

熵视角下延安市生态系统服务价值时空递变规律及其影响因子

谢明阳^{1,2}, 焦春萌³, 韩小雨⁴, 焦峰^{1,2,4}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,水利部水土保持生态工程技术研究中心,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院大学,北京 100049;3.长安大学地球科学与资源学院,西安 710000;4.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要: 退耕还林还草工程显著改变了延安市土地利用情况,进而改善了延安市的生态环境,评估这一过程的生态环境变化情况有利于后续生态保护与规划决策。基于 1990—2020 年土地利用、自然和社会统计数据,利用时间信息熵模型和地理探测器探究退耕还林还草工程实施前后延安市生态系统服务价值(ESV)时空递变规律及影响因子。结果表明:(1)1990—2020 年延安市生态系统服务价值总体增加 7.7 亿元,增幅约 32.42%。林地生态系统服务价值增加了 11.25 亿元,增幅为 80.54%,是增长的主要贡献者,调节服务价值占比 50%。(2)延安市生态系统服务价值整体呈现出“南高北低”的空间分布格局,有 25.1%的区域 ESV 上升,分布在延安北部和中南部,6.4%的区域 ESV 降低,分布在各区县城郊地带。(3)归一化植被指数(NDVI)是 ESV 空间分异的主要影响因子,各因子间的交互作用共同影响了延安市的 ESV 空间分异。

关键词: 生态系统服务价值; 时空递变; 时间信息熵; 地理探测器; 退耕还林还草工程

中图分类号: X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0247-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2022.05.031

Spatio-temporal Transmutation and Impact Factors of Ecosystem Service Value in Yan'an City from the Perspective of Entropy

XIE Mingyang^{1,2}, JIAO Chunmeng³, HAN Xiaoyu⁴, JIAO Feng^{1,2,4}

(1.*Soil and Water Conservation Ecological Engineering Technology Research Center, Institute of Soil and Water Conservation CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.Academy of Earth Sciences and Resources, Chang'an University,*

Xi'an 710000; 4.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The Grain for Green Project significantly changed the land use in Yan'an City, and then improved the ecological environment of Yan'an City. The evaluation of the ecological environment change of this process is beneficial to the subsequent ecological protection and planning decisions. Based on existing research, the land use types, and the natural and social statistical data from 1990 to 2020, this study explored the spatio-temporal variation and impact factors of ecosystem service value (ESV) in Yan'an City before and after the implementation of the project of Grain for Green by using temporal information entropy model and geographical detector. The results showed that: (1) From 1990 to 2020, the total ecosystem service value of Yan'an City increased by 770 million yuan, with an increase of about 32.42%. The value of forest ecosystem services increased by 1.125 billion yuan, with an increase of 80.54%, which was the main contributor to the growth, and the value of regulatory services accounted for 50%. (2) The overall spatial distribution pattern of ecosystem service value in Yan'an city was "high in the south and low in the north". ESV increased in 25.1% of the region, distributed in the north and south of Yan'an; ESV decreased in 6.4% of the region, distributed in the suburbs of each district and county. (3) Normalized difference vegetation index (NDVI) was the main impact factor of spatial variation of ESV, and the synergistic effect of various factors jointly affected the spatial variation of ESV in Yan'an City.

Keywords: ecosystem service value; spatio-temporal transmutation; temporal information entropy; Geo-detector; the Grain for Green Project

收稿日期:2022-01-19
资助项目:中国工程院咨询研究项目“黄土高原典型地区退耕还林(草)成效、问题与对策”(2019-XY-65)
第一作者:谢明阳(1997—),男,在读硕士研究生,主要从事水土保持与环境效应评价研究。E-mail:735502956@qq.com
通信作者:焦峰(1967—),男,教授,副研究员,主要从事水土保持与环境效应评价研究。E-mail:jiaof@ms.iswc.ac.cn

生态系统服务是自然系统反馈于人类的重要资源,是人类赖以生存和发展的资源与环境基础^[1-3]。人类福祉高度依赖生态系统服务,包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务^[2,4]。人类在土地上的经营活动对地表的土地覆盖状况产生了巨大的影响,影响着生态系统服务提供能力的变化^[5]。其中,土地利用变化、经济发展、人口增长等因素被认为是影响生态系统服务与人类福祉时空关系的重要因素^[6-7]。对于生态系统服务的价值评估是进行生态环境保护、生态功能区规划等决策的重要依据和基础^[8]。

