

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.04.009

半干旱生态脆弱区生态服务价值时空演变及地理探测机制

邢晓露, 郭 岚, 杨梅焕, 张全文, 李琛强

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 半干旱生态脆弱区生态系统服务价值的时空评估对保护生态环境、提升国土空间生态服务价值具有重要意义。以景泰县为研究区,以 2009—2017 年土地利用数据和社会统计数据为基础,对景泰县土地利用和生态系统服务价值时空动态变化进行分析,并借鉴生态服务价值当量估算法定量探讨生态系统服务价值的变化特征,采用地理探测模型对县域土地利用和生态系统服务价值变化的驱动力进行分析。①2009—2017 年,景泰县耕地和建设用地面积变化最大,其占比分别从 2009 年的 14.58% 和 1.90%,增加到 2017 年的 14.87% 和 2.31%;林地、草地和未利用地面积较少,但减少幅度较剧烈;水域小幅增长。②近 8 年来,研究区生态系统服务价值总量呈不断减少的趋势,共减少了约 22.08×10^6 元,耕地、水域土地类型的 ESV 呈增加趋势;林地、草地、未利用地类型的 ESV 均呈减少趋势。③空间分布上,景泰县生态系统服务价值总量呈减少的趋势,但波动幅度较小;分布格局呈西南高、东北低。④地理探测分析表明影响景泰县 ESV 变化的主要驱动因素是人口密度、到行政中心最短距离等指标。在未来的发展过程中,景泰县要合理规划土地资源,保证生态系统协调稳定发展,实现经济生态可持续发展。

关键词: 生态; 土地利用; 生态系统服务价值; 半干旱生态脆弱区

中图分类号: P237.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)04-0526-10

Temporal and spatial evolution of ecological service value and geographical exploration mechanism in the ecology fragile area of semi-arid

XING Xiaolu, GUO Lan, YANG Meihuan, ZHANG Quanwen, LI Chenqiang

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The spatio-temporal evaluation of ecosystem service value in semi-arid ecologically fragile areas is of great significance in protecting the ecological environment and enhancing the value of land and spatial ecological services. Taking Jingtai County as the study area, based on the social statistical data of land use from 2009 to 2017, this paper analyzes the spatio-temporal dynamic changes of land use and ecosystem service value in Jingtai County. The change characteristics of ecosystem service value are discussed quantitatively by using the equivalent estimation method of ecological service value, with the geographical exploration model used to analyze the driving forces of the change of land use and ecosystem service value in the county. ①From 2009 to 2017, the area of cultivated land and construction land in Jingtai County changed the most, with the proportion of cultivated land and construction land increasing from 14.58% and 1.90% in 2009 to 14.87% and 2.31% in 2017, respectively. The area of forest land, grassland and unused land decreased sharply, and the water area increased slightly. ②In the past 8 years, the total value of

收稿日期: 2021-03-13; **网络出版日期:** 2021-06-08

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20210607.1719.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41501571)

第一作者: 邢晓露,女,硕士生,研究方向为土地评价与可持续利用。E-mail: 1277485150@qq.com

通信作者: 郭岚,女,硕士,副教授,硕导,研究方向为生态系统和资源生态工作。E-mail: 3036682484@qq.com

ecosystem services in the study area showed a decreasing trend, which decreased by about 22.08×10^6 yuan, the ESV of cultivated land and water land types showed an increasing trend, and the ESV of forest land, grassland and unused land types showed a decreasing trend. ③In terms of spatial distribution, the total value of ecosystem services in Jingtai County shows a decreasing trend, but the fluctuation range is small, and the distribution pattern is high in the southwest and low in the northeast. ④Geographical exploration analysis shows that the main driving factors affecting the change of ESV in Jingtai County are the population density, the shortest distance to the administrative center and other indicators. In the process of future development, Jingtai County should plan land resources reasonably to ensure the coordinated and stable development of ecosystem and realize the sustainable development of economy and ecology.

Key words: ecology; land use; ecosystem service value; semi-arid ecologically fragile area

生态系统服务是指人类从自然生态系统中直接或间接获得的各种利益,生态系统服务价值则是通过价值量形象直观地表达出人类从自然生态系统中获得的福利^[1-2]。土地利用变化和类型转变是人类在满足其经济目的的同时,对土地长期进行开发、经营等各种实践活动造成自然环境的变化,是衡量生态环境质量的重要指标,也在一定程度上反映出环境的好坏^[3-5]。土地利用变化会造成地球表面结构发生改变,也会影响生态系统结构和生态系统服务功能,而生态系统服务功能与人类生存发展息息相关,生态系统服务功能发生损失会造成生态环境恶化,导致土壤类型转变,沙漠化、盐碱化现象严重,最终导致生态服务价值发生损失^[6-10]。

目前,我国开展的国土空间规划始终强调土地利用规划与生态红线协调整合,更好地建设生态文明、保护生态资源,提升国土空间的生态服务价值。故分析土地利用和生态系统服务价值两者的关系具有实际且重大的意义。依据两者的相互关系,挖掘生态用地潜力,改善生态用地类型、功能和空间结构,在特定的区域下,创造合适的环境模式和提高土地利用效率来改善当地生态环境,同时根据地区的基本情况,协调每类生态用地份额进而弥补不足^[11]。

