

DOI: 10.20103/j.stxb.202409102182

何苏玲, 王金亮, 邓云程, 奎梦云, 沙晋明, 李小梅. 滇中地区综合生态系统服务与影响因素响应阈值的尺度效应. 生态学报, 2025, 45(9): - .
He S L, Wang J L, Deng Y C, Kui M Y, Sha J M, Li X M. The scale effect of response thresholds for composite ecosystem services and impact factors in central Yunnan Province. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): - .

滇中地区综合生态系统服务与影响因素响应阈值的尺度效应

何苏玲^{1,2,3,4}, 王金亮^{1,2,3,4,*}, 邓云程^{1,2,3}, 奎梦云^{1,2,3}, 沙晋明⁵, 李小梅⁵

1 云南师范大学地理学部, 昆明 650500

2 云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 昆明 650500

3 云南省地理空间信息工程技术研究中心, 昆明 650500

4 西南联合研究生院, 昆明 650092

5 福建师范大学地理科学院, 福州 350007

摘要:明确生态系统服务与影响因素的响应阈值对区域生态系统修复与优化意义重大,但现有研究普遍忽略了其尺度效应。在分析 1990—2020 年滇中地区综合生态系统服务 (Composite of Ecosystem Services, CES) 时空变化特征和影响因素的基础上,利用约束线方法重点探究了 CES 与不同影响因素响应阈值的尺度效应。结果发现: (1) 1990—2020 年,滇中地区 CES 呈波动下降的趋势,空间分布格局为“中部低、两侧高”。(2) 植被覆盖度 (Fractional Vegetation Cover, FVC) 和年降雨量是影响滇中地区 CES 最关键的因素,重要性均值分别为 0.5472 和 0.1893。(3) 滇中地区 FVC-CES 的约束线形状为正凸型;年降雨量、年均温度、标准化降水蒸散指数 (Standardised Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)、高程和坡度与 CES 的约束线形状为驼峰型;人均 GDP 和城镇化率与 CES 的约束线形状为负凸型。(4) 在 1—14km 的尺度范围内,随着空间尺度的增大, CES 对年降雨量、高程和坡度的响应阈值波动减小,对年均温度的响应阈值波动增大,存在明显的尺度效应。本研究重点弥补了生态系统服务阈值研究中对尺度关注的不足。

关键词:生态系统服务; InVEST 模型; 驱动机制; 约束线

The scale effect of response thresholds for composite ecosystem services and impact factors in central Yunnan Province

HE Suling^{1,2,3,4}, WANG Jinliang^{1,2,3,4,*}, DENG Yuncheng^{1,2,3}, KUI Mengyun^{1,2,3}, SHA Jinming⁵, LI Xiaomei⁵

1 Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

2 Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing for Universities in Yunnan, Kunming 650500, China

3 Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province, Kunming 650500, China

4 Southwest United Graduate School, Kunming 650092, China

5 School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: It is significant to identify the response thresholds of ecosystem services and influencing factors for regional ecosystem restoration and optimization. However, current research often overlooks the scale effects on the response thresholds of ecosystem services and influences. In this study, the composite of ecosystem services (CES) in central Yunnan Province from 1990 to 2020 was first quantified using various methods, such as the integrated valuation of

基金项目: 云南省重大科技专项计划 (202302A0370003); 国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项项目 (2018YFE0184300); 云南省高校科技创新团队 (IRTSTYN)

收稿日期: 2024-09-10; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jlwang@ynnu.edu.cn

ecosystem services (InVSET), the revised universal soil loss equation (RUSLE), and the normalized summation method, and then its spatial and temporal changes were analyzed. The influencing factors of CES were identified using the random forest model. The nonlinear relationship between CES and different influencing factors was explored using the constraint line method. Finally, the scale effect of CES with the response thresholds of different influencing factors was explored in the scale range of 1 km to 14 km. The main findings are as follows: (1) CES in central Yunnan Province fluctuated and then decreased from 1990 to 2020, exhibiting a spatial distribution pattern of 'low value in the middle and high value on both sides'. (2) Fractional Vegetation Cover (FVC) and annual precipitation were identified as the most important factors affecting CES, with mean importance values of 0.5472 and 0.1893, respectively. (3) The constraint line between FVC and CES showed a positively convex pattern, while the constraint lines between CES and factors like annual precipitation, average annual temperature, standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), elevation, and slope exhibited a hump-shaped pattern. The constraint lines between GDP per capita, urbanization rate, and CES demonstrated a negatively convex pattern. (4) Within the scale range of 1 to 14 km, the shapes of most constraint lines remained consistent as spatial scale increased, but the R^2 values fluctuated and decreased. The response thresholds of CES to annual precipitation, elevation, and slope showed fluctuations and decreasing trends, while the thresholds to annual mean temperature fluctuated and increased. There is no significant regularity in the response thresholds of CES to SPEI. This indicates that there is a scale effect between CES and the thresholds of its influencing factors. The findings provide new insights into how changes in CES and scale sensitivity influence the relationship between CES and its driving factors in central Yunnan Province. In summary, this study not only bridges the gap of scale effects in the study of response thresholds of ecosystem services and influencing factors, but also can provide scientific references for ecosystem service management and ecological restoration.

Key Words: ecosystem services, InVEST model, driving mechanisms, constraint lines

气候变化和土地利用/覆盖变化(Land Use/Cover Change, LUCC)改变了生态系统的结构与功能,引起全球 60%的生态系统服务退化^[1]。但是,这两大因素引起生态系统服务变化的机制略有不同。其中,气候变化通过影响生态系统的生物物理过程来影响生态系统服务的供应,具有长期性、渐进性的特点^[2]。人类活动主导的 LUCC 通过改变自然生态系统的物质流、能量流和信息流来影响其生态系统服务,具有短期性、直接性的特点^[3]。在 LUCC 过程中,城镇化和生态恢复是影响区域生态系统服务变化的重要途径。城镇化导致土地利用格局的斑块化和复杂性加剧,从而影响生态系统服务的潜在供应^[4]。大多数的生态恢复项目通过提升区域的植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)来增加生态系统的碳固定、土壤保持等服务能力^[5]。由于生态系统的复杂性,生态系统服务对气候变化和 LUCC 等影响因素的响应是一个复杂的非线性过程。当到达阈值,即使是驱动因素的细微变化都会引起生态系统服务的剧烈变化。这种生态系统服务对驱动因素响应的非线性变化体现了阈值效应的存在。明确阈值是否存在,并识别其具体的数值有利于进一步制定有效的措施提升生态系统服务^[6]。因此,全面剖析生态系统服务与影响因素的响应阈值成为当前综合生态系统管理实践的重要研究内容。

目前,众多的研究^[7-9]通过量化不同影响因子与生态系统服务的阈值,对如何科学开展生态系统管理进行了指导。从方法上看,生态系统服务与影响因素的阈值识别方法主要包括分段线性回归、弹性系数法和约束线法等^[10]。分段线性回归能识别两种趋势相交的转折点(阈值点),对数据要求较低,并且能较好地揭示变量之间的真实关系^[3]。弹性系数法是用变量之间的弹性系数对其阈值进行识别,主要根据变量之间的拟合函数求导得到^[7]。约束线表示受约束因素影响的响应变量的分布范围或潜在最大值^[11],通过约束线可以识别响应变量在特定条件下的临界点。相比之下,由于生态系统服务与驱动因素的散点通常呈云状分布,变化范围较大。而约束线法能更好地刻画其复杂的约束效应^[11],因此被广泛用于生态系统服务与影响因素的阈值识别研究中。

生态系统服务与一定时空尺度上生态系统的结构和过程密切相关,具有复杂的尺度效应^[12]。首先,尺度的变化会影响生态系统服务的空间分布^[13]。其次,不同空间尺度下,不同生态系统服务间作用关系的方向和空间显著性具有明显差异^[14–16]。生态系统服务的空间异质性及不同生态系统服务之间的关系主要受到其所依赖的相关驱动因素的影响^[17]。因此,不仅生态系统服务的空间分布和服务之间的相互关系表现出尺度效应,其对驱动因素的响应阈值也同样存在尺度效应^[18]。但是,目前关于生态系统服务与影响因素响应阈值的研究,大多数局限在单一特定的空间尺度^[3,6–8,19]。而有关生态系统服务尺度效应的研究主要聚焦在生态系统服务权衡与协同关系上^[14]。公众对于生态系统服务与其影响因素的阈值在不同空间尺度上变化的认知有限。此外,由于驱动因子相互作用的复杂性,导致阈值在不同空间尺度上的联系仍存在很大的不确定性^[20–21]。因此,亟需开展生态系统服务与影响因素响应阈值的尺度效应研究。

