

1980—2020 年汾河流域生态系统服务价值的时空变化

林菲, 池泽龙, 杨伟, 刘庚, 马小红, 常博

(太原师范学院 汾河流域科学发展研究中心, 山西 晋中 030619)

摘要: [目的] 分析 1980—2020 年汾河流域生态系统服务价值时空变化特征, 为该流域生态环境的科学调控和管理提供理论参考。[方法] 利用汾河流域 1980—2020 年 5 期 Landsat-MSS/TM/ETM 遥感影像解译数据研究了流域土地利用变化特征, 并估算了生态系统服务价值。[结果] 1980—2020 汾河流域土地利用中耕地、林地和草地一直处于主导地位, 土地利用整体变化表现为耕地向建设用地转移; 土地利用动态度表明 2000—2020 年土地变化明显高于 1980—2000 年。1980—2020 年汾河流域土地利用总生态服务价值持续减少, 空间分布整体上呈上游高, 中下游低的趋势。从不同功能价值来看, 调节和支持服务减少最多。不同土地利用程度与 ESVI 双变量 LISA 聚集图呈现出明显的空间负相关性, 主要以汾河上游的低土地利用程度与高 ESVI 聚集分布为主。[结论] 1980—2020 年汾河流域土地利用/覆被变化对生态服务价值有较大影响。可以通过提高土地集约利用水平, 促进该区土地利用结构向高生态服务价值发展。

关键词: 土地利用; 生态系统服务价值; 汾河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0322-08

中图分类号: X171

文献参数: 林菲, 池泽龙, 杨伟, 等. 1980—2020 年汾河流域生态系统服务价值的时空变化[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 322-329. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.043; Lin Fei, Chi Zelong, Yang Wei, et al. Spatial and temporal changes of ecosystem service value in Fenhe River basin from 1980 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 322-329.

Spatial and Temporal Changes of Ecosystem Service Value in Fenhe River Basin from 1980 to 2020

Lin Fei, Chi Zelong, Yang Wei, Liu Geng, Ma Xiaohong, Chang Bo

(Research Center for Scientific Development in Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi 030619, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial variation characteristics of ecosystem service value in Fenhe River basin from 1980 to 2020 were analyzed to provide theoretical reference for scientific regulation and management of ecological environment in the basin. [Methods] Based on interpretation data of landsat-MSS/TM/ETM remote sensing image from 1980 to 2020, the land use change characteristics of Fenhe River basin were studied, and the ecosystem service value was estimated. [Results] From 1980 to 2020, the cropland, forest and grassland had been in the leading position in the land use of Fenhe River basin. The overall change of land use was mainly from cropland to construction land, and the changing rate of land use from 2000 to 2020 was significantly higher than that from 1980 to 2000. The annual value of total ecosystem services in the Fenhe River basin decreased from 1980 to 2020. The spatial distribution of ecosystem service value (ESV) was higher in the upstream and lower in the downstream. From the perspective of different function values, the regulation and support services decreased the most. The land use degree and ESVI bivariate LISA aggregation map showed a significantly spatially negative autocorrelation pattern, which was mainly dominated by low land use degree and high ESVI aggregation distribution in the upper reaches of Fenhe River. [Conclusion] Land use/cover change of Fenhe River basin had a great impact on ESV during 1980—2020. Measures such as improving the level of land intensive use should be used to improve land use structure developing towards high ESV.

Keywords: land use; ecosystem service value; Fenhe River basin

收稿日期: 2021-09-14

修回日期: 2021-11-01

资助项目: 山西省人文社科重点基地项目“汾河流域生态安全格局识别、优化策略、生态系统服务与协同关系研究”(20190123); 太原师范学院校级大学生创新创业训练项目(CXCY2124); 山西省应用基础研究计划项目(201901D211420); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0791, 2021L411); 山西省 1331 工程项目

第一作者: 林菲(1984—), 女(汉族), 山西省太原市人, 博士, 讲师, 主要从事生态系统服务方面的研究。Email: lin_269@163.com.

通讯作者: 刘庚(1981—), 男(汉族), 山东省微山县人, 博士, 教授, 主要从事土地资源利用与评价方面的研究。Email: liugeng9696@126.com.