自生态系统服务的类型、价值科学测算的原理及方法被 Costanza 等^[2,9]提出并发展后,现已逐渐成为国内外相关领域的研究热点^[10-11]。Jafarzadeh 等^[12]使用土地利用冲突识别策略模型分析伊朗西部扎格罗斯地区的土地利用分配制度及生态系统服务之间的协同和权衡发现,该地区在产水和防止土壤侵蚀之间实现了最高协同,林地、果园是该地区优化配置的最优选择;Gouhari 等^[13]对阿富汗 Shah Foladi 保护区的林地生态系统服务进行了经济评估发现,该地区通过植树造林,增加了木材、薪材的产量,可用以替代支持社区的生计来源,缓解土地退化。在对于生态系统服务价值(ESV)变化的研究中,当前多是基于土地利用变化的离散时相研究^[14-16]或双时相变化检测^[17],如 Han 等^[18]利用探索性空间数据分析对安塞区 1980—2018 年的 ESV 和土地利用变化特征,而在长时序、逐像元的连续动态变化检测方面仍有可供研究的空间,遥感技术与信息论的发展为时间序列的变化检测奠定了理论与数据基础。随着遥感数据的积累,长时间序列的遥感影像完整地记录了地表的变化过程^[19]。通过时间序列变化检测可以充分地挖掘研究对象在时间维的变化信息,更好地反映其时空变化规律^[20]。王超军等^[19]提出时间信息熵方法,综合、量化地反映了延河流域长时间序列植被覆盖的时空变化特征,并与应用最为广泛的回归分析法^[21]进行了对比发现,时空信息熵方法更为客观、准确,从熵的视角出发分析研究对象的时空变化特征,也为长时间序列遥感影像的变化检测提供了新方法、新思路。但目前在该方法的应用层面,仅围绕 NDVI、地表温度等遥感数据展开研究^[22],鲜有利用该方法探究某区域 ESV 时空变化特征的研究,该方法在 ESV 时空变化特征研究中的适用性也有待进一步评估。

自 1999 年起,我国逐步实行了林业生态建设史上规模最大、任务最重、投入最多、群众参与度最高的生态建设工程——退耕还林还草工程^[23],而延安市作为先期试点地区,是退耕还林还草工程实施的主战

场。本研究基于延安市的遥感影像,以谢高地等^[24]制定的当量因子表为基础,评估延安市的生态系统服务价值,引入时间信息熵模型,分析 1990—2020 年 ESV 时空递变规律,并借助地理探测器^[25]识别来自自然、气候、社会与经济等方面的影响因子,以期为延安市土地资源管理和生态修复提供参考依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

延安市位于黄土高原中南部,陕西省北部,地理坐标 35°21′—37°31′N,107°41′—110°31′E(图 1)。延安市属暖温带半湿润易旱气候区,四季分明,日照充足,昼夜温差大,年均无霜期 162 天,年均气温 7.7~10.6℃,年均日照时间 2 400 h,年均降水量 500 mm。降水多集中夏季,且多暴雨,强度大。延安市属于黄土高原丘陵沟壑区,境内沟壑纵横、地表支离破碎,植被稀少,地貌以高原、丘陵为主。地势西北高东南低,平均海拔 1 200 m,黄河自北而南沿延安东界流过,境内两大河流分别为南部的北洛河及北部的延河。研究区属于森林草原区,延安南部地区植被类型以森林植被类型为主,而延安北部灌草植被类型占优势。

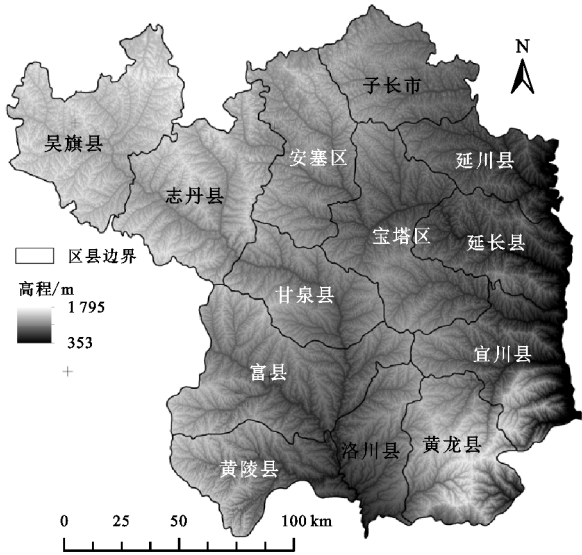


图 1 研究区域

1.2 数据来源

研究选取 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 7 个研究时间节点。通过地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),下载 7 个时期延安地区的 Landsat 系列遥感图像为本研究的主要数据源,其中 1990—2010 年为 Landsat 5 遥感图像,2015—2020 年为 Landsat 8 遥感图像。各时期遥感图像空间分辨率为 30 m×30 m,每景图像的含云量均小于 5%,图像镶嵌后研究区范围内含云量小于 1%,图像时间以各对应年份 7—9 月为主。

基于 ENVI 遥感数字图像处理软件平台, 对不同土地利用类型的空间位置及其在遥感图像上的特征, 以及不同样地的地表覆盖特征等进行了调查。采用支持向量机(support vector machine, SVM)监督分类方法, 根据国家标准《土地利用现状分类》^[26] (GB/T 21010—2017) 将延安地区土地利用类型分为建设用地、水域、耕地、未利用地、林地及草地 6 大类。经过随机抽样检查, Kappa 检验精度达到 90% 以上。再通过 Matlab R2018b 软件对各土地利用类型进行赋值, 得到 7 期延安市 ESV 分布。

