

DOI: 10.20103/j.stxb.202405171132

张朝辉, 李雅杰. 区域生态系统服务耦合态势及其驱动力——基于 GeoDetector 和 fsQCA 集成分析. 生态学报, 2025, 45(8): 3849-3861.

Zhang Z H, Li Y J. A study of coupled dynamics of regional ecosystem services and its driving forces using GeoDetector and fsQCA integrated analysis. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3849-3861.

区域生态系统服务耦合态势及其驱动力 ——基于 GeoDetector 和 fsQCA 集成分析

张朝辉, 李雅杰 *

石河子大学经济与管理学院, 石河子 832000

摘要: 生态系统服务耦合对于经济-社会-环境协同演化具有重要意义。以新疆和田地区为例, 基于 InVEST 模型、耦合协调度模型及地理探测器模型 (GeoDetector)、模糊集定性比较分析 (fsQCA) 方法, 评估 2020 年碳储存、土壤保持、水源涵养、生境支持 4 种关键生态系统服务价值并探讨耦合态势, 探究实现服务耦合的驱动因子及驱动机制。研究发现: (1) 生态系统服务耦合协调程度整体较低, 基于差异性土地利用方式和程度呈现空间异质性特征; (2) GeoDetector 模型证明单一主导因子温度、降雨、地形起伏度以及牲畜规模, 并发现因子两两交互存在增强作用; (3) fsQCA 分析发现存在 5 条有效多元条件组态, “自然因子主导型” “人文因子主导型” “自然人文因子联合主导型” 3 类差异化组态路径揭示 6 个前因变量的异质性组合充分实现生态系统服务的耦合。GeoDetector 和 fsQCA 方法的结合为生态系统服务驱动力解析提供一个全面而创新的视角, 根据研究成果, 生态系统服务的科学管理不仅要关注单因子主导和双因子交互作用, 还应考虑多维因子的综合效应, 以推动耦合持续优化、实现生态系统可持续发展。

关键词: 生态系统服务; 耦合态势; 驱动力; 地理探测器; 模糊集定性比较分析

A study of coupled dynamics of regional ecosystem services and its driving forces using GeoDetector and fsQCA integrated analysis

ZHANG Zhaohui, LI Yajie *

Faculty of Economics and Management, Shihezi University, Shihezi 832000, China

Abstract: The interplay of ecosystem services plays a crucial role in the integrated development of the economy, society, and environment. This research focuses on the Hotan region in Xinjiang as its subject of study. By employing the InVEST model, the coupling coordination degree model, GeoDetector, and fuzzy set qualitative comparative analysis method (fsQCA), this study assesses the values of four pivotal ecosystem services: carbon sequestration, soil conservation, water resource protection, and habitat provision in 2020. Furthermore, it analyzes the degree of coupling and coordination among these types of ecosystem services and their trends, investigates the driving factors and mechanisms behind service integration, and discerns spatial heterogeneity based on differential land-use patterns and intensities. The findings of this study are as follows. Firstly, it is revealed that the overall degree of ecosystem service coupling coordination is low, and the spatial heterogeneity is characterized by the mode and degree of differential land use. Second, the GeoDetector analysis identifies the main factors influencing the development of ecosystem services coupling, underscoring the augmentation of pairwise interactions. Specifically, the GeoDetector model shows that in a single factor, average temperature per unit area, average rainfall per unit area, topographic fluctuation, and livestock size dominate the coupled development of ecosystem

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72163027)

收稿日期: 2024-05-17; **网络出版日期:** 2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyj1914595972@163.com

services. In addition, the two-way interactions between all factors have a significantly enhanced effect compared to the dominant role of a single factor. Thirdly, the result of the fsQCA analysis shows that there are 5 effective multivariate conditional configurations, which are caused by natural factors, human factors, and the joint action of natural and human factors. Furthermore, three differentiated configuration paths have been sorted out. These paths emphasize the heterogeneous combination of differences in the six different antecedent variables, enabling the full realization of the coupling development of ecosystem services. The combination of the GeoDetector method and fsQCA method provides a comprehensive and innovative approach to exploring the driving factors of ecosystem service coupling and deciphering the driving mechanisms. Through the effective combination of the two methods, the driving factors and specific action mechanisms that lead to the coupling development of ecosystem services can be deeply analyzed. The results of this paper show that in order to achieve the goal of scientific and fine management of ecosystem services, attention should not only be paid to the dominant role of the single factors but also to the interactive effects of two factors simultaneously. At the same time, the synergistic effects of multiple dimension factors should be considered to promote the coupling of ecosystem services, so as to achieve continuous optimization, and finally achieve the goal of sustainable development of ecosystem.

Key Words: ecosystem services; coupled dynamics of ecosystem services; driving force grouping; GeoDetector; fuzzy set qualitative comparative analysis

生态系统服务(ES)的耦合发展和协同进步是生态系统管理的关键环节,准确理解生态系统服务的关联关系及驱动力是实施科学有效管理的基本前提,是维系生态系统稳定和可持续发展的核心要素。生态系统供给服务、支持服务、调节服务与文化服务^[1]之间相互依赖又彼此制约,构成一个复杂交互、动态关联的生态系统服务网络,生态系统服务耦合态势作为服务网络中节点与连接状态的集成表征,深刻揭示各服务之间深层次的内在联系与复杂的交互效应。生态系统服务耦合的充分实现,需建立在对生态系统服务发展规律的科学认知以及对复杂生态系统运作机制的深入解析之上。驱动力解析推动高效生态管理策略的制定,优化生态系统的整体功能与服务水平,平衡生态系统可持续发展与经济社会高质量发展需求^[2],实现生态保护与人类福祉联动提升,最终实现区域经济发展、社会进步与生态保护的“共赢”目标。

生态系统服务关系及驱动力解析是当前学术界研究的热点话题。生态系统服务关联关系的分析主要聚焦于两两生态系统服务间此消彼长的权衡关系或相互增益的协同^[3]作用,国内外学者普遍借助 RUSLE、InVEST、CASA 多类模型^[4-5],利用空间自相关及相关系数、主成分分析、生产可能性边界分析多种方法^[6-8],从不同空间尺度^[9]探究各类生态系统服务的关联关系及时空分异格局^[10-11]。生态系统服务间关系的驱动力解构方面,主要利用地理探测器^[12]模型科学识别地形^[4]、地貌^[13]、气温、降水、植被类型及覆盖程度^[14]、土地利用方式^[15]及强度^[16]等自然环境因子和管理措施、生态工程等人文环境因子的影响,通过分析主导因子及因子交互作用^[4]解析生态系统服务关联关系的驱动力。然而需要关注的是,生态系统服务耦合的实现不是单一因子主导或二元因子驱动,而是由自然、经济、社会、人文等复杂因子的多重并发联动作用形成的。主导因子分析是理解生态系统服务耦合态势的技术选择,而多因子组态分析是解码生态系统服务耦合态势的核心思路。因此,以主导因子分析为基础、以多因子组态分析为重点,定量识别生态系统服务实现耦合的驱动因子及驱动机制。生态系统服务关联关系的正确理解和驱动力的深刻解析对于调控关键驱动因素以弱化生态系统服务之间权衡作用、促进各类服务协同演化,进而实现对生态系统服务的有效管理具有积极的应用价值。

