

# 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

焦春萌<sup>1</sup>, 谢明阳<sup>2</sup>, 焦峰<sup>2,3</sup>, 李团胜<sup>1</sup>

(1.长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 对 1990—2020 年陕西省延安市土地利用结构时空偏移及生态系统服务价值变化进行分析, 为该区生态恢复工程的有效实施及因地制宜制定政策提供科学参考。[方法] 利用延安市 1990—2020 年 7 期遥感影像解译获取的土地利用数据, 基于信息熵和偏移份额模型探讨了该区土地利用结构变化及其生态系统服务价值(ESV)变化。[结果] ① 1990—2020 年延安市土地利用结构信息熵由 1.14 Nat 降至 0.99 Nat, 土地利用结构有序性增强, 均质性降低。② 1990—2020 年延安市建设用地、林地、水域属增长性结构。延安市北部为建设用地、林地、水域的竞争优势区, 中部地区周围是草地的优势区, 南部地区耕地竞争优势显著。③ 1990—2020 年延安市 ESV 由 23.75 亿元增至 31.45 亿元, ESV 增长率呈“北高南低”特征。[结论] 建设用地、林地、水域是延安市土地利用增长的根源, 且 ESV 增长率和土地利用结构竞争偏移整体表现出明显的一致性。

**关键词:** 土地利用结构; 信息熵; 偏移份额模型; 生态系统服务价值; 延安市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0274-08

中图分类号: F301.2

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20210803.001; Jiao Chunmeng, Xie Mingyang, Jiao Feng, et al. Spatial and temporal shifts in land use structure and changes of ecosystem service values in Yan'an City from 1990 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 274-281.

## Spatial and Temporal Shifts in Land Use Structure and Changes of Ecosystem Service Values in Yan'an City from 1990 to 2020

Jiao Chunmeng<sup>1</sup>, Xie Mingyang<sup>2</sup>, Jiao Feng<sup>2,3</sup>, Li Tuansheng<sup>1</sup>

(1.College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an,

Shaanxi 710054, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,

China; 3.Institute of Soil and Water Conservation CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial and temporal shifts in land use structure and changes in ecosystem service values in Yan'an City of Shaanxi Province from 1990 to 2020 were analyzed, in order to provide scientific references for the effective implementation of regional ecological restoration projects and the designation of policies according to local conditions. [Methods] The land use data of Yan'an City obtained from the interpretation of seven periods of remote sensing images from 1990 to 2020 were used to explore the changes in land use structure and the changes in ecosystem service value (ESV) in the study area based on information entropy and offset share models. [Results] ① The information entropy of land use structure in Yan'an City from 1990 to 2020 decreased from 1.14 Nat to 0.99 Nat, and the order of land use structure increased while homogeneity decreased. ② From 1990 to 2020, the construction land, forest land and water area in Yan'an City were the growth structures. In the northern part of Yan'an City, the competitive advantage of construction

收稿日期: 2021-07-07

修回日期: 2021-07-29

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: 焦春萌(1996—), 女(汉族), 陕西省铜川市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源与环境效应评价。Email: 2646892579@qq.com。

通讯作者: 焦峰(1968—), 男(汉族), 陕西省三原县人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持与环境效应评价方面的研究。Email: Jiaof@ms.iswc.ac.cn。

land, forest land and water area were obvious. In the central area, the competitive advantage of grassland was obvious. And in the southern area, the competitive advantage of arable land was obvious. From 1990 to 2020, the ESV of Yan'an City increased from 2.375 billion yuan to 3.145 billion yuan, and the growth rate of ESV was characterized by "high in the north and low in the south". [Conclusion] Construction land, forest land and water area are the causes of land use growth in Yan'an City, and the ESV growth rate is consistent with the competitive deviation of land use structure.

**Keywords:** land use structure; information entropy; offset share model; ecological service value; Yan'an City

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<sup>[1-3]</sup>。土地利用是人类对土地自然属性的利用方式和状况,人们的生产和消费活动都是建立在对土地利用的基础上<sup>[4]</sup>。同时土地利用在维持生态系统服务方面起着决定性作用,是生态系统服务供给能力衡量的核心<sup>[5]</sup>。近年来,探讨土地利用变化生态环境效应及其对生态系统服务的影响已成为土地利用变化研究的热点<sup>[6-7]</sup>。但当前研究的重点集中在土地利用的数量变化方面<sup>[8-10]</sup>,对土地利用结构变化的影响考虑仍需进一步探索。