从影响 ESV 空间分异的自然因素和人为因素中, 结合数据可获得性和研究区实际情况, 选择 7 个影响因子: (1) 自然因素, 包括年均温度、年降水、高程、坡度、归一化植被指数(NDVI); (2) 人为因素, 包括地区生产总值和人口密度。自然因子数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心—黄土高原分中心 (<http://loess.geodata.cn>), 通过 Matlab R2018b 软件将月均数据换算为年数据; 地区生产总值和人口密度数据来源于中国科学院资源

环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。由于现有数据时间跨度缺失, 参考延安市统计年鉴对 1990 年、2020 年的缺失数据进行了估算、补足。以上数据最后通过 ArcGIS 软件进行双线性内插重采样统一至 30 m×30 m 精度。

1.3 生态系统服务价值计算

本研究采用焦春萌等^[16]对延安市校正后的生态系统服务价值系数计算延安市生态系统服务价值(表 1), 延安市 ESV 计算公式为:

$$ESV = \sum_i^n A_k \times E_a \times S_k \tag{1}$$

式中: S_k 为地区差异性系数, 根据 1990—2020 延安市和全国的平均气温和年降水量, 按公式计算延安地区差异性系数, 焦春萌等^[16]研究计算 S_k 值为 0.91; E_a 为延安市生态服务价值当量因子的经济价值, 经焦春萌等^[16]计算为 406.29 元/hm², 该结果与靳甜甜等^[27]对子午岭区的生态系统服务价值当量因子相近, 适用性较好。ESV 为研究区生态系统服务总价值(元); i 为土地利用类型, $n=6$; A_k 为第 i 种土地利用类型的面积(hm²)。

表 1 延安市 1990—2020 年各土地利用生态系统服务价值变化

土地利用类型	生态系统服务价值/×10 ⁷ 元						
	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地	334.66	345.88	326.25	99.80	81.41	95.96	86.73
林地	1396.81	1159.35	1386.39	1984.88	2480.93	2129.52	2521.74
草地	613.94	693.17	631.45	746.31	555.09	670.72	511.58
未利用地	0.01	0.02	0	0	0	0	0.02
水域	32.23	33.07	38.43	41.55	43.89	43.68	44.04
建设用地	−2.68	−3.09	−3.09	−4.10	−11.12	−14.46	−19.60
总计	2374.98	2228.40	2379.42	2868.43	3150.20	2925.42	3144.50

1.4 时间序列信息熵模型

王超军等^[19]在借鉴信息熵概念的基础上, 提出了时间信息熵、时间序列信息熵来挖掘研究对象在时间维的变化特征, 表征其在某一时期的变化强度和变化趋势信息。时间信息熵(temporal information entropy)用来反映研究对象在时间维的变化强度特征, 计算公式为:

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_2 \frac{y_{i+m} - y_{i-m}}{C_i \times m \times \Delta/n} \tag{2}$$

其中:

$$C_i = \begin{cases} 1 + \frac{i-1}{m} & 1 \leq i \leq m \\ 2 & m+1 \leq i \leq n-m \\ 1 + \frac{n-i}{m} & n-m+1 \leq i \leq n \end{cases}$$
$$\begin{cases} y_{i-m} = y_1, i \leq m \\ y_{i+m} = y_n, i \geq n-m \end{cases}$$

式中: $y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_n$, 是像元不同时期的观测值

$x_1, \dots, x_n$ 按照从小到大的顺序排列后得到的(x_i 即表示研究对象任意像元第 i 期的值); m 为“时间频率”因子, 通过选取不同的 m 值(m 为不超过 $n/2$ 的正整数)可以反映研究对象在不同时间尺度上的变化特征。本文中, 由于数据跨度为 5 年 1 期, 故该要素变化的时间尺度为 5 年 1 期, 计算时取 $m=1, n=7$; Δ 为“缩放系数”, 表示对不同数据源进行标准化处理, 使得计算结果具有可比性, 在本研究中 $\Delta=1$ 。

另外, 由于时间信息熵的计算方法在计算时对遥感观测数据进行了排序处理, 结果只能反映出环境要素变化的强度信息, 而无法体现出其在时间维的变化趋势信息。王超军等^[19]又提出了时间序列信息熵(time-series information entropy)来反映某一段时间内研究对象在时间维的变化趋势信息。时间序列信息熵的计算和说明:

$$H' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_{i+m} - x_{i-m}) \log_2 \left(\frac{|x_{i+m} - x_{i-m}|}{C_i \times m \times \Delta/n} \right) \tag{3}$$

式中: x_i 为研究对象任意像元第 i 期值; sgn 为符号

$$\text{函数, } \text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0, \text{其他参数含义同上。} \\ -1 & \theta < 0 \end{cases}$$

通过时间信息熵可以反映某一时段内研究对象在时间维的变化强度情况; H 值越大反映出这一段时间内其变化强度越大; 反之则表示变化强度越小。时间序列信息熵则包含有趋势信息: H' 值为正表示在某一时段内研究对象的变化呈增加趋势; 反之则表示研究对象呈减少趋势。 H' 绝对值越大, 表明增加(或减少)的趋势越明显。利用上述时间信息熵、时间序列信息熵可以挖掘研究对象在时间维的变化特征, 定量、客观地反映出长时序研究对象的变化强度和变化趋势信息。同时, 在计算得到上述熵值的基础上, 对其直方图进行分割, 进而得到研究对象的变化等级分布, 在本研究中可为区域生态环境的保育和治理提供更为方便、宏观的参考。