滇中地区是云南省经济发展的核心区,受到降雨和地形的影响,存在干旱^[22–23]、水土流失^[22,24]等生态问题。目前,该区域生态系统服务的研究重点聚焦在各项生态系统服务的量化^[25–28]。尚不清楚该区域综合生态系统服务(Composite of Ecosystem Services, CES)变化的关键影响因素,以及 CES 对不同影响因素的响应是否存在阈值? 该阈值是否存在尺度效应? 鉴于此,研究以滇中地区为研究区,结合生态系统服务与权衡综合评估模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVSET)、修正的通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)和综合叠加法评估并探究 1990—2020 年该区域 CES 的时空变化;利用随机森林模型识别不同影响因素对 CES 的重要性;基于约束线方法揭示不同影响因素与 CES 的非线性约束关系,并识别其阈值;最后探究不同空间尺度下该阈值的变化特征。研究重点回答以下 2 个问题:(1) 滇中地区 CES 的关键影响因素是什么?(2) 在不同的空间尺度上, CES 对不同影响因素的响应阈值呈现什么样的特征? 通过上述研究,弥补了当前生态系统服务阈值研究中对尺度效应关注的不足。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇中地区位于 100°43'E—104°49'E, 23°19'N—27°04'N 之间,包括昆明市、楚雄州、玉溪市和曲靖市 4 个州市,国土总面积达 9.39 万 km²(图 1)。该区域整体地势从北向南缓降,地势最高点位于禄劝马鬃岭,海拔达 4247m。该区域整体位于亚热带季风气候区,但受到地形的影响,在高山和河谷地区分别形成了小范围的寒温带高山气候区和干热河谷气候区。滇中地区作为云南省经济、社会高质量发展的核心。2022 年,其总人口

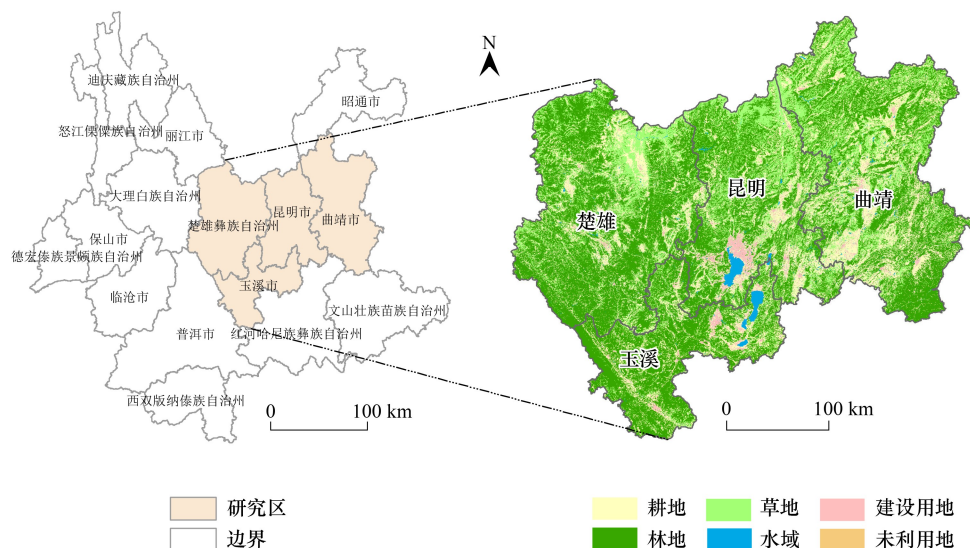


图 1 研究区位置图

Fig.1 Map of the study area

和 GDP 分别达到了 1900.6 万人和 15627.56 亿元,约占据全省的 40.50%和 53.97%。城市持续扩张驱动了该区域各项生态系统服务的显著变化。因此,深入研究滇中地区 CES 变化的驱动因素及 CES 对不同因素的响应阈值对于该区域生态建设至关重要。

1.2 数据源与数据预处理

研究使用的数据源包括 Landsat 系列遥感影像、土地利用数据、气象数据、DEM 数据、土壤数据和社会经济数据(表 1)。除了 DEM 和土壤数据外,所有数据的年份均包含 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 个年份。由于上述栅格数据的坐标系统和原始空间分辨率均存在差异,使用 ArcGIS 10.2 块统计和重投影工具将其空间分辨率统一采样至 1km,坐标系转换到 WGS_1984_UTM_Zone_48N 坐标系。

表 1 研究使用的数据
Table 1 Data used in the study

数据类型 Data type	名称 Name	空间分辨率/比例尺 Spatial resolution/scale	数据来源 Data sources
遥感影像 Remote sensing imagery	Landsat TM/OLI	30m	Google Earth Engine (https://code.earthengine.google.com/)
土地利用数据 Land use data	GLC_FCS30	30m	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)
气象数据 Meteorological data	中国 1km 逐月降水量/气温/潜在蒸散发数据集(1990—2021)	1km	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)
DEM 数据 DEM data	ASTER GEDM	30m	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
土壤数据 Soil data	世界土壤数据库(HWSD)	1:100 万	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)
	全球土壤有效含水量数据	250m	ISRIC 数据中心 (https://data.isric.org/)
	中国基岩深度数据	100m	Yan 等 ^[29] https://doi.org/10.1038/s41597-019-0345-6
社会经济数据 Socio-economic data	人均 GDP、城镇化率	—	中国经济社会大数据研究平台(https://data.cnki.net/)

1.3 研究方法

1.3.1 单项生态系统服务的量化

(1) 基于 InVEST 模型的生态系统服务量化

分别通过 InVEST 模型中的 Water Yield 模块、Habitat Quality 模块和 Carbon Storage and Sequestration 模块来量化滇中地区 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 个典型年份的产水量、生境质量和碳储量。其中,各模块的计算公式参考王培家等^[30]的研究,所需的参数设置如下:

1) Water Yield 模块需要的参数包括土地利用数据、年降雨量、年潜在蒸散发量、根系限制深度、植被可利用含水量数据、生物物理参数表以及 Zhang 系数。其中,土地利用数据、年降雨量、年潜在蒸散发量、根系限制深度、植被可利用含水量数据的数据来源见表 1;生物物理参数表参考张恩伟^[31]的研究进行设置;Zhang 系数的取值范围为 1—30,研究通过反复尝试并将不同 Z 值下的模拟结果与《云南省水资源公报》中的实际产水量比较,最终 Z 值为 0.85 时,模拟值与实际值的拟合效果最好。

2) Habitat Quality 模块所需的参数包括土地利用数据和威胁因子数据。研究将耕地和建设用地作为生态威胁因子,参考金丽娟^[32]的研究设置了威胁因子的最大影响距离、权重和空间衰退类型表以及各地类对威胁因子的敏感性表。

3) Carbon Storage and Sequestration 模块所需的参数包括土地利用数据和不同土地利用类型的碳密度数据。不同土地利用类型的碳密度数据参考张凯琪等^[33]的研究。

(2) 基于 RUSLE 模型的土壤保持量估算

基于 RUSLE 模型评估滇中地区 1990—2020 年 4 个典型年份的土壤保持量,计算公式如下:

$$A = R \times K \times LS \times (1 - C) \quad (1)$$

式中, A 是土壤保持量, R 是降雨侵蚀力, 参考《生产建设项目土壤流失量测算导则 SL773—2018》按年降雨量计算; K 是土壤可蚀性, 利用 EPIC 模型计算^[34]; LS 是坡长和坡度, 使用填注后的 DEM 数据计算; C 是植被管理因子, 基于植被覆盖度的计算方法, 具体公式参考王美娜等^[35]的研究。

(3) 粮食供给量估算

参考 Peng 等^[36]的研究评估滇中地区 1990—2020 年 4 个典型年份的粮食供给量, 计算公式如下:

$$G_i = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times G_{sum} \quad (2)$$

式中, G_i 是栅格 i 的粮食供给量, $NDVI_i$ 是耕地栅格 i 的归一化差异植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), $NDVI_{sum}$ 是耕地 NDVI 的总和, G_{sum} 是区域粮食总量。

上述 5 种单一生态系统服务的量化结果与统计年鉴数据和相关研究结果^[22,28,31,37] 等数据进行了比较, 具有较强的可靠性。

1.3.2 CES 的量化

CES 是多种生态系统服务的综合表达, 用来表征区域整体的生态系统服务水平。由于不同生态系统服务的量纲不一, 首先利用极值标准化对不同的生态系统服务进行归一化, 再通过单项生态系统服务的累加获取 CES, 计算公式如下:

$$ES_s = \frac{ES - ES_{min}}{ES_{max} - ES_{min}} \quad (3)$$

$$CES = \sum_{i=1}^n ES_{si} \quad (4)$$

式中, ES_s 、 ES 、 ES_{min} 、 ES_{max} 分别为生态系统服务的归一化值、原始值、最小值和最大值, ES_{si} 是第 i 项生态系统服务的归一化值, n 为生态系统服务的种类。

1.3.3 影响因素选取及识别

滇中地区位于中国西南山区, 干旱严重且城市化进程明显。针对滇中地区生态系统的自然特征和人类活动特点, 兼顾数据时效性与可获取性等原则。参考前人研究成果^[30,38], 研究从植被、气候、地形和人类活动 4 方面选择了该区域 1990—2020 年 4 个典型年份的 FVC、年降雨量、年均气温、标准化降水蒸散指数 (Standardised Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)、高程、坡度、城镇化率和人均 GDP 共 8 个因子来探究滇中地区对应年份不同影响因素对 CES 的重要性。植被是影响碳存储、水源涵养和土壤保持等生态系统服务的核心变量。降雨和气温直接影响植物的生长过程, 从而影响生态系统服务。干旱等极端气候可能导致水源供给、粮食供给等生态系统服务的剧烈波动^[39]。地形是影响山区生态系统和景观格局空间异质性的的重要因素^[40]。高程变化导致的水热条件变化影响了植被的生长季节和生产力, 从而影响生态系统服务^[41]。坡度通过影响地表径流强度和土壤厚度来影响土壤保持等服务^[42]。人类活动通过改变土地利用方式影响生态系统服务。因此, 城镇化率、人均 GDP 等因素常被认为是影响生态系统服务的重要驱动力之一^[18]。