土地利用结构演变是区域生态管理及土地利用优化研究的重点<sup>[11]</sup>,美国数学家香农提出了信息熵的概念。将其引入城市用地结构的研究中,能够反映城市土地利用系统的有序性和均质性。此后,信息熵作为判定城市土地利用系统有序程度及其演化方向的关键指标被引入不同尺度、不同类型城市土地利用结构演变研究中并推广开来<sup>[12-13]</sup>。偏移份额可以弥补信息熵只能从全局视角表示土地利用结构均匀度和有序度而不能表示单一功能性用地的变化及各子区域土地利用结构差异的缺陷<sup>[14-15]</sup>,作为西方区域经济学中研究区域经济发展时较具代表性的方法之一,最早由美国学者 Dunn 等提出。该模型将区域自身经济总量在某一时期的变动分解为份额量(NS)、结构性偏移量(IM)与竞争性偏移量(RS),以此探究区域结构调整的可行路径。该模型已广泛应用于城市经济增长、产业结构调整和城市用地结构演变等领域<sup>[16-17]</sup>。本研究引入该模型探究延安市土地利用结构的结构变化,以延安市总体土地利用情况为参照体系,对一定时间范围内延安市土地利用或单一功能性用地总量变化情况进行分解,根据份额量、结构性偏移量和竞争性偏移量来考究区域土地利用空间配置差异。在生态系统服务价值评估方面,Costanza 等<sup>[2]</sup>提出的评估体系,系统地计算了全球生物圈的生态系统服务价值(ESV),是迄今为止被使用的最为广泛的体系,掀起 ESV 评估研究的热潮。当量因子法与具有直观、易于使用且所需数据少,使其在区域和

全球范围被广泛使用<sup>[18]</sup>。我国学者谢高地等<sup>[19]</sup>依据中国生态系统的实际情况改进了 ESV 系数,制定了中国陆地生态系统服务价值当量因子表。

退耕还林还草工程实施以来,陕北地区地表覆盖发生了前所未有的大尺度、转换性变化<sup>[20]</sup>。学者们从流域、地形地貌区、格网等进行多尺度探讨<sup>[21-22]</sup>,但前人研究仍存在一些局限,学者们重点关注引起的土地利用数量变化及对生态系统的影响,对县域尺度上土地利用结构的偏移及其生态系统服务变化研究较少。因此,本文以延安市为研究区,基于信息熵和偏移份额模型量化土地利用的空间格局和地域分异特征及 ESV 变化,以期为区域生态恢复工程的有效实施及因地制宜指定政策提出科学参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

延安市位于陕西省北部,黄土高原中南部,介于 $35^{\circ}21'—37^{\circ}31'N$ , $107^{\circ}41'—110^{\circ}31'E$ ,下辖宝塔区、安塞区、延长县、延川县、子长县、志丹县、吴旗县、甘泉县、富县、洛川县、宜川县、黄龙县、黄陵县 13 个区县,总面积约  $3.70 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。延安市属内陆半干旱气候,四季分明,是黄河中游水土流失最为严重的地区<sup>[23]</sup>。1999 年以来,延安市实施退耕还林等国家林业重点工程,截止 2020 年延安市退耕还林政策兑现面积为  $1.29 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,退耕还林工程生态效益显著,为探究土地利用结构变化及其生态系统服务价值的变化提供了平台。

### 1.2 数据来源及预处理

本研究以 1990,1995,2000,2005,2010,2015 和 2020 年为 7 个研究时间节点,通过地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),1990—2010 年为 Landsat 5 遥感图像,2015—2020 年为 Landsat 8 遥感图像。空间分辨率为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,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(因遥感图像更新周期影响,2020 年遥感图像时间为 3—5 月)。对时相不一致数据进行分景处理。最后分别对每层、每区和每景图像进行训练样本的选择和监督分类,以此达到理想的土地利用分类

效果。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(GB/T21010-2017)》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。采用随机分层采样的方法设计随机点与类别涉及的像元数成比例,结合辅助资料和相关数据,进行人工目视判别,利用混淆矩阵法进行精度分析, kappa 检验精度达到 90% 以上。

### 1.3 研究方法

1.3.1 信息熵 信息熵是衡量研究区域土地利用类型的有序程度、均匀程度和集中程度,综合反映一定时期区域内各种土地的转换水平以及动态变化<sup>[13]</sup>。计算公式为:

$$P_i = \frac{S_i}{S} = \frac{S_i}{\sum S_i} \quad (1)$$

$$H = -\sum(P_i \ln P_i) \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为各种土地利用类型的面积占该区域土地总面积的比例;  $H$  表示信息熵;  $S$  为区域土地总面积;  $n$  为土地利用类型数;  $S_i (i=1, 2, \dots, n)$  为各种土地利用类型的面积。

土地利用结构均衡度和优势度描述了土地利用类型之间面积大小的差异,计算公式为:

$$J = \frac{H}{H_{\max}} = \frac{H}{\ln n} = -\frac{\sum(P_i \ln P_i)}{\ln n} \quad (3)$$

$$I = 1 - J \quad (4)$$

式中:  $J$  为土地利用结构均衡度;  $I$  表示土地利用结构优势度。

1.3.2 偏移—份额分析法 按照偏移—份额分析法的基本原理,以延安市土地利用情况为参照系,根据份额量、结构性偏移量和竞争性偏移量来考究区域土地利用空间配置差异<sup>[12-13]</sup>。

