用
自然因子 Natural factor	降水 ^[55]	X6	年均降水情况对状况值的驱动作用
	气温 ^[55]	X7	年均气温情况对状况值的驱动作用

表4 秦岭地区生态资产范围账户

Table 4 Extent account of ecosystem assets in the Qinling region

会计分录 Accounting entries	生态资产类型 Stylized ecosystem types					
	农田/hm ²	森林/hm ²	草地/hm ²	水体/hm ²	裸地/hm ²	城镇/hm ²
期初范围 Opening extent	107751	214288	54033	2407	283	5591
范围的增加 Additions to extent	9677	24006	4416	1449	212	3967
生态工程 Ecological engineering	0	18493	3517	1100	0	0
农田开垦 Land reclamation	9677	0	0	0	0	0
城镇化 Urbanization	0	0	0	0	0	3967
生态退化 Ecological degradation	0	0	899	0	209	0
其他 Else	0	5513	0	349	3	0
范围的减少 Reduction to extent	26398	6043	10376	441	91	378
生态工程 Ecological engineering	22700	0	321	0	89	0
农田开垦 Land reclamation	0	5180	4310	140	0	47
城镇化 Urbanization	3696	106	79	84	2	0
生态退化 Ecological degradation	0	738	181	189	0	0
其他 Else	2	19	5485	28	0	331
范围的净变化 Net change in extent	-16721	17963	-5960	1008	121	3589
期末范围 Closing extent	91030	232251	48073	3415	404	9180

导致生态资产范围账户变化的主要原因包括:退耕还林/还草、湿地恢复、草地恢复等生态工程实施贡献了生态资产范围账户变化的52.85%,其中退耕还林政策使森林生态资产范围账户增加8.63%,主要增加在秦岭中南部;农田开垦贡献了生态资产范围账户变化的22.13%,主要发生在甘肃南部;城镇化贡献了生态资产范围账户变化的9.07%,主要发生在西安市、郑州市及其周边地区。同时也发现局部地区存在生态退化现象(2.53%),主要发生在甘南、阿坝一带(图2)。

3.2 秦岭地区生态资产状况账户及变化

秦岭地区总状况值呈现逐年升高的趋势,分别为2000年(0.571)、2005年(0.582)、2010年(0.584)、2015年(0.587)和2020年(0.599)。2000年期间,秦岭地区农田和草地生态资产状况略有下降,分别是-0.07和-0.019,但森林、湿地、城镇以及裸地生态资产状况整体提升(表5)。

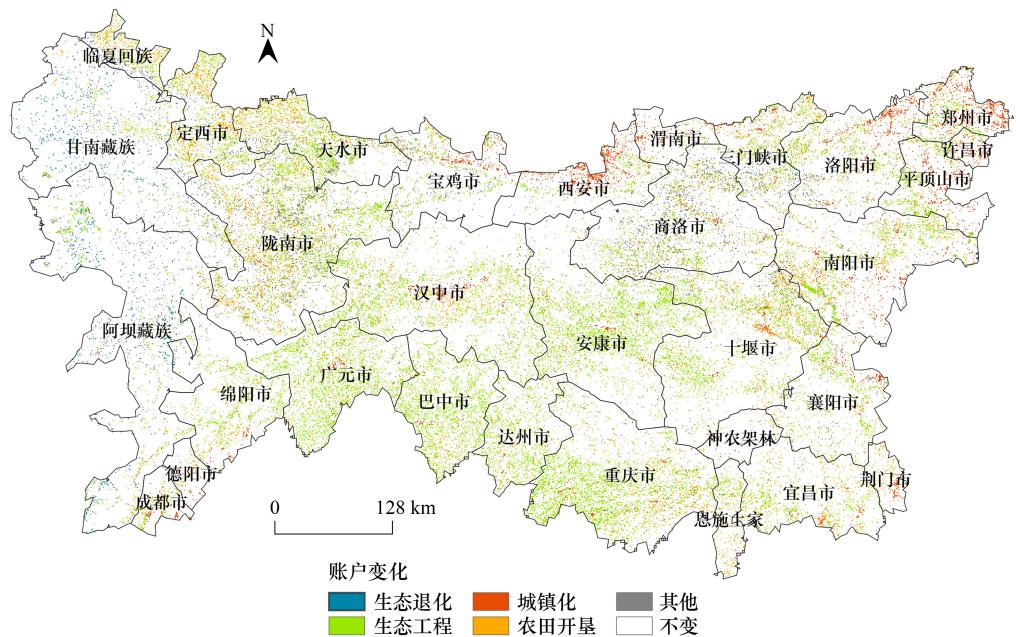


图2 秦岭地区2000—2020年生态资产范围账户变化空间格局

Fig.2 Spatial changes of ecosystem asset extent in the Qinling Region from 2000 to 2020