上述因子中, FVC 通过像元二分法直接从 Landsat 影像中提取^[7]。年降雨量和年均气温通过中国 1km 逐月降水量/气温数据集获取。SPEI 由美国国家大气研究中心提供的 SPEI-R 包计算得到。高程和坡度均由 DEM 直接提取。城镇化率和人均 GDP 由统计年鉴获取, 通过 ArcMap10.2 进行空间化, 空间化的步骤参考甘露^[43]的研究。

随机森林模型是当前机器学习的主流算法之一, 它在量化复杂的特征数据集中的自变量对因变量的贡献有较大优势^[44]。因此, 基于该模型来量化不同驱动因子对 CES 的重要性。

1.3.4 约束线阈值识别

分位数分割法是常见的约束线绘制方法之一, 它是分位数回归法和逻辑切片法的结合。与参数法、散点

云网格法、分位数回归法等相比,该方法具有更强的统计学基础^[45]。因此,本研究利用 python 代码和分位数分割法实现约束线的绘制。该方法的实现流程为:(1)利用 ArcMap 10.2 渔网工具将研究区划分为 1km×1km 网格,共 93553 点,根据多值提取至点工具获取每个渔网点对应的 CES 和影响因素的值;(2)将驱动因子根据数据分为 100 组,选择每组 99.9%的分位数作为边界点;(3)采用直线、二次函数、三次函数、对数函数、指数函数和幂函数几种函数分别对边界点进行拟合,选择拟合效果最好的函数绘制约束线;(4)对约束线进行求导获取阈值。

1.3.5 空间尺度的选择

生态系统服务研究中,尺度选择的依据主要包括经验判断和与决策相对应两种^[46]。大多数相关的研究中^[47—49],空间尺度下限是由数据的原始分辨率来决定,而尺度上限通常与乡镇级行政区划的面积相关。滇中地区面积共 9.39 万 km²,包含 455 个乡镇级行政区,其乡镇区域平均面积为 206km²。首先,14km×14km 的栅格尺度更容易与乡镇尺度匹配,有利于实现网格向行政尺度的过渡^[48—49]。此外,当尺度过大,数据过度聚合容易导致信息丢失。因此,研究以 1km 为尺度下限,在 1—14km 的范围内,以 1km 为步长来逐步探究空间尺度变化对 CES 与驱动因素的响应阈值的影响。

2 结果与分析

2.1 CES 时空演变特征

从 1990—2020 年 CES 平均值的空间分布来看(图 2),CES 表现出“中间低、两边高”的分布特征。高值区主要聚集在元江两侧的哀牢山一带和曲靖市东南部,低值区主要集聚元谋干热河谷、东川小江流域、昆明市

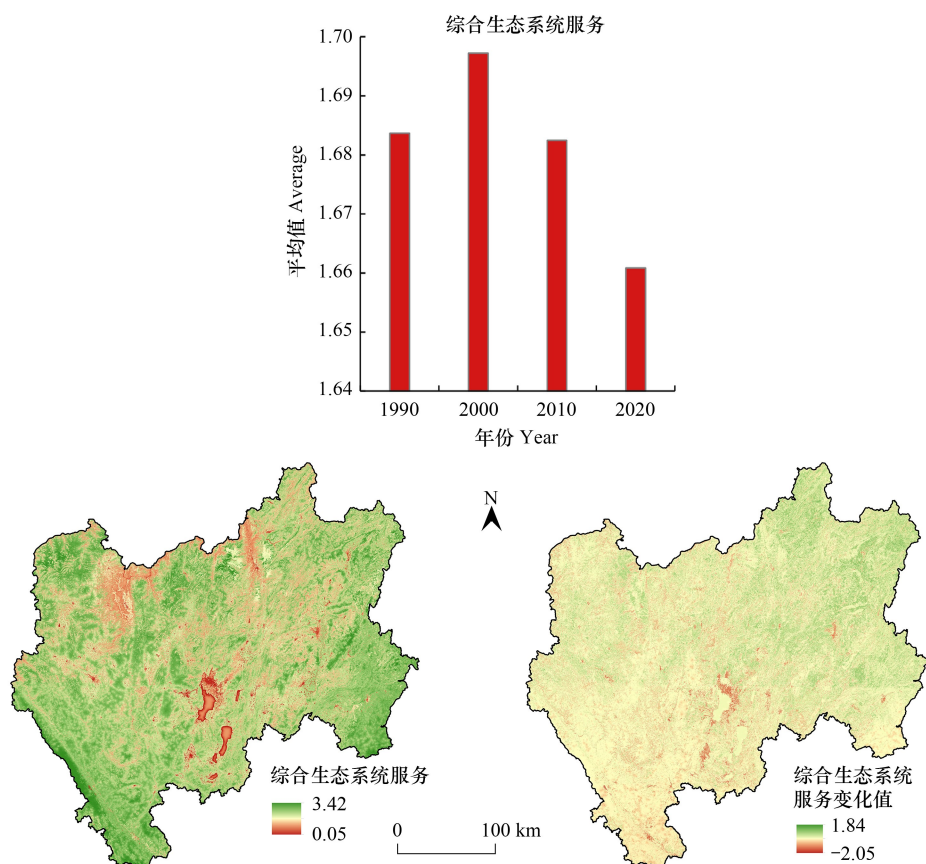


图2 1990—2020 年滇中地区 CES 时空变化

Fig.2 Spatial and temporal changes in CES in central Yunnan Province from 1990 to 2020

主城区和湖泊区域。哀牢山一带和曲靖市东南部均处于亚热带季风气候区,适宜的气候为植被生长提供了适宜的环境。此外,哀牢山一带属于横断山脉、青藏高原和云贵高原的结合部。复杂的地形造就了丰富的植被种类,使得该区域生态系统具有更高的稳定性和抵抗力^[50]。并且哀牢山地区偏远,人类活动较少。1988年,该区域就被设立为国家级自然保护区,防止了人为导致的植被破坏,有利于维持高水平的 FVC。受地形的影响,元谋干热河谷与东川小江流域气温高且降水少。植被容易受到干旱胁迫,主要发育为稀树灌草地,难以形成森林,导致其 FVC 不高^[51]。昆明市主城区和湖泊区域没有较高植被覆盖,从而使得其 CES 较低。

从 CES 的时空变化来看(图 2),1990—2020 年,CES 以“先增加-后减少”的变化态势波动减少了 0.02。CES 明显增长的区域主要聚集在曲靖市东北部,显著减少的区域主要分布在滇池东岸和玉溪市西部。这是因为,滇池东岸大量的建设用地侵占草地、农田、森林等半自然和自然生境^[52—53],导致该区域生境质量和土壤保持量下降^[54]。虽然 2000 年以来,滇中地区开展了退耕还林等生态修复工程,FVC 也明显波动增长。但其增长的区域主要在滇中东部和北部,城镇区域的 FVC 退化十分显著^[55—56]。并且,2010 年,石林县和通海县等地发生的特大火灾使得该时期的 FVC 急剧下降^[57]。此外,在气候变化的影响下,滇中地区产水量随着年降雨量减少。尽管粮食供给量在波动增长,但在多种生态系统服务的共同作用下,滇中地区 CES 依旧表现出波动降低的趋势。

2.2 CES 的影响因素

根据随机森林模型对滇中地区 CES 的影响因子进行重要性排序,其模型的 R^2 均超过 0.82,表示结果可靠。1990—2020 年,FVC、温度、SPEI、高程和坡度对 CES 的影响在波动减弱,其特征重要性值分别减少了 0.0178、0.0025、0.0160、0.0013 和 0.0245。年降雨量、人均 GDP 和城镇化率对 CES 的影响在波动增加,其特征重要性值分别增加了 0.0125、0.0027 和 0.0469(表 2)。从特征重要性的均值来看(表 2),不同因子对 CES 的影响大小可排序为:FVC(0.5472)>年降雨量(0.1893)>年均温度(0.0535)>坡度(0.0509)>SPEI(0.0468)>城镇化率(0.0409)>高程(0.0389)>人均 GDP(0.0325)。

表 2 不同影响因子对 CES 的特征重要性

Table 2 Characteristic importance of different impact factors on CES

影响因素 Factor	1990	2000	2010	2020	平均值 Average
植被覆盖度 Fractional vegetation cover	0.5931	0.5264	0.4938	0.5754	0.5472
年降雨量 Annual precipitation	0.1455	0.1891	0.2644	0.1580	0.1893
年均气温 Annual average temperature	0.0518	0.0712	0.0418	0.0493	0.0535
标准化降水蒸散指数 Standardised precipitation evapotranspiration index	0.0561	0.0445	0.0463	0.0401	0.0468
高程 Elevation	0.0399	0.0407	0.0365	0.0386	0.0389
坡度 Slope	0.0690	0.0497	0.0406	0.0444	0.0509
人均 GDP Per capita GDP	0.0262	0.0473	0.0278	0.0289	0.0325
城镇化率 Urbanization rate	0.0184	0.0310	0.0488	0.0653	0.0409