份额量是各子区域自研究初以来以  $R$  速率发展所能增长的量,它是全局和均等视野下区域发展差异的反映。计算公式为:

$$NS_{ij} = x_{ij}^0 \cdot R \quad (5)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M (x_{ij}^t) - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M (x_{ij}^0)}{\sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^M (x_{ij}^0)} \quad (6)$$

式中:  $NS_{ij}$  表示份额量;  $R$  表示参照区域总用地面积的平均增长速度;  $x_{ij}^0$  为基期子区域  $j$  第  $i$  类建设用地面积 ( $i=1, 2, \dots, S; j=1, 2, \dots, M$ );  $x_{ij}^t$  为该变量  $t$  时间后的值。

结构性偏移量反映各子区域某类功能性用地是否处于增长优势。计算公式为:

$$IM_{ij} = x_{ij}^0 (R_i - R) \quad (7)$$

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^M (x_{ij}^t) - \sum_{j=1}^M (x_{ij}^0)}{\sum_{j=1}^M (x_{ij}^0)} \quad (8)$$

式中:  $IM_{ij}$  表示结构性偏移量;  $R_i$  表示参照区  $i$  类用地的平均增长速度。

竞争性偏移量能够比较任一区域某类功能性用地和其他区域同类用地相比是否具有竞争优势。计算公式为:

$$RS_{ij} = x_{ij}^0 (R_{ij} - R_i) \quad (9)$$

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}^t - x_{ij}^0}{x_{ij}^0} \quad (10)$$

式中:  $RS_{ij}$  表示竞争性偏移量;  $R_{ij}$  表示  $j$  子区域的  $i$  类型用地的实际增长速度。

### 1.3.3 生态系统服务价值

(1) 单位面积生态系统服务价值量校正。借鉴谢高地提出的全国尺度价值当量换算法,由于生态系统生物量的区域差异,气候生产力是影响区域生物量和生态系统服务功能价值的重要因素,因此用延安的气候生产力与全国平均气候生产力比值来构建研究区域的区域差异系数  $S_k$ 。计算公式为:

$$S_k = \frac{NPP_k}{NPP} \quad (11)$$

式中:  $NPP_k$  为延安地区的平均气候生产力;  $NPP$  为全国平均气候生产力。其中气候生产力以 Miami 模型估算,计算公式为:

$$NPP_T = 3000 / (1 + e^{1.315 - 0.119T}) \quad (12)$$

$$NPP_R = 3000 \times (1 - e^{-0.000664R}) \quad (13)$$

$$NPP_P = \min\{NPP_T, NPP_R\} \quad (14)$$

式中:  $T$  为年平均气温;  $R$  为年降水量;  $NPP_T$  为以年平均气温计算的植被净初级生产力;  $NPP_R$  为以年降水量计算的植被净初级生产力;  $NPP_P$  为计算区域的气候生产力。

根据 1990—2020 年延安市以及全国的平均气温和年降水量。计算延安地区差异性系数 ( $S_k$ ) 为 0.91,延安市 1 个 ESV 当量因子的经济价值为 406.29 元/hm<sup>2</sup>。本研究生态系统为耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地 6 类,其中前 5 种分别对应“中国陆地生态系统单位面积服务价值当量表”中的农田、森林、草地、水域及荒漠<sup>[19]</sup>。综合参考前人研究建设用地单位面积价值当量,计算可得(表 1)。水域单位面积生态系统服务价值最高,其次为林地,建设用地最低。

表 1 延安地区各类生态系统服务价值系数

元/hm<sup>2</sup>

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	未利用地	水域	建设用地
供给服务	食物生产	406.29	134.07	174.70	8.13	215.33	113.76
	原材料生产	158.45	1 210.74	146.26	16.25	142.20	121.89
调节服务	气体调节	0.52	1 755.16	609.43	24.38	207.21	0.00
	气候调节	394.10	1 653.59	633.81	52.82	836.95	0.00
	水文调节	312.84	1 661.72	617.56	28.44	7 626.02	-2 173.64
	废物处理	564.74	698.81	536.30	105.63	6 033.37	-999.47
支持服务	保持水土	597.24	1 633.28	910.08	69.07	166.58	8.13
	维持生物多样性	414.41	1 832.36	759.76	162.52	1 393.57	138.14
文化服务	提供美学景观	69.07	845.08	353.47	97.51	1 803.92	487.55
总计		2 917.66	11 424.81	4 741.38	564.74	18 425.15	-2 303.65

(2) 生态系统服务价值。ESV 计算公式为:

$$ESV = \sum_i^n A_k \cdot E_a \cdot S_k \quad (15)$$

式中: $E_a$  为全国 1 个生态系统服务价值当量因子的经济价值;  $ESV$  为研究区生态系统服务总价值(元);  $i$  为土地类型;  $n=6$ ;  $A_k$  为第  $i$  种土地利用类型的面积(hm<sup>2</sup>)。