表5 秦岭地区生态资产状况账户

Table 5 Condition account of ecosystem assets in the Qinling region

会计分录 Accounting entries	生态资产类型 Stylized ecosystem types					
	农田	森林	草地	湿地	裸地	城镇
期初状况值 Opening condition value	0.612	0.600	0.631	0.683	0.562	0.600
非生物生态系统特征变化 Change in abiotic ecosystem characteristics	-0.006	0.004	0.001	0.033	0.025	-0.020
物理特征 Physical state	-0.005	0.004	0.002	0.007	0.027	0.008
化学特征 Chemical state	-0.001		-0.001	0.026	-0.002	-0.028
生物生态系统特征变化 Change in biotic ecosystem characteristics	0.032	0.023	0.016		0.012	-0.002
组成特征 Composition state	0.008	0.000				0.013
结构特征 Structure state	0.024	0.006	0.008		0.004	
功能特征 Function state		0.017	0.008		0.008	-0.015
景观生态系统特征变化 Change in landscape characteristics	-0.033	0.029	-0.019	0.028	0.010	0.038
景观特征 Landscape state	-0.033	0.029	-0.019	0.028	0.010	0.038
状况值净变化 Net change in condition	-0.007	0.056	-0.003	0.061	0.047	0.016
期末状况值 Closing condition value	0.605	0.656	0.628	0.745	0.609	0.616

为了对生态资产状况值进行定量描述,将状况值分为优(0.7—0.8)、良(0.6—0.7)、中(0.5—0.6)、劣(0—0.5)四个等级(图3)。2020年农田(占比43.5%)、森林(占比79.3%)主要类型为中,分别分布在秦岭东部的河南南阳盆地以及西部甘肃陇南的徽成盆地、秦岭中部太白山周边、西部甘肃陇南的白水江自然保护区等高山林区,以及南部汉中的留坝县和佛坪县等地;此外,草地(占比64.1%)主要为良,分布在秦岭东部河南洛阳南部以及西部甘南州、阿坝州部分地区;城镇基本为优。

2000年间,不同生态资产状况表现有所差别(图4)。农田生态资产状况值以不显著降低(占比41.75%)为主要趋势,生物特征指标上升(表5)但景观和非生物指标下降,导致农田生态资产状况下降,下降区域主要分布在汉中和河南境内;草地生态资产状况值变化以不显著降低(占比41.76%)为主,主要是景观指标和化学指标下降(表5),下降区域主要分布在甘南和阿坝区域;相反,森林生态资产状况值主要呈显著提高(占比