2.3 影响因素对 CES 的约束效应

滇中地区 CES 与不同影响因素的约束线形态各异。1990—2020 年,FVC-CES 的约束线为正凸型,表示 CES 随着 FVC 的增长而提高(图 3)。年降雨量-CES、年均温度-CES、SEPI-CES、高程-CES 和坡度-CES 的约束线始终为驼峰型(图 4 和图 5)。表示当达到阈值后,年降雨量、年均温度、SPEI、高程和坡度的增加反而会导致 CES 的降低。过去 30 年,该区域 CES 对年降雨量响应的阈值分别为 894.08mm、897.87mm、864.98mm 和 799.06mm,呈现出波动减小的趋势。CES 对年均温度的响应阈值分别为 11.65℃、13.05℃、14.95℃ 和 10.51℃,表现出先增大后减小的趋势。CES 对 SPEI 的响应阈值由正值转为负值。CES 对高程的响应阈值分别为 2409.73m、2338.90m、2337.46m 和 2645.69m,变化趋势与年均气温相反。1990 年,CES 对坡度的响应阈值为

21.77°, 自 2000 年后, 其阈值一直保持为 22.72°。人均 GDP-CES 和城镇化率-CES 的约束线为负凸型(图 6), 表示 CES 随着人均 GDP 和城镇化率的增长而降低。

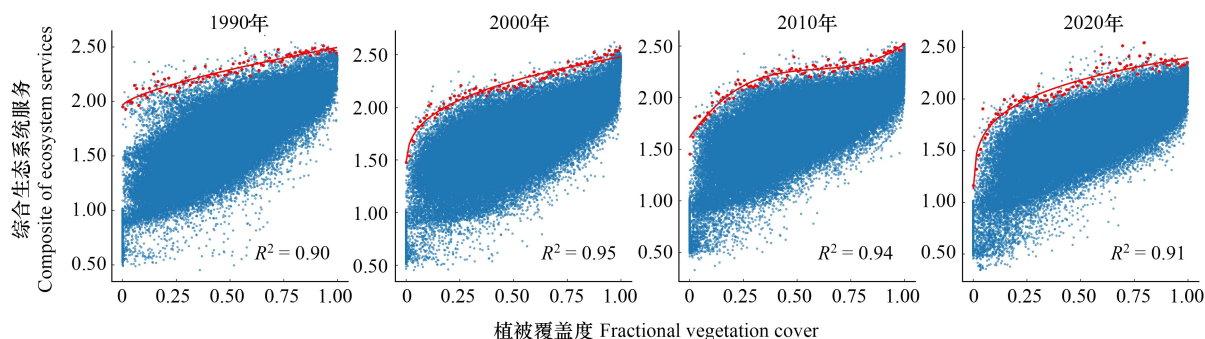


图 3 FVC 与 CES 的约束线

Fig.3 Constraint lines for FVC and CES

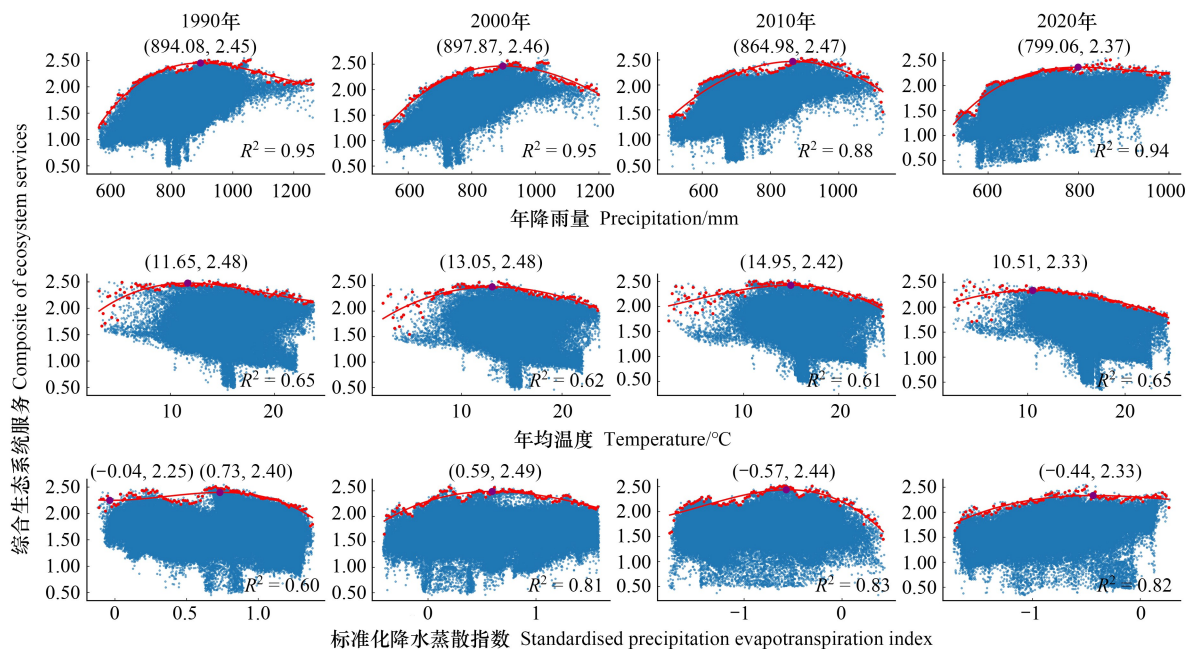


图 4 气候因子与 CES 的约束线

Fig.4 Constraint lines for climate factors and CES

2.4 阈值的尺度效应

由于 FVC-CES、人均 GDP-CES 和城镇化率-CES 之间不存在阈值。研究分别以 2020 年的年降雨量、年均温度、SPEI、高程和坡度与 CES 的约束线为基准, 在 1—14km 的尺度范围内, 以 1km 为步长探究 CES 对不同影响因素响应阈值的尺度效应。随着空间尺度增大, 年降雨量-CES 的约束线由驼峰型逐渐转为凸波型, 年均温度-CES、SPEI-CES、高程-CES 和坡度-CES 的约束线依旧保持为驼峰型(图 7)。但是随着空间尺度增大, 年降雨量、年均温度、SPEI、高程和坡度与 CES 非线性关系的 R^2 均呈现出波动减小的趋势(图 8)。CES 对年降雨量、高程和坡度的响应阈值在波动减小; CES 对年均温度的响应阈值呈现出波动增加的趋势; 而 CES 对 SPEI 的响应阈值没有规律的变化特征(图 8)。