(3) 生态系统服务价值量变化。生态系统服务变化指数(ecological services change index, ESCI)表示生态系统服务价值的变化<sup>[24]</sup>, 可表示生态系统服务的相对增益或减损。计算公式为:

$$ESCI = \frac{ESV_{cur} - ESV_{his}}{ESV_{his}} \quad (16)$$

式中:  $ESCI$  表示生态系统服务价值变化指数;  $ESV_{his}$ 、 $ESV_{cur}$  分别对应的是始末状态下的生态系统服务价值量。

## 2 结果与分析

### 2.1 延安市土地利用结构信息熵值演变特征

1990—2020 年延安市整体土地利用结构信息熵、均衡度呈下降趋势, 优势度与之相反(表 2), 即延安市的土地利用结构有序性增强, 均质性降低, 优势土地利用主导作用增强。土地利用结构信息熵最高值出现在 1990 年和 2000 年(1.14 nat), 最低值出现在 2010 年(0.96 nat)。其中, 1990—2000 年延安市土地利用信息熵处于基本稳定期, 无大幅度波动; 2000—2010 年延安市土地利用信息熵大幅度下降, 其值从 1.14 nat 下降至 0.96 nat, 变化幅度为 -15.8%, 达到 30 年来变化幅度最大值; 2010—2020 年, 延安市土地利用信息熵从 0.96 nat 微增至 0.99 nat。

表 2 延安市 1990—2020 年土地利用结构信息熵、均衡度和优势度变化量

区域	1990—2000 年			2000—2010 年			2010—2020 年			1990—2020 年		
	信息熵	均衡度	优势度									
延安市	0.00	0.00	0.00	-0.18	-0.10	0.10	0.03	0.02	-0.02	-0.15	-0.08	0.08
子长县	-0.22	-0.12	0.12	0.24	0.14	-0.14	0.07	0.04	-0.04	0.09	0.05	-0.05
吴起县	-0.09	-0.05	0.05	0.29	0.16	-0.16	-0.05	-0.03	0.03	0.14	0.08	-0.08
安塞区	-0.12	-0.07	0.07	0.15	0.08	-0.08	0.10	0.06	-0.06	0.13	0.07	-0.07
志丹县	-0.06	-0.04	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
延川县	-0.24	-0.14	0.14	0.25	0.14	-0.14	0.07	0.04	-0.04	0.08	0.05	-0.05
宝塔区	-0.02	-0.01	0.01	-0.09	-0.05	0.05	0.03	0.01	-0.01	-0.09	-0.05	0.05
延长县	-0.15	-0.09	0.09	0.12	0.06	-0.06	0.00	0.00	0.00	-0.04	-0.02	0.02
甘泉县	0.05	0.03	-0.03	-0.13	-0.07	0.07	-0.06	-0.04	0.04	-0.13	-0.07	0.07
宜川县	0.00	0.00	0.00	-0.27	-0.15	0.15	0.05	0.03	-0.03	-0.21	-0.12	0.12
富县	-0.05	-0.03	0.03	-0.34	-0.19	0.19	0.15	0.08	-0.08	-0.23	-0.13	0.13
洛川县	-0.08	-0.05	0.05	-0.10	-0.06	0.06	0.11	0.06	-0.06	-0.07	-0.04	0.04
黄龙县	-0.42	-0.23	0.23	-0.01	-0.01	0.01	-0.03	-0.02	0.02	-0.46	-0.26	0.26
黄陵县	-0.32	-0.18	0.18	-0.20	-0.11	0.11	0.09	0.05	-0.05	-0.43	-0.24	0.24

各区县不同时期信息熵变化各异。1990—2020 年信息熵变化表现为“北增南降”，延安市偏北部子长、吴旗、安塞、志丹、延川地区土地利用结构有序性降低，其余区域信息熵降低，土地利用结构朝有序发展；1990—2000 年除甘泉、宜川县其余区域信息熵变化皆为负值，土地利用结构有序性增加；2000—2010 年，信息熵变化幅度最大，此时期熵值变化为总体 1990—2020 年熵值变化的主要来源，为“北增南降”，延安偏北部子长、吴旗、安塞、志丹、延川土地利用结构有序性降低，其余区域信息熵降低；2010—2020 年，除吴旗、甘泉县，其他区域信息熵微增，土地利用结构趋向无序。

## 2.2 延安市土地利用结构性偏移量演变特征

1990—2020，1990—2000，2000—2010，2010—2020 年延安市土地利用的增长率分别为 0.028%，0.034%，-0.001% 和 -0.005%，全市各类土地均按这个速度增长即为该类土地利用类型的份额量，份额量是全局视野下区域发展差异的反映。基于公式 (5)—(10) 计算得延安市土地利用结构性偏移量 (表 3)、土地利用竞争偏移量 (表 4)。