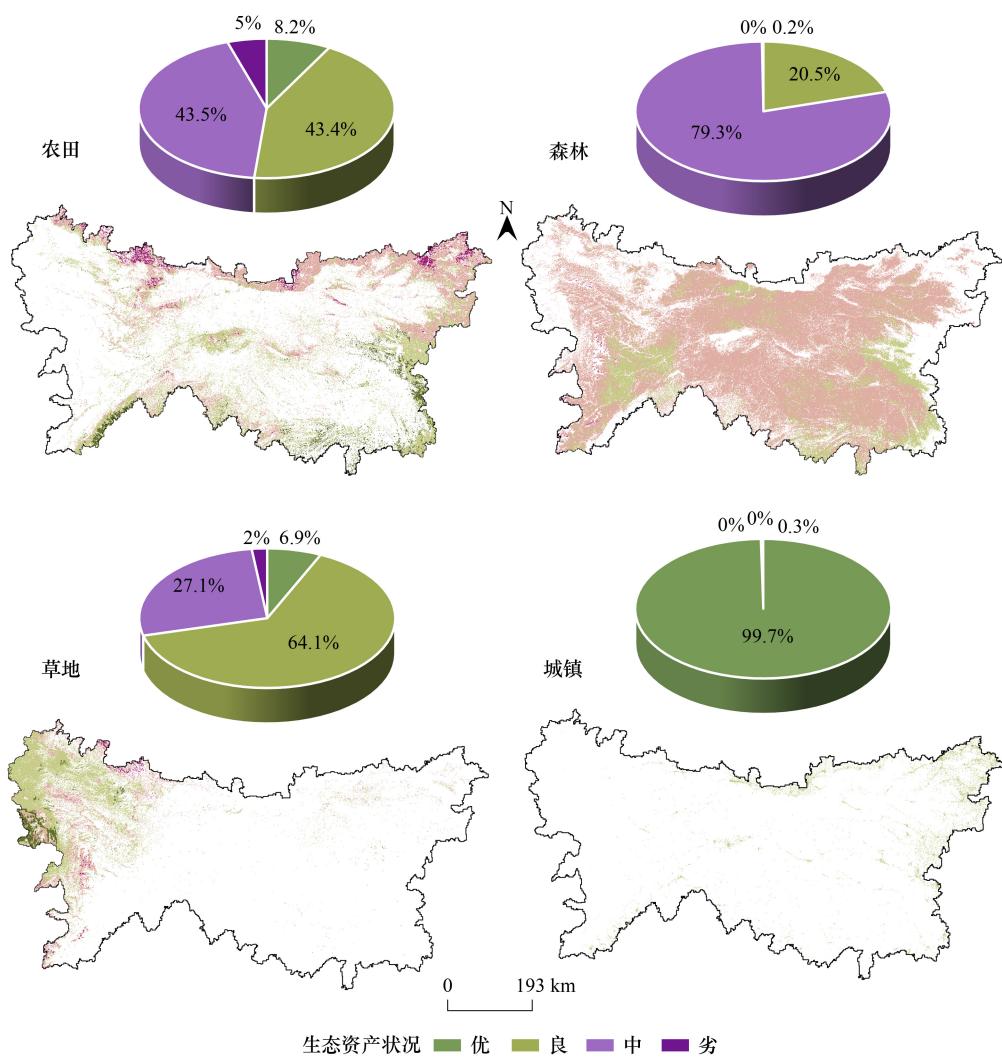


图3 秦岭地区 2020 年主要生态资产分布及占比情况统计

Fig.3 Statistics on the distribution and share of major ecological assets in the Qinling region in 2020 (2020)

62.08%) 和较显著提高(占比 19.28%)趋势,集中在秦岭中部太白山周边、西部白水江自然保护区等区域。

尽管森林、湿地、城镇生态资产状况整体在提升,但部分状况指标也呈现下降趋势,如城镇生态资产的化学与功能特征仍呈现出下降趋势(表 5),裸地生态资产的化学特征也呈现出下降趋势(表 5);森林物理指标土壤含水量在西安南部以及四川北部一带呈下降趋势,功能指标 NPP 也在阿坝中南部呈现下降趋势。

3.3 生态资产状况变化驱动因素

3.3.1 单因素对生态资产状况的影响

自然因子(年均降水、年均气温)和人类活动因子(农田开垦、生态工程、人口密度、夜间灯光指数和城镇化)对不同生态资产状况的影响不同(图 5)。综合来看,各驱动因子影响力排名为:X6(年均降水)>X2(农田开垦)>X1(生态工程)>X4(人口密度)>X5(夜间灯光指数)>X3(城镇化)>X7(年均气温),但在不同生态资产类型中表现不同。自然因子中年均降水对农田、森林、草地等生态资产状况影响最大,生态工程和农田开垦很大程度上影响了森林和草地生态资产状况,城镇化对农田生态资产状况产生突出影响。