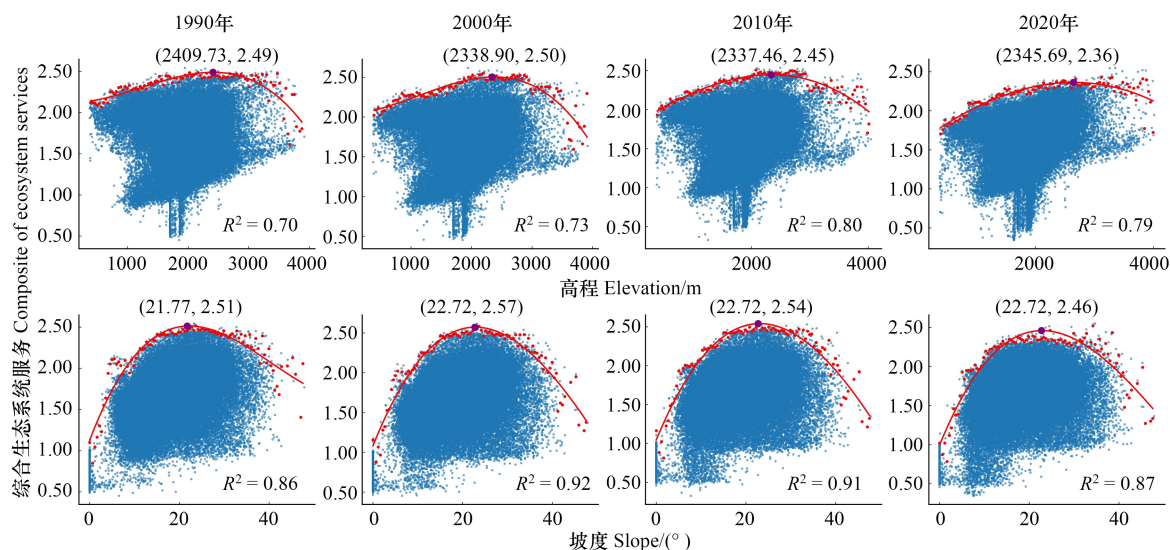


图 5 地形因子与 CES 的约束线

Fig.5 Constraint lines for terrain factors and CES

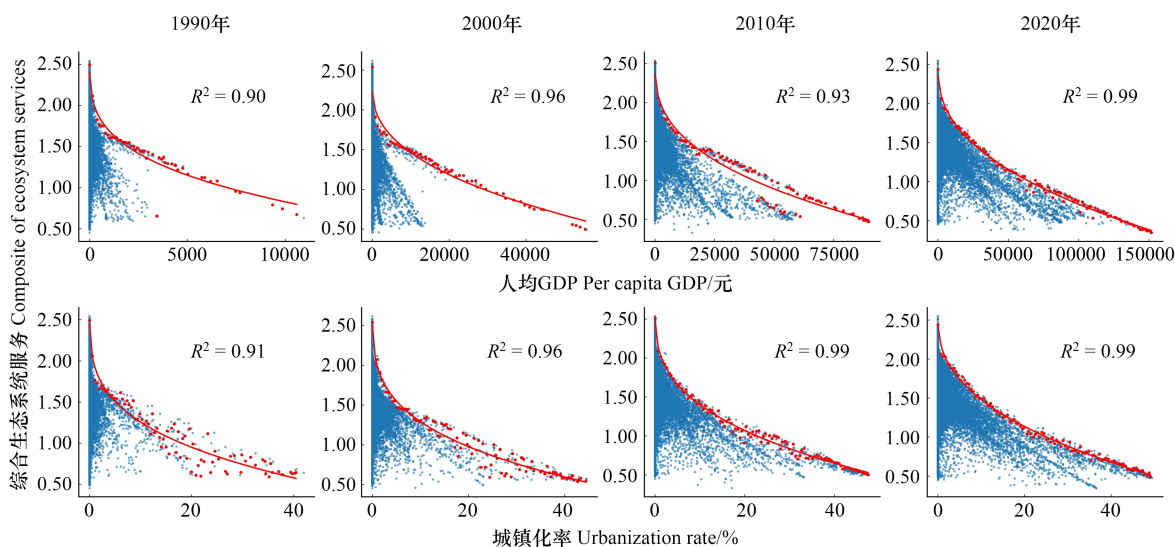


图 6 人类活动因子与 CES 的约束线

Fig.6 Constraint lines for anthropogenic factors and CES

3 讨论

3.1 CES 影响因素的变化

CES 受到气候、地形、植被、人类活动等不同因子的影响,但不同因子的影响程度各异(表 2)。研究发现,1990—2020 年,FVC 和年降雨是影响滇中地区 CES 的关键因素,这与陈田田等^[58]和 Jiang 等^[59]的研究结果一致。CES 是多项生态系统服务的综合表达,以植被为主的森林生态系统不仅提供了巨大的碳汇量^[60],而且为水土保持和维护生物多样性提供了重要基础^[61]。年降雨量不仅是影响地表产水最关键的因子,也是维持植被生长的重要基础条件。充足的降雨能促进植物生物量积累,提高碳储存、土壤保持等服务。随着时间的推移,FVC 和年降雨对 CES 的影响程度有所不同。FVC 对 CES 的影响波动减弱,而年降雨量对 CES 的影响

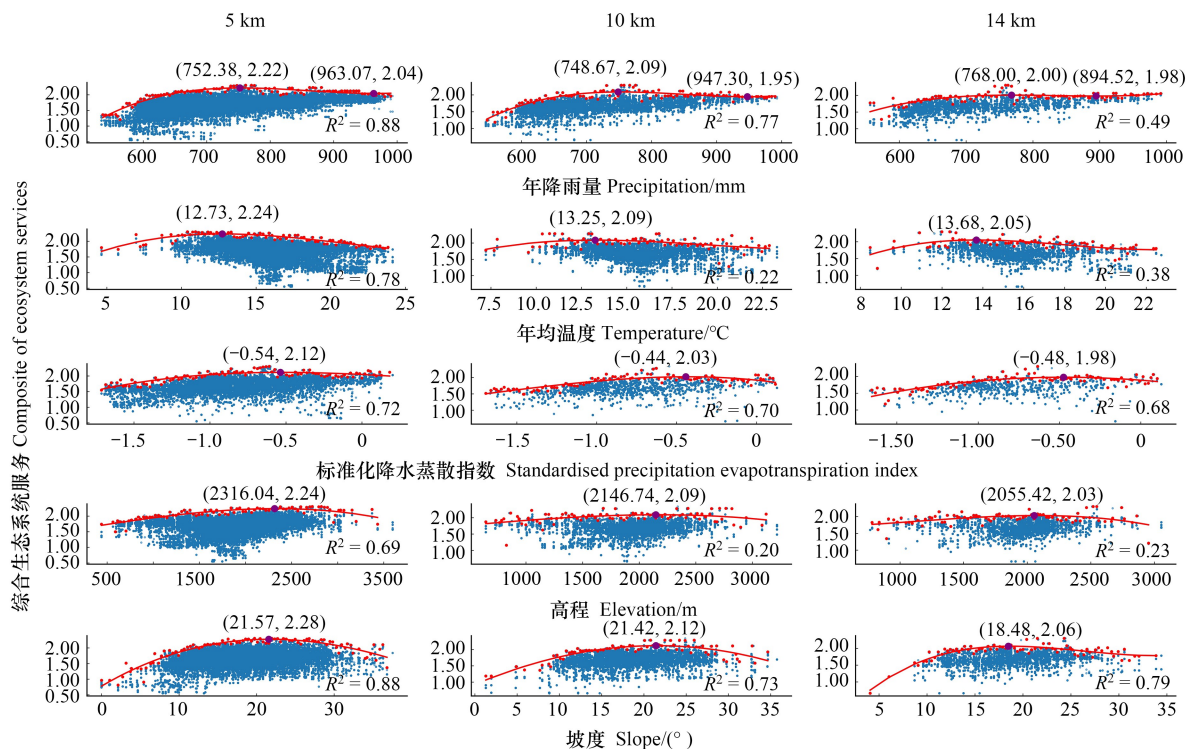


图7 不同尺度下各因素与 CES 约束线

Fig.7 Constraint lines for factors and CES at different scales

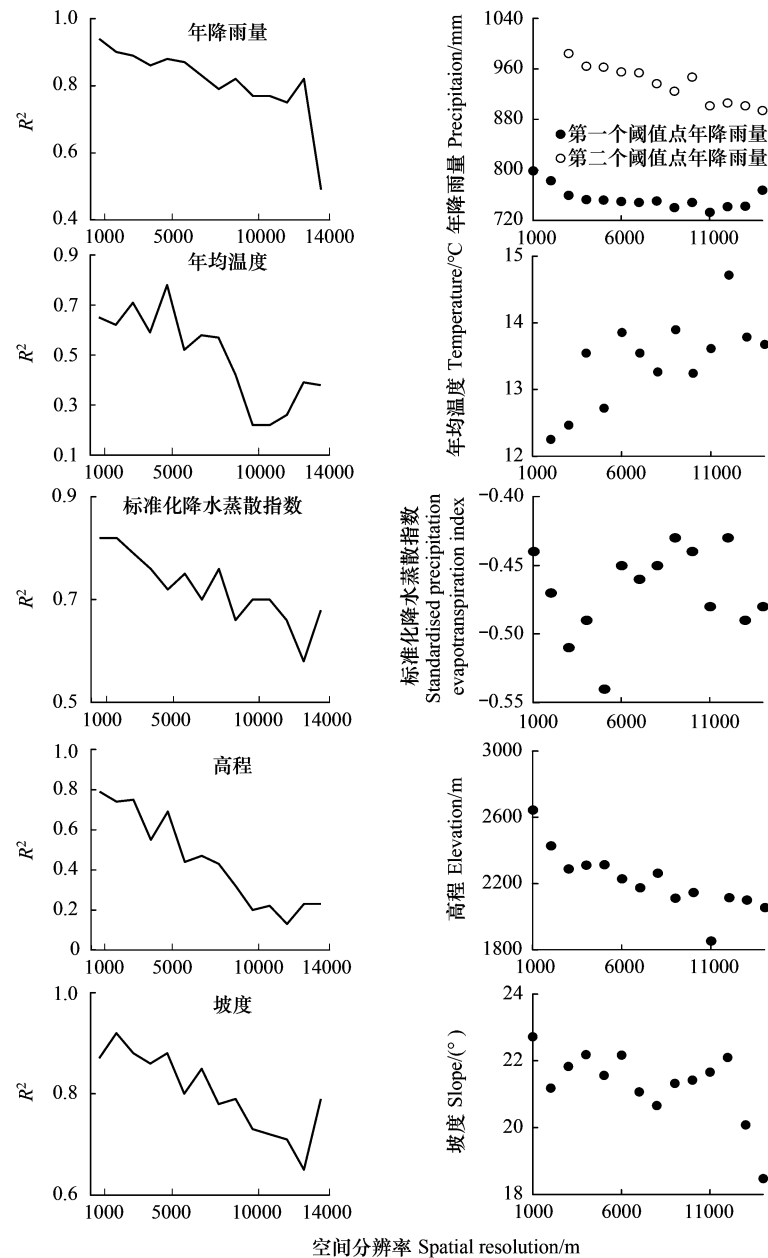
波动增加(表2)。这可能与生态恢复政策的实施以及气候变化密切相关。对于 FVC 而言,自 2000 年以来,滇中地区开展的众多生态修复工程使其 FVC 逐渐提升。FVC 对 CES 的边际效应趋于稳定,因此其影响逐渐减弱。对于年降雨量而言,虽然生态恢复工程有效增强了植被覆盖率,但这些人工干预措施对降雨量更加依赖^[62]。此外,气候变化背景下,滇中地区降水显著减少,干旱趋势明显加剧^[63]。这使得生态系统对水分的依赖性增加,降雨对 CES 的影响更加突出。值得注意的是,2010 年,该区域 FVC 对 CES 的影响远小于其它 3 个年份,而年降雨量的表现相反。因为这一年,滇中地区大面积的林火导致植被严重破坏,FVC 急剧下降^[57]。使得植被在水源涵养、碳储存和土壤保持中的作用减弱,对 CES 的影响程度显著降低。而火灾破坏了植被的缓冲能力,使降雨直接影响水文过程和土壤侵蚀。这种情况下,降雨对 CES 的影响程度明显增强。

