

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

侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 丁振民, 鲁亚楠, 郑雪, 李雅男

(西北农林科技大学资源经济与环境管理研究中心, 杨凌 712100;

西北农林科技大学经济管理学院, 杨凌 712100)

摘要: 在退耕还林工程背景下, 以退耕还林实施后生态效果较显著的延安市为研究对象, 基于解译的三期影像数据, 通过土地利用转移矩阵, 在 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 的格网尺度下测算延安市不同土地利用类型的生态服务价值(ESV), 并结合空间探索性数据分析, 探讨ESV的不同土地利用类型转移的时间变化特征及空间转移的关联性和异质性。延安市的实证分析显示: (1) 1990-2015年间, ESV的增减主要发生在耕地、林地和草地之间, 林地和草地ESV合计转入21.29亿元, 且转入量主要发生在退耕还林工程实施之后; (2) 生态服务功能主要由林地和草地提供, ESV的时间变化经历了先下降后上升的过程, 退耕还林工程的实施促进ESV的增长, 2001-2015年间增长了5.34%; (3) 空间探索性分析显示, ESV在格网尺度下呈现出显著的“南高北低”分布格局, 并在空间上表现出正向的集聚性和依存性, ESV的高高集聚和低低集聚效果比较明显, 并且高高集聚区与林地、草地的空间分布相吻合, 低低集聚区与耕地、城乡建设用地的空间分布相吻合。整体而言, 延安市土地利用类型转移和ESV的增减变化与推行退耕还林工程在时间上呼应、在空间上匹配, 政府主导的退耕还林工程对生态环境恢复与保护起到显著的积极作用。因此, 对于不同土地利用类型的生态服务功能, 以耕地为主的北部地区应在基本农田保护制度基础上, 注重农业生产与生态效益平衡, 而林草资源丰富的南部地区则继续发挥生态屏障的调节作用。

关键词: 土地利用类型转移; 生态服务价值; 格网尺度; 空间探索性分析; 延安市; 退耕还林

土地是人类生产生活与维持生态平衡的空间载体, 当前中国的城镇化进程正在向纵深发展, 城乡要素的交互影响导致土地利用类型和利用方式在深度与广度上均呈现剧烈变化^[1]。而土地利用通过改变地表自然景观, 对生态系统的结构和功能造成影响, 带来生态服务价值的变化^[2]。生态系统服务是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务^[3], 1997年Costanza等^[3]把全球生态系统划分为14类生物群落, 把生态系统的服务功能划分为17种主要类型, 系统地评估了全球生态系统服务的功能价值, Daily等^[4]则系统地介绍生态系统服务功能的概念及价值评估。自此之后, 关于生态

收稿日期: 2018-08-27; 修订日期: 2019-01-25

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费(201504424); 教育部人文社会科学重点基金项目(14JJD790031); 国家自然科学基金项目(71473195)

作者简介: 侯孟阳(1988-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 研究方向为资源经济与环境管理、农业经济与生态。

E-mail: houmengyang@outlook.com

通讯作者: 姚顺波(1964-), 男, 湖南益阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源经济与环境管理, 林业政策效果评估。E-mail: yaoshunbo@163.com

系统服务的价值评估逐渐成为国内外生态学相关学者研究的热点问题之一,围绕生态系统服务的理论框架^[5-6]、类型划分^[7-8]、价值评估方法^[9-11]等多方面进行了深入探讨。

中国生态服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)研究主要始于欧阳志云等^[5]和谢高地等^[6],并以谢高地等^[10]于2003年提出的基于单位面积的价值当量表的应用最为广泛,成为评估不同地区不同类型ESV的重要手段^[12-15]。ESV作为生态系统的重要部分,基于土地利用类型转移矩阵的价值评估、不同土地类型时间对比分析已经相当成熟^[12-13],在不同的空间尺度下,会产生不同的空间效应。宏观尺度多以行政区作为评估单元,而微观尺度较多转换成格网作为评估单元。国内学者对此也做出了有益的探索,陈彧^[16]以10 km×10 km网格为单元测算了湖北省土地ESV,并分析了2000-2008年间的时空分异特征;李露然^[17]以800 m×800 m格网为基本研究单元分析了九寨沟保护区ESV的时空变化;唐秀美等^[18]、李建春等^[19]、马骏等^[20]基于格网尺度的研究,不仅推动了GIS格网技术方法的扩展应用,也丰富了ESV的研究。但在格网尺度下,空间关系量化、空间格局演变、空间转移过程以及时空分异变化对比等方面的研究仍值得继续挖掘。

土地利用类型转移及生态系统服务功能的时空演变特征,影响着土地资源的利用格局及ESV的提供。本文可能的创新之处在于,针对当前ESV时空格局依赖性及异质性特征等方面的研究相对较少的情况下,选取国内退耕还林工程实施较早、生态效果较显著的延安市为研究对象,基于谢高地等^[11]修正后的单位面积生态系统服务价值当量表,在GIS格网尺度下测算不同土地利用类型的ESV。在ESV损益矩阵分析基础上,通过空间探索性分析方法中的Moran's *I*指数和LISA集聚图,从空间上探讨ESV在退耕还林前后的时空格局的集聚性和异质性,以期为退耕还林工程实施的生态效益、优化土地资源可持续利用、经济社会与生态的协调发展提供理论与实践支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

延安市位于陕西省北部,介于35°21'~37°31'N、107°41'~110°31'E之间,黄土高原中南部,西安以北371 km。北连榆林,南接关中咸阳、铜川、渭南三市,东隔黄河与山西临汾、吕梁相望,西邻甘肃庆阳(图1)。延安市属内陆半干旱气候,四季分明,日照充足,昼夜温差大,年均无霜期170天,年均气温7.7~10.6℃,年均日照数为2300~2700小时,年均降水量为500 mm左右。延安市地处黄河中游,属于黄土高原丘陵沟壑区,地貌以高原、丘陵为主。地势西北高东南低,平均海拔1200 m左右。

退耕还林工程始于1999年,陕西、四川和甘肃率先开展试点。国家林业局统计数据显示,退耕还林工程实施以来,中国累计完成退耕还林任务4.47亿亩,工程区森林覆盖率平均