3.3.2 多因素对生态资产状况的影响

多因素对生态资产状况产生交互影响,表现出非线性增强或双因子增强(图 6),意味着两个因子的交互作用效果优于各自单独作用的效果。

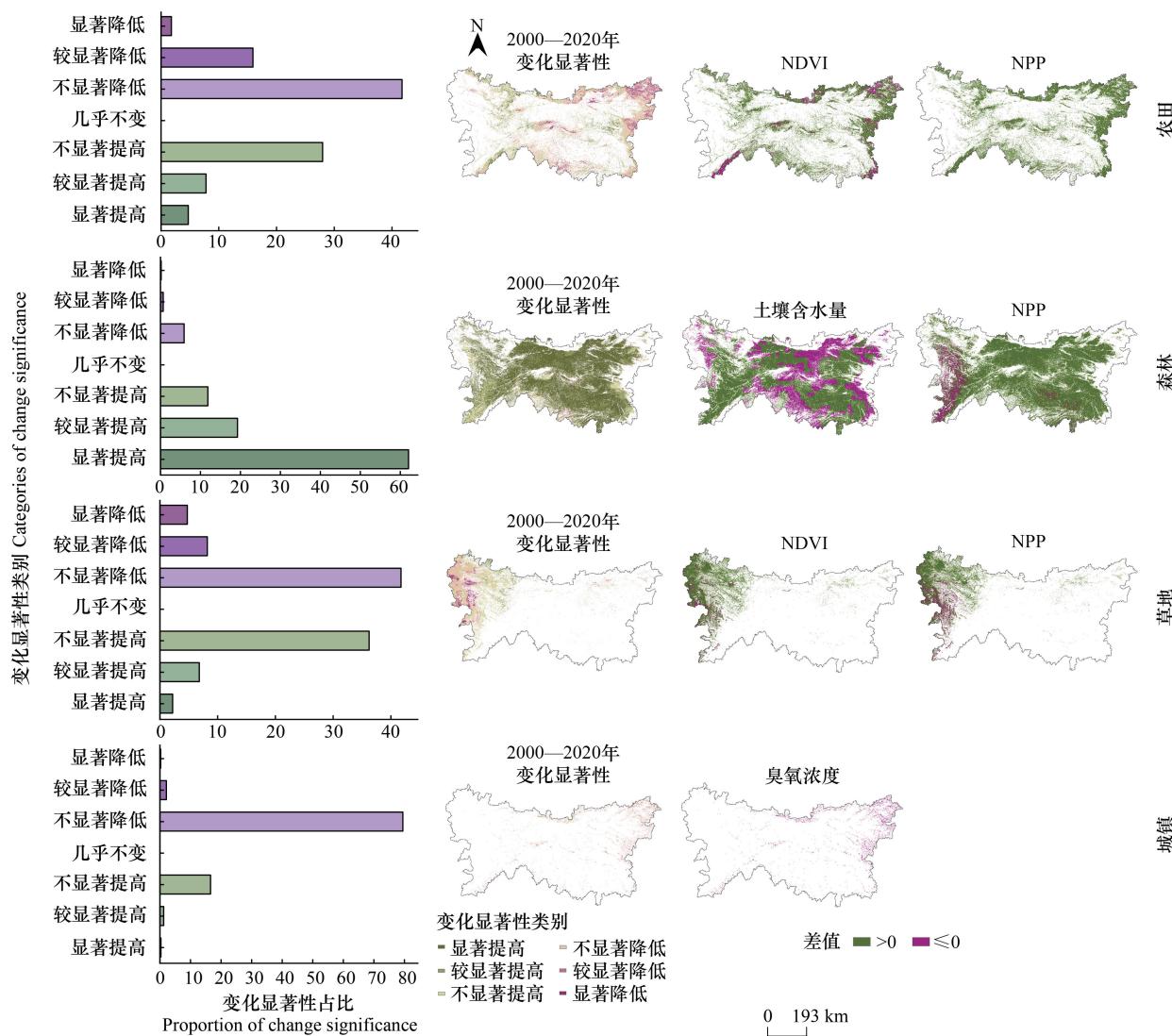


图4 秦岭地区主要生态资产状况值及其指标空间变化

Fig.4 Condition value and its indicator changes of major ecosystem assets in the Qinling region

总的来看,对于全部生态资产,年均降水与其他因子交互作用影响最强。具体而言,农田生态资产状况变化主要受到年均降水与城镇化的交互影响;而水体生态资产状况变化主要受到年均降水与人口密度的交互影响;森林、草地、裸地和城镇生态系统中,年均降水和生态工程交互作用最为明显。

4 讨论

本研究基于 SEEA-EA 框架,构建秦岭地区生态资产存量账户,系统分析了 2000—2020 年生态资产实物量账户变化特征及其驱动因素。

在范围账户方面,森林和城镇面积增加,而农田和草地面积减少,尤其是农田向森林的转化尤为显著。这一趋势与秦岭地区实施的一系列生态工程密切相关,如退耕还林^[56]、三北防护林建设^[57]等政策有效促进了森林面积增长。同时,城镇化进程的加快^[58],使得城镇建设用地需求上升,导致城镇面积扩张。

在状况账户方面,秦岭地区生态资产状况呈现“中部较优,南北较低”的分布格局。农田和草地生态状况下降,以河南部分传统农业大县为例,土地过度利用^[59]导致土壤肥力下降、水分减少。此外,退耕还林可能引发斑块破碎化问题^[60],影响生态系统的稳定性。在甘南、阿坝等牧区,过度放牧加剧了草地退化,使土壤贫

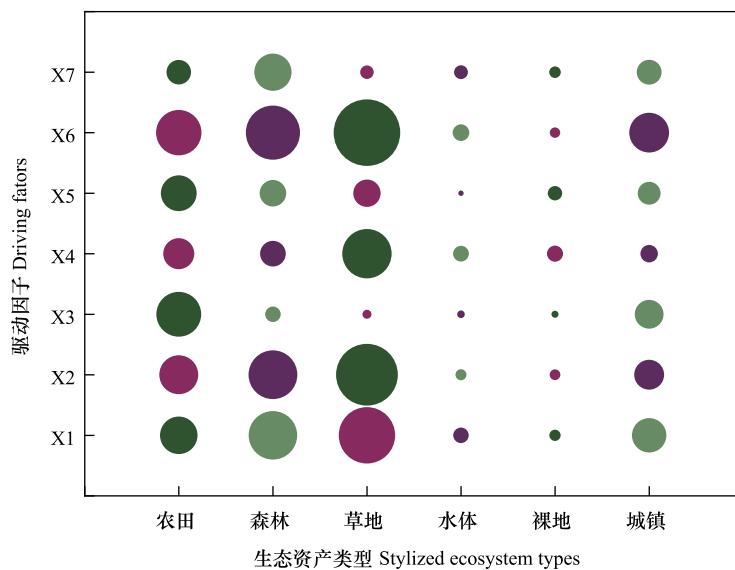


图 5 秦岭地区 2000—2020 年生态资产状况值变化单因子探测结果

Fig.5 Results of single-factor detection for the change of ecosystem asset condition in the Qinling region from 2000 to 2020

X1:生态工程;X2:农田开垦;X3:城镇化;X4:人口密度;X5:夜间灯光指数;X6:年均降水;X7:年均气温

瘠、斑块破碎,影响化学和景观指标。而森林、水体、城镇和裸地生态资产状况在合理保护下有所优化,表明环境保护政策在提升生态系统质量方面发挥了积极作用。

在驱动因素方面,通过趋势分析和地理探测器等方法研究发现,不同驱动因素对各类生态资产状况影响各异。年均降水对农田、森林、草地等生态资产状况影响最大;生态工程和农田开垦显著影响森林和草地生态资产;城镇化对农田生态资产影响突出。在双因素交互作用方面,不同因子交互均呈现非线性增强或双因子增强,其中年均降水与其他因子的交互作用影响最强。具体而言,农田生态资产状况变化主要受城镇化与年均降水交互影响;水体生态资产受人口密度与年均降水交互作用主导;森林、草地、裸地和城镇生态系统则主要受生态工程和年均降水的交互影响。这些结果表明,秦岭地区生态系统状况值的变化是多种驱动因子相互协同作用的结果。与既有研究相比,本研究结果在一定程度上得到了验证。已有研究表明,生态工程^[61–62]、农田开垦^[63]、城镇化扩张^[64–65]、社会因素(如人口密度、夜间灯光指数)^[66]、气候因子(降水、气温)^[67–68]等均会对生态资产状况产生影响,这与本研究的发现基本一致。

