

# 汾河流域中游地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响

刘焕才, 崔敏华, 李园园, 李曼\*

(山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000)

**摘要:** 汾河为黄河第二大支流, 研究其流域土地利用变化状况及其对当地生态系统的影响, 可为黄河流域生态保护和高质量发展提供参考。以位于汾河流域中游地区的山西省晋中市为典型案例区, 利用 RS 和 GIS 技术对遥感图像和相关社会统计数据进行处理计算, 研究 1998—2018 年晋中市生态系统服务价值 (ESV) 对土地利用变化的响应特征。结果显示: 近 20 年, 晋中市建设用地的土地利用动态度远超其他地类, 且面积持续增加, 草地、水域和未利用地均呈波动增加趋势, 而耕地和林地处于持续减少状态。在此影响下, 晋中市 ESV 呈持续弱化态势 (-2.36%), 共减少  $7.74 \times 10^8$  元, 生态环境出现退化迹象, 因此, 该区域应注重维持社会经济发展和生态环境保护之间的平衡点, 切实推进生态文明建设。

**关键词:** 土地利用变化; 生态系统服务价值; 随机森林分类法; 汾河流域

中图分类号: F301.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)04-0635-06

## The effect of land use change on ecosystem service value in the middle reaches of Fenhe River basin

LIU Huancai, CUI Minhua, LI Yuanyuan, LI Man

(College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000)

**Abstract:** Fenhe River is the second largest tributary of the Yellow River, study on land use change and its impact on local ecosystem can provide reference for ecological conservation and high-quality development in the Yellow River Basin. Taking Jinzhong City, Shanxi Province, which is located in the middle reaches of the Fenhe River Basin, as a typical case area, and by applying RS and GIS technology to process the remote sensing image and social statistical data, this paper analyzes the effect of land use change on ecosystem service value in this case area from 1998 to 2018. The results showed that, over the past 20 years, the construction land area of Jinzhong City has been increasing, and its land use dynamic degree is far more than other land use types, the area of grassland, water area and unused land increased with fluctuation, while the area of cultivated land and forest land continued to decrease. Affected by this, the ecosystem service value showed a continuous decreasing tendency (-2.36%), and decreased by  $7.74 \times 10^8$  Yuan, which means the signs of ecological degradation. Therefore, the region needs to be proactive in maintaining the balance between socio-economic development and environmental protection, and build ecological civilization effectively.

**Key words:** land use change; ecosystem service value; random forest classification; Fenhe River basin

生态系统服务是指人类从生态系统功能中所获取的各种惠益<sup>[1]</sup>, 是影响工农业可持续发展的重要基础, 目前, 人类面临的主要生态问题正是持续恶化的生态环境以及生态系统服务功能的破坏。据调查, 全球 24 项主要生态系统服务中有 15 项处于退化状态<sup>[2]</sup>。20 世纪 90 年代随着学者 Costanza 等<sup>[1]</sup>和 Daily<sup>[3]</sup>在生态系统服务价值 (ecosystem service

value, ESV) 定量估算方面的探究, ESV 研究进入快速发展时期, 并越来越多的服务于政府决策。目前研究内容涉及生态系统服务的分类和价值评估等诸多领域<sup>[4]</sup>。研究指出生态系统的结构和过程正在被人类活动引发的土地利用/覆被变化 (land use/cover changes, LUCC) 改变, 且深刻影响生态系统各项服务价值的发挥<sup>[5]</sup>, 因此 LUCC 对 ESV 的