研究发现,随着时间变化,滇中地区人为因素(城镇化率)对 CES 的影响逐渐超越部分自然因素(温度、SPEI、高程和坡度)。这与现有研究结论^[64]一致。首先,在较短的时间尺度上,自然因素对生态系统的影响相对稳定^[65]。而城镇扩张直接改变了区域生态系统的结构和过程,对生态系统服务造成了更显著的影响。此外,随着城镇化进程加快,区域内对生态系统服务的需求增加,但供给能力下降。这种由城镇化导致的供需失衡使得其对 CES 的影响大于自然因素^[49]。

3.2 影响因素对 CES 的约束效应

本研究发现,在 1km 的空间尺度上,滇中地区 FVC-CES 的约束线为正凸型(图3)。这与员学峰等^[66]的研究结果一致。植被恢复能减少水土流失,增强生境的适宜性和稳定性并提升碳储量^[67]。因此,CES 随着 FVC 增加而增加。但是,该研究结果与张琨等^[7]和王晓峰等^[8]的发现有所不同。这种差异可能与空间尺度上推过程有关。研究将 FVC 和 CES 从 30m 的空间尺度上推至 1km 来探讨其约束效应。在这个过程中,数据被平滑、复杂性降低^[68],可能导致 FVC 与 CES 的非线性效应被削弱或掩盖。之前的研究^[69-70]也表明,空间尺度上推可能降低植被指数数据的敏感性,使得其生态过程变得不显著。

气候(年降雨量、年均温度、SPEI)和地形(高程和坡度)因素与 CES 的约束线均为驼峰型(图4和图5)。

图8 不同尺度下各因素与CES约束线的 R^2 和阈值Fig.8 R^2 and thresholds for factors with CES constraint lines at different scales

这与 Ma 等^[6]、Li 等^[71]和王雯等^[72]的研究结果一致。温度是影响植被生长的基础条件,适当的温度有利于促进植被生长、提升生境质量,高温、少雨容易引起干旱,从而影响碳储量等生态系统服务。作为影响滇中地区 CES 的重要因素,年降雨量与 CES 的约束线呈现出驼峰型的原因可能是:当降雨量较低时,水资源匮乏限制了植被生长,从而使得粮食供给、碳储量等生态系统服务受限。随着水分的增加,有效促进了植物的光合作用^[73],进而提升生态系统服务供给能力。然而,随着降雨量的增多,当超过一定阈值后,生态系统中的水分平衡可能被破坏。首先,在坡度较大的区域,过多的降水会导致地表径流增加,导致土壤侵蚀加剧,土壤保持量降低^[42]。其次,过量的降雨可能会导致土壤含氧量降低、使得植被根系腐烂,从而影响植被生长^[74-75]。因此,过多的降雨量不仅会削弱土壤保持服务,而且可能影响碳储量、粮食生产等其他生态系统服务。尽管黄钰婷等^[76]指出,产水量服务随着降雨量增多而增强。但需要注意的是,CES 是多种生态系统服务的综合体。当

降雨量过多时,虽然产水量服务可能增加,但土壤保持、碳储量等生态系统服务可能受到负面影响。因此,降雨量过多会导致 CES 的下降。地形是限制人类活动和影响植被生长的重要因素。海拔较低且地形平坦的区域通常是人类活动的热点区,城市扩张导致 CES 受到较大负面影响。适当的海拔和坡度具有较为适宜的温度和降水条件,有利于植物的生长,且受人类活动干扰较小^[72]。高海拔地区气温低、土层浅且肥力低,贫瘠的土壤限制了植被的生长,其景观主要以草地为主,生物多样性有限^[41]。坡度较大的区域,容易发生水土流失,导致碳储量、土壤保持等生态系统服务受限。因此,地形因素与 CES 的约束线表现为驼峰型。

人类活动(人均 GDP 和城镇化率)与 CES 的约束线均表现为负凸型(图 6)。这与 Zhang 等^[18]和焦春萌等^[77]的研究结果一致。城市扩张导致森林、草地等自然生态用地被不透水面替代,直接削弱了城镇区域碳储量、食物供给等生态系统服务。此外,城镇化加剧了景观破碎化,导致生物多样性降低^[78]。尽管 Yi 等^[79]指出随着城市规模扩大、集聚效应显现,城市扩张对生态系统服务的负面影响会逐渐减弱。但对于滇中地区而言,其城市扩张模式表现为低密度和扩散型特征,这种扩张模式导致的生态系统服务损失更大^[80]。

3.3 阈值的尺度效应

多数研究^[81-83]表明,驱动因素对生态系统服务的影响会随尺度发生变化。但是,目前关于生态系统服务与其影响因素响应阈值的尺度效应研究仍较为有限。本研究发现,CES 与其影响因素的约束关系和响应阈值存在尺度效应。首先,除年降雨量外,气候和地形因素与 CES 的约束关系在各个空间尺度上均表现出较高的稳定性。在小尺度上,CES 与所有因素约束线的 R^2 总体高于大尺度。这与 Xu 等^[13]、Zhang 等^[84]和 Li 等^[85]的研究一致。气候、地形等自然因素相对稳定,其不同空间尺度上对生态系统的作用机制相对一致。因此,气候和地形因素与 CES 约束关系在不同空间尺度依旧保持稳定。但是,值得注意的是,随着空间尺度的变大,年降雨量-CES 的约束线由驼峰型逐渐转变为凸波型。这是因为,温度和 SPEI 等气候因子对生态系统的影响通常存在累积效应^[86]。而年降雨量对生态系统服务的作用更加直接,它可以直接影响生态系统的产水和土壤保持等服务。因而随着尺度增加,约束关系出现波动。并且随着空间尺度的增加,年降雨量和 CES 的空间异质性整体增强^[87-88]。这导致不同区域生态系统服务对降雨的响应存在差异,多种复杂关系相互叠加使得其约束线由驼峰型转变为凸波型。对于 CES 与各因素约束线的 R^2 而言,首先,随着空间分辨率的降低,其数据精度可能受到影响,从而导致模型拟合的精度下降。此外,人类活动因素对生态系统服务的影响逐渐突出^[78],从而降低了气候和地形等单一因子与 CES 约束关系的 R^2 值。

空间尺度的增加改变了生态过程的表达形式和变量间的关系,导致生态系统服务对影响因素响应阈值的相对变化^[18],体现了阈值尺度效应的存在。本研究发现,CES 对不同影响因素的响应阈值也存在显著的尺度效应。具体而言,随着空间尺度的上升,CES 对年降雨量、高程和坡度的响应阈值在波动减小,对年均温度的响应阈值在波动增加,而对 SPEI 的响应阈值未呈现规律性的特征。这一现象表明在不同空间尺度下,CES 对影响因素的响应阈值有所差异。在研究的 5 个影响因素中,只有年降雨量的响应阈值表现出相对稳定的减小趋势,而其他因素的响应阈值波动较大。这可能是由于年降雨量对 CES 的直接影响更为显著,而气温、SPEI 和地形等其它因素对 CES 的影响较小导致的。CES 对年降雨量的响应阈值随着空间尺度的增大而减小的现象可能由以下几方面原因造成:一是空间异质性的影响^[83-84]。随着空间尺度增大,分析单元的空间异质性显著增强。不同的生态系统区域(例如干旱区、湿润区)同时被纳入一个较大网格中。由于干旱区对降水的敏感性更高,这部分区域的贡献被放大,从而整体上降低了 CES 对年降雨量的响应阈值。二是生态系统服务结构变化的影响。在小尺度下,分析单元内的 CES 可能由单一的生态系统服务(例如产水服务)主导。该服务对降雨的响应曲线明显,从而阈值较高。随着尺度的增大,分析单元内可能纳入更多的生态系统服务类型,导致响应关系趋于平滑,从而降低了整体的响应阈值。三是数据分布的影响。在小尺度下,数据相对集中,模型拟合的响应曲线更加陡峭,因此阈值较高。而在大尺度下,数据较为分散,曲线拟合趋于平滑,导致响应阈值较低。这种 CES 对年降雨量响应阈值的尺度效应表明,年降雨量在干旱和半干旱区域对 CES 具有更高的敏感性。在该区域,少量降水即可显著提升 CES。因此,在生态系统保护与修复管理中,应优先考虑这些区域的

水资源分配,采取针对性措施(例如加强灌溉)以提升生态系统服务供给能力。

3.4 不足与展望

研究量化了滇中地区 CES 的时空演变特征,并探究了其关键因素和阈值,重点关注了该阈值的尺度效应,弥补了生态系统服务阈值研究中对尺度关注的不足。但是,受到数据获取的限制,本研究没有考虑与文化服务相关的生态系统服务。在之后的研究中,应该将与此相关的生态系统服务纳入考虑。此外,研究基于同一套数据探索了不同空间尺度上 CES 与影响因素响应阈值的尺度效应。但是,不同空间尺度上对指标选择和数据精度等要求具有不同的标准。在下一步的研究中,我们将考虑不同尺度上指标和数据精度的差异,进一步探索跨尺度的分析方法。