1.5 生态系统服务价值空间递变影响因子的地理探测

地理探测器是由王劲峰等^[25]提出的探测空间分异性, 以及揭示其背后影响因子的一种新统计学方法, 包括因子探测、交互作用探测、风险探测和生态探测 4 个探测器。在本研究中采用因子探测器及交互作用探测器对影响延安市 ESV 空间分异的自然因素和人为因素影响力进行探测。空间分异性用 q 值度量, 表达式^[25]为:

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

式中: q 为 ESV 空间递变影响因子探测力值, $q \in [0, 1]$, q 值越大, 表明该影响因子对于研究区 ESV 空间分布影响力越高; N 和 N_h 分别为研究区的取样数和第 h 层的样本数; σ^2 和 σ_h^2 分别是研究区 ESV 总方差和其在第 h 层的离散方差; L 为研究区某影响因子的分类类型数。

交互作用探测可探测每 2 个影响因子之间的交互作用类型, 共有非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强 5 种交互作用类型, 这五种类型的各因子间交互作用依次增强。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务价值总体演变特征

在研究期内, 延安市生态系统服务总值呈现先下降后上升的变化趋势(图 2), 转折点出现在 2000 年。从整个研究时期来看, 延安市 ESV 总体增加了 7.7 亿元, 增幅约 32.4%。耕地 ESV 从 1990 年的 3.35 亿元下降至 2020 年的 0.87 亿元, 降幅达 74.1%; 林地 ESV 从

1990 年的 13.97 亿元, 上升至 2020 年 25.22 亿元, 增加 11.25 亿元, 增幅为 80.5%, 说明延安市原来毁林开荒严重, 1999 年实行退耕还林还草工程后成效显著, 且研究期内延安市 ESV 的增加主要来自于耕地向林地的转变。水域 ESV 在研究期内增加了 0.12 亿元, 增幅为 36.6%; 同时城市化也导致了建设用地面积增加, 研究期内建设用地 ESV 下降了 0.17 亿元, 下降了 6.31 倍之多, 但这些减损被林地、水域的扩张带来的生态系统服务增益所弥补。

将延安市 30 m × 30 m ESV 栅格数据逐年对比可知, 延安市 ESV 整体呈现东南、西南部高, 中南部、北部地区低的趋势, 随着退耕还林还草工程的推进, 北部和中南部地区大面积区域 ESV 由低转高, 这是由于延安市地处荒漠草原—森林生态系统的过渡地带, 在退耕还林还草工程推行前, 延安北部大部分是农耕地或低覆盖度草地, 而南部则有天然林、经济林等林地, 可以直观看到 1995 年相较于 1990 年, 北部 ESV 进一步降低, 2000 年较之于 1995 年仍保持着相似的下降趋势, 自 2000 年开始, 延安市整体 ESV 逐步上升。

2.2 生态系统服务价值的时空变化特征分析

运用时间信息熵模型对延安地区 ESV 进行分析, 计算得出延安市 ESV 时间信息熵分布图、延安市 ESV 时间序列信息熵分布(图 3)。对时间信息熵值分布直方图进行分割(自然间断法), 确定时间信息熵值在 4.76 以下的区域所发生的变化不大, 进一步对时间序列信息熵直方图进行分割, 确定时间序列信息熵值在 -7.5 以下的区域 ESV 严重降低, 熵值在 -7.5 ~ 0 的区域 ESV 降低, 熵值在 0 ~ 4.5 的区域 ESV 增加, 熵值在 4.5 以上的区域 ESV 明显增加。

统计得, 延安市 ESV 基本不变的区域占 68.5%, 主要分布在延安市的东南部 and 西南部; ESV 严重降低的区域占 0.4%, 大部分分布在各县县城郊地带, 表明造成这些地区 ESV 严重降低的主导因素是城市化; ESV 降低的区域占 6%; ESV 增加的区域占 14%; ESV 明显增加的区域占 11.1%, 大部分分布在延安市的北部和中南部, 也正是在这些地区, 大面积的耕地在退耕还林还草工程中转变为林地和草地(图 4)。

2.3 生态系统服务价值空间分异的影响因子探测

从自然因素和人为因素中选择高程、坡度、NDVI、年均温度、年降水量、人口密度、GDP 等 7 个因素作为影响延安市 ESV 空间分异的影响因子, 使用地理探测器“因子探测”部分, 可以得到延安市 ESV 空间分异的单因子影响程度(表 2), 结果显示, 2020 年延安市各影响因子对生态系统价值空间分异的解释力由高到低依次

为 $NDVI > \text{年均温度} > \text{高程} > \text{人口密度} > \text{GDP} > \text{坡度} \approx$