土地利用/覆被变化(land use/cover change, LUCC)是全球气候变化的主要原因之一,是驱动人类活动和自然环境变化的关键因素,它通过改变生态系统的结构、过程和功能,从而影响生态系统服务^[1-2]。生态系统服务(ecosystem services, ES)是指人类可直接或间接地从自然生态系统中获得的各种惠益,通常将这种惠益分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务^[3-4]。生态系统服务价值(ecosystem services value, ESV)量化评估有助于高效配置土地资源,优化区域土地利用格局,实现土地集约化与生态环境协调发展^[5-7]。

因此 LUCC 对 ESV 影响的定量研究成为国内外学者关注的重点,遥感、GIS 等先进技术手段与空间分析方法也逐渐融合到研究当中^[8-12]。土地利用变化对生态系统服务的影响研究在我国许多流域已广泛展开,汤洁等^[13]研究发现,1989—2012 年辽河流域 ESV 呈下降趋势,耕地的开发导致湿地和水域的退化是下降的主要原因。何毅等^[14]对 1998—2018 年漓江流域研究发现 ESV 先增加后减少,与林地面积变化基本一致。朱利英等^[15]研究也发现,1980—2015 年北运河流域土地利用 ESV 先增加后减少,城镇和水体的 ESV 贡献率最大。因此,LUCC 的时空格局变异直接影响 ESV,相关研究的开展有助于了解流域生态系统服务能力及空间分布差异和变化趋势等特征,为针对性地制定生态保护措施提供背景资料 and 理论参考^[16-17]。

近年来,在人类活动强度不断加大和全球气候变化等因素的共同作用下,汾河流域植被减少退化,水质污染,供需矛盾突出,水土流失问题日益凸显。学者在汾河流域开展了土地利用变化的研究工作,但这些研究多集中在部分河段或较短的时间序列^[18-22],针对整个流域 LUCC 长时间时空变异对 ESV 影响的研究匮乏^[23]。此外,2017 年山西省全面启动了汾河流域生态保护修复工作,这一工作的顺利进行,全面取决于生态环境保护和建设的成效。因此,本文以汾河流域 1980,1990,2000,2010 年和 2020 年 5 个时间节点的土地利用数据为数据源,分析 1980—2020 年汾河流域土地利用格局的变化,用修正的生态系统服务价值评估模型、生态系统服务价值强度(ESVI)、动态度(EV)表征流域生态系统服务功能的总价值的时空变化特征,通过马尔科夫转移矩阵、价值损益流向表探讨 LUCC 影响下 ESV 对土地利用方式的空间依赖性,这些问题的探讨为生态修复工程和土地利用调控提供科学参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

汾河是黄河的第二大支流,汾河流域地处山西省的中部和西南部,位于黄土高原东部,包括全省 9 个地市的 51 个市(县、区),流域地形为一条地堑型纵谷,流域面积 39 721 km²,占山西省国土面积的 25.3%(110°30′—113°32′E,35°20′—39°00′N)。流域属温带大陆性季风气候,为半干旱、半湿润气候过渡带,雨热同季,光热资源较为丰富。年均气温为 10℃,多年均降水量为 500 mm。主要的土壤类型为褐土、棕壤、浅色草甸土和淡褐土。汾河流域是山西省经济最发达,人口密度最高、城镇最集中区域,生态功能区以及粮棉主要产区,在全省经济发展和社会稳定中占有十分重要的地位^[24]。但近年来,由于流域内人口增长,经济的发展过度开采,使得大部分区域植被覆盖率低,再加上黄土丘陵沟壑区造成的支离破碎的地形使得流域内水土流失严重。在行政区划上,汾河流经忻州、太原、吕梁、晋中、临汾、运城 6 个地市,主要涉及 35 个县域(涉及面积极小的县域不统计在内)。按照流域自然地形特点和不同流域段河流水文状况,将汾河分为上游(包括宁武县、静乐县、岚县、娄烦县和古交市)、中游(包括阳曲县、太原市市辖区、寿阳县、晋中市市辖区、交城县、清徐县、文水县、太谷县、祁县、汾阳市、平遥县、孝义市、介休市、交口县、灵石县、汾西县和霍州市)和下游(包括洪洞县、古县、临汾市辖区、浮山县、襄汾县、翼城县、曲沃县、河津市、稷山县、新绛县、万荣县、侯马市和绛县)3 段^[25]。