4 结论

研究揭示了滇中地区 1990—2020 年 CES 的时空演变特征和不同影响因素对 CES 的重要性程度,重点探究了 CES 与不同影响因素的响应阈值及该阈值的尺度效应。发现 1990—2020 年,滇中地区 CES 的时空异质性明显,FVC 和年降雨量是影响滇中地区 CES 最关键的因素。CES 与影响因素的约束线主要包括正凸型、驼峰型和负凸型三种类型。在 1—14km 的空间尺度内,随着空间尺度增大,CES 与大多数影响因素的约束线形状始终保持稳定,阈值呈现出波动减小的趋势。该研究不仅揭示了滇中地区 CES 的驱动机制,而且弥补了前人研究中对生态系统服务阈值尺度特征关注的不足,为区域生态生态系统服务评估提供了新参考。

参考文献(References):

- [1] Assessment M E. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] 何再军,程江浩,刘悦俊,张燕杰. 1990—2020 年土地利用和气候变化对青藏高原生态系统调节服务的影响. 冰川冻土, 2023, 45(5): 1616-1628.
- [3] Peng J, Tian L, Liu Y X, Zhao M Y, Hu Y N, Wu J S. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: thresholds identification. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 706-714.
- [4] Leito I, Ferreira C, Ferreira A. Assessing long-term changes in potential ecosystem services of a peri-urbanizing Mediterranean catchment. Science of the Total Environment, 2019, 660:993-1003.
- [5] Zhao Z X, Dai E F. Vegetation cover dynamics and its constraint effect on ecosystem services on the Qinghai-Tibet Plateau under ecological restoration projects. Journal of Environmental Management, 2024, 356: 120535.
- [6] Ma S, Wang L J, Jiang J, Chu L, Zhang J C. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change and vegetation coverage change in the Qinghai-Tibet Plateau ecological shelter. Journal of Cleaner Production, 2021, 318: 128592.
- [7] 张琨,吕一河,傅伯杰,尹礼唱,于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. 地理学报, 2020, 75(5):949-960.
- [8] 王晓峰,白娟,冯晓明,周继涛,王筱雪,尧文洁,涂又,孙泽冲,马嘉豪. 秦巴山区生态系统服务对植被覆盖变化的响应阈值. 生态学报, 2024, 44(15): 6811-6827.
- [9] Ouyang X, Jian C, Li C. Threshold effect of ecosystem services in response to human activity in China's urban agglomeration: a perspective on quantifying ecological resilience. Environmental Science and Pollution Research International, 2024, 31(6): 9671-9684.
- [10] 荀斌,郑莹,范蓉,刘宝印. 生态系统服务权衡/协同关系的阈值识别研究. 生态学报, 2024, 44(17): 7431-7444.
- [11] Hao R F, Yu D Y, Wu J G. Relationship between paired ecosystem services in the grassland and agro-pastoral transitional zone of China using the constraint line method. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 240: 171-181.
- [12] 傅伯杰,周国逸,白永飞,宋长春,刘纪远,张惠远,吕一河,郑华,谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6):571-576.
- [13] Xu S N, Liu Y F, Wang X, Zhang G X. Scale effect on spatial patterns of ecosystem services and associations among them in semi-arid area: a case study in Ningxia Hui autonomous region, China. Science of the Total Environment, 2017, 598: 297-306.
- [14] Aryal K, Maraseni T, Apan A. Spatial dynamics of biophysical trade-offs and synergies among ecosystem services in the Himalayas. Ecosystem Services, 2023, 59: 101503.
- [15] 韩晓佳,王继军,温昕. 退耕区域生态系统服务作用关系尺度效应及分异机制——以安塞区为例. 生态学报, 2024, 44(5): 1791-1807.
- [16] 裴渊杰,罗漫雅,赵永华,韩磊,杨舒媛,张磊. 多尺度生态系统服务权衡与协同关系——以延安市为例. 生态学报, 2022, 41(7):

1351-1360.

- [17] Shen J S, Li S C, Liu L B, Liang Z, Wang Y Y, Wang H, Wu S Y. Uncovering the relationships between ecosystem services and social-ecological drivers at different spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125193.
- [18] Zhang Y M, Su K, Jiang X B, You Y F, Zhou X B, Yu Z, Chen Z C, Wang L Y, Wei C W, Liao Z H. Response of ecosystem services to impervious surface changes and their scaling effects in Loess Plateau ecological Screen, China. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109997.
- [19] Berdugo M, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, Hernández-Clemente R, Zhao Y C, Gaitán J J, Gross N, Saiz H, Maire V, Lehmann A, Rillig M C, Solé R V, Maestre F T. Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science*, 2020, 367(6479): 787-790.
- [20] 龚金玉, 马致远, 胡琛, 何林轩, 李田, 雷静品. 综合生态系统管理的生态阈值理论研究与展望. *生态学报*, 2024, 44(22): 10499-10511.
- [21] 侯利萍, 何萍, 范小杉, 徐杰, 任颖, 李代魁. 生态阈值确定方法综述. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 711-718.
- [22] Yu Y H, Shen Y Z, Wang J L, Wei Y C, Liu Z Y. Simulation and mapping of drought and soil erosion in Central Yunnan Province, China. *Advances in Space Research*, 2021, 68(11): 4556-4572.
- [23] Deng H, Cheng F, Wang J L, Wang C. Monitoring of drought in central Yunnan, China based on TVDI model. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, 30(4): 3511-3523.
- [24] Liu Z Y, Zhang J P, Wang J L. Temporal and spatial variation of soil erosion in central Yunnan province, China. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, 18(5): 6691-6712.
- [25] 冉玉菊, 雷冬梅, 刘林, 高丽萍. 滇中城市群 2000—2020 年土地利用变化对生态系统服务价值的影响. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 310-322, 2.
- [26] 陈相标, 丁文荣. 滇中高原湖泊流域土地利用变化及生态系统服务功能. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 205-212.
- [27] Yang A R, Zhao J S, Lin Y L, Chen G P. Coupling and coordination relationship of economic - social - natural composite ecosystem in central Yunnan urban agglomeration. *Sustainability*, 2024, 16(7): 2758.
- [28] 彭双云, 陈明满, 张老伟, 龚陆平, 范嘉俊. 滇中城市群碳储量时空演变及其对 LULC 变化的响应. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 246-256, 266.
- [29] Yan F P, Wei S, Zhang J, Hu B F. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 2.
- [30] 王培家, 章锦河, 杨良健, 郭丽佳, 马小宾, 阚越, 陈敏. 典型旅游城市生态系统服务时空演变及其影响因素——以黄山市为例. *生态学报*, 2024, 44(9): 3897-3910.
- [31] 张恩伟. 滇中城市群产水服务和土壤保持服务时空格局演变及其影响因素研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
- [32] 金丽娟. 集成 CVOR-GWLR-电路理论模型的云南省生态安全格局构建研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2022.
- [33] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 周国清, 尤号田, 韩小文. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2799-2809.
- [34] Williams J R, Jones C, Kiniry J, Spauld D. The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASABE*, 1989, 32: 497-511.
- [35] 王美娜, 范顺祥, 舒翰俊, 张建杰, 褚力其, 法玉琦. 河南省土壤侵蚀时空分异特征及土壤保持经济价值. *生态环境学报*, 2024, 33(5): 730-744.
- [36] Peng J, Chen X, Liu Y X, Lü H L, Hu X X. Spatial identification of multifunctional landscapes and associated influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Applied Geography*, 2016, 74: 170-181.
- [37] 张露尹, 朱大明, 左小清, 彭秋志, 宋炜炜. 基于 InVEST 模型的多情景下滇中城市群生境质量时空演变特征及预测. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(4): 547-555.
- [38] Yu C Y, Zhang Z H, Jeppesen E, Gao Y, Liu Y X, Liu Y J, Lu Q L, Wang C X, Sun X M. Assessment of the effectiveness of China's protected areas in enhancing ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2024, 65: 101588.
- [39] 王杰. 极端干旱对内蒙古温带草原生态系统服务功能和价值的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [40] Li M, Luo G J, Li Y B, Qin Y, Huang J, Liao J J. Effects of landscape patterns and their changes on ecosystem health under different topographic gradients: a case study of the Miaoling Mountains in Southern China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110796.
- [41] He S L, Nong L P, Wang J L, Zhong X Z, Ma J. Revealing various change characteristics and drivers of ecological vulnerability in the mountains of Southwest China. *Ecological Indicators*, 2024, 167: 112680.
- [42] 何茂林, 李瑞, 吴盼盼, 熊玲, 肖林绿. 裸露岩石对喀斯特坡地水土流失及水动力特征的影响. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 103-113.
- [43] 甘露. 成渝地区双城经济圈 SDGs 可持续发展框架量化评价研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2021.
- [44] 何苏玲, 贺增红, 潘继亚, 王金亮. 基于多模型的县域土地利用/土地覆盖模拟. *自然资源遥感*, 2023, 35(4): 201-213.
- [45] 郝蕊芳, 于德永, 邬建国, 郭勤峰, 刘宇鹏. 约束线方法在生态学研究中的应用. *植物生态学报*, 2016, 40(10): 1100-1109.
- [46] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1172-1189.
- [47] Zhou L L, Zhang H Z, Bi G H, Su K C, Wang L, Chen H J, Yang Q Y. Multiscale perspective research on the evolution characteristics of the