在经济快速发展的情况下,土地利用变化与生态系统服务价值的研究受到了国内外学者的高度关注,已成为生态学、地理学等多个学科争相研究的热点问题。Brown^[12]在全球尺度下研究土地利用/覆盖变化和生态系统服务中的社会价值两者之间的关系。Lautenbach等^[13]将生态服务功能分为4个方面并基于专家知识分析了德国的生态系统服务价值。刘桂林等^[14]是以特殊的长三角地区为研究区域,分析了30年的土地利用变化对该地区的生态服务价值造成的影响。戴文远等^[15]在三生空间的基础上分析土地类型、功能转变与生态系统服务价值时空演变,对“三生空间”的管控具有重要的意义。王

慧^[16]利用三期南京市土地利用数据,在分析土地变化和景观格局特征基础上,采用Markov模型预测南京市未来景观格局的发展趋势。

目前研究多集中于土地类型变化快、发达的大型城市内部和典型流域等地区,相比较而言,对于西北山区研究很少,尤其对西北部半干旱生态脆弱区的研究更为薄弱。

从干旱山区的角度讲,影响干旱山区发展的因素很多,已有学者利用灰色关联法和主成分分析等多种方法分析土地利用变化与影响因子之间的关系^[17-20],采用地理探测器模型对干旱山区土地演变格局与驱动因子关系的分析较少。地理探测器模型能够在不需要过多假设条件情况下分析多个自变量与一个因变量之间的关系,且能够克服在处理变量时的局限性^[21]。

景泰县属甘、宁、蒙三省交界区域,是我国西北地区的典型生态脆弱区,县域内盐碱危害、干旱和风沙共存,水资源缺乏,生态功能弱,生态环境基础差,集约土地利用、提高生态服务价值尤为迫切。随着人口不断增长以及对土地开发程度的加大,起到防护作用的林草地在持续减少,生态系统失衡现象严重。深入分析景泰县土地演变的规律和生态系统服务价值时空评估,以期为生态环境质量改善和“乡村振兴”提供数据支持和战略支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

景泰县位于甘肃省中部($103^{\circ}33' \sim 104^{\circ}43' E$, $36^{\circ}43' \sim 37^{\circ}38' N$),地处腾格里沙漠南部且向黄土高原过渡,地势西南高,东北低,见图1。县域总面积为 $548\ 630\ \text{hm}^2$,境内山峦丘陵居多,其面积为 $411\ 472\ \text{hm}^2$,约占研究区总面积的75%。气候为温带干旱型大陆气候,年均降水量仅为185 mm,蒸发量达到2 303 mm。

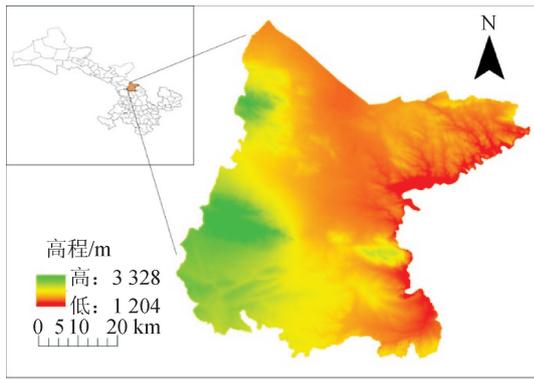


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Location map of study area

1.2 数据收集

本文采用的数据包括土地利用数据、社会统计数据。土地利用数据来源于景泰县 2009, 2013 和 2017 土地利用变更调查数据库, 社会经济数据来源于甘肃省景泰县统计年鉴(2010—2018)、《中国农产品价格调查年鉴》(2010—2018)和国家统计局网站。根据景泰县实际用地情况以及研究需要, 将景泰县土地利用类型合并提取, 最终划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种土地利用类型。

1.3 土地利用信息熵

在人类的实践活动中, 土地利用结构不断发生演变对土地利用系统的稳定性造成不同程度的影响。本文采用土地利用信息熵表示景泰县土地利用系统的稳定性。根据熵值的大小形象直观地看出土地利用结构的稳定性和有序程度, 熵值越小, 土地利用结构稳定性越好, 有序程度越高, 反之亦然^[22]。表达式为:

$$p(x_i) = \frac{A(x_i)}{A} \quad (1)$$

$$H = - \sum p(x_i) \ln p(x_i) \quad (2)$$

表 1 景泰县不同土地利用类型的 ESV 系数

Tab. 1 Parameters of ESV for different land-use categories in Jingtai County

生态服务类型	不同土地利用类型的 ESV 系数					
	林地	草地	耕地	水域	未利用地	建设用地
气体调节	6 055.14	1 384.03	865.02	0	0	0
气候调节	4 671.11	1 557.04	1 539.74	795.82	0	0
水源涵养	5 536.13	1 384.03	1 038.02	35 258.22	51.90	0
土壤形成与保护	6 747.16	3 373.58	2 525.86	17.30	34.60	0
废物处理	2 266.35	2 266.35	2 837.27	31 452.13	17.30	0
生物多样性保护	5 639.93	1 885.74	1 228.33	4 307.80	588.21	0
食物生产	173.00	519.01	1 730.04	173.00	17.30	0
原材料	4 498.10	86.50	173.00	17.30	0	0
娱乐文化	2 214.45	69.20	17.30	7 508.37	17.30	0
合计	37 801.37	12 525.48	11 954.58	79 529.94	726.61	0

式中: A 为区域内面积的总和; $A(x_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示区域内各种土地利用类型的面积; $P(x_i)$ 表示各种土地利用类型的面积所占总面积的比例; H 为土地利用结构信息熵。