与既有研究相比,本研究在多个方面展现出独特之处,为生态资产核算领域提供了新的思路和方法。论文采用 SEEA-EA 框架,针对秦岭地区生态资产实物量账户变化特征及驱动因素开展研究,创新点主要体现在:

(1)本研究克服生态资产单一维度评估局限,基于 SEEA-EA 框架构建了包含范围账户与状况账户的多维度生态资产核算体系。通过融合生物物理指标、化学指标和景观格局指标,系统揭示了秦岭生态资产“量-质-构”协同演变规律,为复杂山地生态系统提供了“空间分布-质量状况-景观结构”三位一体的全评估范式,提升了生态资产核算结果的系统性和完整性。

(2)本研究建立了生态资产变化“驱动机制解析-政策响应映射”的研究路径。通过地理探测器量化自然与人文因子的交互效应,发现生态工程与降水的协同作用($q=0.42$)是森林质量提升的关键机制,而城镇化与降水交互则导致农田退化,这种基于驱动因子空间异质性提出的“南调水-北控城-中维工”分区管理策略,实现了从科学认知到政策制定的精准转化,为生态脆弱区可持续发展提供了决策支持框架。本研究在理论层面,提供了国内基于 SEEA-EA 框架的生态资产核算典型案例,丰富了生态资产核算的实践经验,有助于推动国内生态系统核算体系与国际接轨,进一步完善相关理论与方法。在实践层面,研究结果为秦岭地区生态保