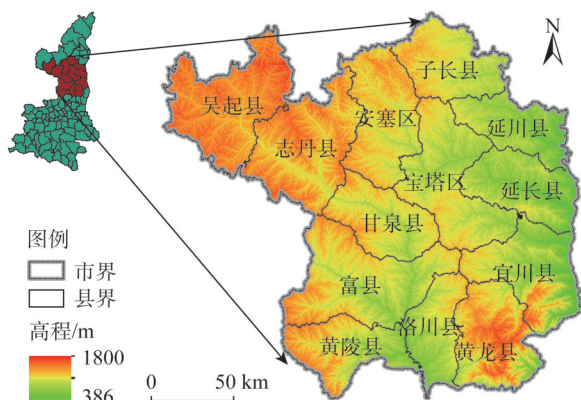


图1 延安市在陕西省的位置

Fig. 1 Location of Yan'an in Shaanxi province

提高3个多百分点,每年产生的生态系统服务功能总价值超过 1×10^{12} 元,林草植被覆盖明显恢复,生态环境显著改善。延安市地处黄河中游丘陵沟壑区,曾经是黄河中游水土流失最为严重的地区。1999年以来,延安市相继实施退耕还林、天然林保护、三北防护林等国家林业重点工程,截至2016年年底,累计完成退耕还林1077.46万亩,占延安市国土面积的19.4%,且占陕西省累计退耕还林面积27%,当前林地面积达4396.2万亩,并且延安市植被覆盖度由2000年的46%提高到2016年的67.7%,退耕还林的生态效益显著。2013年延安市启动新一轮退耕还林工程,决定从2013年起,用4年时间,逐步将现有 25° 以上坡耕地全部退耕还林,实现陡坡全绿化、林草全覆盖。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源

选取1990年、2001年和2015年三期研究区6-8月的Landsat TM、ETM+、OLI影像进行土地利用分类。三期影像数据来源美国地质勘探局服务平台(<https://glovis.usgs.gov/>)。研究区跨5幅影像,图像编号分别为126/35、127/34、127/35、128/34和128/35,影像分辨率为30 m;在ENVI 5.1平台下对影像进行大气校正、几何校正、拼接和裁剪等预处理后,采用监督分类与人机交互目视解译相结合的方法进行相应年份研究区土地利用分类。参考中国科学院土地利用/覆被分类体系,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地六类^[21]。在对影像进行监督分类的过程中,结合Google Earth历史影像对人工选取的各地类感兴趣区(Region of Interest, ROI)进行误差校正,由此得到研究区三期土地利用分类数据。最后,在ENVI 5.1平台下,运用精度评价模块,通过随机抽取300个地面点,分别对这三期解译数据进行评价,结果得到1990年、2001年和2015年三期分类结果的总分类精度分别为85.6317%、86.2345%和88.5621%,Kappa指数分别为0.81、0.82和0.84,满足应用精度要求。研究区的DEM数据源下载于地理空间数据云提供的ASTER-GDEM 30 m分辨率的数字高程数据,延安市行政边界矢量数据来源于2017年国家基础信息中心公布的全国1:100万基础地理数据库(www.webmap.cn)。本文所使用的空间坐标系为WGS_1984_UTM_zone_49N(图2)。另外,陕西省粮食价格、单位面积产量、CPI等社会经济数据来源于各年份《全国农产品成本收益汇编》^[22]及国家数据网站(<http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>)。

1.2.2 基于格网尺度的数据处理

GIS格网尺度法是指用格网点状单元作为指标因子的数据载体和基本评价分析单元的方法。基于ArcGIS平台,导入1990年、2001年及2015年三期延安市的土地利用分类影像数据,采用栅格转面工具将栅格数据转换为矢量数据,运用Create Fishnet工具,采用覆盖研究区的等积格网对三期土地利用空间数据进行划分并生成样本点集,计算公式如下^[17]:

$$H=(1/2) \times [\min(A_i)]^{1/2} \quad (1)$$

式中: H 为格网边长; A_i 表示最小图斑的面积。

经过反复试验,确定格网大小约为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$,据此创建土地利用类型的格网样本,获得研究区土地利用的格网数量为9658个(边缘地带划定的格网面积有所差异),并将创建的格网与不同时期土地利用类型分布图进行裁剪、相交等工作,最后汇总统计单个格网内不同土地利用类型 ESV ,得到每个格网 ESV ,从而完成空间数据的重构^[16,19],