新疆和田地区属于干旱内陆盆地生态地理区域,具有典型的干旱荒漠气候特征,同时拥有丰富的生物多样性和独特的地理环境。该地区生态地理特征对于西部生态安全至关重要,本研究以新疆和田地区为例,基于《新疆维吾尔自治区“三线一单”生态环境分区管控方案》(以下简称《方案》)要求,科学定量评估碳储存、土壤保持、水源涵养、生境支持 4 类生态系统服务,分析生态系统服务耦合态势及空间分异特征,利用地理探测器模型(以下简称“GeoDetector 模型”)识别生态系统服务耦合的单一主导因子及因子两两交互作用,应用

模糊集定性比较分析方法(以下简称“fsQCA 方法”)挖掘自然、人文因子对充分实现生态系统服务耦合的多重并发因果关系,深入探究促进和田地区生态系统服务耦合协调的驱动因子及驱动机制。本研究为干旱地区生态系统服务耦合态势解读及驱动力解析提供科学的研究框架,精准识别影响生态系统稳定协调发展的关键因素并深入剖析不同因子综合作用的驱动机制,以进行科学管理和策略优化,维持生态系统整体健康水平,平衡生态系统保护与经济社会发展的需要,实现生态系统各类服务耦合发展、推动社会经济系统与生态系统的协同发展,为全球环境治理提供新的思路方法。

1 材料与方法

1.1 研究对象

和田地区位于中国新疆西南部($77^{\circ}39'—84^{\circ}91'E$, $34^{\circ}33'—39^{\circ}66'N$),属温暖带极干旱荒漠气候,光照充足但降水极少。整体地势南高北低且海拔变化较大(图 1),南部陈列大量冰川和高山湖泊,山麓以北戈壁横布,河流和冲积扇平原相间分布,玉龙喀什河和喀拉喀什河作为冰雪融水和山区降水混合补给型河流,发源于昆仑山北坡,自南向北流经多个乡镇并在阔什塔什河汇流成和田河贯穿和田地区,承担沿河两岸及河流下游农业灌溉以及生活用水任务,同时具有引水、泄洪、排沙等综合功能,为周边植被提供水分,滋养丰富的生物多样性,同时对调节气候、防止土地荒漠化起到积极作用,推动和田地区的经济发展和生态平衡。冲积扇平原绿洲扇缘连接塔克拉玛干沙漠直至塔里木盆地中心地带。

和田地区深处内陆,气候恶劣,植被覆盖度低,地表沙土大面积裸露,沙尘灾害频发^[17],生态环境比较脆弱。在风沙、干旱、盐碱、极端天气等多种环境胁迫长期影响下,研究区内生物种类单调贫乏、生态系统稳定性差^[18]的问题日益凸显,沙尘频发^[19]、土地荒漠化^[20]、土壤污染尤其是耕地面源污染等生态问题^[21]愈发严重,耕地、林地、草地、水域相互交错分布的生态景观复原难度大^[22]的问题也十分突出。

和田地区农业主要集中在绿洲地区且土地利用程度高,畜牧业广泛分布于草原和山地地区,但荒漠和草原地区的利用相对较为分散和低效。土地利用方式直接关系到当地居民生计和经济发展,同时对生态环境产生影响,人地关系的多样化趋势也影响着当地的社会发展和生态平衡。和田地区由于区位限制经济发展整体水平较低,近年来随着土地合理规划使用并配合对口援助帮扶政策,以农业为核心产业的和田地区经济得到快速发展,2020 年农林牧渔业总产值 185.63 亿元,其中农业产值贡献率达到 62.53%。常用耕地面积 19.80 万 hm^2 ,牲畜存栏头数 433.85 万头,和田地区总人口达到 250.47 万人,城镇居民人均可支配收入 30586 元,农村居民人均可支配收入 9733 元。

1.2 数据来源

本研究以 2020 年为时间截面,DEM 高程数据源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)的 ASTER GDEM 30M 分辨率数字高程数据;土地利用数据及气象数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/DOL/>);土壤数据及土壤栅格数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn/portal/>),土壤根系埋藏深度数据来源于中国基岩深度图^[23]。矢量数据利用 ArcGIS 10.8 软件进行数据分类、坐标转换、空间分类和图层叠加等处理,为了保证数据的统一性,以土地利用数据为标准对其他数据进行相应的空间处理,将所有栅格数据映射转换为统一空间参考,鉴于和田地区气候、土壤等宏观指标在较大空间尺度上具有显著相关性和变化规律,栅格数据选择 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 的分辨率,确保数据适用性和有效

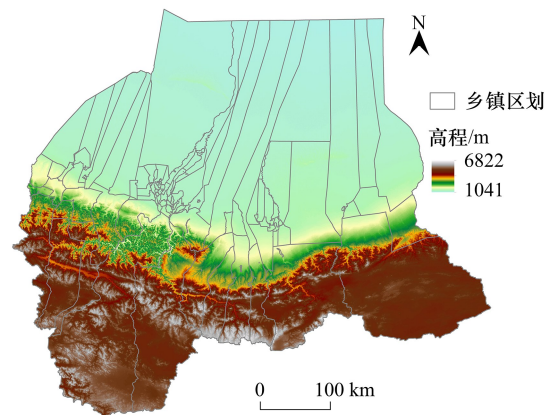


图 1 和田地区地形图

Fig.1 Topographic map of Hotan region

性。社会经济数据以乡镇为统计单元,农业产值、牲畜规模、人口密度等数据来源于《和田统计年鉴》。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值评估

研究区地域辽阔,为了更好地理解生态系统的功能、维持生态平衡以应对气候变化和人类活动的影响,研究选取水源涵养、土壤保持服务评估生态系统应对自然灾害的能力,选取碳储存服务评估生态系统稳定性和抗干扰能力,选取生境支持服务评估人类活动影响下的环境质量。这 4 种生态系统服务的定义、模型和计算方法参考文献^[4,24-25],具体呈现如表 1。为了更好地呈现数据结果,根据和田地区区位特征对模型参数进行适当调整。

表 1 生态系统服务质量评估
Table 1 Evaluation of ecosystem services (ES)