降水量, $NDVI$ 对空间分异的解释力最高。

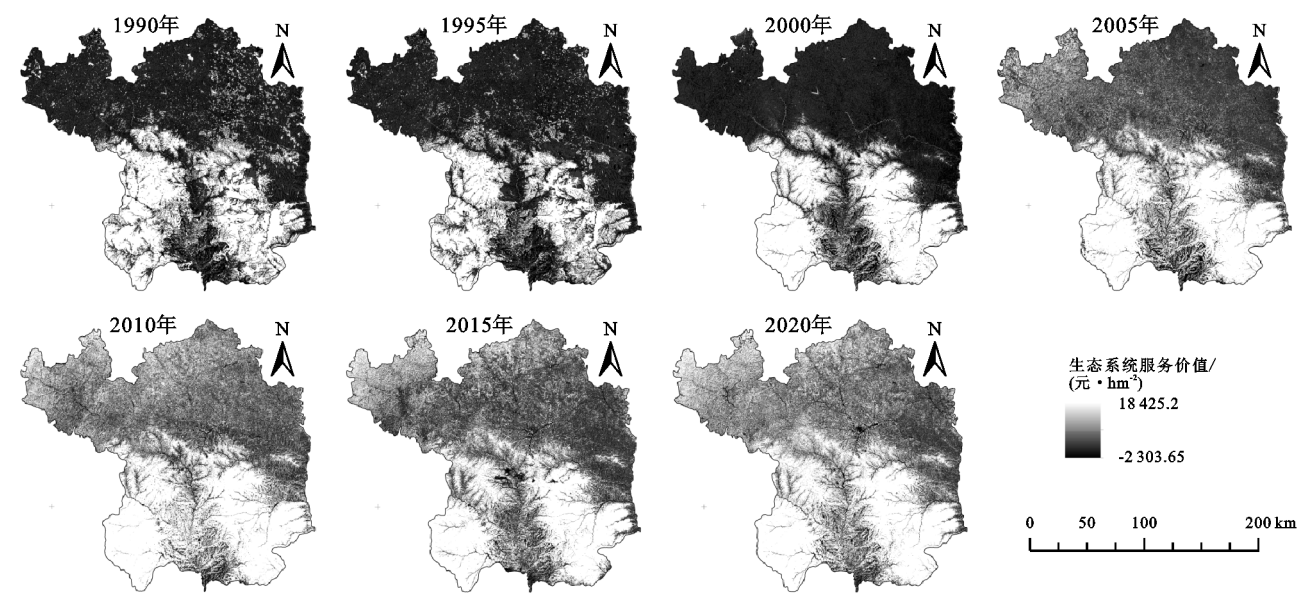


图 2 延安市生态系统服务价值分布

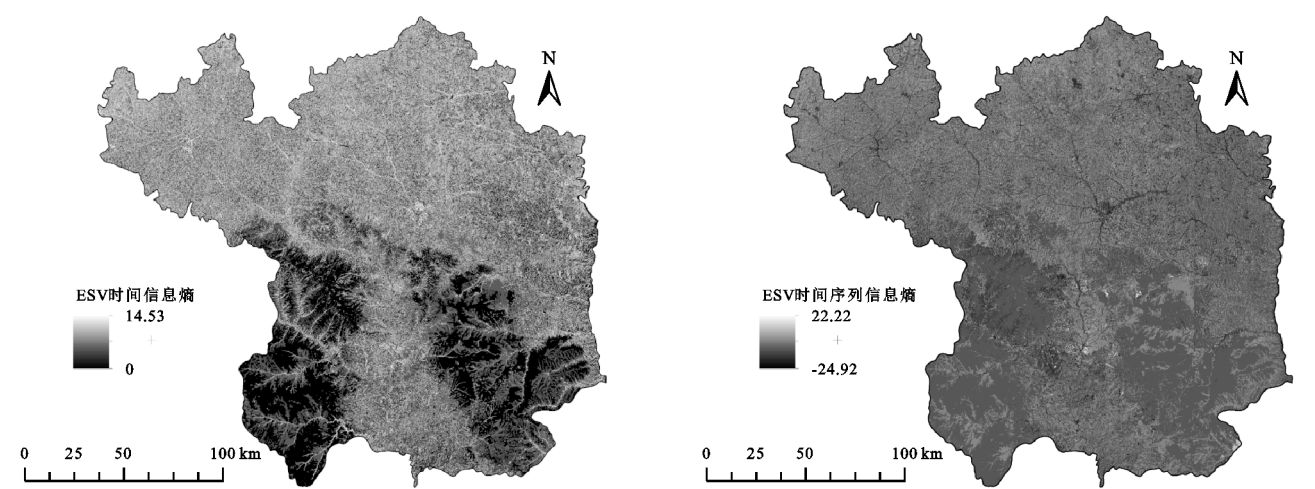


图 3 延安市生态系统服务价值时间信息熵及时间序列信息熵分布

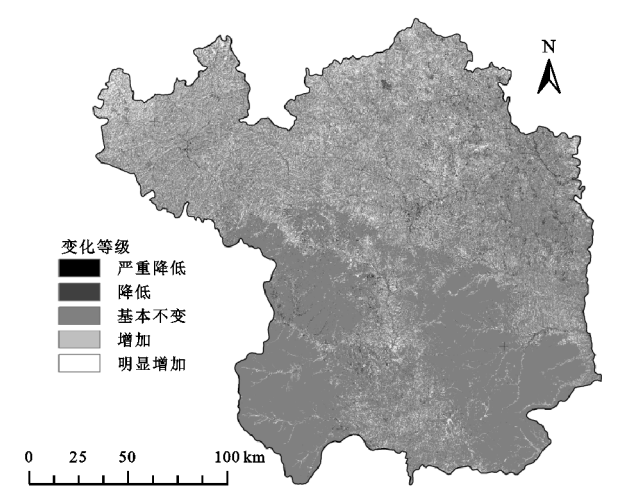


图 4 延安市生态系统服务价值变化等级分布

对比历年各影响因子探测结果, $NDVI$ 一直是对空间分异解释力最高的影响因子, 说明植被覆盖对 ESV 空间分异的贡献处主导地位, 且 $NDVI$ 的解释力从 1995 年的 0.42 骤增到 2000 年的 0.68, 之后又

下降到 2005 年的 0.40, 最终在 2020 年降低到最低的 0.20; 年降水量的解释力也在 2000 年发生骤增, 从 1995 年的 0.07 增加到 2000 年的 0.28, 之后逐渐下降, 到 2020 年下降到最低的 0.02。其他影响因子的影响程度虽然仍是显著的, 但对空间分异的解释力均未超过 10%。

通过延安市 ESV 空间分异影响因子的交互探测结果(图 5)可以看出, 所选择的 7 个影响因子两两交互后对 ESV 空间分异的解释力大多为双因子增强作用或非线性增强作用。因此, 延安市 ESV 的空间分异更多是不同影响因子之间交互作用的结果, 其中 $NDVI$ 与其他因子的交互作用也明显强于其他各因子间的交互作用, 在 2000 年 $NDVI$ 与其他因子交互作用最强, 接近 0.70, 而后 $NDVI$ 与其他因子的交互作用逐渐减弱, 但仍高于其他因子间交互作用, 这也印证了植被覆盖的影响力强于其他影响因子, 处于主导地位。且

2000 年降水与其他因子的交互作用也较强,这一点也符合单因子探测中出现的突变。随着退耕还林还

草工程的推进,到 2020 年,各因子之间交互作用类型也更多地从双因子增强型提高为非线性增强型。

表 2 延安市生态系统服务价值空间分异影响因子探测结果

年份	影响因子	高程	坡度	NDVI	年均温	年降水	人口密度	GDP
1990	q 统计量	0.04	0.01	0.41	0.05	0.08	0.06	0.02
	p	0	0	0	0	0	0	0