表 3 研究区 1990—2020 年土地利用结构性偏移量

地区	土地利用偏移量					
	建设用地	林地	水域	耕地	未利用地	草地
子长县	16.63	170.34	1.18	-823.38	0.00	-178.16
吴起县	20.67	121.32	5.36	-1 109.64	0.00	-356.31
安塞县	53.11	182.81	2.58	-924.62	0.34	-241.48
志丹县	13.28	458.44	4.70	-998.37	0.08	-307.25
延川县	22.70	168.93	8.19	-661.76	0.00	-139.60
宝塔区	92.18	869.60	3.86	-998.66	1.07	-177.74
延长县	11.38	281.50	9.60	-698.27	0.00	-174.99
甘泉县	58.98	1 100.12	4.14	-423.73	0.00	-57.99
宜川县	24.97	1 014.13	4.93	-459.61	0.00	-172.51
富县	132.51	2 221.87	10.78	-441.27	0.00	-115.57
洛川县	182.90	471.29	3.51	-492.33	0.00	-85.96
黄龙县	25.98	1 601.59	0.20	-234.67	0.00	-72.09
黄陵县	79.47	1 188.14	4.95	-228.23	0.00	-76.13

不同时段内子区域土地利用结构偏移一致，结构性偏移量反映各地区某类功能性用地是否处于增长优势，总体来看，1990—2020 年建设用地、林地、水域结构性偏移量值为正，表明其增长率超过延安土地利用的增长率，属增长性结构，是延安土地利用增长的根源。耕地、草地结构性偏移量值为负，说明其增长率低于延安土地利用增长率，属衰减性结构。延安市增长性结构用地类型从衰退型结构中吸纳了 10 650.29 km<sup>2</sup>

的新增用地，耕地、草地分别占贡献量的 79.8% 和 20.2%，此贡献在增长性结构的分配大多集中于林地，占比 92.5%。不同时段林地、耕地、草地结构偏移有所差异，1990—2000 年林地、耕地结构偏移为负，为衰减结构，草地则属增长性结构；2000—2010 年为林地增长期，耕地、草地衰减期，林地增长幅度在宝塔区、甘泉、宜川、富县、洛川、黄龙、黄陵表现更为突出；2010—2020 年林地、耕地为增长性结构，草地呈衰减态势。建设用地大幅度增长、水域微增、未利用地无显著波动。

表 4 研究区 1990—2020 年土地利用竞争性偏移量

地区	土地利用偏移量					
	建设用地	林地	水域	耕地	未利用地	草地
子长县	43.68	688.35	3.58	-100.63	0.00	177.74
吴起县	44.42	1 994.57	17.17	-83.51	0.00	-656.32
安塞县	27.86	966.60	1.50	-49.98	-0.94	-19.30
志丹县	37.74	832.87	8.70	13.18	-0.22	-65.79
延川县	68.51	150.55	-7.43	-32.83	0.00	422.06
宝塔区	49.20	-40.33	-4.82	-96.40	1.14	313.67
延长县	50.86	-64.15	-3.23	-2.89	0.00	592.85
甘泉县	-28.79	-840.71	-4.05	20.21	0.00	170.92
宜川县	12.24	-272.53	1.48	57.84	0.00	-211.85
富县	-106.82	2 222.64	-6.21	118.16	0.00	-155.22
洛川县	-150.93	-51.18	-2.14	130.10	0.00	-6.30
黄龙县	-11.63	1 041.36	1.80	5.49	0.00	-276.16
黄陵县	-36.34	-662.15	-6.36	21.25	0.00	-286.31

不同地区土地利用类型竞争偏移有明显差异 (表 4)，竞争性偏移量能够比较任一区域某类功能性用地和其他区域同类用地相比是否具有竞争优势。1990—2020 年建设用地竞争偏移在延安中部及北部为正，在延安南部甘泉、宜川、富县、洛川、黄龙、黄陵县为负，表明在延安中部及北部建设用地竞争优势显著，建设用地呈扩张趋势，南部 6 县建设用地呈缩减趋势；林地竞争偏移量在延安北部包括子长、吴旗、安塞、志丹、延川以及富县为正，呈扩张趋势，其他区县值为负，林地缩减；水域竞争偏移在北部子长、吴旗、安塞、志丹以及宜川和黄龙两县为正，此区域水域扩张，其他区县水域缩减；耕地竞争偏移量在北部及中部宝塔区、延长县为负，耕地急剧缩减，中南部甘泉、宜川、富县、洛川、黄龙、黄陵耕地相对扩张；未利用竞争偏移量稳定，无明显变化；草地竞争偏移值在延安北部吴旗、安塞、志丹三县以及南部宜川、富县、洛川、黄龙、黄陵为负，草地挤出效应严重，呈缩减趋势，子长县及中部延川、延长、甘泉县、宝塔区草地增长处于优势。