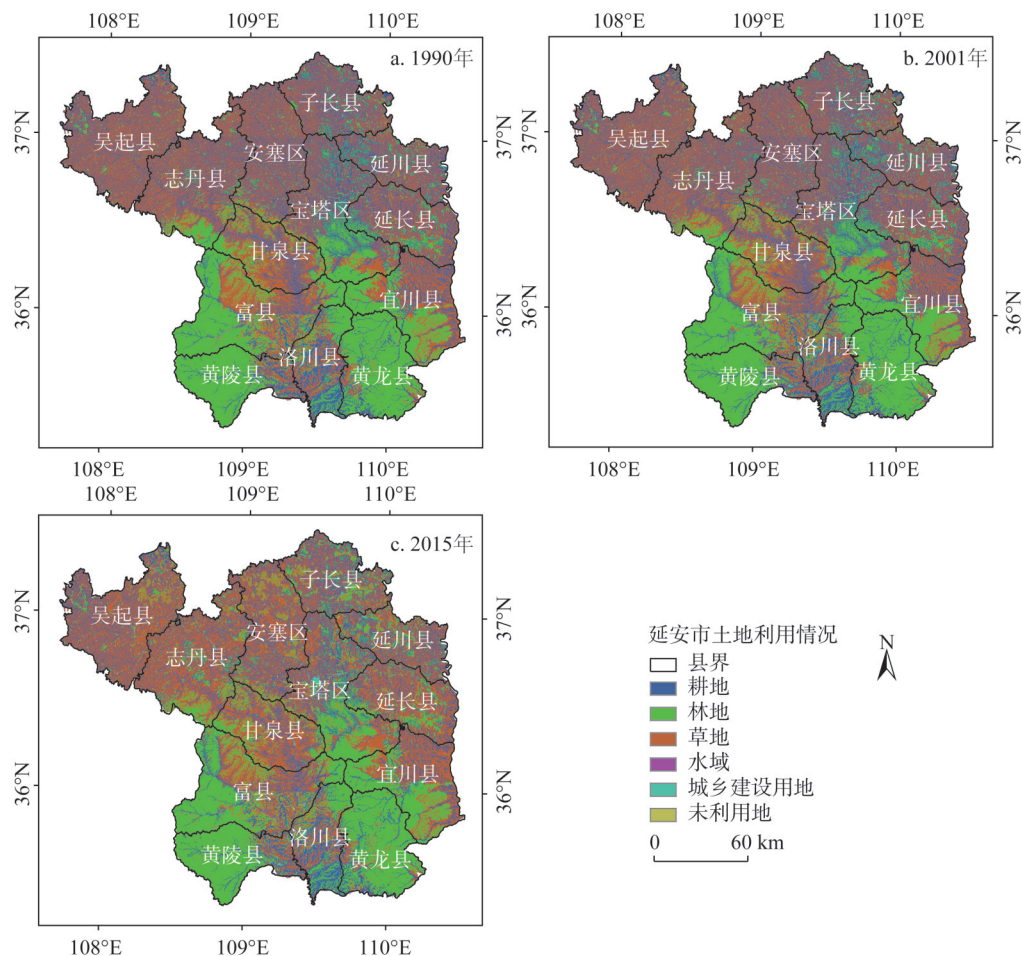


图2 1990年、2001年及2015年延安市土地利用类型

Fig. 2 The land use types of Yan'an in 1990, 2001 and 2015

以便进行空间探索性分析。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值评估

生态系统服务是指通过生态系统直接或间接地为人类生存和生活质量提供生态产品与支持^[23]。本文对延安市ESV的测算参考谢高地等^[11]修订的中国生态系统单位面积ESV当量因子表, 因子表中旱地的食物生产价值当量系数0.85, 表示1 hm²全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值为0.85, 即1个标准单位生态系统服务价值当量因子的价值量。因而, 不同类型生态系统服务的单价就可以根据延安市1990-2015年内粮食单产的市场均价进行换算, 另外, 据谢高地等^[6,8,10]的相关研究, 单位面积农田生物生产的ESV (即1个当量因子的价值) 相当于当年延安市平均粮食单产经济价值的1/7^[16], 从而得到延安市单位面积的ESV公式如下:

$$C = p \times q / 7 \quad (2)$$

式中: C 表示延安市单位面积的ESV (元/hm²); p 表示延安市1990-2015年的粮食均价

(元/kg); q 表示延安市 1990-2015 年平均粮食单位面积产量 (kg/hm^2)。

测算延安市单位面积生态系统服务价值 C , 首先需要估算延安市 1990-2015 年间粮食均价: 通过整理陕西省 1990-2015 年间小麦和玉米的价格^[25], 以小麦和玉米价格的平均值近似作为该时间段延安市的粮食均价, 通过居民消费价格指数 (CPI) 对其进行修正, 以消除物价上涨对价值变化的影响^[13], 根据单位面积粮食产量及 ESV 公式, 最终得到 2015 年延安市单位面积 ESV 量为 $868.88 \text{ 元}/\text{hm}^2$ 。根据延安市土地利用类型的特征, 把每种土地利用类型与最接近的生态系统类型相联系。具体操作原则为: 耕地对应农田和水田的平均值; 林地对应森林, 即针叶、针阔混交与灌木的平均值; 草地对应灌草丛与草甸的平均值; 水域对应水系; 未利用地对应荒漠; 城乡建设用地包括城镇用地、农村居民点等, 并取其 ESV 为 0^[14]。根据 Costanza 等^[3]的方法, 可测算出不同土地利用类型生态系统服务价值系数 C_k , 即不同土地利用类型单位面积的生态服务价值量 (表 1), 并得到延安市不同土地利用类型生态系统服务总价值 ESV :

表 1 延安市不同土地利用类型单位面积 ESV

Table 1 The per unit area ESV of different land use types in Yan'an city

(元/ hm^2)

一级分类	二级分类	农田	森林	草地	水域	城乡建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	960.11	208.53	260.66	695.11	0	4.34
	原料生产	212.88	480.78	386.65	199.84	0	13.03
	水资源供给	-1133.89	249.08	212.88	7203.03	0	8.69
调节服务	气体调节	773.30	1581.36	1351.11	669.04	0	56.48
	气候调节	404.03	4729.61	3575.45	1989.74	0	43.44
	净化环境	117.30	1378.63	1181.68	4822.29	0	178.12
	水文调节	1298.98	2954.20	2619.68	88834.47	0	104.27
支持服务	土壤保持	451.82	1923.12	1646.53	808.06	0	65.17
	维持养分循环	134.68	147.71	125.99	60.82	0	4.34
	生物多样性	147.71	1752.24	1498.82	2215.65	0	60.82
文化服务	美学景观	65.17	767.51	660.35	1642.19	0	26.07
	合计	3432.08	16172.79	13519.80	109140.24	0	564.77

$$ESV = \sum_k A_k \times C_k \quad (3)$$

式中: A_k 为第 k 类型的土地面积; C_k 为 ESV 系数, 表示 k 类型的土地单位面积的 ESV 。

在式 (3) 的基础上, 得出 ESV 损益计算公式^[13]:

$$P_{ij} = (C_j - C_i) \times A_{ij} \quad (4)$$

式中: P_{ij} 为第 i 类土地利用类型转化为第 j 类土地利用类型后的 ESV 损益; C_i 、 C_j 分别为第 i 、 j 类土地利用类型的 ESV 系数; A_{ij} 为第 i 类土地利用类型转化为 j 类土地利用类型的面积。

1.3.2 空间探索性分析方法

空间探索性分析方法 (Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA) 是一系列空间数据分析方法和技术的集合, 以空间关联度为核心, 通过对事物或现象空间分布格局的描述与可视化分析, 探索空间集聚与空间异常^[19], 其核心是通过全局空间自相关和局部空间自相关度量和检验空间趋同性或异质性^[24]。该部分分析均在 ArcGIS、GeoDa 平台下完成。

(1) 全局空间自相关

全局空间自相关反映研究区整体的某种属性值是否存在空间关联, 衡量全局空间自相关的指标和方法, 包括全局Moran's I 和Geary's C 等方法, 本文采用全局Moran's I 指标对基于格网的延安市ESV进行全局自相关度量和检验, 其计算公式为^[25]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (5)$$

式中: I 为Moran's I 指数; n 为研究区域总数量; x_i 、 x_j 为某区域 i 、 j 的属性值; \bar{x} 为属性的平均值; w_{ij} 为行标准化的空间权重矩阵, 满足 $\sum_j w_{ij} = 1$ 。根据延安市的空间邻接性构造空间权重矩阵, 若空间相邻, 则 $w_{ij} = 1$; 否则, $w_{ij} = 0$ 。

(2) 局部空间相关性

局部空间自相关(局部Moran's I 指数)由Anselin^[26]于1995年提出, 其反映某区域与邻近区域在同一属性值的集聚程度, 用于观察空间局部的不平衡性, 识别局部区域存在的空间关联和空间异质性, 其本质上是全局Moran's I 指数分解到各个空间单元, 以便分析空间单元与周围单元的空间差异程度及其显著性水平^[16]。主要度量方法有空间关联局部指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA)、Moran散点图等。LISA能够进一步衡量某区域与周边区域之间相近或差异的程度, 并能够对局部空间集聚的显著性进行评估, 其计算公式为^[25]:

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j, z_i = \frac{n(x_i - \bar{x})^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})}, z_j = (x_j - \bar{x}) \quad (6)$$

式中: z_i 、 z_j 分别为区域 i 、 j 上观测值的标准化。

2 结果分析

2.1 基于土地利用转移矩阵的ESV损益分析

为充分了解土地利用类型转移带来的生态系统服务价值的增减变化, 根据式(5), 考虑到退耕还林前后的影响, 利用土地利用转移矩阵计算1990-2001年、2001-2015年及1990-2015年的ESV在不同土地利用类型的损益(表2)。据此可以得出以下转移特征: (1) 延安市ESV损益变化主要集中在2001-2015年间, 且主要发生在耕地、林地和草地之间。1990-2015年间, 延安市ESV合计增长17.86亿元, 且主要发生在耕地向林地和草地的转移, 耕地面积的减少导致ESV转出35.45亿元, 并促使林地和草地ESV分别增长10.49亿元、24.07亿元, 而林地向耕地、草地的转移导致ESV分别减少了3.78亿元、1.17亿元, 草地向耕地的转移导致ESV减少了10.33亿元, 剧烈增减的转移均发生在2001-2015年间。在1990-2000年间, ESV并未发生剧烈增减变化, 耕地面积的转移主要导致林地和水域的ESV分别增长了0.38亿元和0.40亿元, 林地和草地的ESV分别减少了1.99亿元和2.10亿元, 主要流向耕地和城乡建设用地, 表明退耕还林前延安市生态环境的恶化问题已经不容忽视。(2) 1999年开始实施的退耕还林工程, 加速延安市土地利用类型转移进程, 显著促进ESV的增长。2001-2015年间, 同样在耕地、林地和草地之间转移, 耕

表2 不同时期延安市ESV损益矩阵
Table 2 The *ESV* profit or loss matrix of Yan'an city in different periods (亿元)

1990年	2001年						
	耕地	林地	草地	水域	城乡建设用地	未利用地	转出合计
耕地	0	0.3840	0.0617	0.4030	-0.0658	0	0.7829
林地	-0.9502	0	-0.1853	0.0099	-0.8598	0	-1.9855
草地	-2.6698	0.4782	0	0.1051	-0.0114	0	-2.0979
水域	-0.1927	-0.0702	-0.2673	0	-0.0001	0	-0.5302
城乡建设用地	0.0003	0.0003	0.0001	0	0	0	0.0007
未利用地	0.0007	0.0045	0.0179	0	0	0	0.0231
合计	-3.8117	0.7968	-0.3729	0.5180	-0.9370	0	-3.8069

2001年	2015年						
	耕地	林地	草地	水域	城乡建设用地	未利用地	转出合计
耕地	0	10.6999	24.8491	1.0457	-0.2939	-0.0157	36.2852
林地	-3.1926	0	-1.1302	0.3198	-1.0630	-0.0647	-5.1307
草地	-8.7018	1.3369	0	1.0898	-0.3797	-0.1225	-6.7772
水域	-1.1458	-0.2390	-1.4460	0	-0.1141	-0.0218	-2.9668
城乡建设用地	0.0312	0.0230	0.0477	0.0448	0	0	0.1468
未利用地	0.0007	0.0045	0.0179	0	0	0	0.0231
合计	-13.0083	11.8253	22.3386	2.5002	-1.8507	-0.2247	21.5804

1990年	2015年						
	耕地	林地	草地	水域	城乡建设用地	未利用地	转出合计
耕地	0	10.4862	24.0653	1.2651	-0.3524	-0.0156	35.4486
林地	-3.7757	0	-1.1695	0.3313	-1.8046	-0.0610	-6.4794
草地	-10.3300	1.7150		1.2015	-0.4006	-0.1258	-7.9399
水域	-1.2135	-0.3026	-1.6700	0	-0.1102	-0.0218	-3.3182
城乡建设用地	0.0269	0.0207	0.0401	0.0353	0	0	0.1228
未利用地	0.0007	0.0045	0.0179	0	0	0	0.0231
合计	-15.2915	11.9238	21.2837	2.8332	-2.6678	-0.2242	17.8572

地ESV转出36.29亿元,向林地、草地分别转出10.70亿元和24.85亿元,显著高于1990-2001年同类型间的转出量,并且,耕地向其他类型转移的ESV显著高于其他类型向耕地转移的ESV,该时期内耕地转入量为13.01亿元,主要由林地和草地转入,占到耕地转入量的91.44%。从两个时期转移的ESV对比显示,退耕还林工程实施后,耕地相比其他类型土地的转移更为活跃,耕地ESV转出量明显大于转入量,合计转出23.28亿元,主要促进了林地和草地ESV的增加,仅有少量耕地转变为其他土地利用类型,且显著高于退耕还林前的转出量。另外,林地和草地ESV转入合计为21.29亿元(转入+转出),表明延安市整体上退耕还林工程的效果已经开始逐步显现。

2.2 *ESV*的时间演变特征

2015年延安市ESV为444.22亿元(表3),并主要集中在耕地、林地和草地,水域ESV变化较稳定。1990-2015年整体呈上升走势,15年间增长了4.58%;但退耕还林工程实施前后,ESV的变化存在显著差异。在退耕还林前的1990-2001年,整体下降了0.72%,主要是由林地和草地向耕地转化导致的,耕地的ESV增长了0.97亿元,而林地和草地ESV合计则减少了3.99亿元,反映出退耕还林前延安市资源环境提供的生态服务处于较严峻的状态,生态亟需改善。而在退耕还林后的15年间,延安市ESV整体上升了

表3 延安市不同土地利用类型的ESV变化

Table 3 Changes of *ESV* in different land use types in Yan'an city

土地利用类型	<i>ESV</i> /亿元			变化率/%		
	1990年	2001年	2015年	1990-2001年	2001-2015年	1990-2015年
耕地	39.2966	40.2649	32.4692	2.46%	-19.84%	-17.37%
林地	179.9524	180.9463	191.5062	0.55%	5.87%	6.42%
草地	189.7549	184.7740	204.9246	-2.62%	10.62%	7.99%
水域	15.7472	15.7074	15.3187	-0.25%	-2.47%	-2.72%
城乡建设用地	0	0	0	—	—	—
未利用地	0.0015	0.0015	0.0015	0	0	0
合计	424.7526	421.6940	444.2202	-0.72%	5.34%	4.62%