1.4 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵可以反映出区域内各种地类之间的转换动态过程信息^[23]。采用空间叠加分析方法得到研究区各土地利用类型转换面积, 土地利用转移矩阵表达形式为:

$$N = \begin{bmatrix} N_{11} & \dots & N_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ N_{n1} & \dots & N_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N_{ij} 为面积; n 为土地类型的数量; i, j 分别为转移前和转移后的土地类型。

1.5 生态系统服务价值

Costanza 等研究出全球生态系统服务价值的计算方法, 谢高地等在此基础上制定出中国陆地生态系统服务价值当量表^[24-25]。参考谢高地等的研究成果, 修正粮食单产经济价值和土地利用类型。根据 2009、2013、2017 年景泰县平均粮食产量 5 399.144 kg/hm², 平均粮食价格为 2.243 元/kg, 修正计算得到景泰县的一个当量因子为 1 730.04 元/hm², 土地利用类型的修正以荒漠-未利用地、水体-水域、森林-林地、农田-耕地形式与中国生态系统服务价值当量因子表对应。最终得到景泰县生态系统服务价值系数(表 1), 生态系统服务价值的计算公式为:

$$ESV = (A_k \times VC_k) \quad (4)$$

$$ESV_f = (A_k \times VC_{fk}) \quad (5)$$

式中: ESV 是生态系统服务价值; A_k 为第 k 类土地类型的面积; VC_k 为第 k 类土地类型的单位面积生态系统服务价值系数; ESV_f 为第 f 类生态功能价值; VC_{fk} 为第 k 类土地类型的第 f 种服务功能价值系数^[26]。

1.6 生态贡献率

生态贡献率表示的是在特定时间段内,各个土地类型的生态服务价值的变化量对整个研究区总服务价值变化量的影响。表达式为:

$$S_{KT} = \frac{|\Delta ESV_{KT}|}{\sum_{K=0}^6 |\Delta ESV_{KT}|} \quad (6)$$

式中: S_{KT} 为K类生态系统在T时间段内生态贡献率; ΔESV_{KT} 为K类生态系统在T时间段内的生态服务价值变化量^[27]。

1.7 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性且能揭露其背后驱动因子的模型,该模型由风险探测器、因子探测器、生态探测器和交互作用探测器组成^[28-31]。本文选取因子探测器来分析影响景泰县生态系统分布格局的各个驱动因素,公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (7)$$

式中: $h=1, \dots, L, L$ 为变量Y或因子X的分层,即分类或分区; N_h 和N分别为层h和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层h和全区的Y值的方差;SSW和SST分别为层内方差之和和全区总方差; q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大表示驱动因子对土地演变空间分异性越明显。

在复杂的社会环境下,生态系统服务价值的变化不仅受到土地间空间配置的影响,也会受到自然环境以及人文因素的作用。本研究从通达性、聚集性和适宜性三方面对生态系统服务价值驱动力进行分析。首先,根据经济发展的集聚效应和经济地理的网络理论,聚集性因子代表选取到行政中心的距离、人口密度;选取到主要公路的距离、到主要河流的距离作为通达性因子代表;又考虑到自然环境的影响,选取高程和坡度为适宜性因子代表^[32]。由上

所述,三方面共选取6个变量作为影响生态系统分布格局的表征因子。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化

2.1.1 土地利用变化/土地覆盖

见图2,2009—2017年间,景泰县的土地利用变化较为显著,在3个时期,草地和未利用地是景泰县的主要土地覆盖类型。景泰县8年间土地类型变化大的为林地、草地和建设用地。研究区域内寺滩乡、红水镇、漫水滩乡和喜泉镇人类活动干预性强,较大部分的林草地和未利用地转为建设用地、耕地。变化最大的土地类型是草地,从2009年的48.40%,减少到2017年的47.86%。

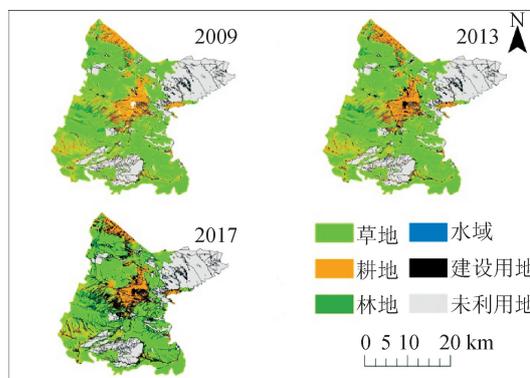


图2 2009—2017年景泰县土地利用变化图
Fig. 2 Land-use change of Jingtai County during 2009—2017

见表2,总体上,景泰县变化幅度最大的土地利用类型为草地,变化幅度最小则是水域。林地、草地和未利用地不断减少,耕地、建设用地快速增加,主要原因是经济发展加快,农业经济结构发生转变,未利用地得到有效利用,耕地面积扩大,同时景泰县人口增加以及经济发展都需要以土地为承载力,才能其满足城镇建设的需求。

表2 2009—2017年间景泰县土地利用变化格局

Tab. 2 Change patterns of land-use in Jingtai County from 2009 to 2017

土地利用类型	2009年		2013年		2017年	
	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%
耕地	79 987.23	14.58	80 537.50	14.68	81 572.87	14.87
林地	18 424.28	3.36	18 351.74	3.34	17 981.66	3.28
草地	265 511.79	48.40	264 027.44	48.12	262 568.34	47.86
水域	1 267.14	0.23	1 357.34	0.25	1 431.00	0.26
建设用地	10 400.68	1.89	11 723.23	2.14	12 686.65	2.31
未利用地	173 039.12	31.54	172 632.98	31.47	172 389.72	31.42
总面积	548 630.24		548 630.23		548 630.24	