1990—2000 年,延安南部宜川、富县、洛川、黄龙、黄陵地区林地增长竞争优势大,其余各县林地增长处于劣势,耕地增长在吴旗、延川、延长、宜川突出,其余各县耕地增长无竞争优势,延安北部子长、吴旗、安塞、志丹及宝塔区、甘泉、富县草地增长优势显著;2000—2010 年,延安北部、中部子长、吴旗、安塞、志丹、延川、延长、宝塔林地增长快速,南部各区县林地增长无优势,耕地在延安南部甘泉、宜川、富县、洛川、黄龙、黄陵表现出增长优势,草地在市区附近延川、延长、宝塔、甘泉增长显著;2010—2020 年林地增长优势依旧体现在北部子长、吴旗、安塞、志丹及市区宝塔,耕地在北部子长、吴旗、安塞、志丹及南部富县、洛川、

黄龙、黄陵优势增长,延川、延长及南部富县、宜川、洛川、黄陵草地优势增长。

### 2.3 土地利用结构偏移的生态系统服务价值变化

延安地区 1990,1995,2000,2005,2010,2015 和 2020 年总 ESV 分别为 23.75,22.28,23.79,28.68,31.50,29.25 和 31.45 亿元,EVS 总体呈增长趋势,30 a 间共增长 7.7 亿元。从空间上来看,1990—2020 年各区县 ESV 的平均值(图 1),整体表现为南高北低的特征,富县 ESV 均值最高,为 39.02 亿元,延川 ESV 为最低值,为 10.35 亿元。延安市各子区域变化率呈现“北高南低”特征,即延安北部区域受退耕还林还草政策影响更大,ESV 增长迅速。

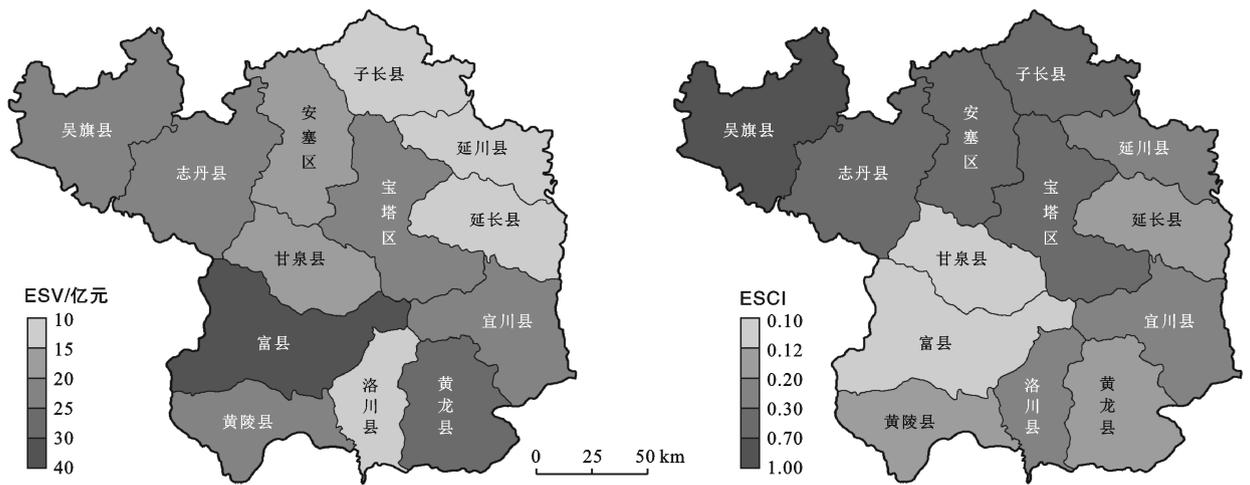


图 1 研究区 1990—2020 年生态系统服务价值均值(ESV)及变化率(ESCI)分布

根据延安市各区县不同土地利用类型结构性偏移量(表 3)可知,各区县不同土地利用类型的结构性偏移量正负一致,即所有子区域不同土地利用类型增减趋势一致。因此 1990—2020 年导致延安市各区县 ESV 变化率差异的是延安各子区域不同土地利用类型与其他区域同类土地利用类型的相对变化快慢。即工程实施前后各子区域 ESV 变化率与延安市土地利用竞争性偏移量相呼应(表 4)。

吴旗县林地、水域增长率相对于其他区县同类用地优势突出,根据延安地区各类生态系统服务价值系数(表 1),林地、水域生态系统服务价值系数占总生态系统服务价值系数比例分别为 32% 和 52%,占比较高,导致吴旗县 ESCI 最高;志丹、安塞、子长与吴旗类似,以林地、水域增长见长,其值略低于吴旗,故 ESCI 次之。

延川县 ESCI 变化在于林地、草地增长率贡献,延安市区,即宝塔区 ESCI 值在未利用地和草地的贡献,1990—2020 正值当地经济快速发展期,市中心地区未利用地大量开发,此地为政治经济文化中心,对

于绿化需求较高,其草地增长率较其他区域更为显著,宜川水域增长较为优势,耕地减少缓慢,是其 ESCI 的主要来源,洛川县建设用地增加缓慢、耕地减少率最低,故其 ESCI 较为可观。