收稿日期: 2020-09-26

基金项目: 国家自然科学基金 (41901071, 41701062) 和山西省高等学校哲学社会科学研究项目 (20162205) 共同资助。

作者简介: 刘焕才, 博士, 讲师。E-mail: liuhc@sxnu.edu.cn

\* 通信作者: 李曼, 博士, 副教授。E-mail: limansx@163.com

影响研究成为当前的研究热点。

谢高地等<sup>[6]</sup>基于我国实际制定的中国陆地生态系统服务价值当量因子表推动了中国该方面的研究工作。作为经济蓬勃发展的的发展中大国，中国的工农业活动正在深刻改变土地利用结构并对 ESV 造成重要影响，但由于自然和经济等条件的区域差异明显，众多学者从不同空间尺度对此开展了大量卓有成效的研究工作，相应的研究手段也变得更加丰富，主要表现在 InVEST 和 SolVES 等评估模型的相继开发和推广应用<sup>[7-8]</sup>。就全国而言，中国 ESV 总量为 38.10 万亿元，其中森林提供的 ESV 最高，调节功能在服务类别中占绝对比重<sup>[9]</sup>。与此同时，针对不同空间尺度的 ESV 评估也在广泛开展，省域（如内蒙古<sup>[10]</sup>、陕西<sup>[11]</sup>和江苏<sup>[12]</sup>）、市域（如重庆市<sup>[13]</sup>和深圳市<sup>[14]</sup>）以及流域（如乌鲁木齐河<sup>[15]</sup>和疏勒河<sup>[16]</sup>）等均开展了 LUCC 对 ESV 的影响研究。

汾河为黄河第二大支流，其中游地区占全流域面积的 46.6%，是流域内经济状况最好的地区之一，但相应的生态环境问题也较为突出，这在一定程度上影响着黄河的生态安全状况。对中游核心区晋中市的土地利用变化研究表明，耕地和牧草地等在减少，而林地和工矿用地等在增加，且各地类相对动态呈现出不同的区域差异性<sup>[17]</sup>，当地土地的过度开发与利用很大程度上会制约山西省乃至黄河流域经济、社会和环境的整体协调发展<sup>[18]</sup>。然而，关于晋中市土地利用变化对生态系统服务价值影响的研究甚少。针对之前的不足，本研究基于遥感影像数据，通过当量因子法，以晋中市为例探究 1998—2018 年汾河流域中游地区土地利用变化对生态系统服务的影响，以期为流域生态治理和土地合理开发提供决策依据，同时也为黄河流域生态保护和高质量发展提供参考。

### 1 研究区概况

山西省晋中市位于 111°25′~114°05′E, 36°40′~38°06′N（图 1），位于汾河流域中游，东靠太行山，西临汾河，是汾河流域生态修复中游核心区<sup>[17]</sup>。该地区属于中纬度内陆黄土高原，面积 1.64×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>，温带大陆性季风气候显著，由于地形等因子制约，区内水资源分布不均衡。

### 2 数据来源与研究方法

#### 2.1 数据来源及处理

本研究采用 1998、2003、2008、2013 和 2018 年共 5 期 Landsat 遥感影像，并从《山西省统计年

鉴》<sup>[19]</sup>和《晋中市统计年鉴》<sup>[20]</sup>中获取晋中市各地类面积和粮食产量等数据。在 ENVI5.3 中处理并解译遥感影像，将研究区用地类型划分为耕地、草地、林地、建设用地、水域和未利用地 6 类<sup>[21]</sup>，并在 ArcGIS10.6 中分析并计算各期土地类型面积数据，结合中科院遥感影像解译结果和 Google Earth 软件系统验证，解译精度高达 86%以上，与本研究精度要求相符。

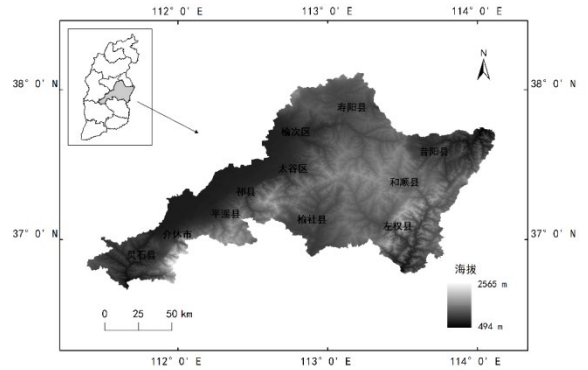


图 1 研究区位置示意图

Figure 1 Location of the study area

#### 2.2 研究方法

2.2.1 随机森林分类法 随机森林是目前遥感影像分类主要方法，能为土地利用研究者提供更为精确的分类结果。与支持向量机和最大似然法相比，它具有操作简单、分类准确且速度快、高效处理量大、复杂样本数据的优点<sup>[22-24]</sup>。其流程如图 2 所示：