服务类型 Category of ES	定义 Definitions	选择依据 Selection criteria	计算方法 Calculation methodologies
碳固存 Carbon sequestration	生态系统中的植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳,将其转化为有机物质,实现固定并储存的功能。	减少大气二氧化碳、调节气候、维护生态平衡、促进经济发展和提升生态意识。响应《方案》对地区应对气候变化及可持续发展相关要求。	利用 InVEST 模型的碳储量模块进行评估,计算方法如下: $C_{cx} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (1)$ 式中, C_{cx} 为栅格 x 的总碳固存量; C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 、 C_{dead} 分别为栅格 x 的地上生物碳、地下生物碳、土壤有机碳、死亡有机物。 利用 InVEST 模型土壤保持模块计算研究区土壤保持量,计算方法如下: $SC = RKLS - RUSLE \quad (2)$ $RKLS = R \times K \times LS \quad (3)$ $RUSLE = R \times K \times LS \times C \times P \quad (4)$ 式中,RKLS 为潜在土壤侵蚀,RUSLE 为实际土壤侵蚀,SC 为实际土壤保持。 R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡度因子; C 为植被管理因子; P 为水土保持措施因子 ^[25] 。
土壤保持 Soil conservation	采取土地利用和管理方法,防止人为或自然因素对土壤的侵蚀,维护土壤的自然功能。	切实保障农业生产、合理有效管理水资源、保护生物多样性、预防自然灾害和调节气候。响应《方案》对土壤环境质量提高以及风险管控的要求。	
水源涵养 Water resource protection	单位流域面积在一定时间内产生的河流径流量。	维护水资源供应、减轻洪水风险、保护水质、维持生态平衡和调节气候。响应《方案》对地区水量开采及用水安全保障相关要求。	利用 InVEST 模型水源涵养模块计算研究区的水源涵养服务,计算方法如下: $Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (5)$ 式中, $Y(x)$ 、 $AET(x)$ 、 $P(x)$ 分别为网格单位 x 的年产水量、年实际蒸散量和年降水量 ^[4] 。
生境支持 Habitat provision	生态系统为个体和种群的生存提供适宜条件的能力。	维持生态系统功能、确保生态系统服务供给持续有效、保护生物多样性、增强经济发展和社会福祉可持续性、推动居民心理健康发展和提升地域文化价值。响应《方案》对生态环境保护与生态修复工作效果相关要求。	利用 InVEST 模型生境质量模块测算研究区生境质量指数以衡量研究区生境支持服务供给水平,计算方法如下: $HQ_{sj} = H_j \times \left(1 - \frac{D_{sj}^z}{D_{sj}^z + K^z}\right) \quad (6)$ 式中,格点 x 处的土地覆盖类型为 j ;生境质量为 HQ_{sj} ;该点生境退化程度为 D_{sj} ; H_j 为 j 型土地覆被的生境适宜性; Z 和 K 均采用模型的默认参数,分别为 2.5 和 0.5 ^[4] ;威胁源数据和生境类型对胁迫的敏感度数据参考已有文献 ^[24] 。

为消除不同指标间的量纲和单位差异,使得不同指标具有可比性,利用最大—最小值归一化方法对碳储存、土壤保持、水源涵养、生境支持 4 种生态系统服务价值进行处理,并通过 Jenks 自然断点法将各类生态系统服务划分为 5 个等级,得到生态系统服务空间分布格局。

$$x'_i = \frac{x_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (7)$$

式中, x'_i 是标准化之后的数据, x_i 是原始数据, $\min(X)$ 是原始数据中的最小值, $\max(X)$ 是原始数据中的最大值。

1.3.2 生态系统服务耦合态势

生态经济系统中, 各类生态系统服务之间相互作用并实现动态关联, 既相互依赖又彼此制约, 测算整体耦合协调度以定量研究生态系统服务耦合协调发展水平^[26]。耦合度用于度量各系统或系统内部各要素之间相互影响、相互关联的程度, 协调度用于分析各系统或各要素之间良性互动、协调发展的程度, 是对良性互动关联性可持续发展的体现。由此构建 4 类生态系统服务的耦合协调度模型, 公式如下:

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (8)$$

$$C = \left\{ \frac{E_1 \times E_2 \times E_3 \times E_4}{[(E_1 + E_2 + E_3 + E_4)/4]^4} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

$$T = a \times E_1 + b \times E_2 + c \times E_3 + d \times E_4 \quad (10)$$

式中, D 为耦合协调度, $D \in [0, 1]$; C 为耦合度; E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 分别为 4 类生态系统服务无量纲化处理之后的综合评价指数; T 为综合协调指数; a 、 b 、 c 、 d 分别表示各类生态系统服务对系统整体的贡献, 因其相对重要性不会影响耦合协调度总体走势^[27], 令 $a = b = c = d = 0.25$ 。

1.3.3 地理探测器模型

为了深入剖析生态系统服务耦合协调关系的影响因素, 需要借助 GeoDetector 模型剖析驱动因子及驱动机制。GeoDetector 模型是探测空间一致性并揭示各要素空间分异的统计学方法, 由分异及因子探测、交互作用探测、生态探测及风险探测组成, 针对不同探测内容、不同角度研究要素的空间分异现象。根据现有研究成果和数据可获取性, 整合自然生态社会经济多方数据, 选取单位面积平均温度、单位面积平均降雨量、地形起伏度、农业产值、牲畜规模、人口密度 6 个因子作为影响因子, 其中自然禀赋因子通过形成特定的生态环境条件来影响生态系统服务之间的耦合演化过程, 而社会经济因子则是通过推动内部生产力的发展机制来对生态系统服务间的耦合演化施加影响^[28]。运用地理探测器模型探测驱动因子与生态系统服务耦合协调度之间的空间相关性, 通过空间异质性定量探测各驱动因子对于因子对耦合分布的解释度大小(q 值)。 q 的值域为 $[0, 1]$, 值越大表明该因子对于生态系统服务价值空间分布的解释度越大, 反之则越小。当交互探测结果大于两因子的 q 值之和, 表示两个因子呈非线性增强关系; 当交互探测结果大于其中某一因子 q 值则表示二者呈双因子增强, 两种增强均说明两两因子共同作用时会增加对生态系统服务之间耦合演化空间分异的影响。驱动因子及驱动机制的识别能够更加精准理解耦合态势的空间分布特征, 揭示驱动因子在不同地理位置的影响差异。

1.3.4 模糊集定性比较分析

在自然资源配置和人类活动干预下, 生态系统服务间的相关关系构成复杂的自适应系统, 生态系统服务间的依赖关系受到多维条件因子的组合影响, 从系统视角出发, 在最大程度保留原始数据可用信息的前提下分析多个因素的组合作用, 借助集合论观点来探究前因结果之间非恒定、非对称的多因并发的等效性组态集合, 通过量化数据和定性化分析将多个案例可重复性呈现并探寻提升的路径组合^[29], 探究差异化的生态系统服务间协同发展驱动路径的选择问题^[30]。基于组态思维、布尔逻辑和反事实分析进行多层次、多维度^[30]的组态分析, 为探究生态系统服务耦合的驱动机制提供新的思路。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务价值及耦合关系的空间分布格局

以和田地区所辖乡镇、街道等空间区域为基本评价单元, 测算各单元碳储存、土壤保持、水源涵养、生境支持 4 种生态系统服务价值并进行无量纲化处理, 通过 Jenks 自然断点法将各类生态系统服务划分等级得到生态系统服务空间分布格局。

由图 2,碳储存服务分布南高北低,西高东低,且在中部平原地区形成高值中心,河流途径的区域的碳储存服务价值也普遍高于同纬度其他区域。土壤保持服务南北呈现出显著的差异性,北部沙漠区域和中部平原地区的土壤保持服务的供给十分有限,南部山地土壤保持服务的供给量较大,在西南地区形成高值中心。水源涵养服务整体水平偏低,呈现出南高北低的空间格局。生境支持服务整体水平较高,但中部平原地区由于人类活动干扰数值较低,南北生境质量较高,但南部山地区域整体优于北部荒漠地区,北部河流途径区域的生境质量普遍高于同纬度其他区域。