1995	q 统计量	0.04	0.01	0.42	0.06	0.07	0.02	0.02
	p	0	0	0	0	0	0	0
2000	q 统计量	0.06	0.01	0.68	0.09	0.28	0.04	0.07
	p	0	0	0	0	0	0	0
2005	q 统计量	0.04	0.02	0.40	0.07	0.19	0.09	0.08
	p	0	0	0	0	0	0	0
2010	q 统计量	0.03	0.01	0.33	0.04	0.10	0.04	0.03
	p	0	0	0	0	0	0	0
2015	q 统计量	0.06	0.01	0.36	0.09	0.05	0.04	0.04
	p	0	0	0	0	0	0	0
2020	q 统计量	0.06	0.02	0.20	0.08	0.02	0.05	0.04
	p	0	0	0	0	0	0	0

1990年								2000年							
	DEM	Slope	NDVI	PD	Tem	Pre	GDP		DEM	Slope	NDVI	PD	Tem	Pre	GDP
DEM	0.04	0.06	0.44	0.10	0.13	0.23	0.07	DEM	0.06	0.08	0.70	0.13	0.20	0.50	0.20
Slope	0.06	0.01	0.42	0.07	0.07	0.10	0.03	Slope	0.08	0.01	0.69	0.05	0.10	0.31	0.09
NDVI	0.44	0.42	0.41	0.43	0.44	0.43	0.42	NDVI	0.70	0.69	0.68	0.69	0.69	0.69	0.69
PD	0.10	0.07	0.43	0.06	0.08	0.23	0.09	PD	0.13	0.05	0.69	0.04	0.13	0.38	0.13
Tem	0.13	0.07	0.44	0.08	0.05	0.30	0.08	Tem	0.20	0.10	0.69	0.13	0.09	0.55	0.19
Pre	0.23	0.10	0.43	0.23	0.30	0.08	0.12	Pre	0.50	0.31	0.69	0.38	0.55	0.28	0.38
GDP	0.07	0.03	0.42	0.09	0.08	0.12	0.02	GDP	0.20	0.09	0.69	0.13	0.19	0.38	0.07