延长县草地增长最快,与此同时其建设用地增长也最为迅猛,故 ESCI 较低,黄龙、黄陵两县因其本身基数高,各土地利用类型变化率低,故 ESCI 低;甘泉虽草地增长较高,林地、水域增长率最低,是其 ESCI 最低的主要原因,富县林地、草地增长较高,因其基数高,导致变化率低,即 ESCI 低。

## 3 讨论和结论

### 3.1 讨论

1990—2020 年延安市土地利用信息熵值不断变化,整体变现为:平稳—调整—微调。土地利用信息熵的时间变化受退耕还林还草工程影响明显。其中 1990—2000 年退耕还林还草工程尚未实施,因此该时间段内信息熵值稳定,土地利用结构相似。2000—2010 年,土地利用信息熵值急剧下降,土地利用系统

有序性增加。2013 年延安市实施新一轮退耕还林,逐步将全市剩余 25°全部退耕还林,因政策微调整,土地利用结构信息熵此时随之波动,截止到 2020 年,随着生态建设的稳步推进,其土地利用信息熵稍降将,趋于平稳。1990—2020 年偏移一份额模型计算结果表明,在政策主导下土地利用结构变化主要为林地—耕地—草地利用变化的结果,林地、耕地和草地为衰减性结构;各子区域土地利用结构变化程度对比而言,延安北部区域林地扩张,耕地、草地被挤出,延安中部草地扩张,林地、耕地被挤出,延安南部耕地扩张,林地、草地被挤出。

退耕还林以来,延安市土地利用转变规模巨大、时间迅速,增加了地表植被覆盖,有效提升了延安地区 ESV,且为延安地区 ESV 增长的主要贡献来源<sup>[20,25]</sup>。本研究发现延安北部地区林地增长率居高,中部地区草地增长率居高,南部地区耕地减少缓慢,表现出地域差异,退耕还林还草政策整体效果显著,生态用地显著增加,生态系统服务表现明显增长趋势。

本研究仍存在局限,首先本文分析了土地利用偏移份额和生态系统服务变化,但局限于土地利用偏移份额计算尺度的影响,本文对两者的关系仅是定性的表征,没有直接采用数据揭示两者的定量关系,后续研究中可以在这方面进行加强。其次,不同方法模型对生态系统服务价值量计算存在差异,本文采用谢高地等人的计算方法,虽然进行了本地化处理,但评价结果受方法限制。后续可以采用其他生态系统服务计算模型进行对比。最后,本文对土地利用偏移和生态系统服务变化的研究是基于县级尺度展开的,缺乏多尺度对比分析及讨论,多尺度空间分异性归因研究是当前地理学研究重点,后期可以尝试进行多尺度的土地利用结构和生态系统服务变化研究。

### 3.2 结论

(1) 延安市研究期内土地利用结构有序性增强,均质性降低,优势土地的主导型作用增强。信息熵时空差异显著;1990—2020 年北部地区土地利用有序性下降,南部相反,1990—2000 年,土地利用结构有序性增加,2000—2010 年信息熵变化幅度最大,与 1990—2020 年熵值变化空间分布一致,2010—2020 年土地利用结构趋于稳定。

(2) 总体而言,建设用地、林地、水域是延安市土地利用增长的根源。1990—2000 年林地、耕地为衰减结构,草地则属增长性结构,2000—2010 年为林地增长期,耕地、草地衰减期,2010—2020 年林地、耕地为增长性结构,草地呈衰减态势。研究期间延安北部

为建设用地、林地、水域的竞争优势区,延安中部市区周围是草地的优势区,延安南部耕地竞争优势显著,1990—2000 年,延安南部林地增长竞争优势大,2000—2010 年,延安北部、中部林地增长快速,耕地在南部表现出增长优势,2010—2020 年林地增长优势依旧体现在北部,耕地在北部及南部优势增长,草地在南部增长显示出显著优势。

(3) 延安地区 1990—2020 年 EVS 总体呈增长趋势,30 a 间共增长 7.7 亿元,各子区域 ESV 总值均有增加,但空间分异差异显著,总体呈“南高北低”格局,增长幅度呈“北高南低”特征,与延安市土地利用竞争偏移量表现一致。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5):19-25.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.
- [3] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].地球科学进展,2009,24(6):571-576.
- [4] 魏慧,赵文武,张骁,等.基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价:以山东省德州市为例[J].生态学报,2017,37(11):3830-3839.
- [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] 巩杰,徐彩仙,燕玲玲,等.1997—2018 年生态系统服务研究热点变化与动向[J].应用生态学报,2019,30(10):3265-3276.
- [7] Chen Wangxu, Chi Guangqing, Li Jiangfeng. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995—2015 [J]. Science of the Total Environment, 2019,669:459-470.
- [8] 刘亚茹,王聪,严力蛟.华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响:以河南省商丘市为例[J].应用生态学报,2018,29(5):1597-1606.
- [9] 王永琪,马姜明.基于县域尺度珠江—西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[J].生态学报,2020,40(21):7826-7839.
- [10] 雷军成,王莎,汪金梅,等.土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2019,39(9):3089-3099.
- [11] 龚建周,刘彦随,张灵.广州市土地利用结构优化配置及其潜力[J].地理学报,2010,65(11):1391-1400.
- [12] 谢汀,伍文,高雪松,等.基于信息熵与偏移一份额模型的建设用地结构变化分析:以成都市为例[J].资源科学,2014,36(4):722-730.
- [13] 王玉明,王瑞康.城市化时期郊区土地利用结构信息熵