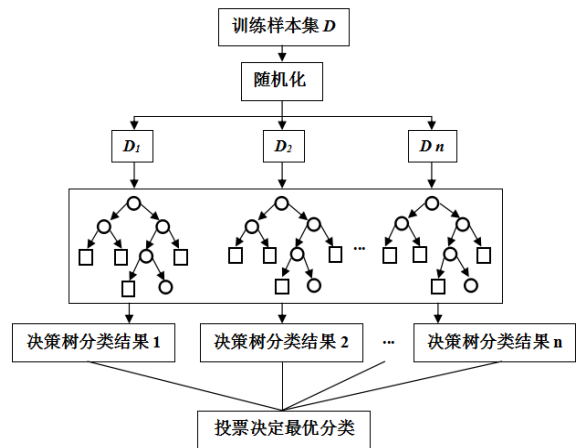


图 2 随机森林分类过程示意

Figure 2 Schematic diagram of random forest classification

2.2.2 土地利用动态度 土地利用动态度反映研究区在单位时间内某地类的变化剧烈程度<sup>[25]</sup>。其表达式为：

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{1}$$

式中，K 为某地类变化动态度，U<sub>a</sub>、U<sub>b</sub> 分别是

研究期初和研究期末某地类的面积;  $T$  为研究时长, 单位一般为年。

**2.2.3 生态系统服务价值测度** 以鲁春霞等<sup>[26]</sup>和谢高地等<sup>[27]</sup>中国生态系统服务价值当量因子表为参考标准, 结合研究区现状, 对单位面积农田年粮食产量的经济价值进行修正, 修正后, 1998—2018 年粮食产量是  $5\,319.91\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 其平均收购价格为  $2.32\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 经计算 1 个当量因子的经济价值是

$1763.17\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 从而得出适用于晋中市的生态系统服务价值系数 (表 1)。ESV 计算公式为:

$$ESV = \sum (A_k \times VC_k) \quad (2)$$

$$ESV_f = \sum (A_k \times VC_{fk}) \quad (3)$$

式中,  $A_k$  是  $k$  地类面积;  $VC_k$  是生态系统价值系数;  $ESV_f$  是生态系统单项服务价值;  $VC_{fk}$  是地类  $k$  的生态系统单项价值系数。

表 1 晋中市土地利用类型的生态系统服务价值系数

生态系统服务与功能	林地	草地	耕地	水域	未利用地
气体调节	6 171.10	1 410.54	881.59	0.00	0.00
气候调节	4 760.56	1 586.85	1 569.22	811.06	0.00
水源涵养	5 642.14	1 410.54	1 057.90	35 933.41	52.90
土壤形成与保护	6 876.36	3 438.18	2 574.23	17.63	35.26
废物处理	2 309.75	2 309.75	2 891.60	32 054.43	17.63
生物多样性保护	5 747.93	1 921.86	1 251.85	4 390.29	599.48
食物生产	176.32	528.95	1 763.17	176.32	17.63
原材料生产	4 584.24	88.16	176.32	17.63	0.00
娱乐文化	2 256.86	70.53	17.63	7 652.16	17.63
总计	38 525.26	12 765.36	12 183.51	81 052.93	740.53

**2.2.4 敏感性指数** 敏感性指数 (coefficient of sensitivity, CS) 是反映生态系统服务价值系数变化 1% 的情况下 ESV 随之变化情况的指标<sup>[28]</sup>, 可表征价值系数的精确度,  $CS > 1$ , 则 ESV 对 VC 具有弹性;  $CS < 1$ , 则 ESV 对 VC 缺少弹性, 结果可信。计算公式如下:

$$CS = \frac{\left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_{jk} - VC_{ik}) / VC_{ik}} \right|}{\quad} \quad (4)$$