2010年								2020年							
	DEM	Slope	NDVI	PD	Tem	Pre	GDP		DEM	Slope	NDVI	PD	Tem	Pre	GDP
DEM	0.03	0.05	0.37	0.07	0.07	0.16	0.08	DEM	0.06	0.09	0.30	0.10	0.11	0.13	0.11
Slope	0.05	0.01	0.34	0.06	0.06	0.13	0.05	Slope	0.09	0.02	0.22	0.07	0.11	0.05	0.07
NDVI	0.37	0.34	0.33	0.35	0.35	0.39	0.35	NDVI	0.30	0.22	0.20	0.24	0.27	0.30	0.25
PD	0.07	0.06	0.35	0.04	0.07	0.14	0.07	PD	0.10	0.07	0.24	0.05	0.11	0.10	0.09
Tem	0.07	0.06	0.35	0.07	0.04	0.17	0.08	Tem	0.11	0.11	0.27	0.11	0.08	0.16	0.12
Pre	0.16	0.13	0.39	0.14	0.17	0.10	0.15	Pre	0.13	0.05	0.30	0.10	0.16	0.02	0.07
GDP	0.08	0.05	0.35	0.07	0.08	0.15	0.03	GDP	0.11	0.07	0.25	0.09	0.12	0.07	0.04

注:DEM 为高程;Slope 为坡度;NDVI 为归一化植被指数;PD 为人口密度;Tem 为温度;Pre 为降水;GDP 为国内生产总值。

图 5 延安市生态系统服务价值空间分异影响因子的交互探测

3 讨论

退耕还林还草工程直接改变了土地利用/土地覆盖^[28],从而提高了区域生态系统服务价值,在这一点上本研究与已有研究^[16,28-29]结论一致。焦春萌等^[16]研究表明,自 1999 年开展退耕还林还草工程起,延安北部成为建设用地、林地、水域的竞争优势区,中部市区周围成为草地的优势竞争区,在县区级行政区划尺

度上揭示了延安地区的 ESV 变化趋势,得出了各县县 ESV 均值分布南高北低、ESV 变化率北高南低的结论;而本研究在探测延安市 ESV 时空递变规律方面,创新性地引入了时间序列信息熵方法,较为客观地表征了长时间序列 ESV 的变化强度和变化趋势信息,并在像元尺度上得出了更为细化的结果:在退耕还林还草工程实施前,延安北部地区存在大面积的耕地,而南部的天然次生林则保存较好,退耕还林还草

工程带动的 ESV 价值提高也主要来源于耕地向林地、灌草地的转变,与此同时城市化增加的建设用地是主要的 ESV 降低区域。同时,时间信息熵模型在探究 ESV 时空递变规律中的适用性较好,在像元尺度上能准确地甄别研究时序内研究对象的变化趋势及变化幅度。

本研究在评估延安市 ESV 变化情况的同时,为延安市生态环境的进一步改善提供了科学的参考依据:延安市应在守住耕地红线的基础上,继续保持北部地区的退耕还林生态恢复态势,同时丰富林地、草地配置体系,使用扩展生态位(发展林下经济)、开发第三产业等措施以期进一步提高延安市尤其是南部地区的 ESV 体量,同时合理控制城市化的扩张进程,尽可能少地为延安市的 ESV 带来减益。

在对延安市生态系统价值空间分异影响因子进行探测时,本研究部分结论已有研究一致,孙梦华等^[30]对陕甘宁地区的 ESV 空间分异影响因子进行探测,得出 NDVI 是 ESV 空间分异的主导因子的结论;李理等^[31]对淇河流域生态系统服务进行了探测,得出了 NDVI 对固碳与土壤保持服务间的权衡影响最强(达到 0.306)的结论,且大部分影响因子间交互作用类型也都是双因子增强或非线性增强。在本研究中出现了 2 个影响因子解释力突变的时间点,在 2000 年,NDVI 和年降水量的解释力骤增,原因可能为退耕还林还草工程初期,地表植被覆盖情况剧变,导致 NDVI 的增长,从而影响了 ESV 的变化;另外,已有研究^[32-33]表明,植被恢复是黄土高原地区土壤干燥的主要原因,而农田生态系统的土壤水分是跟随降雨量变化的,因此在退耕还林还草初期,降水量是影响 ESV 的关键因素;在 2010 年后,NDVI 的解释力逐渐降低,但伴随这一过程,各影响因子间的交互作用逐渐强烈,交互作用类型更多地从双因子增强变为非线性增强,说明延安市退耕还林还草工程推进过程中,初期单因子影响占主导地位的模式逐渐被因子间共同影响的模式所取代。

4 结 论

(1)研究期内延安市 ESV 总体增加 7.7 亿元,增幅约 32.4%,其增益主要来源于林地的扩张;调节服务占比高达 50%,高于供给服务、支持服务和文化服务。

(2)延安市 ESV 空间分布大致表现出“南高北低”趋势,并且以 2000 年为拐点实现了 ESV 由降低到升高的转折。时间信息熵模型运行结果表明延安北部和中南部 ESV 明显增加,占延安市 25.1%,延安市的东南、西南部 ESV 基本不变,一直保持在较高的

水平,占延安市的 68.5%,各县区的城郊地带 ESV 严重下降,原因是城市化导致的其他土地利用类型向建筑用地转变。

(3)延安市 ESV 空间分异受到自然因子和人为因子的共同影响,其中 NDVI 是影响 ESV 空间分异的主要因子,影响因子间的交互作用是双因子增强或非线性增强,以 NDVI 和降水的交互作用解释力最高。

时间序列信息熵模型在探究区域 ESV 时空递变规律上具有结果准确、捕捉能力敏锐的优点,可以探知研究对象像元尺度上的时空变化信息;本研究对时间信息熵模型输出结果的 2 个熵值分割中,均采用自然间断法,但在如何确定其熵值分割标准及分割数量上仍需根据自身需要进一步研究。对于地理探测器的运用,本研究所收集的因子均为自然因素或人为因素中具有代表性的因子,在未来研究中为细化结果可根据需要收集更多数据进行因子探测。

参考文献:

[1] Millennium ecosystem assessment. Ecosystems and human well-being: Synthesis [M]. Washington D C: Island Press, 2005.