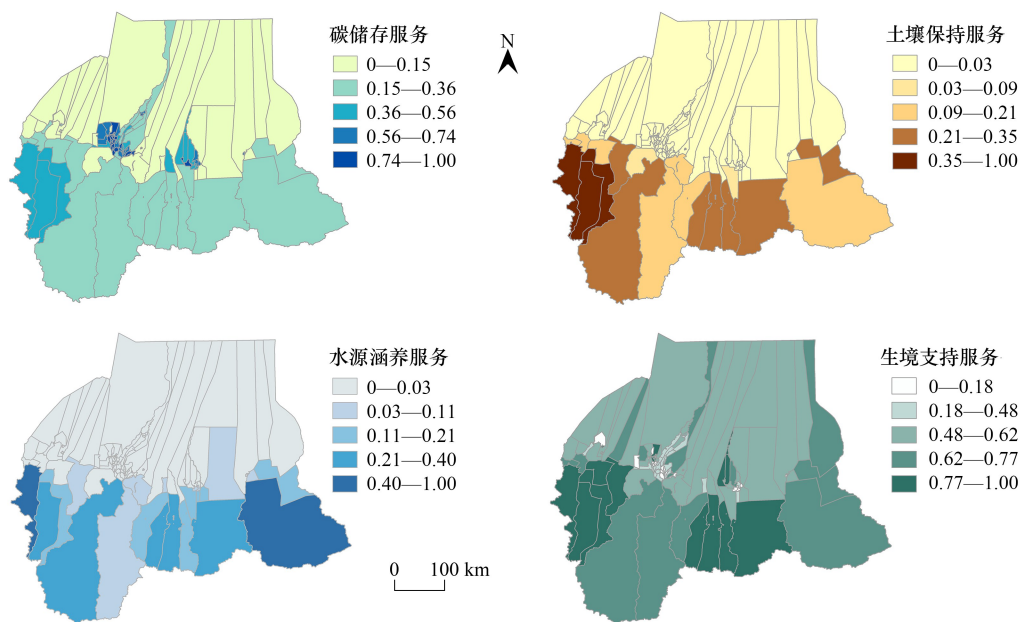


图 2 和田地区生态系统服务空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem services in Hotan

利用耦合协调度模型测算 4 种生态系统服务耦合关系并进行阶段划分^[31-32],得到生态系统服务耦合关系如图 3。从整体分布特征来看,研究区生态系统服务耦合协调度整体较低,各乡镇的耦合协调度大多处于失调、濒临失调、勉强协调和初级协调阶段,处于中级协调、良好协调的乡镇较少,没有处于优质协调的乡镇。从生态系统服务耦合的空间分异特征来看,和田地区 4 类生态系统服务供给及相互依赖关系因地形地势特殊性、土地利用方式和土地利用程度的差异性特征而呈现出明显的空间分异特征。北部荒漠地区人口稀少,植被稀疏,各类生态系统服务供给严重不足,分配效率低下,各服务间无法实现协调发展,耦合程度较低。中部平原地区耕地、林地、草地、水域、城镇建设用地相间分布,人类活动驱动下土地利用产生相应变化,生态系统受到干扰,生态系统服务的耦合协调并不能充分实现。南部高原山地地区自然环境主导生态系统服务之间的供给和配置,以草地、水域、未利用土地为主要土地利用类型,独特的地理位置、海拔高、人类活动稀少,生态系统可以有效实现自我适应、自我调节和修复,生态系统服务有效供给并合理分配,实现生态系统服务实现整体耦合协

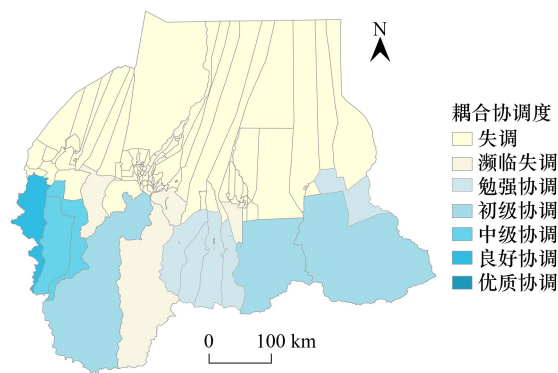


图 3 和田地区四类生态系统服务耦合协调度

Fig.3 Degree of coupled coordination of four types of ecosystem services in Hotan area

调发展,生态系统处于有序发展的阶段。

2.2 生态系统服务耦合的驱动机制探究

为全面反映各影响因素对生态系统服务之间相关关系空间变化的影响差异,利用 GeoDetector 模型和 fsQCA 方法两种方法,探究生态系统服务耦合的驱动因子以及驱动机制。气温、降水和地形起伏度对于土地利用、植被生长、水分蒸发、土壤侵蚀等具有直接影响,同时人类活动尤其是农牧业活动会对生态系统产生影响,人口密度与土地利用、资源消耗密切相关,选取六个影响因子以分析生态系统服务协同演化过程中的显著驱动因子,进而剖析生态系统服务耦合发展的驱动机制。

2.2.1 地理探测器结果分析

(1) 单因子探测

在生态系统服务耦合协调度分析基础上,本研究在特征尺度下选取单位面积平均温度、单位面积平均降雨量、地形起伏度、农业产值、牲畜规模、人口密度 6 个典型自然人文因子,基于 q 值对生态系统服务耦合态势的影响因素进行分析(表 2)。通过单因子检测结果发现,自然因子包括温度、降雨和地形起伏度都对生态系统服务耦合有较强的解释力,其中平均温度对于服务耦合的解释力最强(q 值为 0.52),说明自然因子是生态系统服务实现耦合的主导因素,其中温度是影响植物生长、动物活动模式以及水循环等生态过程的关键因素,对生态系统服务的形成和发展作用显著,其变化可以影响生物多样性、生产力和物种分布;降雨量不仅直接影响水资源供给,还通过改变土壤湿度、促进植被生长等方式间接影响其他生态系统服务;地形起伏度可以影响水分流动、光照分布进而影响生态系统结构和功能,温度、降雨和地形起伏度三类自然因子都对不同生态系统服务之间的耦合关系产生直接作用。人文因子中牲畜规模对服务耦合的实现具有较强解释力,牲畜活动可以通过改变土地利用方式、影响土壤质量和植被覆盖度等方式,间接影响生态系统服务供给及耦合关系;农业产值和人口密度并没有对生态系统服务耦合产生显著性影响,究其原因,农业产值更多地反映了经济活动的结果,而不是直接影响生态系统的自然过程;人口密度高通常意味着更大的人类活动强度,可能导致生态环境压力增加进而导致生态系统服务失调,人文因子不显著说明其对于生态系统服务耦合的影响呈现出一定的间接性特征,但随着人类干预强度的上升间接影响逐渐直接化呈现。

表 2 生态系统服务耦合因子探测结果

Table 2 Results of the detection of coupling factors of ecosystem services

驱动因子 Driving forces	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
q	0.52 ***	0.28 ***	0.46 ***	0.05	0.12 ***	0.07

X_1 :单位面积平均温度; X_2 :单位面积平均降雨量; X_3 :地形起伏度; X_4 :农业产值; X_5 :牲畜规模; X_6 :人口密度; q :空间解释程度;***、**、