式中,  $ESV_i$  和  $ESV_j$  分别为价值系数调整前、后的 ESV。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用动态变化分析

结果显示, 1998—2018 年, 各类用地面积均发生明显变化 (图 3, 表 2)。

1998—2003 年晋中市土地利用动态最大的是建设用地 (1.96%), 最小的是林地 (-0.01%); 耕地、草地和林地面积呈波动减少趋势, 耕地减少尤为明显 (-1 916.64 hm<sup>2</sup>), 建设用地面积增加显著 (3 889.22 hm<sup>2</sup>), 水域、未利用地面积较为稳定。此阶段, 农业化水平低、土地集约化程度低以及粮食产量低是耕地面积减少的主要原因, 气候变化和人类活动双重作用致使草地和林地削减, 当地城镇

化水平提高以及人口数量增加是建设用地面积大幅增加的主要原因。

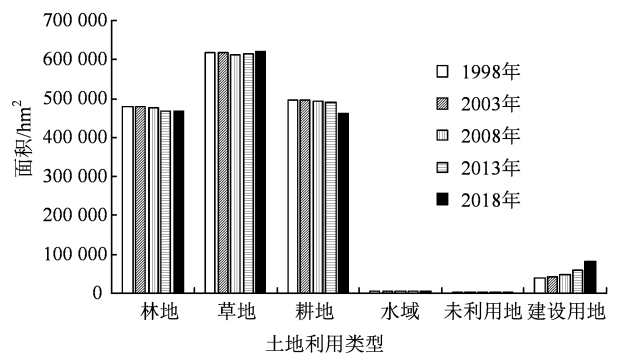


图 3 1998—2018 年晋中市土地利用面积  
Figure 3 Area of land use in Jinzhong, 1998-2018

2003—2008 年, 水域的土地利用动态最大 (-3.11%), 林地和耕地最小 (-0.03%); 建设用地面积增加较为明显 (5 615.64hm<sup>2</sup>), 未利用地略微增长, 草地减少较为显著 (-3 436.65hm<sup>2</sup>), 其他类型则都有所减少, 这些面积缩减除与降水量减少有关, 还与城市和工矿业开发与建设密不可分, 城市发展与扩张、工矿业开发与建设侵占了部分草地、水域、耕地及林地, 此外, 部分耕地弃置导致未利用地小幅增长, 人类活动与国家政策引导导致建设用地大幅增加。

表 2 1998—2018 年晋中市土地利用面积变化  
Table 2 Area change of land use in Jinzhong, 1998-2018

年份	项目	林地	草地	耕地	水域	未利用地	建设用地
1998—2003	面积变化/hm <sup>2</sup>	-280.31	-1 814.92	-1 916.64	185.51	-19.17	3 889.22
	动态度/%	-0.01	-0.06	-0.08	0.69	-0.62	1.96
2003—2008	面积变化/hm <sup>2</sup>	-711.45	-3 436.65	-737.24	-861.57	72.45	5 615.64
	动态度/%	-0.03	-0.11	-0.03	-3.11	2.41	2.58
2008—2013	面积变化/hm <sup>2</sup>	-8 504.99	1 709.19	-3 820.19	560.59	-29.95	10 127.69
	动态度/%	-0.36	0.06	-0.15	2.40	-0.89	4.12
2013—2018	面积变化/hm <sup>2</sup>	-1 801.07	6 418.13	-28 570.45	758.63	48.13	23 055.14
	动态度/%	-0.08	0.21	-1.17	2.90	1.50	7.78
1998—2018	面积变化/hm <sup>2</sup>	-11 297.82	2 875.75	-35 044.52	643.16	71.46	42 687.69
	动态度/%	-0.12	0.02	-0.35	0.60	0.58	5.39