5.34%，受耕地面积减少的影响，耕地 *ESV* 量减少了 7.81 亿元，下降了 19.39%，下降幅度较大；而同期林地 *ESV* 量增长了 10.56 亿元，增长幅度为 5.84%；草地 *ESV* 量增长了 20.15 亿元，增长幅度为 10.91%。整体看来，延安市 *ESV* 的增长变化与退耕还林的推行时间相呼应。随着城镇化进程的加快，耕地 *ESV* 将会逐渐降低到稳定状态，而林地和草地的 *ESV* 将会逐渐增长到稳定状态，以至达到耕地与林地、草地变化的平衡状态。

从不同土地利用类型 *ESV* 的贡献度来看，受各类生态资产分布面积及生态功能差异的影响，各类土地类型对延安市生态服务总价值的贡献程度存在很大差异。林地和草地的贡献度在不同时期分别达到 40% 以上，1990-2015 年间整体的平均贡献度分别为 42.80%、44.87%，两者 *ESV* 贡献度合计接近 90%；而耕地的平均贡献度只有 8.70%；水域 *ESV* 贡献度则稳定在 3.6% 左右，水域生态功能处于较低水平。整体而言，延安市生态服务功能主要由林地和草地提供。

2.3 *ESV* 的空间格局与分异特征

基于 ArcGIS 平台，以 1990-2015 年为基准，采用自然间断点法 (Jenks)，并以 0 为界限，对 *ESV* 变化进行分类，将格网尺度下延安市 1990-2015 年 *ESV* 变化划分为 7 个不同区间：(-1308.31, -410.35]、(-410.35, -185.81]、(-185.81, 0]、(0, 74.62]、(74.62, 207.29]、(207.29, 417.75] 及 (417.75, 1665.12] (图 3)。从空间分布图来看，退耕还林工程实施前的 1990-2000 年间 (图 3a)，延安市 *ESV* 变化基本保持稳定，多数地区呈现出下降态势，下降幅度较小，主要集中在 (-185.81, 0] 区间内；而出现上升的区域主要集中在北部的安塞区、子长县及志丹县的北部、西南部的黄陵县、富县一带及东南部的黄龙县、宜川县部分地区，主要是耕地面积增加导致林地、草地 *ESV* 的降低。而退耕还林工程实施后的 2001-2015 年间 (图 3b)，延安市 *ESV* 呈现明显的增长态势，低值区向高值区增长的态势较明显，主要表现为延安市北部地区县域 *ESV* 在增长；而南部的黄陵县、黄龙县域内的生态功能变化比较稳定，退耕还林工程的实施不仅使得延安市北部地区的生态恶化问题得到了缓解，也使得生态资源丰富的南部地区生态得到保护。从 1990-2015 年整体来看 (图 3c)，延安市 *ESV* 发生较大幅度的增长，退耕还林工程实施的效果显著，且 *ESV* 增长的分布基本上与林地和草地的增长分布相吻合，即与退耕还林工程实施空间上相匹配。在时空变化上，延安市北部以耕地为主的低 *ESV* 区域增长较明显，南部以林地和草地为主的生态资源丰富区域基本保持稳定状态。

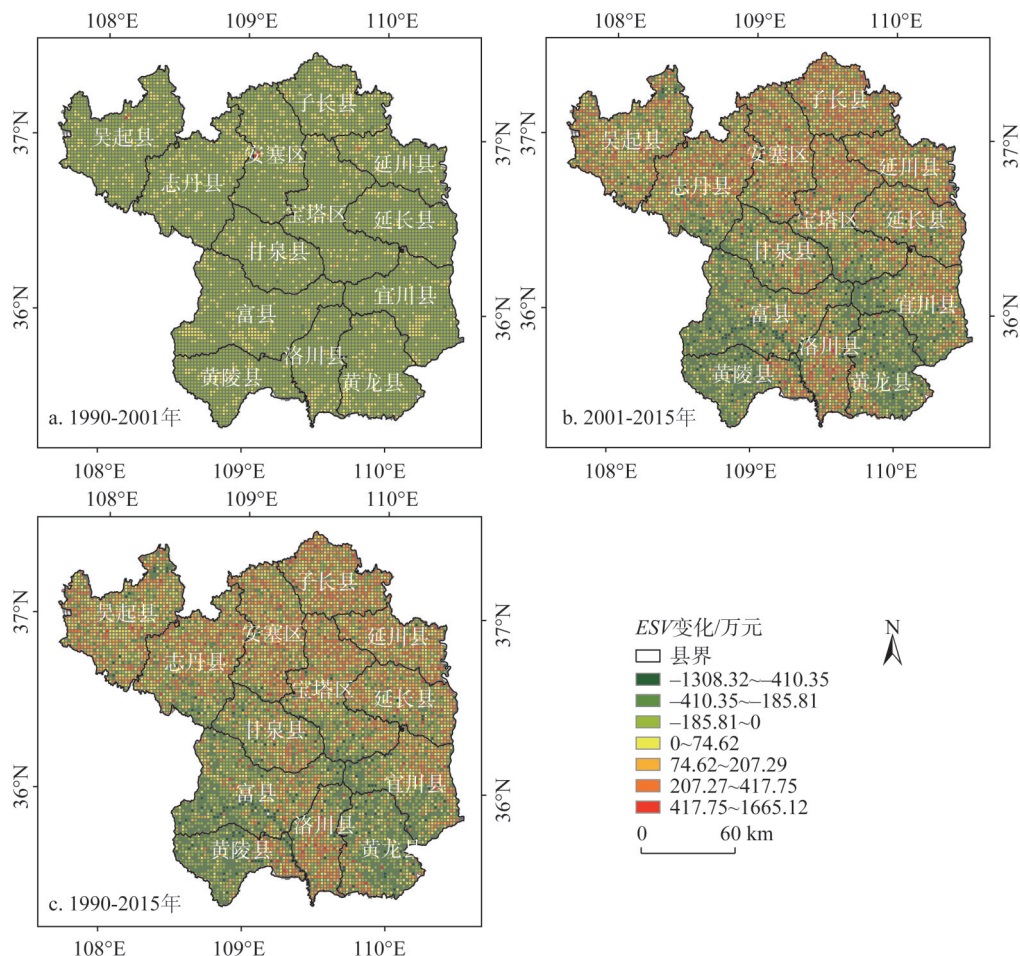


图3 格网尺度下不同时期延安市ESV的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of *ESV* in different periods at the Grid Scale in Yan'an city