2.1.2 土地利用信息熵分析

根据表 2 以及式(1)算出 3 个时期的土地利用信息熵,分别为 1.730 0、1.743 5、1.752 0。土地利用信息熵日益增加,说明景泰县土地利用的有序度在下降,无序度日渐上升,土地利用系统没有良好的稳定性。中国在不断向前发展,城镇化率也日益增加,建设用地的需求更加明显,侵占了大量的生态用地,导致景泰县的整个土地利用系统发生改变,朝着不稳定的趋势发展。2009—2013 年土地利用信息熵增长率较高,为 0.78%,此阶段内,人类干预力度较大,注重城镇化的发展,土地利用不合理,而后阶段土地利用信息熵增长率呈现下降趋势,主要由于主张发展以人为本的新型城镇化的提出,同时景泰县在经济发展过程中,注重人居生态质量,对土地利用结构进行了调整。

2.1.3 土地利用转移

土地类型的相互转换在一定程度上能反映出研究区域内土地利用的整体发展方向以及各个土地类型的演变过程。见表 3,2009—2017 年间,研究区域的 6 种土地类型都发生了不同程度的变化,变化程度较大是林地和草地,8 年间林地、草地转出面积分

别为 447.3hm²、2 982.71hm²,主要转出类型为耕地和建设用地,林地转为耕地和建设用地的面积分别为 318.54hm²、122.70hm²,草地转为耕地和建设用地的面积分别为 1 772.56 hm²、1 119.63 hm²,较少面积转为未利用地、水域。说明由于景泰县农业在经济的带动下有所发展,转换为建设用地的原因主要来源于气候变化以及人类活动的影响,破坏林地、草地进行开荒,致使农林业种植结构发生调整,对森林的砍伐以及对草地的占用使得土地类型发生改变。耕地的转换也有很大变化,约有 548.73 hm²转为建设用地,景泰县城镇化速度加快导致城镇附近的耕地被侵占,耕地转换也与因土壤贫瘠的耕作条件出现农田撂荒有关。建设用地也发生较小的转移,转为各个类型的总面积为 4.76 hm²,其中转为耕地的面积为 2.17 hm²,可能与村落整理以及工业废弃地复垦相关。水域转出量最少,仅为 4.04 hm²,主要建设用地的利用。研究周期内,未利用地也发生了较为显著的变化,主要流向为建设用地、耕地、水域和草地,转出面积分别为 496.06 hm²、120.39 hm²、42.16 hm²、9.22 hm²,主要受到农业、生态环境的修复和建设活动等多重因素的影响。

表 3 2009—2017 年间景泰县土地利用转移矩阵

Tab. 3 Transition matrix of LUCC in Jingtai County from 2009 to 2017

单位:hm²

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	79 359.09	0.68	25.70	45.29	548.73	7.75
林地	318.54	17 976.99	3.20	2.14	122.70	0.72
草地	1 772.56	3.10	262 529.09	78.29	1 119.63	9.13
水域	0.14	0.02	0.15	1 263.11	3.61	0.12
建设用地	2.17	0.12	0.99	0.02	10 395.92	1.46
未利用地	120.39	0.75	9.22	42.16	496.06	172 370.55

2.2 ESV 变化

2.2.1 ESV 总量变化

见表 4,2009—2017 年景泰县生态系统服务功能总价值由每年 $5 204.84 \times 10^6$ 元减少到 $5 182.76 \times 10^6$ 元,共减少约 22.08×10^6 元。其中耕地和水域 ESV 呈上升趋势,林地、草地和未利用地 ESV 下降趋势。草地 ESV 占总价值高达 60%,但呈持续下降的趋势,林地和未利用地的 ESV 也相对较高,但都呈现持续下降的趋势,而未利用地下降幅度较大。

2009—2017 年间景泰县耕地的 ESV 增加幅度较大,变化率为 1.98%,从景泰县整个研究区来看耕地面积较少,但其 ESV 增加值较大。研究区内水域面积较少,但对景泰县生态系统服务功能的贡献

较大,对于生态脆弱区域来说水域的作用很大,是改善研究区域生态环境、提升生态环境质量的重要组成部分。

2.2.2 ESV 类型间的变化

见表 5,2009—2017 年间,景泰县的水源涵养、废物处理、食物生产和娱乐文化价值均有呈现出增加的趋势,其他服务项目价值则均有不同程度的减少。水域对生态服务价值的作用显著,水源涵养价值的增加主要源于多个水库的扩建。废物处理、食物生产和娱乐文化价值服务项目价值升高的主要是因为耕地和建设用地面积的扩大。减少的价值中原材料和气体调节的减少幅度较大,这是由于城镇化的推进,林地、草地面积大幅减少的结果。

表4 2009—2017年间景泰县各类生态系统服务价值及变化
Tab.4 ESV values and its change in Jingtai County from 2009 to 2017

土地利用类型	ESV /10 ⁶ 元			ESV 变化率/%		
	2009	2013	2017	2009—2013	2013—2017	2009—2017
耕地	956.21	962.79	975.17	0.69	1.29	1.98
林地	696.46	693.72	679.73	-0.39	-2.02	-2.40
草地	3 325.66	3 307.07	3 288.79	-0.56	-0.55	-1.11
水域	100.78	107.95	113.81	7.11	5.43	12.93
未利用地	125.73	125.44	125.26	-0.23	-0.14	-0.37
建设用地	0	0	0	0	0	0
总计	5 204.84	5 196.97	5 182.76	6.62	4.01	11.03