表 3 1998-2018 年晋中市各类用地生态系统服务价值变化  
Table 3 Change of ecosystem service value for each land use in Jinzhong, 1998-2018

年份	项目	林地	草地	耕地	水域	总计
1998	生态服务价值/10 <sup>8</sup> 元	184.13	78.97	60.49	4.34	327.93
	比率/%	56.15	24.08	18.45	1.32	100
2003	生态服务价值/10 <sup>8</sup> 元	184.02	78.74	60.26	4.49	327.51
	比率/%	56.19	24.04	18.40	1.37	100
2008	生态服务价值/10 <sup>8</sup> 元	183.75	78.29	60.17	3.79	326.00
	比率/%	56.36	24.02	18.46	1.16	100
2013	生态服务价值/10 <sup>8</sup> 元	180.47	78.51	59.70	4.25	322.93
	比率/%	55.88	24.31	18.49	1.32	100
2018	生态服务价值/10 <sup>8</sup> 元	179.78	79.33	56.22	4.86	320.19
	比率/%	56.15	24.78	17.56	1.52	100
1998—2003	价值变化/10 <sup>8</sup> 元	-0.11	-0.23	-0.23	0.15	-0.42
	变化率/%	-0.06	-0.29	-0.38	3.46	-0.13
2003—2008	价值变化/10 <sup>8</sup> 元	-0.27	-0.44	-0.09	-0.70	-1.51
	变化率/%	-0.15	-0.56	-0.15	-15.59	-0.46
2008—2013	价值变化/10 <sup>8</sup> 元	-3.28	0.22	-0.47	0.46	-3.07
	变化率/%	-1.79	0.28	-0.78	12.14	-0.94
2013—2018	价值变化/10 <sup>8</sup> 元	-0.69	0.82	-3.48	0.61	-2.74
	变化率/%	-0.38	1.04	-5.83	14.35	-0.85
1998—2018	价值变化/10 <sup>8</sup> 元	-4.35	0.36	-4.27	0.52	-7.74
	变化率/%	-2.36	0.46	-7.06	11.98	-2.36

2008—2013 年建设用地动态度最大(-4.12%)，草地最小(-0.06%)；建设用地面积大幅扩张(10 127.69 hm<sup>2</sup>)，草地和水域有所增加，其他地类各有减少，其中减少最显著的是林地(-8 504.99 hm<sup>2</sup>)。工矿业粗放发展方式导致研究区出现林地和耕地面积明显减少，土地资源浪费和土壤污染等问题；随着城市的不断发展与扩张，对建设用地的需求进一步增加也是用地类型发生改变的重要因素之一。

2013—2018 年建设用地动态度最大(7.78%)，林地最小(-0.08%)；建设用地面积扩大最为明显(23 055.14hm<sup>2</sup>)，草地、水域和未利用地面积均有所增加，其他地类则不同程度减少，减少最显著的是耕地(-28 570.45hm<sup>2</sup>)，一方面由于大量劳动力外出务工导致部分耕地荒废，另一方面受退耕还草政策导致。相关企业针对土壤污染的指导和污水、废气的达标排放等有效治理是草地恢复的重要原因。同时，此阶段，“能源战略”、“中部崛起战略”

等国家政策的推进实施进一步加快了区域城市化进程, 使得建设用地大幅扩张。

受地理位置、气候条件、资源优势、战略地位、经济发展、人口增加、国家政策和城镇化发展等方面因素的影响, 近 20 年, 晋中市建设用地面积持续增多 ( $42\,687.69\text{ hm}^2$ ), 草地、水域和未利用地面积波动增加, 耕地和林地面积持续减少 ( $-35\,044.52\text{ hm}^2$ ,  $-11\,297.82\text{ hm}^2$ ), 结构逐渐显现出不合理性, 该区域应着重寻找社会经济发展和生态环境保护之间的平衡点, 推进生态文明建设。

表 4 1998—2018 年晋中市生态系统服务价值的敏感性指数  
Table 4 The sensitivity coefficients of ecosystem service value in Jinzhong, 1998-2018