为进一步探索延安市 *ESV* 的空间变化与空间分异特征, 以 ArcGIS、GeoDa 等软件为支撑平台, 在格网尺度下采用全局 Moran's *I* 指数和 LISA 聚集分析方法对其空间演变特征进行分析。全局 Moran's *I* 指数采用边界相邻原则将空间关系概念化, 并进行 ROW 标准化, 得到 1990 年、2001 年及 2015 年延安市 *ESV* 的 Moran's *I* 指数分别为 0.6361、0.6293、0.5841; *Z* 得分分别为 86.95、86.05、79.89; *P* 值均为 0, 表明延安市 *ESV* 的空间自相关关系显著, 即 *ESV* 在 2 km×2 km 的格网尺度上存在正向的集聚和依存特征。

根据延安市 *ESV* 格网单元显著的空间相关关系, 在 95% 的置信区间下, 依据 Moran's *I* 散点图和 LISA 集聚图, 将全市 *ESV* 进一步划分为 4 种不同的类型 (图 4、图 5): (1) 高高集聚 (H-H), 格网自身与周边格网 *ESV* 都较高; (2) 低低集聚 (L-L), 格网自身与周边格网的 *ESV* 均较低; (3) 高低集聚 (H-L), 格网自身 *ESV* 较高, 但周边格网较低; (4) 低高集聚 (L-H), 格网自身 *ESV* 较低, 但周边格网较高。

由 LISA 集聚图可清晰看出延安市 *ESV* 的空间集聚特征: *ESV* 空间集聚形态基本保持稳定, 呈现出“南高北低”的分布格局, 高高和低低类型的空间集聚效果比较显著, 高低和低高类型的空间集聚效果并不明显, 但局部区域发生了显著变化。具体表现为:

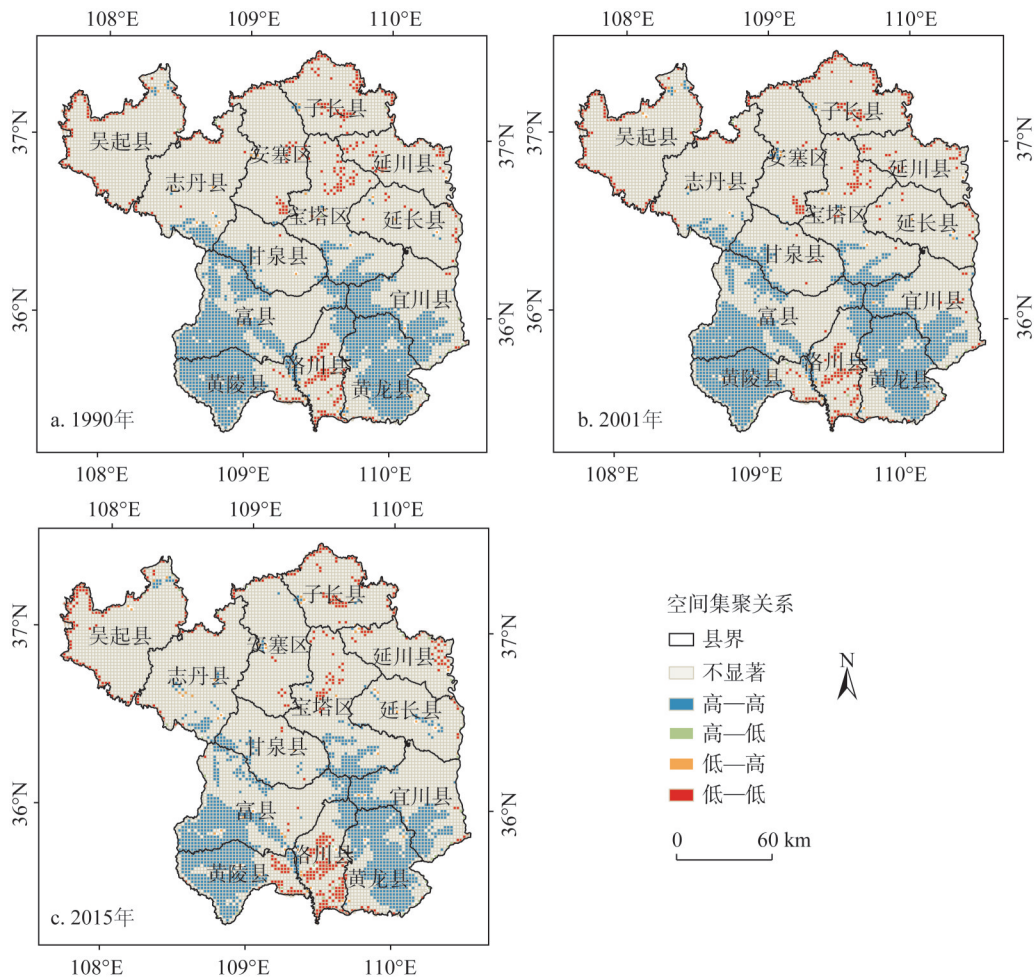


图4 网格尺度下延安市ESV的LISA集聚图

Fig. 4 The LISA aggregation of *ESV* in Yan'an city at the Grid Scale

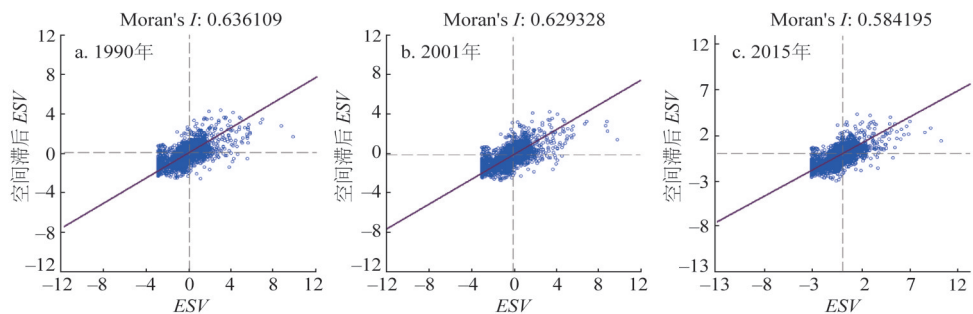


图5 网格尺度下延安市ESV的Moran散点图

Fig. 5 The Moran scatter map of *ESV* in Yan'an city at the Grid Scale

(1) 高高集聚区(H-H)。延安市ESV的高高集聚区主要分布在西南部的甘泉县、富县及黄陵县等和东南部的黄龙县、宜川县等地区，另外宝塔区、富县及宜川县交界的区域也是比较稳定的高高集聚区，其他地区分布比较零星。从地貌特征上可以看到，这些