1.2 数据来源

1980,1990,2000,2010 和 2020 年汾河流域土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学院数据中心,中国多时期土地利用/土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC),空间分辨率为 30 m(<http://www.resdc.cn>)^[26]。其中 1980 年土地利用重建主要使用 Landsat-MSS 遥感影像数据,1990,2000 和 2010 年各期数据的遥感解译主要使用 Landsat-TM/ETM 遥感影像数据,而 2020 年土地利用/覆盖数据更新主要使用 Landsat 8 遥感影像数据。DEM(digital elevation model)数字高程数据来源于地理空间数据云平台,参照中国科学院资源环境数据中心土地分类系统,结合汾河流域土地利用类型特点,将研究区土地类型分为 6 种 1 级类型:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。社会与经济数据来源于 1990—2020 年《山西省统计年鉴》等统计资料。

1.3 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵用于反映在研究时期初至末汾河流域各用地类型面积间相互转化的动态过程^[27]。计算公式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S 为面积(km^2); n 为汾河流域土地利用类型数; i, j 分别为研究初末期土地利用类型。

1.4 生态系统服务价值估算

在 Costanza 等^[3]提出的 ESV 研究的基础上,参考谢高地等^[28-29]建立的生态系统服务价值当量表,其中建设用地采用李晓赛等^[30]的研究结果来获取汾河流域生态系统服务各项的当量因子(表 1)。根据生态系统服务价值当量因子为单位面积粮食价值的 1/7,结合研究区域具体情况,1980—2020 年汾河流域平均粮食产量为 $3\ 537.72\ \text{kg}/\text{hm}^2$,2020 年平均粮食价格为 2.35 元/kg,因此修正得到汾河流域生态系统服务当量因子为 1 187.66 元/ hm^2 。结合表 1 得到研究区各生态系统服务项目价值系数。

表 1 汾河流域生态系统服务价值当量因子

服务项目	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
气体调节	0.50	3.50	0.80	0	0	0
气候调节	0.89	2.70	0.90	0.46	0	0
水源涵养	0.60	3.20	0.80	20.38	-7.51	0.03
土壤形成与保护	1.46	3.90	1.95	0.01	0.02	0.02
废物处理	1.64	1.31	1.31	18.18	-2.46	0.01
生物多样性保护	0.71	3.26	1.09	2.49	0.34	0.34
食物生产	1.00	0.10	0.30	0.10	0.01	0.01
原材料	0.10	2.60	0.05	0.01	0	0
娱乐文化	0.01	1.28	0.04	4.34	0.01	0.01

根据以下计算公式,得到各年份汾河流域土地利用类型的生态系统服务价值(ESV)。

$$VC_i = F_i \cdot V \quad (2)$$

$$ESV = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot VC_i) \quad (3)$$

$$ESV_f = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot VC_{fi}) \quad (4)$$

式中: F_i 为第 i 类土地类型的当量因子; V 为修正后的单位当量因子(元/ hm^2); VC_i 为 i 地类的 ESV 系数(元/ hm^2); ESV 为生态系统服务价值(元); A_i 为 i 地类的面积(hm^2); ESV_f 为第 f 项服务功能的价值(元); VC_{fi} 为 i 地类的第 f 项生态系统服务价值(元)。

1.5 生态系统服务价值动态度和强度

选取生态服务价值动态度(EV)用于描述 1980—2020 年汾河流域生态服务价值的变化趋向及其程度,计算方法参考前人研究结果^[17]。用生态系统服务价值强度(ESVI)来表征研究区行政区划单位流域生态系统服务功能总价值的空间分布^[11,31]。

1.6 生态系统服务价值流向分析

本研究利用马尔科夫转移矩阵,来计算各土地利用类型转化数据和不同地类之间相互转化所引起的生态系统服务价值的损益,分析土地利用变化对生态系统服务价值的影响^[32-33]。

1.7 空间自相关分析

空间自相关分析是用于衡量土地利用及 ESV 的空间分布是否具有集聚性,包含全局和局部空间自相关两个方面^[34]。Anselin^[35]在此基础上提出双变量空间自相关,来揭示空间单元属性值与邻近空间上其他属性值的相关性。本文空间自相关分析采用 GeoDa 1.14.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 土地利用结构变化