从生态系统服务的功能上看,土壤形成与保护、废物处理、生物多样性保护和气候调节排在前列,且是影响景泰县整个研究区生态系统服务总价值的四大主要生态功能,其价值比率高达68%;而娱乐文化、原材料和食物生产的价值比率仅为9.16%。为此,可以看出景泰县的服务性功能强,但是生产性功能较弱。

表5 2009—2017年间景泰县各类型ESV的变化
Tab.5 ESV change in Jingtai County from 2009 to 2017

服务项目	2009年	2013年	2017年	趋势
	ESV/10 ⁶ 元	ESV/10 ⁶ 元	ESV/10 ⁶ 元	
气体调节	548.23	546.21	542.85	减少
气候调节	623.64	621.91	619.56	减少
水源涵养	606.16	607.44	607.03	增加
土壤形成与保护	1 228.08	1 223.96	1 219.15	减少
废物处理	913.29	914.15	915.26	增加
生物多样性保护	810.09	807.72	804.32	减少
食物生产	282.58	282.76	283.72	增加
原材料	119.70	119.34	117.74	减少
娱乐文化	73.07	73.48	73.13	增加
合计	5 204.84	5 196.97	5 182.76	减少

2.2.3 ESV空间差异

见表6,景泰县生态系统服务价值总量呈减少的趋势,但波动幅度较小。为形象直观地看出景泰县各个乡镇生态系统服务价值的差异,本文利用ArcGIS中的自然间断点分级法将景泰县2009—2017年生态服务价值划分为5个等级,见图3。

研究期内,条山集团和一条山镇的生态服务价值总体处于低值范围,漫水滩乡、五佛乡的生态系统服务价值是一直处于较低水平,总体处于中等范围的有红水镇、芦阳镇、草窝滩镇。上沙沃镇、正路镇、喜泉镇、中泉镇的生态服务价值为较高水平,高价值范围的生态系统服务价值仅有寺滩乡。总体上,景泰县生态系统服务价值呈西南高、东北低的分布格

局,在景泰县西南部有明显的高聚集区,在其东北部平原及其辐射区域构成低值地带,说明景泰县生态系统服务价值的空间差异与该地区的地形地貌有密切关联。总体上,西南部和西北部山地丘陵区林草覆盖率较高,占到相应土地面积的1/2,良好的生态资源条件赋予了较高的生态系统服务价值;东部平原地区,耕地、建设用地资源多,森林覆盖率低,水域资源优势不明显,一定程度上对该区域的生态系统服务价值产生影响。

见图3,从2009—2017年生态系统服务价值空间变化来看,8年间景泰县西部地区的生态优势有削减的趋势。东部地区的生态系统服务价值的变化较大,一条山镇生态系统服务价值由较低等级转变为低等级,草窝滩镇的生态系统服务价值中等水平变为较低水平。同时,变化后的景泰县生态系统服务价值的分布格局具有一定规律,景泰县西南和西北方向形成以寺滩乡高价值水平向四周下降,而西南方向呈现出逐次减弱梯度的分布特征。

2.2.4 生态贡献率

见表7,2009—2013年和2013—2017年两个时段,草地对生态服务价值变化的贡献率最大,分别是52.6%和36%,未利用地对生态服务价值变化的贡献率最小,分别为0.82%和0.36%。2009—2013年,水域、耕地、林地的生态贡献率依次为20.27%、18.6%和7.75%,2013—2017年,林地、耕地和水域的生态贡献率为27.6%、24.4%以及11.6%。2009—2017年草地、耕地和林地的生态贡献率分别为42.84%、22.03%和19.44%,三者之和高达84.31%。两个时期中的林地、草地和水域的生态贡献率变化较大,分别是19.85%、16.6%和8.67%,说明景泰县总服务价值受到林地、草地和水域产生的生态服务价值变化量影响较大。因此,耕地、草地和水域是主要的贡献因子和敏感因子。

表6 2009—2017年景泰县各乡镇生态服务价值变化
 Tab.6 Changes in ESV of each township in Jingtai County from 2009 to 2017

乡镇	2009年 ESV/10 ⁶ 元	2013年 ESV/10 ⁶ 元	2017年 ESV/10 ⁶ 元	2009年与2013年 ESV 差额/10 ⁶ 元	2013年与2017年 ESV 差额/10 ⁶ 元
草窝滩镇	314.79	304.15	288.53	-10.64	-15.62
红水镇	402.72	403.46	403.47	0.74	0.01
芦阳镇	333.15	336.72	341.80	3.57	5.08
漫水滩乡	218.33	222.28	220.40	3.95	-1.88
上沙沃镇	549.04	534.99	540.22	-14.05	5.23
寺滩乡	974.17	979.36	967.26	5.19	-12.10
条山集团	98.05	95.99	95.62	-2.06	-0.37
五佛乡	249.73	245.99	267.23	-3.74	21.24
喜泉镇	558.71	564.77	585.66	6.06	20.89
一条山镇	181.20	170.07	170.75	-11.13	0.68
正路镇	629.52	635.55	612.00	6.03	-23.55
中泉镇	695.43	703.64	689.82	8.21	-13.82
合计	5 204.84	5 196.97	5 182.76	-7.87	-14.21