高高集聚区主要分布在子午岭、黄龙山土石山区等生态资源比较丰富的地区,林地、草地分布密集,其中黄陵县和黄龙县森林覆盖率均达74%以上。黄龙县也是全国八大防护林区之一,是延安市ESV的主要来源,未来仍将是延安市生态涵养保护区。

(2) 低低集聚区(L-L)。延安市ESV的低低集聚区主要分布在北部的子长县、安塞区、宝塔区、延长县及南部的洛川县等地区,且分布比较零散,洛川县域内的低值集聚区有所扩大,延安市北部边界也是较稳定的低低集聚区,其他零星的低低集聚区主要是县城及乡镇所在地。从地貌特征上可以看到,低低集聚区主要分布有耕地、城乡建设用地等土地类型,其中安塞区和子长县属于典型的黄土梁峁丘陵地貌,洛川为黄土塬地貌,延川以黄土残塬平梁地貌为主,耕地资源丰富,能够根据自身条件发展特色农业。

(3) 其他集聚区(H-L、L-H)。延安市ESV的高低、低高集聚区分布较少且零星,主要分布在高高集聚区和低低集聚区的边界地区,黄陵县和洛川县交界地区、志丹县、安塞区、延长县等地区均有零星分布。从地貌特征上可以看出,这些地区主要是林地、草地与耕地的交界地带及水域与耕地的交界地带,比如在有水系经过的志丹县、宝塔区、延长县等地区,水系周围城乡建设用地和耕地比例较高,在高高集聚区周围出现了低高集聚区;而在子长县有水域经过的地区,在低低集聚区周围出现了高低集聚区。

另外, Moran散点图的第一至第四象限分别表示某格网与周围相邻单元的ESV呈现出高高集聚、低高集聚、低低集聚与高低集聚的空间关系。由散点图看出,研究期内,落入第一、第三象限的格网居多,同样表明延安市ESV表现出正相关,即高高集聚与低低集聚的分布特征。

3 结论与讨论

3.1 结论

在退耕还林工程实施背景下,以延安市为研究对象,基于1990年、2001年及2015年三期影像解译数据和土地利用转移矩阵,分析退耕还林前后不同土地类型转移的ESV损益变化特征,并在2 km×2 km的格网尺度下通过Moran's *I*指数和LISA集聚图探讨ESV空间格局的关联性和异质性。主要结论如下:

(1) 从ESV损益矩阵变化看,退耕还林工程对延安市ESV增长存在正向促进作用。ESV的损益变化与土地利用类型转移相类似,主要发生在耕地、林地和草地之间,且与退耕还林工程的推行时间相呼应。1990-2000年间的下降程度并不明显,而退耕还林工程的实施加速了延安市土地利用类型转移进程;2001-2015年间林地和草地ESV合计转入21.29亿元,且主要由耕地转出,使得延安市ESV上升了5.34%,表明退耕还林工程的实施效果已经显现。

(2) 从ESV的空间演变特征看,呈现出显著的“南高北低”分布格局,延安市北部以耕地为主的区域ESV增长较明显,南部以林地和草地为主的区域ESV基本保持稳定状态。空间探索性分析显示,格网尺度下不同时期延安市ESV的全局Moran's *I*指数的均值为0.5934,表明延安市ESV在2 km×2 km的格网尺度下表现出正向的空间关联性和依存性。LISA集聚图和Moran's *I*散点图显示,延安市ESV的高高和低低类型的空间集聚效果比较显著,分布比较集中,高高集聚区主要分布在延安市南部林草资源丰富的黄陵县、黄龙县等地区,低低集聚区则主要分布在延安市北部的洛川县、子长县、延川县等地区

的耕地、城乡建设用地周围,而高低和低高集聚类型的空间集聚效果并不明显,且分布比较零散。

3.2 讨论

在分析延安市 *ESV* 损益特征基础上,基于格网尺度分析了 *ESV* 的时空格局和演化特征,为探讨 *ESV* 的空间变化规律提供新方法和新视角,并能够准确把握延安市 *ESV* 在退耕还林工程实施前后的时空分异特性。延安市 *ESV* 的时空演变特征表明,以政府为主导的退耕还林工程对延安市生态环境恢复与保护起到显著的积极作用, *ESV* 的增长率明显,因而在制定未来土地利用规划时,对于不同土地利用类型的生态服务功能应做到因地制宜。以耕地为主的延安市北部地区应在基本农田保护制度基础上,加强对水域的保护与修复,控制城乡建设用地对水域的侵占,继续保持退耕还林的良好局面;而在林草资源丰富的南部地区,应对林地和草地制定严格的保护措施,并完善自然保护区制度,发挥生态屏障的调节作用。

ESV 的时空演变受到地形条件、气候条件、降水量等自然因素及人口密度、城镇化水平、产业结构等社会经济因素的综合影响,因而,在未来的研究中,仍需深入探讨的问题主要包括:(1)在空间格局下分析影响 *ESV* 变化的关键因素及影响程度;(2)扩大研究范围,着眼于黄土高原 *ESV* 的空间格局变化。另外,已有学者开始关注生态系统服务的协同与权衡、空间流动等问题,这也将是继续探索的前沿问题。

参考文献(References):

- [1] 刘永强,龙花楼.长江中游经济带土地利用转型时空格局及其生态服务功能影响.经济地理,2017,37(11): 161-170. [LIU Y Q, LONG H L. Study on the spatio-temporal patterns of land use transition and its impact on ecological service function of the middle of Yangtze River Economic Belt. Economic Geography, 2017, 37(11): 161-170.]
- [2] 李云生,周广金,梁涛,等.巢湖流域的土地利用变化及其生态系统功能损益.地理研究,2009,28(6): 1656-1664. [LI Y S, ZHOU G J, LIANG T, et al. Study of land use change on the gains and losses of ecosystem service function values of Chaohu Lake Basin. Geographical Research, 2009, 28(6): 1656-1664.]
- [3] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [4] DAILY G C. Nature's Service1: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington D C: Island Press, 1997.
- [5] 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.生态学报,1999,19(5): 19-25. [OUYANG Z Y, WANG X K, MIAO H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 19-25.]
- [6] 谢高地,张钰铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值.自然资源学报,2001,16(1): 47-53. [XIE G D, ZHANG Y L, LU C X, et al. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 47-53.]
- [7] JAN P S, LUKE B, JOACHIM M, et al. Mapping ecosystem services' values: Current practice and prospects. Social Science Electronic Publishing, 2012, 4: 33-46.
- [8] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估.自然资源学报,2003,18(2): 189-196. [XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189-196.]
- [9] ROESCH-MCNALLY G E, RABOTYAGOV S S. Paying for forest ecosystem services: Voluntary versus mandatory payments. Environmental Management, 2016, 57: 585-600.
- [10] 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.自然资源学报,2008,23(5): 911-919. [XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.]
- [11] 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.自然资源学报,2015,30(8): 1243-1254. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem ser-