1980—2020 年汾河流域土地利用情况如图 1 所示。由图 1 可以看出,不同地类的比例差异明显。汾河流域主要土地利用类型为耕地、林地和草地,分别占流域总面积的 39.21%~41.75%,28.06%~28.61%和 23.91%~25.70%,3 者面积之和约占流域总面积的 90%以上。汾河流域耕地和草地面积逐年减少,分别由 1980 年的 41.75%和 25.70%减少到 2020 年的 39.21%和 23.91%,面积分别减少了 1 029.76 和 724.96 km^2 。林地的面积呈 1980—2000 年减少,2000—2020 年总体增加的趋势。水域总体减少,未利用地无变化。建设用地规模不断外延,面积逐年增加,由 1980 年的 3.49%增加到 2 020 年的 7.69%,增加了 1 703.64 km^2 。由图 1 可知,汾河流域土地利用具有显著的空间差异性。1980—2020 年,太原盆地耕地减少最为显著,主要因为太原盆地内大面积的退耕还林还草和城市建设用地的扩张。林地主要分布在吕梁山,太行山等山系。建设用地在各地级城市中,2000—2010 年扩张明显。1980—2020 年耕地和草地持续减少,是所有土地利用类型中减少速度最快的两类。4 个时期的土地变化速率在 2000—2010 年较为强烈,建设用地动态度最高,未利用地和水域次之。1980—1990 年、1990—2000 年、2010—2020 年各地类动态度远小于 2000—2010 年,说明土地利用表现为先剧烈变化后趋于稳定的态势。