* 分别表示在 1%、5%、10%的水平上显著

(2) 交互因子探测及生态探测

交互探测重点考察任意两个因子交互作用与其各自相比时增强还是减弱的程度。从交互因子探测结果来看(图 4),各驱动因子交互作用的 q 值远高于对应单因子探测的 q 值,说明各因子交互都存在增强效应,这种增强效应意味着当两个或多个因子共同作用时,它们对生态系统服务耦合的影响远远大于各自单独作用的总和。自然人文多维因子协同交互对生态系统服务耦合的空间分布具有的强解释力体现了因子对生态系统服务耦合影响强度的一致性。对于生态系统服务耦合态势呈现出的空间分异特征,温度与降雨、地形起伏度,降雨与地形起伏度交互作用并表现为双因子增强作用,温度影响水循环和植物生长,而降雨则直接影响水资源供给和土壤湿度,两者交互作用显著增强服务耦合;地形起伏度影响水分流动和土壤分布,降雨则影响土壤湿度和植被生长,两者交互作用显著影响水文循环和土壤侵蚀,从而影响生态系统服务的空间分布及不同服务耦合。剩余因子相互作用并表现为非线性增强作用,非线性增强的交互作用明显强于双因子交互作用,注重非线性增强的因子交互作用、合理协调相关资源对于实现生态系统服务耦合具有更多参考价值。在所有交互作用中,最大作用力为平均温度 $\cap$ 人口密度, q 值达到 0.79,温度影响生态系统的自然过程,而人口密度则

代表了人类活动的强度,两者交互作用对生态系统功能、土地利用等方面具有重要影响。两因子交互对于生态系统功能、土地利用等方面具有重要影响,因子间的相互影响在驱动生态系统服务耦合的机制中具有重要作用。同时平均温度与其他因子的交互作用 q 值均高于其他因子两两交互的 q 值,证明温度在生态系统服务的耦合实现过程中具有核心地位,需要重点关注其与其他因子交互作用对于生态系统服务耦合、整体生态系统的稳定和功能的意义。

生态探测比较两两因子对生态系统耦合协调分布的影响是否具有显著差异,结果显示对耦合态势空间分布的作用而言,地形起伏度与其他变量存在着显著差异,起伏度为主导因子对其他因子具有较强的辐射作用,表明合理利用地形起伏度的重要性,有效调控对实现生态系统服务实现耦合具有倍增性的显著效果。

2.2.2 模糊集定性比较分析

生态系统服务耦合是多要素并发联动形成的聚合产物,利用 fsQCA 方法分析不同因素组合的条件变量对生态系统服务耦合协调发展的充分性,解释引致生态系统服务耦合充分实现的多重因素。将生态系统服务耦合的充分实现作为结果变量,将年平均温度、年平均降雨量、地形起伏度、农业产值、牲畜规模、人口密度作为条件变量。参考已有文献^[33]并结合案例实际进行分析。采用直接校准法进行校准,设置完全隶属点、交叉点、完全不隶属点的校准标准分别为 0.95、0.5 和 0.05。具体分析过程中参考已有文献^[33],结合案例具体情况,将必要条件一致性阈值、PRI、案例频数阈值分别设置为 0.9、0.8 和 1。

(1) 必要性分析

为避免必要条件被包括在真值表分析中而被纳入“逻辑余项”的简约解中被简化,在组态分析之前需要进行必要条件分析^[34]。生态系统服务耦合的必要条件分析结果如表 3 所示。

表 3 单变量必要性检验结果
Table 3 Univariate necessity test results

条件变量 Conditional variables	一致性 Consistency	覆盖率 Coverage	条件变量 Conditional variables	一致性 Consistency	覆盖率 Coverage
X_1	0.6611	0.5426	$\sim X_1$	0.8102	0.8331
X_2	0.7085	0.6375	$\sim X_2$	0.6954	0.6442
X_3	0.7324	0.7703	$\sim X_3$	0.6324	0.5100
X_4	0.5938	0.6527	$\sim X_4$	0.7677	0.5993
X_5	0.7721	0.7227	$\sim X_5$	0.6446	0.5743
X_6	0.6266	0.6068	$\sim X_6$	0.7730	0.6674

“ $\sim$ ”表示逻辑运算的“非”

结果显示 6 个条件变量及其逻辑“非”运算的一致性均低于 0.9,即各条件变量都无法单独成为推动生态系统耦合这一结果的必要条件,说明生态系统服务实现耦合是多因素协同作用而产生的结果,各条件变量对于实现生态系统服务耦合的影响机理存在复杂性和相互依赖性即交互性,这与 GeoDetector 模型探测结果一致。

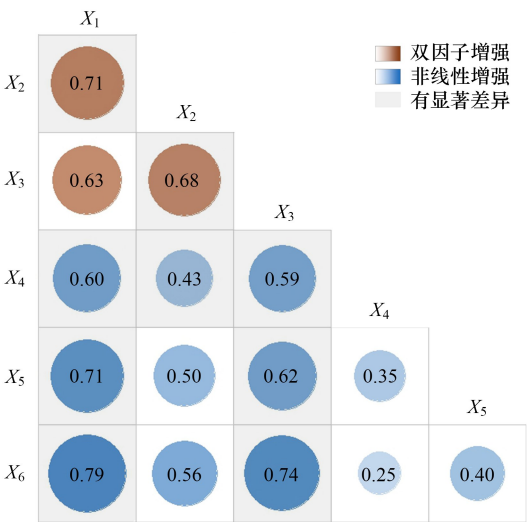


图 4 地理探测器交互探测和生态探测结果
Fig.4 The interactive and ecological detection results of GeoDetector

X_1 :单位面积平均温度; X_2 :单位面积平均降雨量; X_3 :地形起伏度; X_4 :农业产值; X_5 :牲畜规模; X_6 :人口密度

(2) 条件组态分析

条件组态分析用于揭示多个条件变量相互依赖、产生组合效应以充分实现生态系统服务耦合这一结果的多元路径。通过对 6 个条件变量进行条件组态分析,并输出复杂解、中间解和简约解,鉴于中间解采用符合理论和实际的“逻辑余项”^[34],利用中间解识别多维因素如何驱动生态系统服务耦合充分实现的多元路径,并考虑到非对称因果关系,通过中间解与简约解的嵌套关系对比区分核心和边缘条件,若条件同时出现于中间解和简约解视为核心条件,否则视为边缘条件^[35](表 4)。由输出结果可知,总体解的一致性为 0.87,说明在所有满足这 3 条有效组态的案例中,超过 87%的结果的实现都是由 6 个条件变量综合作用形成,显示出较高的一致性,形成充分条件。模型解的覆盖度为 0.70,说明生成的 3 条有效组态共同解释了超过 70%的案例,说明 3 个组态解释了生态系统服务耦合这一结果变量实现的重要原因。覆盖度也从侧面反映出由于自然条件和人文条件的不同导致生态系统服务耦合的实现具有显著差异性。各驱动路径具体解读如下:

表 4 充分实现生态系统服务耦合的驱动因子组态

Table 4 Driver groupings that fully realize coupling between ecosystem services

条件变量 Conditional variables	组态 Configuration				
	H1	H2a	H2b	H3a	H3b
X_1	○	○	○	○	
X_2	○	◆	○		●
X_3	●		◆	●	●
X_4	○	◆		○	●
X_5		●	●	●	◆
X_6	◇	●	◇	◇	●
一致性 Consistency	0.85	0.96	0.93	0.95	0.98
原始覆盖率 Original coverage	0.39	0.33	0.37	0.40	0.30
唯一覆盖率 Unique coverage	0.09	0.06	0.05	0.06	0.02
总体解的一致性 Consistency of the general solution			0.87		
总体解的覆盖度 Coverage of the general solution			0.70		

●表示核心条件存在;○表明核心条件缺失;◆表示辅助条件存在;◇表示辅助条件缺失;空白表示是一种模糊状态,条件存在与否对结果变量不产生影响

“自然因子主导型”路径由组态 H1 构成,在地形起伏度等自然因子的主导作用下充分实现生态系统服务耦合。在和田地区西南方位的乡镇,因其独特区位特征(高地形起伏度)无法满足人类生计发展需求,在较少人类活动干预下植被、土壤和水资源相对丰富完整且未受到严重污染和过度开发,为生态系统的稳定性和服务功能提供有利条件,生态系统能够为生态系统的自然演替和生物多样性的维持提供一定的空间和时间,相对独立地进行自我调节并维持平衡状态。不同生态系统服务之间相互影响相互促进形成稳定的生态系统功能网络,生态系统能够稳定地提供服务并有效调控服务之间的相互关系,最终实现生态系统服务的耦合,为生态系统的管理和可持续发展提供一定优势。

“人文因子主导型”路径由二阶等价组态 H2a 和 H2b 构成,由于草地、水域资源能够满足畜牧业发展,在牲畜规模等人文因子的主导作用下充分实现生态系统耦合。在和田地区中部和南部的乡镇,尽管在气温、降水、地形起伏度上不存在区位优势,但是由于合理的畜牧业发展模式,合理有效利用自然资源,产业发展并未对生态系统服务的供给造成实质性的减损,生态系统服务之间的相互关系也能维持在一个较好的耦合协调水平,从而充分实现生态系统服务耦合。通过合理控制畜牧密度、规范安排放牧制度,并对畜牧废弃物进行有效处理利用,成功平衡畜牧业发展和草原资源的保护,避免过度放牧带来的草场退化问题,同时减少废弃物对土壤和水资源的污染,进一步保障了生态系统的稳定性。此外对自然资源的有效管理也对当地生态系统服务的耦合发展具有关键作用,合理的草地利用、水资源的保护和管理以及对植被的保护保证草原生态系统的完整性,维护草原生态系统的生产力和稳定性,对水资源的保护和管理有助于维持当地水文循环的平衡,保证水资

源的可持续利用,对植被的保护对维护生态系统多样性和稳定性发挥积极作用。合理的畜牧业发展模式配合有效的自然资源管护方式,在一定程度上减缓了生态系统服务的减损,确保生态系统服务的可持续供给,同时维持不同生态系统服务之间的相互关系,使其保持在一个较好的耦合协调水平上运作,实现各类生态系统服务相互支持相互促进进而实现耦合,为当地经济发展提供可持续的生态支撑。

“自然人文因子联合主导型”路径由二阶等价组态 H3a 和 H3b 构成,地形起伏度、降水等自然因子和农业产值、牲畜规模、人口密度等人为因子综合作用充分实现生态系统服务耦合。在和田地区东南方位的乡镇,地形起伏度较高,但是在降雨因子的作用下,为区域的农业发展提供了较好的资源禀赋和区位优势,高密度的人口为农业发展提供了充足的人力资本,同时在地形起伏度较高但温度较低的乡镇发展畜牧业,合理的产业发展并不会对生态本底造成损害,同时可以有效推动生态系统间的良性循环,生态系统服务之间的供给以及各类生态系统服务之间的相关关系仍然呈现向好趋势,从而充分实现生态系统服务耦合。和田地区东南方向的乡镇因其独特的地理、人文和生态条件在农业、畜牧业发展以及生态系统服务方面具有独特的优势和潜力。高地形起伏度的地理特点以及适量的降雨为农业发展创造有利条件,提供了宝贵的自然资源基础和独特的区位优势,为农业发展提供资源禀赋和区位优势,高密度人口为农业提供充足劳动力资源,同时人力资源的介入为农业相关技术的进步和发展提供重要支撑和动力,即使在地形起伏度较高的地区,也能通过技术创新、适应性提升、教育培训和社会合作等途径实现农业的良好发展,有效提高农业生产效率,实现农业生产的规模化和现代化。合理的畜牧业发展模式在不损害生态本底的前提下推动自然环境的有效保护和可持续开发利用,进而实现生态系统的稳定和可持续。在自然和人文因素相互促进、共同推动作用下实现生态系统服务的协同供给以及各类生态系统服务之间的耦合发展,这种协同作用可能意味着生态系统的稳定性和多样性得到了保护,各种生态系统服务相互促进,形成良性循环,从而为地区的生态平衡和可持续发展提供了有力的支撑。

通过 PRI 阈值调整发现组态结果没有显著变化,足以验证结果是稳健的。fsQCA 方法立足于全局视角和整体维度,在证明 GeoDetector 模型测算出单一因子结果和两两因子交互的局部效应真实可信的基础上进一步分析,剖析自然、人文多维因子对耦合结果的综合驱动影响,尽可能保证分析过程的真实性和准确性,以更好地理解生态系统服务之间的复杂关系。

3 讨论

和田地区作为新疆重要的生态屏障,其生态地理特征对于西部生态安全至关重要,对当地居民生计、农业生产以及生态环境可持续具有深远影响。本研究以乡镇为调查单元测算碳储存、土壤保持、水源涵养、生境支持 4 类关键生态系统服务价值并测算生态系统服务之间的耦合态势及其空间分布格局,并利用 GeoDetector 模型和 fsQCA 方法的集成,深入探究生态系统服务实现耦合的驱动因子以及驱动机制。和田地区发展模式对其他相似生态地理区域具有重要决策参考价值,为实现可持续发展和生态环境保护目标提供有益经验和模式。

生态系统服务由供给、支持、调节、文化多个服务子系统构成,各子系统之间的关系错综复杂,生态系统服务的耦合协调是自然、经济、社会、人文多维因子多重并发联动作用形成,不仅要关注自然资源禀赋的对于生态系统服务供给效率及服务耦合的直接效应,同时要关注人类活动驱动下的土地利用变化对于生态系统服务关系变化的重要作用,社会、经济因素通过对土地利用变化的影响进而对生态系统服务耦合关系产生显著影响,需要综合考虑多维因子进而解构生态系统服务耦合态势的驱动力。GeoDetector 模型在探究和田地区生态系统服务耦合协调发展驱动因子时具有科学性。分析单位面积平均温度、平均降雨量、地形起伏度、农业产值、牲畜规模和人口密度对生态系统服务耦合发展的影响。研究区域多数乡镇耦合协调状态不佳,但所有驱动因素对服务耦合呈正向驱动。其中,气温与降水是反映地区气候状况的有效指标,对生态系统服务供给及交互关系有关键影响,通过调控水、碳循环影响生物代谢和生态系统生产力,维持生态平衡与功能^[36]。地形起伏度代表区域地势起伏和地形复杂程度,反映自然资源禀赋及开发利用状况,自然禀赋因素直接作用于生