- ecosystem services supply-demand relationship in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir area. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109227.
- [48] 余昊轩, 汤江龙, 陈荣清. 湖北省生态系统服务供需时空演变特征及其多尺度的空间平衡与匹配分析. *环境科学*, 2024, 45(11): 6477-6488.
- [49] 邓丽明, 杨骥, 尹小玲, 贾凯, 孙嘉, 舒思京, 黄爱琳. 粤港澳大湾区生态系统服务供需关系及其对城市化多空间尺度的响应. *生态学报*, 2024, 44(20): 9094-9107.
- [50] 卢孟孟, 黄小翠, 慈秀芹, 杨国平, 李捷. 沿海拔梯度变化的哀牢山亚热带森林群落系统发育结构. *生物多样性*, 2014, 22(4): 438-449.
- [51] 胡月, 卢阳, 金可, 周火明, 万丹, 张乾柱, 闫建梅. 干热河谷生态治理探讨. *长江科学院院报*, 2021, 38(10): 69-75.
- [52] Zhang E W, Feng H M, Peng S Y. Measurement of urban expansion and spatial correlation of central Yunnan urban agglomeration using nighttime light data. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 8898468.
- [53] Antonio Chaparro Torres R, Wang J L, Zhang J P, Liu L F, Lan Y C. Temporal analysis of land degradation and urban expansion in central Yunnan Province using remote sensing for supporting sustainable development goals 11/15. *Ecological Indicators*, 2024, 163: 112058.
- [54] 虞涵, 吴映梅, 李琛, 王敏, 周艳. 滇中高原山地城市群土地利用及生境质量的时空演变与多情景模拟. *应用生态学报*, 2024, 35(10): 2842-2852.
- [55] Li Y J, Song Y H, Cao X Z, Huang L Y, Zhu J Q. Temporal—spatial changes in vegetation coverage under climate change and human activities; a case study of central Yunnan urban agglomeration, China. *Sustainability*, 2024, 16(2): 661.
- [56] Ma J, Wang J L, He S L, Zhang J P, Liu L F, Zhong X Z. Direct and indirect effects of urbanization on vegetation; a survey of Yunnan central urban economic circle, China. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112536.
- [57] Lan Y C, Wang J L, Hu W Y, Kurbanov E, Cole J, Sha J M, Jiao Y M, Zhou J C. Spatial pattern prediction of forest wildfire susceptibility in Central Yunnan Province, China based on multivariate data. *Natural Hazards*, 2023, 116(1): 565-586.
- [58] 陈田田, 黄强, 王强. 基于地理探测器的喀斯特山区生态系统服务关系分异特征及驱动力解析——以贵州省为例. *生态学报*, 2022, 42(17): 6959-6972.
- [59] Jiang C, Zhang H Y, Zhang Z D. Spatially explicit assessment of ecosystem services in China's Loess Plateau: patterns, interactions, drivers, and implications. *Global and Planetary Change*, 2018, 161: 41-52.
- [60] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [61] Newbold T, Hudson L N, Hill S L L, Contu S, Lysenko I, Senior R A, Börger L, Bennett D J, Choimes A, Collen B, Day J, De Palma A, Díaz S, Echeverria-Londoño S, Edgar M J, Feldman A, Garon M, Harrison M L K, Alhusseini T, Ingram D J, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia D L P, Martin C D, Shai M R, Novosolov M, Yuan P, Phillips H R P, Purves D W, Robinson A, Simpson J, Tuck S L, Weiher E, White H J, Ewers R M, Mace G M, Scharlemann J P W, Purvis A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 2015, 520(7545): 45-50.
- [62] 王玉娟, 杨胜天, 曾红娟, 温志群. 黄河大柳树水利枢纽工程区生态修复绿水资源消耗量定量模拟. *干旱区地理*, 2011, 34(2): 262-270.
- [63] 曹言, 王杰, 张雷, 戚娜, 段琪彩. 滇中地区极端降水事件的时空变化特征分析. *人民长江*, 2017, 48(21): 50-55.
- [64] 王诗媛, 向洋, 高翻翻, 赵龙飞, 骆鑫, 候曼, 边思源. 自然和人为因素影响下的生态系统服务时空演变特征——以关中平原城市群为例. *西安理工大学学报*, 2024: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20240708.1207.002.html>.
- [65] 范树平, 程从坤, 刘友兆, 张红梅, 於冉. 中国土地利用/土地覆盖研究综述与展望. *地域研究与开发*, 2017, 36(2): 94-101.
- [66] 员学锋, 施林童, 杨悦, 安骐岷. 陕北黄土丘陵沟壑区人类活动和植被覆盖对关键生态系统服务的影响. *应用生态学报*, 2024, 35(12): 3235-3246.
- [67] 王海熠, 王洪荣, 陈树新, 罗鑫, 刘炳杰, 田昕, 冯毅, 王鹏杰. 成都市龙泉山城市森林公园植被覆盖度与景观格局特征动态变化分析. *遥感技术与应用*, 2023, 38(6): 1455-1466.
- [68] 高江波, 吴绍洪, 蔡运龙. 区域植被覆盖的多尺度空间变异性——以贵州喀斯特高原为例. *地理研究*, 2013, 32(12): 2179-2188.
- [69] 石磊, 杨武年, 杨彦通, 陈平. 影像不同空间尺度对鲁甸植被分析的影响. *测绘科学*, 2017, 42(03): 64-69.
- [70] 徐凯健, 田庆久, 朱小波, 杨闫君, 焦俊男. 空间尺度上推转换对影像信息的影响分析. *测绘科学*, 2019, 44(05): 117-125.
- [71] Li D L, Cao W F, Dou Y H, Wu S Y, Liu J G, Li S C. Non-linear effects of natural and anthropogenic drivers on ecosystem services: integrating thresholds into conservation planning. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 116047.
- [72] 王雯, 侯青青, 裴婷婷. 甘肃河东地区坡度对生态系统服务的影响及其阈值效应. *生态环境学报*, 2024, 33(7): 1117-1129.
- [73] 陈亮, 孙宝玉, 韩广轩, 刘子亭, 贺文君, 王安东, 吴立新. 降雨量增减对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸和芦苇光合特性的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(09): 2794-2804.

- [74] Collar N M, Saxe S, Ebel B A, Boden K S, Rust A J, Hogue T S. Linking fire-induced evapotranspiration shifts to streamflow magnitude and timing in the western United States. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128242.
- [75] Yang L S, Feng Q, Lu T X, Adamowski J F, Yin Z L, Hatami S, Zhu M, Wen X H. The response of agroecosystem water use efficiency to cropland change in Northwest China's Hexi Corridor. *Agricultural Water Management*, 2023, 276: 108062.
- [76] 黄钰婷, 曹雅蓉, 吴隽宇, 周哲琛. 长三角生态系统服务驱动因素的交互效应及其阈值. *生态学报*, 2024, 44(21): 9956-9973.
- [77] 焦春萌, 符鑫鑫. 关中城市群生态系统服务对城市化响应阈值. *农业与技术*, 2021, 41(15): 116-121.
- [78] 严坤, 孙然好. 京津冀县域城镇化与景观格局变化的协调性研究. *生态环境学报*, 2018, 27(1): 62-70.
- [79] Yi J H, Dai S, Cheng J H, Liu K L. How urban sprawl affects local and nearby ecosystem services in China. *Regional Environmental Change*, 2023, 23(4): 139.
- [80] Yi D, Guo J, Pueppke S G, Han Y, Ding G Q, Ou M H, Koomen E. What dominates the variation of ecosystem services across different urban expansion patterns? —evidence from the Yangtze River Delta Region, China. *Environmental Impact Assessment Review*, 2025, 110: 107674.
- [81] Mitchell M, Bennett E, Gonzalez A. Strong and nonlinear effects of fragmentation on ecosystem service provision at multiple scales. *Environmental Research Letters*, 2015, 10: 094014.
- [82] Su C, Dong M, Fu B, Liu G H. Scale effects of sediment retention, water yield, and net primary production: a case - study of the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2020, 31: 1408-1421.
- [83] Gu R L, Yu H, Duo L H. Exploring the pattern and influencing factors of ecosystem services under multiscale perspective: implications for ecosystem services management. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2024, 30(7/8): 615-640.
- [84] Zhang Y, Liu Y F, Pan J W, Zhang Y, Liu D F, Chen H T, Wei J Q, Zhang Z Y, Liu Y L. Exploring spatially non-stationary and scale-dependent responses of ecosystem services to urbanization in Wuhan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(9): 2989.
- [85] Li C, Zhao J, Hou W. Nonlinear effects of landscape patterns on ecosystem services at multiple scales based on gradient boosting decision tree models. *Remote Sensing*, 2023, 15(7): 1919.
- [86] 王会静, 郭玉川, 白运保, 王宁, 魏宣, 周明通. 新疆植被动态格局及其对气候的时滞效应. *农业工程学报*, 2023, 39(11): 137-145.
- [87] Xiong C S, Ren H Y, Xu D, Gao Y M. Spatial scale effects on the value of ecosystem services in China's terrestrial area. *Journal of Environmental Management*, 2024, 366: 121745.
- [88] 危小建, 辛思怡, 张颖艺, 龙英豪, 张茜. 不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及其影响因素差异——以大南昌都市圈为例. *生态学报*, 2023, 43(18): 7585-7597.