年份	林地	草地	耕地	水域
1998	0.561 5	0.240 8	0.184 5	0.013 2
2003	0.561 9	0.240 4	0.183 9	0.013 7
2008	0.563 7	0.240 2	0.184 6	0.011 7
2013	0.558 9	0.243 1	0.184 9	0.013 2
2018	0.561 5	0.247 8	0.175 6	0.015 2

### 3.2 生态系统服务价值变化分析

研究发现, 研究区林地 ESV 比重最大, 草地和耕地次之, 水域甚微。未利用地由于自身价值系数低, 面积积极小, 占 ESV 比重微乎其微, 对研究区 ESV 的变化几乎不产生影响, 在此不做计算。1998—2018 年, 研究区 ESV 总量呈持续减少态势 (表 3), 由 1998 年的  $327.93 \times 10^8$  元减少至 2018 年的  $320.19 \times 10^8$  元, 净减少  $7.74 \times 10^8$  元, 将来区域社会发展和生态环境治理可能会受到制约。

具体来看, 1998—2018 年晋中市各用地类型的 ESV 变化存在显著性差异, 林地和耕地的 ESV 不断减少, 分别减少  $4.35 \times 10^8$  元,  $4.27 \times 10^8$  元, 幅度均较为明显 ( $-2.36\%$  和  $-7.06\%$ ); 草地的 ESV 先减少后增加, 整体呈增长态势 ( $0.36 \times 10^8$  元); 水域的 ESV 整体上有着小幅波动增长态势 ( $0.52 \times 10^8$  元), 除 2003—2008 年呈减少态势之外, 其他时段均呈增加态势, 总体增幅  $11.98\%$ 。分析可知, 1998—2018 年晋中市 ESV 的变化主要受同期土地利用面积变化的影响, 耕地和林地面积缩减明显, 水域和草地变动较平缓, 因此, 耕地和林地面积减少是导致 ESV 持续减少的主要因素。同时, 由于各类型的价值系数差异较大, 也使得不同土地利用变化会对 ESV 的影响出现相应的差别。

此外, 晋中市山地和丘陵较多, 平原较少, 地形成了阻碍区域发展的主要原因之一, 加之土地利

用集约化程度低、土地利用效率低及土壤污染等问题很大程度上制约了区域土地利用结构优化调整, ESV 的持续减少意味着生态环境状况正在走下坡路, 若按此趋势发展, 当地环境和生态将受到巨大挑战, 因此, 结合当地实际优化调整土地利用结构, 提高土地集约化和强化土壤污染治理显得十分迫切。

### 3.3 敏感性分析

将生态系统服务价值系数上下变动 50% 后计算得到各用地类型的 CS (表 4), 可见晋中市各地类的 CS 值均小于 1, 表明 ESV 对价值系数缺乏弹性, 故研究结果可靠。其中林地的 CS 值最大, 均值达到 0.561 5, 这意味着林地的价值系数增加 1% 时, 其 ESV 将增加 0.561 5%。

## 4 讨论与结论

1998—2018 年, 晋中市土地利用类型变化主要是耕地和林地转变为建设用地、草地和水域, 建设用地增加了 1.08 倍, 动态度远超于其他地类 ( $5.39\%$ )。在当地 ESV 构成中贡献最大的为林地, 其次是草地和耕地, 水域和未利用地的贡献最小。

受 LUCC 影响, 研究区 ESV 持续下降, 自 1998 年的  $327.93 \times 10^8$  元减少到 2018 年的  $320.19 \times 10^8$  元, 共减少  $7.74 \times 10^8$  元, 林地和耕地面积削减是最大原因。表明过去 20 年, 当地生态环境已经出现恶化的迹象, 将来社会发展和生态环境治理会受到阻碍。