态系统服务供给,对耦合影响显著。此外,社会经济因素对生态系统服务耦合关系也有显著影响,农业产值和牲畜规模代表区域农业和畜牧业生产水平及经济活力,反映产业发展成果和繁荣程度,其产值变化体现产业结构调整、技术进步和生产方式变化,反映区域产业发展水平和经济状况。人口密度表征单位面积人口数量,代表人口聚集程度和土地利用发展水平,高人口密度反映土地高度利用和人口聚集,其变化反映人口迁移、城市化进程和土地利用结构变化。以往研究表明,在生态环境相对脆弱地区,社会经济因素对生态系统服务供给及相互关系影响显著^[37]。在地理探测器的交互作用分析过程中证明各驱动因子交互作用的 q 值远高于对应单因子探测的 q 值,说明各因子交互都存在增强效应,也进一步印证了引入组态思维、利用多因子组态分析驱动机制的必要性。在 GeoDetector 模型分析基础上引入 fsQCA 方法,立足生态系统服务整体耦合态势,综合考虑生态系统实现耦合的驱动因子和驱动组态,深入分析自然资源禀赋和人类活动干预对于生态系统服务实现耦合发展的影响。GeoDetector 模型证明存在单一主导效应的驱动因子在 fsQCA 分析过程并没有表现为必要条件,类似于温度、降雨等自然禀赋因子在具体处理中也并没有体现出是核心条件存在于每条组态中,地形起伏度和牲畜规模因子虽然在多数案例中作为核心条件存在,但是仍有部分案例中表示为边缘存在条件或者无关条件,这也进一步验证了本研究的观点:生态系统服务耦合关系是多维因子综合作用的复杂结果,各因素之间的相互依存作用开始受到关注,单一主导因子的作用被部分或完全抵消,这也说明 GeoDetector 模型在分析驱动机制的局限性,而 fsQCA 方法的引入准确捕捉驱动因子组态对于生态系统服务实现耦合的影响,深入剖析驱动因子之间的不同组态对于结果的影响以实现各类生态系统服务子系统之间各类要素的耦合互馈,从而削弱系统之间的权衡效应而加强协同效应,最终实现生态系统由无序向有序发展的演变。研究所选驱动因子对生态系统服务耦合作用具有较大空间异质性。社会经济合理发展能有效促进和田地区中部南部乡镇生态系统服务耦合,种养殖业发展模式与水平对服务耦合发展影响显著。经济落后地区可通过提升产业发展水平、优化产业结构、培育新产业,形成以高质量发展为导向的产业格局,应积极推进产业优化升级,从资源型产业发展方式转变为高效率集约化经济增长方式^[38]。生态资源有效保护对和田西南和东南部乡镇服务耦合促进作用明显,地区草场面积比例大,可合理开发草地促进服务耦合发展,自然条件对和田地区生态系统服务供给及耦合发展影响较大,可通过荒漠化治理、草场恢复等提升服务供给进而影响耦合协调关系,需适时优化分区轮牧、荒漠土地治理、退化草地补播等途径恢复保护生态系统平衡。社会经济的合理发展和生态资源的有效保护相结合,对于和田东南部乡镇服务耦合作用显著。东南部乡镇由于地广人稀,城镇化进程能发挥人口聚集规模效应与技术外溢效应,同时配合有效的生态保护和合理的生态资源开发模式,带动周边生态系统服务供给及耦合发展,需加快城镇化进程、缩小城乡差距以提升社会效益。

本研究对生态资源合理配置、生态系统服务持续发展以推动经济社会生态可持续发展具有借鉴意义。通过分析可以发现,实现 4 类生态系统服务耦合,需要充分利用地形地势及气候等优势,合理分配耕地、林地、草地以及建设用地资源,充分调动人口资源,推动农林牧产业和谐发展,实现经济发展和生态保护双重目标实现,在推动乡镇经济增长的同时维持各类生态系统服务耦合协同以及可持续发展。但本研究仍存在一定的不足,本文并没有考虑将各类生态系统服务纳入环境变量考虑生态系统服务实现耦合的驱动机制,下一步有必要针对这一问题进行更加深入的探讨,更加准确解析驱动因子及驱动组态,以促进研究区内各类生态资源的合理利用、各类生态系统服务的协调配置,推动各类生态系统服务管理战略的灵活制定以实现区域经济社会与自然协调发展。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 和田地区生态系统服务耦合程度总体偏低,并基于差异化土地利用类型以及土地利用程度呈现南高北低的空间异质性布局特征;

(2) 自然因子温度、降雨、地形起伏度与人文因子农业产值、牲畜规模、人口密度对生态系统服务耦合的

实现具有差异化影响,地理探测器模型证明实现生态系统服务耦合的单一主导因子温度、降雨、地形起伏度以及牲畜规模,并发现所有因子两两交互呈现双因子增强作用和非线性增强作用,各因子交互对于生态系统耦合具有更强解释力;

(3)模糊集定性比较分析方法深入剖析生态系统服务间耦合实现的5组有效多元组态路径,在证实地理探测器模型结果科学性的基础上验证“自然因子主导型”“人文因子主导型”“自然人文因子联合主导型”3类多元化组态路径揭示不同乡镇单元基于自身自然资源禀赋和人文资源分配情况的充分实现生态系统服务耦合的差异化路径。

4.2 建议

研究以乡镇为调查单元,利用 GeoDetector 模型识别和田地区实现生态系统服务耦合的驱动因子,并利用 fsQCA 方法深入剖析充分实现生态系统服务耦合的驱动机制,结合分析结果提出以下可行性建议:生态系统服务的耦合实现可能有助于提高生态系统的韧性和适应性,使其能够更好地适应外部压力和变化。因此,需要在生态保护与可持续发展政策中充分考虑当地地形特征和生态系统的复杂响应,以实现人类与自然的和谐共生,推动当地社会经济的可持续发展。具体来看:

(1)对于中部平原区,土地面积有限、可利用土地面积有限,需要充分利用地形优势以及气候条件、重点关注耕地资源、合理利用草地资源,并配合合理的劳动力配置政策,合理配置生态资源,提高生态系统服务的供给效率,实现各类服务间的优化协同以实现耦合发展。

(2)对于南部山地区,地域面积广阔,耕地、林地、草地资源都有分布,需要合理规划土地利用类型,推动农业、畜牧业综合协同发展,合理分配人力资源,实现生态资源有效利用,在实现经济目标的同时保证生态资源的合理开发、有效利用以及生态系统的稳定可持续演化,以达到生态系统服务耦合目标。

(3)对于北部荒漠区,首要目标是提高生态系统服务供给能力和供给效率,通过固沙种草、植树造林等生态修复措施提升北部荒漠区生态系统服务供给能力,有效利用自然资源,最大程度提升生态系统服务供给能力,改善景观格局,优化生态系统,推动生态系统服务的可持续供给以及各类服务之间的耦合演化。