[2] Costanza R, Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387: 253-260.

[3] 傅伯杰,刘世梁,马克明.生态系统综合评价的内容与方法[J].生态学报,2001,21(11):1885-1892.

[4] Liu R R, Dong X B, Wang X C, et al. Study on the relationship among the urbanization process, ecosystem services and human well-being in an arid region in the context of carbon flow: Taking the Manas river basin as an example[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: e108248.

[5] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.

[6] Xu Z H, Wei H J, Fan W G, et al. Relationships between ecosystem services and human well-being changes based on carbon flow: A case study of the MRB, Xinjiang, China [J]. Ecosystem Services, 2019, 37: e100934.

[7] Wang X C, Dong X B, Liu H M, et al. Linking land use change, ecosystem services and human well-being: A case study of the Manas River Basin of Xinjiang, China [J]. Ecosystem Services, 2017, 27: 113-123.

[8] 汪清川,奚砚涛,刘欣然,等.生态服务价值对土地利用变化的时空响应研究:以徐州市为例[J].自然资源遥感,2021,33(3):219-228.

[9] Costanza R, De Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.

[10] 管青春,郝晋珉,石雪洁,等.中国生态用地及生态系统

- 服务价值变化研究[J].自然资源学报,2018,33(2):195-207.
- [11] Leslie R, John L, Timm K, et al. The role of benefit transfer in ecosystem service valuation [J]. *Ecological Economics*, 2015, 115: 51-58.
- [12] Jafarzadeh A A, Mahdavi A, Shamsi S R F, et al. Assessing synergies and trade-offs between ecosystem services in forest [J]. *Land Use Policy*, 2021, 111: e105741.
- [13] Gouhari S, Forrest A, Roberts M. Cost-effectiveness analysis of forest ecosystem services in mountain areas in Afghanistan [J]. *Land Use Policy*, 2021, 108: e105670.
- [14] 黄木易,岳文泽,方斌,等.1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J].地理学报,2019,74(9):1904-1920.
- [15] 马勇,凌旋,童昀.格网尺度下典型旅游城市生态服务价值估算和时空分异特征:以三亚为例[J].生态学报,2021,41(19):7542-7554.
- [16] 焦春萌,谢明阳,焦峰,等.1990—2020 年延安市土地利用结构时空偏移及生态系统服务价值变化[J].水土保持通报,2021,41(6):274-281.
- [17] 倪泽睿,杨上广,张全.长三角地区生态系统供给服务价值评估及权衡协同分析[J].生态经济,2021,37(11):150-155.
- [18] Han X J, Yu J L, Shi L N, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem service values in an area dominated by vegetation restoration: Quantification and mechanisms [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 131 (7713): e108191.
- [19] 王超军,吴锋,赵红蕊,等.时间信息熵及其在植被覆盖时空变化遥感检测中的应用[J].生态学报,2017,37(21):7359-7367.
- [20] Jamali S, Jnsson P, Eklundh L, et al. Detecting changes in vegetation trends using time series segmentation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 182-195.
- [21] 宋富强,邢开雄,刘阳,等.基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价[J].生态学报,2011,31(2):354-363.
- [22] 王超军.时间信息熵及在延河流域生态环境质量评价中的应用[D].北京:清华大学,2016.
- [23] 雷波.黄土丘陵区生态脆弱性演变及其影响力分析[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2013.
- [24] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [25] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 21010—2017 土地利用现状分类[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [27] 靳甜甜,张云霞,朱月华,等.黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性:以子午岭区为例[J].应用生态学报,2021,32(5):1623-1632.
- [28] 贾晓娟,常庆瑞,薛阿亮,等.黄土高原丘陵沟壑区退耕还林生态效应评价[J].水土保持通报,2008,28(3):182-185.
- [29] 花东文,温仲明,杨士梭,等.黄土丘陵沟壑区土地利用景观格局变化分析:以延河流域为例[J].水土保持研究,2015,22(5):86-91.
- [30] 孙梦华,牛文浩,张蚌蚌,等.黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应:以陕甘宁地区为例[J].应用生态学报,2021,32(11):3913-3922.
- [31] 李理,赵芳,朱连奇,等.淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测[J].生态学报,2021,41(19):7568-7578.
- [32] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 111-122.
- [33] Jia X X, Shao M A, Wei X R, et al. Policy development for sustainable soil water use on China's Loess Plateau [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(24):2053-2056.