- 上升的原因[J].地理学报,2018,73(9):1647-1657.
- [14] 郭施宏,海西城市群城市土地利用结构与效率[J].经济地理,2017,37(1):170-175.
- [15] 许芸鹭,雷国平.辽中南城市群城市用地结构的时空演变分析[J].经济地理,2018,38(1):69-77.
- [16] 宋洋,朱道林, Yeung Godfrey, 等.收缩情境下城市用地结构时空格局演变及动力机制:以中国东北地区为例[J].地理研究,2021,40(5):1387-1403.
- [17] 王成新,王波涛,王翔宇.基于结构视角的中国人口城市化与土地城市化异速增长研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(8):135-141.
- [18] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [19] 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.
- [20] 邓元杰,侯孟阳,谢怡凡,等.退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响[J].生态学报,2020,40(18):6597-6612.
- [21] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].地理学报,2019,74(9):1835-1852.
- [22] 侯孟阳,姚顺波,邓元杰,等.格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征:基于退耕还林工程的实施背景[J].自然资源学报,2019,34(3):539-552.
- [23] 李慧,周维博,庄妍,等.延安市农业水土资源匹配及承载力[J].农业工程学报,2016,32(5):156-162.
- [24] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报,2018,73(5):868-879.
- [25] 张学斌,罗君,石培基,等.格网尺度下张掖生态系统服务价值时空演变及地形梯度分异特征[J].应用生态学报,2020,31(2):543-553.

(上接第264页)

- [29] 王成,唐宁.重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J].地理研究,2018,37(6):1100-1114.
- [30] 朱青,罗志红,张伟.区域间资本存量与经济增长:一个动态比较[J].商业研究,2016(5):25-31.
- [31] 刘洪玉,杨帆,徐跃进.基于2010年人口普查数据的中国城镇住房状况分析[J].清华大学学报(哲学社会科学版),2013,28(6):138-147.
- [32] Pradhan R P, Bagchi T P. Effect of transportation infrastructure on economic growth in India: The VECM approach [J]. Research in Transportation Economics, 2013,38(1):139-148.
- [33] He Canfei, Huang Zhiji, Wang Rui. Land use change and economic growth in urban China: A structural equation analysis [J]. Urban Studies, 2014, 51(13): 2880-2898.
- [34] Glaeser E L, Shapiro J M. Urban growth in the 1990s: Is city living back? [J]. Journal of Regional Science, 2003,43(1):139-165.
- [35] Gong Peng, Li Yuecao, Wang Jie, et al. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018 [J]. Remote Sensing of Environment, 2020,236:111510.
- [36] 李佳铭,张文忠,孙铁山,等.中国城市群集聚特征与经济绩效[J].地理学报,2014,69(4):474-484.
- [37] 李亚婷,潘少奇,苗长虹.中国县域人均粮食占有量的时空格局:基于户籍人口和常住人口的对比分析[J].地理学报,2014,69(12):1753-1766.
- [38] 国家统计局.中国城市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019.
- [39] 国家统计局.中国县(市)社会经济统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019.
- [40] 郭彦彪,戴军,冯宏,等.土壤质地三角图的规范制作及自动查询[J].土壤学报,2013,50(6):1221-1225.

(上接第273页)

- [26] 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.
- [27] 赵筱青,李思楠,谭琨.基于功能空间分类的抚仙湖流域“3类空间”时空格局变化[J].水土保持研究,2019,26(4):299-305,313.
- [28] 唐秀美,刘玉,任艳敏.基于格网尺度的密云水库区域“三生”空间功能测度与时空变化分析[J].中国农业资源与区划,2021,42(5):60-69.
- [29] 刘瑞华,曹暄林.滇池20年污染治理实践与探索[J].环境科学导刊,2017,36(6):31-37.
- [30] 金杰.滇池流域土地利用变化的生态环境效应及其约束下的优化配置研究[D].云南昆明:昆明理工大学,2018.
- [31] 昆明市规划局.昆明城市总体规划(2008—2020年)[R].云南昆明:昆明市规划局,2011.
- [32] 庾川,张璐,唐磊.基于湖城共生的滇池流域国土空间格局构建[J].城市观察,2019,(5):108-119.