参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰,于丹丹,吕楠.中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系.生态学报,2017,37(2):341-348.
- [2] 潘健峰,马月伟,陈艳,蔡思青,陈玉美.社会-生态耦合分析视角下普达措国家公园生物多样性价值评估.生态与农村环境学报,2022,38(5):609-620.
- [3] 韩磊,杨梅丽,刘钊,赵永华,赵子林,张永锋.黄土高原典型退耕区生态系统服务权衡与协同关系研究——以延安市为例.生态学报,2022,42(20):8115-8125.
- [4] Zuo L Y, Gao J B, Du F J. The pairwise interaction of environmental factors for ecosystem services relationships in Karst ecological priority protection and key restoration areas. Ecological Indicators, 2021, 131: 108125.
- [5] 王晓峰,程昌武,尹礼唱,冯晓明,卫新东.新疆生态系统服务时空变化及权衡协同关系.生态学杂志,2020,39(3):990-1000.
- [6] 郑德凤,郝帅,吕乐婷,徐文瑾,王燕燕,王辉.三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系.地理研究,2020,39(1):64-78.
- [7] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, Dalgaard T, Svenning J C. Bundling ecosystem services in Denmark: trade-offs and synergies in a cultural landscape. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 89-104.
- [8] 杨晓楠,李晶,秦克玉,李婷,刘婧雅.关中-天水经济区生态系统服务的权衡关系.地理学报,2015,70(11):1762-1773.
- [9] Liu Q, Qiao J J, Li M J, Huang M J. Spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their drivers at different spatial scales in the Yellow River Basin. Science of the Total Environment, 2024, 908: 168486.
- [10] 刘树超,邵全琴,牛丽楠,宁佳,刘国波,张雄一,黄海波.长江上游生态状况变化及其服务功能权衡与协同.生态学报,2023,43(3):1-12.
- [11] 任娟,赵雪雁,徐省超,马平易,杜昱璇.黄河中游地区生态系统服务的时空演变及权衡与协同关系研究.地球环境学报,2022,13(4):477-490.
- [12] 陈睿,杨灿,杨艳,董祥泽.洞庭湖生态经济区生态系统服务价值的时空演绎及其驱动因素.应用生态学报,2022,33(1):169-179.

- [13] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, Ding J Y, Wang S. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 1250-1263.
- [14] Wang H, Liu L B, Yin L, Shen J S, Li S C. Exploring the complex relationships and drivers of ecosystem services across different geomorphological types in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China (2000 - 2018). *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107116.
- [15] 张苗, 杨国庆, 王军邦, 李继园, 张甜. 秦巴山区生态系统服务权衡—协同关系. *山地学报*, 2022, 40(1): 1-13.
- [16] 左丽媛, 姜远, 高江波, 杜馥君, 张怡博. 生态保护红线区生态系统服务多维驱动力的定量分离. *地理学报*, 2022, 77(9): 2174-2188.
- [17] 开买尔古丽·阿不来提, 毛东雷, 王雪梅, 曹永香. 和田地区近 60 a 沙尘天气的时空变化特征. *甘肃农业大学学报*, 2022, 57(2): 145-152, 163.
- [18] 吕新, 杨磊, 张风华, 谷新利, 张伟, 张旺峰, 王绍明. 荒漠绿洲区农业特征及其可持续发展策略. *中国沙漠*, 2005, 25(4): 599-603.
- [19] 艾沙江·艾力, 梁菲菲, 徐海量, 木合塔尔·吾提库尔, 麦麦提艾力·麦麦提敏, 李金. 和田绿洲沙尘暴物质输送路径及其对大气环境质量的影响. *环境科学学报*, 2020, 40(8): 2882-2891.
- [20] 努尔麦麦提·如孜, 王雪梅. 新疆和田地区土地荒漠化时空特征分析. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(7): 870-878.
- [21] 田丰收, 刘新平, 原伟鹏. 新疆和田地区耕地地面源污染生态风险评价. *干旱区地理*, 2019, 42(2): 295-304.
- [22] 边慧芹, 王雪梅. 基于 NDVI 的塔里木盆地北缘绿洲-荒漠过渡带时空演变分析. *生态科学*, 2020, 39(3): 80-87.
- [23] Yan F P, Shanguan W, Zhang J, Hu B F. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 2.
- [24] 刘方田, 许尔琪. 基于土地利用的新疆兵团与非兵团生境质量时空演变的对比. *应用生态学报*, 2020, 31(7): 2341-2351.
- [25] 夏楚瑜, 国洪, 赵晶, 薛飞, 王楚玥, 周珺, 孙彤, 李淞, 张念慈. 京津冀地区生态系统服务对城镇化的多空间尺度动态响应. *生态学报*, 2023, 43(7): 2756-2769.
- [26] 刘海龙, 唐飞, 丁娅楠, 张羽, 郭晓佳, 谭景柏, 程岳. 山西省县域高质量发展与生态系统服务耦合的时空演变特征. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 1234-1245.
- [27] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 谢金燕, 苏坤. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. *地理学报*, 2021, 76(4): 973-991.
- [28] 戚琦, 王玲, 陈俊辰, 王彬宇, 贺淑钰, 韩建南, 李兆华, 李昆. 武汉市城市快速扩张与生态系统服务价值权衡/协同的交互作用. *地理科学*, 2024, 44(6): 953-963.
- [29] 曹峥林, 姜松, 王钊. 行为能力、交易成本与农户生产环节外包——基于 Logit 回归与 csQCA 的双重验证. *农业技术经济*, 2017(3): 64-74.
- [30] 杜运周, 马鸿佳. 复杂性背景下的创新创业研究: 基于 QCA 方法. *研究与发展管理*, 2022, 34(3): 1-9.
- [31] 王浩, 吴吉林, 龚磊, 周懿桐. 武陵山片区生态系统服务供需耦合协调评价及其驱动因素分析. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(1): 114-125.
- [32] 张玉臣, 朱铭祺, 廖凯诚. 粤港澳大湾区创新生态系统内部耦合时空演化及空间收敛分析. *科技进步与对策*, 2021, 38(24): 38-47.
- [33] 谢智敏, 王霞, 杜运周, 谢玲敏. 创业生态系统如何促进城市创业质量 ——基于模糊集定性比较分析. *科学学与科学技术管理*, 2020, 41(11): 68-82.
- [34] 徐广平, 张金山, 杜运周. 环境与组织因素组态效应对公司创业的影响 ——一项模糊集的定性比较分析. *外国经济与管理*, 2020, 42(1): 3-16.
- [35] 杜运周, 贾良定. 组态视角与定性比较分析(QCA): 管理学研究的一条新道路. *管理世界*, 2017, 33(6): 155-167.
- [36] Liu Y, Yuan X L, Li J X, Qian K X, Yan W, Yang X Y, Ma X F. Trade-offs and synergistic relationships of ecosystem services under land use change in Xinjiang from 1990 to 2020: a Bayesian network analysis. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 160015.
- [37] 朱丹丹, 安睿, 刘艳芳, 仝照民, 窦超, 晏阳. 湖北省生态系统服务协同权衡时空差异及归因分析. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(4): 799-809.
- [38] 李雪敏, 李同宁, 李道政, 马文琪. 内蒙古县域生态系统服务与居民福祉耦合协调关系时空特征及影响因素研究. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(7): 27-37.