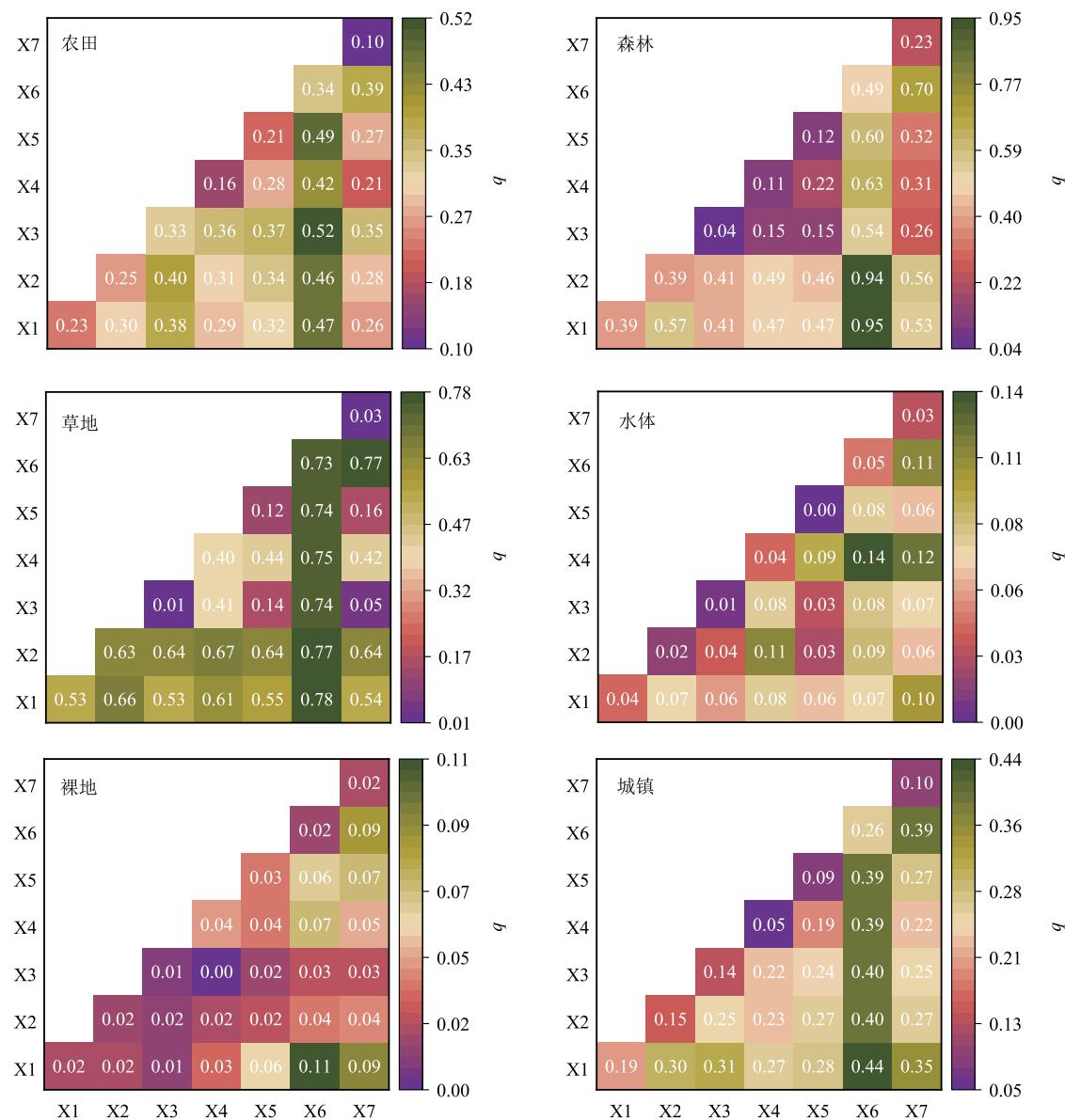


图 6 秦岭地区 2000—2020 年生态资产状况值变化双因子探测结果

Fig.6 Results of two-factor detection for the changes of ecosystem asset condition in the Qinling region from 2000 to 2020

护政策的制定、调整和评估提供了科学依据。政府部门可依据研究结论,优化生态工程规划、合理调整土地利用政策、科学引导城镇化进程,以在促进经济发展的同时,保障区域生态安全。此外,本研究成果对其他生态脆弱地区的生态资产核算和生态保护工作也具有重要的借鉴意义。

尽管本研究取得了一定成果,但仍存在一些不足之处。在数据精度方面,虽然综合运用了遥感、监测站点和统计数据,但部分数据的时间分辨率和空间分辨率仍有待提高。例如,气象数据的站点分布不均,可能导致对局部生态资产状况值的精确计算;复杂地形区域的遥感数据精度受限,可能导致生态系统状况的识别误差。在指标权重确定方面,本研究在构建生态资产状况账户时,部分指标权重采用了相对简单的方法,可能无法充分反映各指标对生态资产状况的实际影响。未来研究可尝试运用更科学的方法,如层次分析法(AHP)、主成分分析法(PCA)等,以提高核算结果的准确性和合理性。驱动因素解析方面,本研究主要关注了政策、社会经济和气候因素,但生态系统变化受多种复杂因素共同作用,未来研究可进一步纳入土壤质地、地形地貌、生物多样性等变量,以更加全面地揭示生态资产变化的驱动机制,为生态保护和管理提供更精准的决策支持。

本研究基于 SEEA-EA 框架,对秦岭地区生态资产实物量账户的变化特征及驱动力进行了深入分析,在理论和实践方面均取得了一定进展。未来研究可进一步优化核算精度、完善指标体系,并拓展更多生态因子的影响分析,以推动生态资产核算体系的完善,为区域生态安全与可持续发展提供更科学的支撑。

参考文献(References) :