汾河流域中游地区的发展状况直接影响黄河流域生态保护和高质量发展进程, 其生态环境正在受到城市发展和扩张带来的负面影响, 因此, 在今后的土地利用中, 应当贯彻退耕还林还草和耕地占补平衡等政策, 对工农业生产与发展进行合理规划, 实现经济效益和生态效益的统一; 对城镇用地的规模进行严格把控, 防止无序扩张, 紧抓农村居民点整治, 合理规划城乡建设用地; 此外, 在优化土地利用结构的同时, 也要注重农业生态系统的保护及优化。

同时, 本研究区是我国重要的煤炭资源分布区, 多年以来, 矿产资源开采过程中出现地表植被破坏、耕地资源被侵占、土壤资源和水资源受污染等问题, 部分区域生态系统功能受到严重破坏, 且极易发生地质灾害, 生态安全受到极大威胁。因此, 应加大对开采区的整治力度, 将开采废弃地复垦为生态用地及农业用地, 及时治理土壤污染和水污染, 以减少对生态系统的进一步破坏, 提高区域生态服务功能。

## 参考文献:

- [1] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecol Econ*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] REID W V, MOONEY H A. The millennium ecosystem assessment: testing the limits of interdisciplinary and multi-scale science[J]. *Curr Opin Environ Sustain*, 2016, 19: 40-46.
- [3] DAILY G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [4] 赵海兰. 生态系统服务分类与价值评估研究进展[J]. *生态经济*, 2015, 31(8): 27-33.
- [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] 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.
- [7] 马良, 金陶陶, 文一惠, 等. InVEST 模型研究进展[J]. *生态经济*, 2015, 31(10): 126-131.
- [8] SHERROUSE B C, CLEMENT J M, SEMMENS D J. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services[J]. *Appl Geogr*, 2011, 31(2): 748-760.
- [9] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [10] 王宁, 杨光, 韩雪莹, 等. 内蒙古 1990-2018 年土地利用变化及生态系统服务价值[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 244-250.
- [11] 岳杙筱, 薛亮. 陕西省土地利用与生态系统服务价值动态研究[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(10): 20-30.
- [12] 丁梦婷, 裴凤松, 胡引翠, 等. 基于 LUCC 的江苏省生态系统服务价值时空变化特征研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6801-6811.
- [13] 张艳军, 官冬杰, 翟俊, 等. 重庆市生态系统服务功能价值时空变化研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(3): 1169-1177.
- [14] 李文楷, 李天宏, 钱征寒. 深圳市土地利用变化对生态服务功能的影响[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 440-446.
- [15] 李曼, 郭俊莉, 刘焕才. 乌鲁木齐河流域中下游生态系统服务价值动态变化[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(3): 48-54.
- [16] 刘洋. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域生态系统服务功能时空演变[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [17] 贾宇平. 晋中市土地利用变化特征研究[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(3): 197-199.
- [18] 古亚娟. 晋中市土地利用变化分析[D]. 太谷: 山西农业大学, 2015.
- [19] 山西省统计局. 山西省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004-2016.
- [20] 晋中市统计局. 晋中市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004-2016.
- [21] 徐媛银, 郭冻, 薛达元, 等. 赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 1969-1978.
- [22] RUIZ HERNANDEZ I E, SHI W Z. A random forests classification method for urban land-use mapping integrating spatial metrics and texture analysis[J]. *Int J Remote Sens*, 2018, 39(4): 1175-1198.
- [23] 马慧娟, 高小红, 谷晓天. 随机森林方法支持的复杂地形区土地利用/土地覆被分类研究[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(3): 359-371.
- [24] 黄衍, 查伟雄. 随机森林与支持向量机分类性能比较[J]. *软件*, 2012, 33(06): 107-110.
- [25] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 等. 近 30 年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2973-2985.
- [26] 鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 等. 青藏高原生态系统服务功能的价值评估[J]. *生态学报*, 2004, 24(12): 2749-2755.
- [27] 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.
- [28] 陈忠升, 陈亚宁, 李卫红, 等. 基于生态服务价值的伊犁河谷土地利用变化环境影响评价[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(4): 870-877.