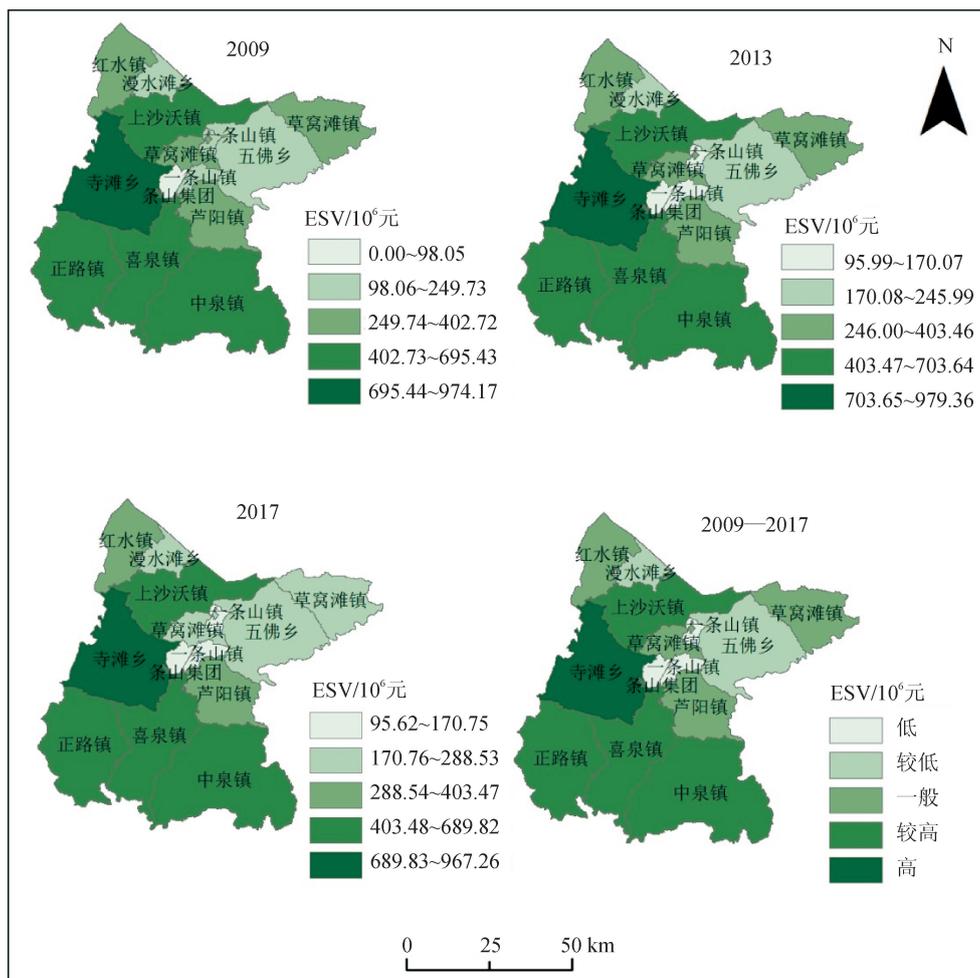


图3 景泰县2009—2017年生态系统服务价值的空间分异
 Fig.3 Spatial differences of the ESV in Jingtai County from 2009 to 2017

表 7 2009—2017 年景泰县不同土地利用类型生态服务价值变化的贡献率

Tab. 7 Contribution rate of changes in ESV of different land use types in Jingtai County from 2009 to 2017

单位: %

时间	耕地	林地	草地	水域	未利用地
2009—2013	18.60	7.75	52.60	20.27	0.82
2013—2017	24.40	27.60	36.00	11.60	0.36

2.2.5 ESV 变化驱动因素分析

不同影响因素使得景泰县的生态系统服务价值发生不同程度的变化,根据地理探测器软件数据处理要求,将各影响因子数据通过 ARCGIS 软件进行离散化处理,高程、坡度、到主要河流的距离、到主要公路的距离以及到行政中心的距离分为 9 类,人口密度以乡镇为单位分为 12 类,便于在模型中进行分析。

通过 GeoDetector 软件处理数据,得到 2009、2013、2017 年土地演变各驱动因子在因子探测器模块中影响强度值 q , q 值越大表示该因子对土地演变空间分异性作用强,也就是生态系统服务价值的主要因素。表 8 为因子探测器计算结果,景泰县地区土地格局影响因子作用强度值从大到小排列依次是:人口密度(0.236 4)、到行政中心的距离(0.178 0)、海拔高程(0.045 7)、到主要公路的距离(0.029 3)、到主要河流的距离(0.021 0)、坡度(0.005 4)。景泰县地区土地利用格局和生态系统服务价值的变化,是多个因子共同作用的结果。第一,聚集性因子起到主导作用,聚集性因子 q 值统计量合计达到 40%,人口密度(X6)对于土地变化的影响最为显著,区域发展是人口与经济在生态系统的两个主体,土地变化程度与人口密度有关,生态环境也会受到社会经济活动的干扰;其次是到行政中心的距离(X5),因为行政中心周围出现集聚可能性大,且距行政中心近的地区,土地扩张现象严重,在一定程度上更利于生态用地的形成。第二,通达性因子影响强度较高,到主要公路的距离(X1)和到主要河流的距离(X2)两个因素关系着人们的衣食住行,道路的通达性会影响人们对土地的开发力度,从而引起土地类型演变,造成生态环境发生不同程度的变化。充分的水资源更有利于周围植被的生长,河流周围人们活动也会有所增加,生态效益得到提升。第三,在适宜性因子中,海拔高程和坡度 q 值统计量合计仅为 5%,影响强度较弱,表明景泰县土地利用变化受自然地理条件的制约不明显。总之,人为因素和自然因素共同对土地格局和生态系统服务价值产生影响。