- [1] 欧阳志云, 郑华, 谢高地, 杨武, 刘桂环, 石英华, 杨多贵. 生态资产、生态补偿及生态文明科技贡献核算理论与技术. 生态学报, 2016, 36(22): 7136-7139.
- [2] Mäler K G, Aniyar S, Jansson A. Accounting for ecosystem services as a way to understand the requirements for sustainable development. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(28): 9501-9506.
- [3] United Nations. Handbook of National Accounting: Integrated Environmental and Economic Accounting1993 Temporary Version. New York : United Nations, 1993, 27-101.
- [4] European Commission, International Monetary Fund, Organization for Economic Co-operation and Development, et al. System of national accounts 2008. New York : United Nations, 2009, 19-158.
- [5] United Nations, European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations. System of environmental-economic accounting 2012 central framework (SEEA central framework). New York : United Nations, 2014.
- [6] United Nations, European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations, et al. System of Environmental-Economic Accounting 2012 Experimental Ecosystem Accounting (SEEA Experimental Ecosystem Accounting). New York : United Nations, 2014, 192-287.
- [7] United Nations. Technical Recommendations in Support of the System of EnvironmentalEconomic Accounting 2012 Experimental Ecosystem Accounting (White Cover Publication, Pre-Edited Text Subject to Official Editing). New York : United Nations, 2017, 76-115.
- [8] United Nations. System of environmental-economic accounting ecosystem accounting(SEEA EA). New York : United Nations, 2021, 3-207.
- [9] Canberra : Australian Bureau of Statistics, Commonwealth of Australia. Australian Environmental-Economic Accounts 2014. 92.
- [10] Remme R P, Edens B, Schröter M, Hein L. Monetary accounting of ecosystem services: a test case for Limburg Province, the Netherlands. Ecological Economics, 2015, 112: 116-128.
- [11] ONS. 2018. UK Natural Capital: Ecosystem Service Accounts, 1997 to 2015. Office for National Statistics and Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra), 23.
- [12] Statistics Canada. Table 38-10-0165-01 Agroecosystem extent. <https://doi.org/10.25318/3810016501-eng>.
- [13] Statistics Canada. Table 38-10-0164-01 Agroecosystem condition account. <https://doi.org/10.25318/3810016401-eng>.
- [14] Bruzón A G, Arrogante-Funes P, Santos-Martín F. Modelling and testing forest ecosystems condition account. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118676.
- [15] WAVES. 2017. Annual Report 2017. International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Washington, 60 pp.
- [16] Statistical Commission. 2018. "Global Assessment of Environmental-Economic Accounting and Supporting Statistics." <https://seea.un.org/content/global-assessment-environmental-economic-accounting>
- [17] 於方, 王金南, 曹东, 蒋洪强. 中国环境经济核算技术指南. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [18] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 徐卫华, 郑华, 张琰, 肖燚. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. 生态学报, 2013, 33 (21): 6747-6761.
- [19] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [20] 生态系统评估 陆地生态资产核算技术指南. GB/T 43677—2024. 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2024.
- [21] Zheng H, Wu T, Ouyang Z Y, Polasky S, Ruckelshaus M, Wang L J, Xiao Y, Gao X L, Li C, Daily G C. Gross ecosystem product (GEP): quantifying nature for environmental and economic policy innovation. Ambio, 2023, 52(12): 1952-1967.
- [22] 邱琼, 施涵. 基于 SEEA EA 的中国生态系统核算改进. 中国国土资源经济, 2023, 36(11): 4-15.
- [23] 丁则准, 马杰, 王旭 & 张志. 基于改进型遥感生态指数探究赣州市生态环境质量及其与城镇化关系. 华中师范大学学报(自然科学版), 2024, 58(06): 720-730.
- [24] Sukopp H, Weiler S. Biotope mapping and natureconservation strategies in urban area of the Federal Republicof Germany. Landscape and Urban Planning, 1988, (15): 39-58.
- [25] Jeffery D K, Alissa M, Ralph J A. Integrating urbanizationinto landscape-level ecological assessmentsJ. Ecosystem, 2001, (04): 3-18.
- [26] 黄金川, 方创琳, 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. 地理研究, 2003, 22(2): 211-220.
- [27] 宋学峰, 刘耀彬. 基于 SD 的江苏省城市化与生态环境耦合发展情景分析. 系统工程理论与实践, 2006(3): 124-131.
- [28] 乔标, 方创琳. 城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用. 生态学报, 2005, 25(11): 3003-3009.
- [29] 李静, 李雪铭. 大连市城市化与城市生态环境发展协调性评价与分析. 现代城市研究, 2008(02): 29-35.
- [30] 王新杰, 薛东前. 西安市城市化与生态环境协调发展模式演化分析. 自然资源学报, 2009, 24(08): 1378-1385.
- [31] 崔利芳, 任学慧. 青岛市城市化与生态环境发展协调性的定量评价. 云南地理环境研究, 2010, 22(04): 77-81.
- [32] 潘占冬, 王轶夫, 王可月, 等. 基于改进型遥感生态指数的将乐县生态质量评估及驱动分析. 环境科学, 1-18.
- [33] 曾浩, 邓宏兵. 武汉市城市化与生态环境协调发展定量评价与分析. 华中师范大学学报(自然科学版), 2012, 46(05): 611-615.
- [34] Nana Liu, Chuanzhe Liu, Yufei Xia, Bowen Da. Examining the coordination between urbanization and ecoenvironment using coupling and spatial