- vice value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [12] 王科明, 石惠春, 周伟, 等. 干旱地区土地利用结构变化与生态服务价值的关系研究: 以酒泉市为例. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(3): 124-128. [WANG K M, SHI H C, ZHOU W, et al. Study on the relationship between land-use structure change and ecological services value in the arid inland basin area: A case study of Jiuquan. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(3): 124-128.]
- [13] 王航, 秦奋, 朱筠, 等. 土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2017, 37(4): 1286-1296. [WANG H, QIN F, ZHU Y, et al. The effects of land use structure and landscape pattern change on ecosystem service values. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(4): 1286-1296.]
- [14] 蒋晶, 田光进. 1988年至2005年北京生态服务价值对土地利用变化的响应. *资源科学*, 2010, 32(7): 1407-1416. [JIANG J, TIAN G J. Responses of ecosystem service value to land use change in Beijing from 1998 to 2005. *Resources Science*, 2010, 32(7): 1407-1416.]
- [15] 荣益, 李超, 许策, 等. 城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异: 以黄骅市为例. *生态杂志*, 2017, 36(5): 1374-1381. [RONG Y, LI C, XU C, et al. Ecosystem service values and spatial differentiation changes during urbanization: A case study of Huanghua city. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(5): 1374-1381.]
- [16] 陈彧. 湖北省土地生态服务价值时空分异及驱动因素研究. 武汉: 中国地质大学, 2015. [CHEN Y. Study on spatial-temporal differentiation of land ecosystem service value and the driving factors in Hubei province. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.]
- [17] 李露然. 基于格网GIS的生态系统服务价值时空变化研究. 上海: 上海师范大学, 2015. [LI L R. The research of ecosystem service value temporal and spatial change based on Grid GIS Method: A case study in Jiuzhaigou Natural Reserve. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015.]
- [18] 唐秀美, 刘玉, 刘新卫, 等. 基于格网尺度的区域生态系统服务价值估算与分析. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 149-153, 205. [TANG X M, LIU Y, LIU X W, et al. Estimation and analysis of ecosystem service value based on grid scale. *Transactions of the CSAM*, 2017, 48(4): 149-153, 205.]
- [19] 李建春, 袁文华. 基于GIS格网模型的银川市土地生态安全评价研究. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 988-1001. [LI J C, YUAN W H. Assessment of urban land ecological security in Yinchuan city based on the grid method. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 988-1001.]
- [20] 马骏, 马朋, 李昌晓, 等. 基于土地利用的三峡库区(重庆段)生态系统服务价值时空变化. *林业科学*, 2014, 50(5): 17-26. [MA J, MA P, LI C X, et al. Temporal and spatial variation of ecosystem service value in the Three Gorges Reservoir region (Chongqing Section) based on land use. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(5): 17-26.]
- [21] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14. [LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [22] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益汇编(1991-2016). 北京: 中国统计出版社, 1991-2016. [The Price Department of the State Development and Reform Commission of China. *National Agricultural Products Cost Return Assembly*. Beijing: China Statistics Press, 1991-2016.]
- [23] 韩东薇. 基于GIS的富裕县土地生态系统服务价值研究. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016. [HAN D W. Study on the service value of land ecosystems in Fuyu county based on GIS. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.]
- [24] 马晓熠, 裴韬. 基于探索性空间数据分析方法的北京市区域经济差异. *地理科学进展*, 2010, 29(12): 1555-1561. [MA X Y, PEI T. Exploratory spatial data analysis of regional economic disparities in Beijing during 2001-2007. *Progress in Geography*, 2010, 29(12): 1555-1561.]
- [25] 蒲英霞, 葛莹, 马荣华, 等. 基于ESDA的区域经济空间差异分析: 以江苏省为例. *地理研究*, 2005, 24(6): 965-974. [PU Y X, GE Y, MA R H, et al. Analyzing regional economic disparities based on ESDA. *Geographical Research*, 2005, 24(6): 965-974.]
- [26] ANSELIN L. Local Indicators of spatial association: LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.

Spatial-temporal evolution pattern and differentiation of ecological service value in Yan'an city at the grid scale based on Sloping Land Conversion Program

HOU Meng-yang, YAO Shun-bo, DENG Yuan-jie, DING Zhen-min,

LU Ya-nan, ZHENG Xue, LI Ya-nan

(Research Center for Resource Economics and Environment Management, Northwest A&F University, Yangling

712100, Shaanxi, China; College of Economics & Management, Northwest A&F University, Yangling 712100,

Shaanxi, China)

Abstract: Under the background of Sloping Land Conversion Program (SLCP), this study explores the temporal variation characteristics and the correlation and heterogeneity of spatial transfer of the ecological service value (ESV) for different land use types of Yan'an, a city with remarkable ecological improvement after the SCLP. To achieve this goal, the ESV of different land use types at a grid scale of $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ is calculated using land use transfer matrix achieved from the interpreted image data of three periods and exploratory spatial data analysis (ESDA). The results show that: (1) From 1990-2015, the increase (decrease) of ESV mainly occurred between arable lands, forests and grasslands, and the total ESV increased from forests and grassland was 2.129 billion yuan, the amount of transfer-in mainly occurred after the implementation of the SLCP; (2) The ecological service function was mainly provided by forestland and grassland, the ESV experienced a process of descending and then increasing from the temporal perspective, and the implementation of SLCP promoted the growth of ESV with an increase of 5.34% during 2001-2015; (3) The ESDA shows that, the ESV has a significant distribution of "high in the south, while low in the north" pattern at the grid scale which expresses positively spatial agglomeration and dependence, and it is obvious that the high-high aggregation area accorded with the spatial distribution of forestland and grassland whereas the low-low aggregation area accorded with that of farmland and construction land. Overall, the transfer of land use types and the changes of ESV in Yan'an city coincided with the implementation of SLCP temporally and spatially, which indicates that the SLCP, a government- dominated project, had a significantly positive effect on the restoration and protection of ecological environment. Therefore, with regard to the ecological service function of different land use types, the northern part of the study area with a large amount of cultivated land should pay attention to the balance between agricultural production and ecological benefits based on the basic farmland protection system, while the southern part with abundant forestland and grassland should continue to play a critical role in the regulation function of ecological barrier.

Keywords: land use type transfer; ecological service value (*ESV*); grid scale; exploratory spatial data analysis (ESDA); Yan'an city; Sloping Land Conversion Program (SLCP)