表 8 泰县土地利用变化影响因子探测

Tab. 8 Detection of impact factors of land use change in Jingtai County

指标类型	因子类型	q 值
通达性	到公路的距离 X1	0.029 3
	到河流的距离 X2	0.021 0
适宜性	高程 X3	0.045 7
	坡度 X4	0.005 4
聚集性	到行政中心的距离 X5	0.178 0
	人口密度 X6	0.236 4

3 结论与讨论

3.1 讨论

本文是以县域为单位,基于土地利用变化研究景泰县的生态服务价值,着重从土地利用信息熵、土地利用矩阵和生态贡献率等方面分析生态服务价值时空演变,通过地理探测器模型分析土地类型变化及生态系统服务价值演变的驱动力。本文选用的评估方法参数少,操作简单,但由于建设用地的复杂性,定量分析其生态服务价值和对环境的影响较难,因此本文没有计算建设用地的生态系统服务价值,以及该评估方法存在多方面的不确定性。全国各个城市发展需求导向不同,核算生态服务价值选择参数就会有一定的局限性。土地利用分类结果细化以及生态系统功能改变也会对评估结果造成影响,地理探测器模型最大优势就是无假设条件,能有效克服传统数学统计模型局限性,但由于数据的可获取性,没有考虑规划调控、经济管理等政策因素对土地演变及生态服务价值变化的影响。今后研究中可以改进评估方法,另外应全面考虑驱动因素,使得评估结果和探测结果更准确。

3.2 结论

1) 随着经济的快速发展,景泰县土地利用发生了明显的变化。2009—2017 年间,耕地和建设用地的面积增长较多,分别从 2009 年的 14.58% 和 1.90% 增加到 2017 年的 14.87% 和 2.31%;林地、草地和未利用地面积较少,但减少幅度较剧烈;水域小幅度增加。

2) 研究区生态系统服务功能总价值量呈不断减少的趋势,8年间共减少 22.08×10^6 元。其中耕地和水域 ESV 呈上升趋势,林地、草地和未利用地 ESV 下降趋势。草地 ESV 占总价值高达 60%,但呈持续下降的趋势。生态系统服务的土壤形成与保护、废物处理、生物多样性保护、气候调节功能是影响景泰县生态系统服务总价值的四大主要生态功能,其价值比率高达 68%;而娱乐文化、原材料和食物生产的价值比率仅为 9.16%。

3) 景泰县生态系统服务价值总量呈减少的趋势,但波动幅度较小。总体上,景泰县生态系统服务价值分布格局呈西南高、东北低。

4) 景泰县土地格局和 ESV 变化受通达性因子、聚集性因子和适宜性因子的共同影响。短时间内适宜性因素对景泰县的影响较小,聚集性和通达性的影响能力较强,尤其是人口密度因子和到行政中心的距离因子影响特别显著,因此人文因素是景泰县生态系统服务价值时空变化的主要驱动因素。

参考文献:

- [1] 赵军,杨凯. 生态系统服务价值评估研究进展[J]. 生态学报,2007,27(1):346-356.
ZHAO Jun, YANG Kai. Valuation of ecosystem services: characteristics, issues and prospects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 346-356.
- [2] 江凌,肖毅,饶恩明,等. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响[J]. 生态学报,2016,36(12):3734-3747.
JIANG Ling, XIAO Yi, RAO Enming, et al. Effects of land use and cover change (LUCC) on ecosystem sand fixing service in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3734-3747.
- [3] 周秋文,杨胜天,罗娅,等. 2001年—2009年中国及周边国家土地利用/覆盖变化分析[J]. 世界地理研究,2012,21(2):64-71.
ZHOU Qiuwen, YANG Shengtian, LUO Ya, et al. Land use and cover change in China and the neighboring countries from 2001 to 2009[J]. World Regional Studies, 2012, 21(2): 64-71.
- [4] 封建民,王黎,文琦. 榆神府矿区土地利用变化及合理性分析[J]. 水土保持研究,2015,22(1):188-193.
FENG Jianmin, WANG Li, WEN Qi. Land use changes and its rationality evaluation in the Yushenfu mining area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 188-193.
- [5] RUELLAND D, TRIBOTTE A, PUECH C, et al. Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years from aerial photograph and satellite images in a Sahelian catchment[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(6): 1747-1777.
- [6] TUAN Yifu. Geography, phenomenology, and the study of human nature[J]. The Canadian Geographer, 2010, 15(3): 181-192.
- [7] ZHAO Bin, KREUTER U, LI Bo, et al. An ecosystem service value assessment of land-use change on Chongming Island, China[J]. Land Use Policy, 2004, 21(2): 139-148.
- [8] 赵亮,刘吉平,田学智. 近60年挠力河流域生态系统服务价值时空变化[J]. 生态学报,2013,33(10):3169-3176.
ZHAO Liang, LIU Jiping, TIAN Xuezhi. The temporal and spatial variation of the value of ecosystem services of the Naoli River Basin ecosystem during the last 60 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 3169-3176.
- [9] 约日古丽·卡斯木,杨胜天,夜比布拉·司马义. 新疆艾比湖流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(2):260-269.
YUERIGULI Kasimu, YANG Shengtian, ZIBIBULA Simayi. Impact of land use change on ecosystem service value in Ebinur Lake Basin, Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 260-269.
- [10] MAMAT Z, HALIK Ü, KEYIMU M, et al. Variation of the flood plain forest ecosystem service value in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(1): 47-57.
- [11] 龙花楼,刘永强,李婷婷,等. 生态用地分类初步研究[J]. 生态环境学报,2015,24(1):1-7.
LONG Hualou, LIU Yongqiang, LI Tingting, et al. A primary study on ecological land use classification[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(1): 1-7.
- [12] BROWN G. The relationship between social value for ecosystem services and global land cover: an empirical analysis [J]. Ecosystem Services, 2013, 5: 58-68.
- [13] LAUTENBACH S, KUGEL C, LAUSCH A, et al. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data[J]. Ecological Indicators, 2011, 11(2): 676-687.
- [14] 刘桂林,张落成,张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报,2014,34(12):3311-3319.
LIU Guilin, ZHANG Luocheng, ZHANG Qian. Spatial and temporal dynamics of land use and its influence on ecosystem service value in Yangtze River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3311-3319.
- [15] 戴文远,江方奇,黄万里,等. 基于“三生空间”的土地利用功能转型及生态服务价值研究——以福州新区为例[J]. 自然资源学报,2018,33(12):2098-2109.
DAI Wenyuan, JIANG Fangqi, HUANG Wanli, et al. Study on transition of land use function and ecosystem service value based on the conception of production, living and ecological space: a case study of the Fuzhou