- analyses: a case study in China. *Ecological Indicators*, 2018, 93:1163-1175.
- [35] 权文婷,周辉,王卫东,张煦庭,赵青兰,王旭东 & 陈军.2000—2023年关中平原城市群生态环境质量动态特征.水土保持研究,2025,32(01):336-346+357.
- [36] 汤从沧,李巧,陶洪飞,马合木江·艾合买提,穆振侠 & 姜有为.基于改进遥感生态指数模型的塔里木河流域生态环境质量评价.环境科学,2025,46(07):4485-4498.
- [37] 赵娜,王冰,王子昊 & 张秋良.基于遥感生态指数的内蒙古生态环境质量时空演化及生态管理分区.环境科学,2025,46(07):4499-4509.
- [38] 张京新,谷雨鑫,沈佳琦,张明琦,丛铭,孙燕 & 杨利伟.黄河流域生态环境质量时空变化及驱动因素分析.环境科学,2025,46(02):956-971.
- [39] 李旭,吴秀芹,刘亚楠 & 董贵华.2000—2020年西南高山峡谷耕地边际化及生态效应.农业资源与环境学报,2025,42(04):855-865.
- [40] 陈兵兵,盖迎春,宋忠航,吴向楠,艾宇,杨映,王生堂,刘宇烁.祁连山地区生态质量时空变化及驱动力.中国沙漠,2024,44(06):258-267.
- [41] 万荣山,于慧,王瀚婕,金秋雨,马艳霞 & 刘梦君.地震扰动下四川省九寨沟县生态质量的时空变化及影响因素.应用生态学报,2024,35(08):2035-2043.
- [42] 李胤,王玉军,宋珂,詹雅婷 & 杨礼平.基于遥感生态指数与地理探测器的长江干流岸带(江苏段)2000—2020年生态质量时空变化及其驱动因子分析.遥感技术与应用,2024,39(06):1478-1489.
- [43] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63 (324): 1379-1389.
- [44] 陈康,尹海伟,孔繁花,沈舟,孙辉,苏杰 & 盖振宇.基于资源型城市分区比较的黄河流域生态环境质量时空变化及驱动力分析.生态学报,2025,(18):1-12.
- [45] 谷越,马晓君,赵雪.环境经济核算体系(SEEA):框架结构与账户体系.调研世界,2023(04):53-63.
- [46] Yang, J. and Huang, X.: The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 3907—3925, <https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021>, 2021.
- [47] Shangguan W, Dai Y J, Liu B Y, Zhu A X, Duan Q Y, Wu L Z, Ji D Y, Ye A Z, Yuan H, Zhang Q, Chen D D, Chen M, Chu J T, Dou Y J, Guo J X, Li H Q, Li J J, Liang L, Liang X, Liu H P, Liu S Y, Miao C Y, Zhang Y Z. A China data set of soil properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(2): 212-224.
- [48] Gong P, Li X C, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Liu X P, Xu B, Yang J, Zhang W, Zhou Y Y. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111510.
- [49] Wei J, Li Z Q, Li K, Dickerson R R, Pinker R T, Wang J, Liu X, Sun L, Xue W H, Cribb M. Full-coverage mapping and spatiotemporal variations of ground-level ozone (O₃) pollution from 2013 to 2020 across China. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 270: 112775.
- [50] 国家统计局.(2020).中国统计年鉴2020.北京:中国统计出版社.
- [51] Chen X D, Liu L Y, Zhang X, Li J S, Wang S L, Gao Y, Mi J. Long-term water clarity patterns of lakes across China using Landsat series imagery from 1985 to 2020. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(13): 3517-3536.
- [52] Lin J Y, Wang P, Wang J Z, Zhou Y P, Zhou X D, Yang P, Zhang H, Cai Y P, Yang Z F. An extensive spatiotemporal water quality dataset covering four decades (1980—2022) in China. *Earth System Science Data*, 2024, 16(2): 1137-1149.
- [53] Liu L L, Cao X, Li S J, Jie N. A 31-year (1990—2020) global gridded population dataset generated by cluster analysis and statistical learning. *Scientific Data*, 2024, 11(1): 124.
- [54] Wu Y Z, Shi K F, Chen Z Q, Liu S R, Chang Z J. Developing improved time-series DMSP-OLS-like data (1992—2019) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 4407714.
- [55] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, Chen Y M, Cao Y, Ren J Y. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011—2100. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 183-194.
- [56] 孙亮.秦巴山区退耕还林效益评价研究述评.陕西林业科技,2020, 48(02): 107-110.
- [57] 朱教君,郑晓.关于三北防护林体系建设的思考与展望——基于40年建设综合评估结果.生态学杂志,2019, 38(05): 1600-1610.
- [58] 周红,方健雯.城镇化的内涵及指标体系研究综述.当代经济,2015, 32(14): 40-43.
- [59] 董秀茹,石水莲,王秋兵.土地集约利用与生态环境的辩证关系研讨.水土保持应用技术,2006,(03): 33-34.
- [60] Baral H, Keenan R J, Sharma S K, Stork N E, Kasel S. Spatial assessment and mapping of biodiversity and conservation priorities in a heavily modified and fragmented production landscape in north-central Victoria, Australia. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 552-562.
- [61] 李益敏,李盈盈,刘师旖,吴博闻,赵娟珍.基于退耕还林工程的生态环境质量动态变化研究——以云南兰坪县为例.环境工程技术学报,2023, 13(01): 359-367.
- [62] Zhang Y, Zheng H, Chen X D. Effects of ecological restoration projects on ecosystem services flows. *Ecosystem Services*, 2024, 70: 101681.
- [63] 张凤华,潘旭东,李玉义.新疆玛河流域绿洲农田开垦后土壤环境演变分析.中国农业科学,2006, 39(02): 331-336.
- [64] Huang Y, Zhang S D, Zhang J, Fan F F, Zheng H. Exploration of ecosystem asset-economy coupling coordination and its endogenous and exogenous drivers in mountainous regions. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 486: 144460.
- [65] 刘巧婧,王莉红.城市化与生态环境耦合协调关系研究——以杭州市为例.环境科学学报,2018, 38(10): 4214-4222.
- [66] 赵晓燕,李永平,谈树成,刘立冰 & 刘飞鹏.成渝双城经济圈生态环境质量时空演变格局及驱动力分析.生态学报,2025,45(01):319-333.
- [67] 罗旭,王丽霞,张晶,杨耘 & 刘招.秦岭地区生态环境质量时空变化及驱动力分析.环境科学,2025,46(06):3720-3729.
- [68] 王经宇,杨丽萍,王美,李凯旋,杨佳佳,姚嘉琦.陕北黄土高原生态环境质量时空变化监测及驱动力分析.环境科学,2025,46(07):4522-4533.