- new area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12):2098-2109.
- [16] 王慧. 南京市土地利用景观格局变化及预测[D]. 南京:南京农业大学, 2010.
WANG Hui. Dynamics and prediction of landscape in land utilization of Nanjing city[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [17] 张浚茂, 臧传富. 东南诸河流域 1990-2015 年土地利用时空变化特征及驱动机制[J]. *生态学报*, 2019, 39(24): 9339-9350.
ZHANG Junmao, ZANG Chuanfu. Spatial and temporal variability characteristics and driving mechanisms of land use in the Southeastern River Basin from 1990 to 2015[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24):9339-9350.
- [18] 王兆礼, 陈晓宏, 曾乐春, 等. 深圳市土地利用变化驱动力系统分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(6): 124-128.
WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, ZENG Lechun, et al. Application of grey system theory to analyze the driving force system of land use change in Shenzhen City[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2006, 16(6):124-128.
- [19] 张英杰, 雷国平. 地质灾害易发区农村居民点布局优化研究:以浙江洞头为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(11): 1387-1395.
ZHANG Yingjie, LEI Guoping. Analysis of spatial distribution and optimization of rural settlements in geological disaster-prone area: a case study of Dongtuo County, Zhejiang Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(11):1387-1395.
- [20] 姚远, 丁建丽, 赵振亮. 快速城市化背景下的乌鲁木齐市土地利用变化人文驱动力定量研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(10): 132-137.
YAO Yuan, DING Jianli, ZHAO Zhenliang. Study on the land use change in Urumqi during accelerated urbanization[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(10):132-137.
- [21] 李颖, 冯玉, 彭飞, 等. 基于地理探测器的天津市生态用地格局演变[J]. *经济地理*, 2017, 37(12):180-189.
LI Ying, FENG Yu, PENG Fei, et al. Pattern evolution of ecological land in Tianjin based on geodetector[J]. *Economic Geography*, 2017, 37(12): 180-189.
- [22] 周子英, 段建南, 梁春风. 长沙市土地利用结构信息熵时空变化研究[J]. *经济地理*, 2012, 32(4):124-129.
ZHOU Ziying, DUAN Jiannan, LIANG Chunfeng. Temporal-spatial changes analysis of land use structure in Changsha city based on information entropy[J]. *Economic Geography*, 2012, 32(4):124-129.
- [23] 张佰发, 苗长虹. 黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J]. *资源科学*, 2020, 42(3):460-473.
ZHANG Baifa, MIAO Changhong. Spatiotemporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2020, 42(3): 460-473.
- [24] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2):189-196.
XIE Gaodi, LU Chuanxia, LENG Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2):189-196.
- [25] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital 1[J]. *Nature*, 1999, 387(1):3-15.
- [26] SCHIRPKE U, KOHLER M, LEITINGER G, et al. Future impacts of changing land-use and climate on ecosystem services of mountain grassland and their resilience [J]. *Ecosystem Services*, 2017, 26 (A): 79-94.
- [27] 封建民, 郭玲霞, 李晓华. 汉中市土地利用时空变化及其对生态系统服务价值的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(1):275-282.
FENG Jianmin, GUO Lingxia, LI Xiaohua. Temporal and spatial variations of land uses and their influences on ecosystem service function values in Hanzhong City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1):275-282.
- [28] 吕晨, 蓝修婷, 孙威. 地理探测器方法下北京市人口空间格局变化与自然因素的关系研究[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(8):1385-1397.
LÜ Chen, LAN Xiuting, SUN Wei. A study on the relationship between natural factors and population distribution in Beijing using geographical detector[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8):1385-1397.
- [29] WANG Jinfeng, HU Yi. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [30] WANG Jinfeng, LI Xinqu, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24 (1): 107-127.
- [31] 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.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [32] 吴巍, 黄翠萍, 赵晓杰, 等. 不同模式下城区用地空间扩展特征及机理——以赣州为例[J]. *城市发展研究*, 2018, 25(12):141-146.
WU Wei, HUANG Cuiping, ZHAO Xiaojie, et al. Spatial expansion characteristics and mechanism of urban land use in different modes: a case study of Ganzhou[J]. *Urban Development Studies*, 2018, 25(12): 141-146.

(责任编辑 王绪迪)