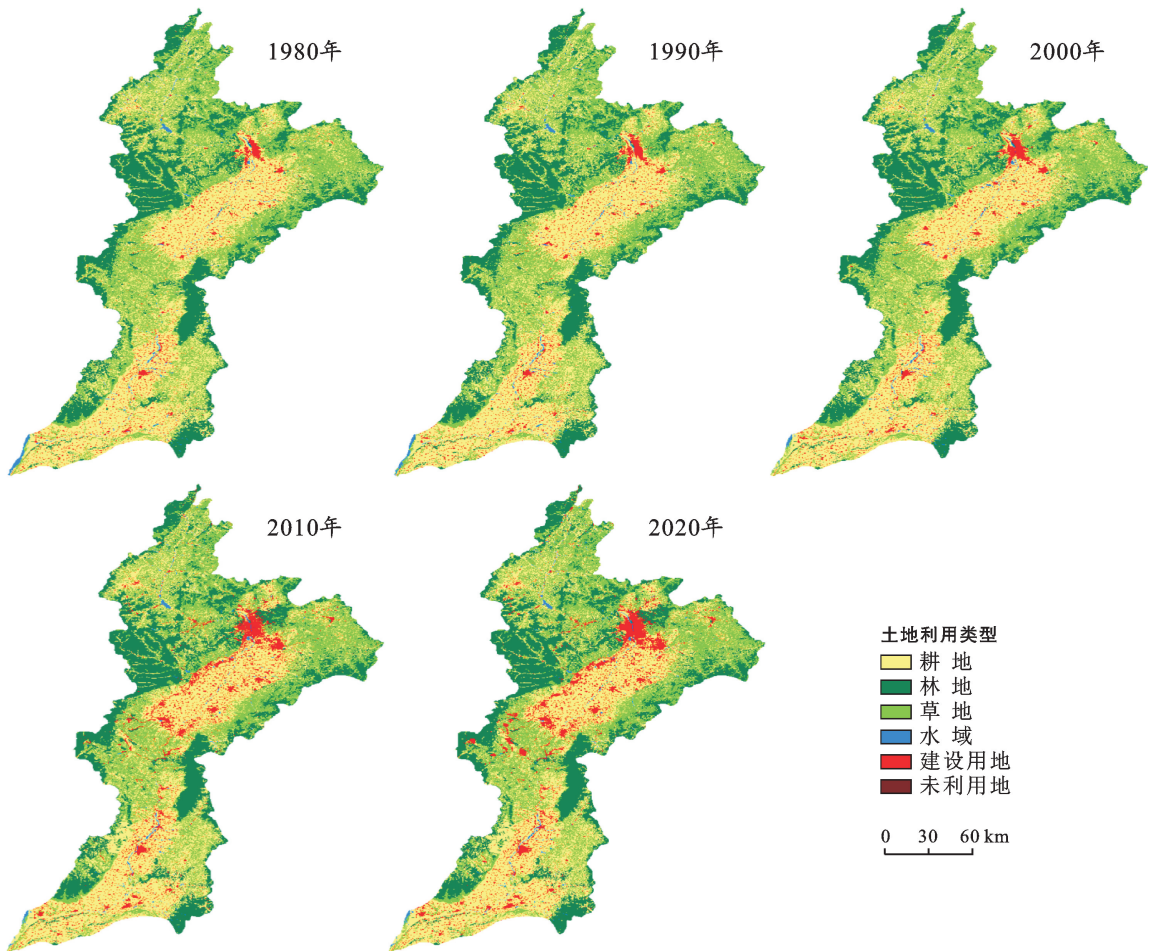


图 1 汾河流域 1980—2020 年土地利用类型

土地转移主要发生在耕地、林地、草地和建设用地之间。1980—2000 年汾河流域的耕地面积减少 270.4 km², 主要转向建设用地, 占比为 79.63%。草地和水域面积的减少主要转向耕地, 占比分别为 80.25% 和 68.47%。2000—2020 年汾河流域耕地转移面积为 1 928.05 km², 远高于 1980—2000 年的 270.4 km², 主要转向建设用地和草地, 占比分别为 67.19% 和 22.06%; 草地转移面积为 1 172.43 km², 主要转向耕地、林地和建设用地, 占比分别为 53.13%, 23.95% 和 22.03%; 林地和水域均主要转向耕地和建设用地。不同时期汾河流域土地利用变化不同, 但 2000—2020 年比 1980—2000 年的土地变化范围更大。由表 2 可知, 整个研究期(1980—2020)内, 汾河流域耕地持续转出, 转出面积为 2 140.19 km², 69.48% 转向建设用地; 接下来为草地转向耕地。其次, 以建设用地扩张为主, 共有 1 486.94 km² 耕地, 87.48 km² 林地, 274.71 km² 草地, 27.01 km² 水域转为建设用地。

2.2 生态系统服务价值的时间变化特征

根据公式计算出 1980—2020 年研究区各个土地利用类型的生态系统服务价值和不同年份生态服务项

目的 ESV 值(表 3—4)。1980 年汾河流域总生态系统服务价值为 528.327 亿元, 随后呈逐年减少的趋势, 至 2020 年 ESV 值为 493.402 亿元。1980—2000 年 ESV 减少 1.184%, 2000—2020 年 ESV 减少 5.491%。各地类 ESV 中, 林地 ESV 占比最大, 1980—2020 年占比均大于 56%, 其次为耕地和草地, 两者平均占比分别为 26.35% 和 16.91%。水域平均占比 3.56%。根据图 1 结果林地、耕地、草地和水域占流域总面积分别为 28.06%~28.61%, 39.21%~41.75%, 23.91%~25.70% 和 0.73%~0.92%, 其中, 林地和水域以平均 29% 的面积占比贡献了流域 61% 的 ESV(表 3), 说明林地和水域对汾河流域生态服务价值贡献较大。1980—2020 年, 除了林地 ESV 增加 1.10%, 耕地、草地和水域 ESV 均减少。这与其土地利用面积占比变化趋势一致。建设用地土地利用面积增加, 但由于其生态系统服务当量因子为负值, 因此其 ESV 减少。退耕还林政策的实施和城镇化是导致这一变化的关键原因。自 1978 年改革开放以来, 城市化进程逐步加快。特别是 2000 年之后, 建设用地加速扩张。山西省城市化率由 1990 年的 23.90% 提升至 2018 年的 58.41%。

表 2 汾河流域 1980—2020 年土地利用转移矩阵

km²

项目	1980 年						总计	
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地		
2020 年	耕地	14 771.095	133.083	716.074	94.367	165.728	0.600	15 880.946
	林地	170.966	11 049.627	295.573	2.379	3.033	0.124	11 521.702
	草地	431.136	120.576	9 110.741	18.318	9.795	0.084	9 690.651
	水域	50.532	4.289	10.729	230.600	1.334	0.075	297.559
	建设用地	1 486.940	87.476	274.706	27.013	1 233.1	1.529	3 110.763
	未利用地	0.614	0.750	1.281	0.111	0.081	1.429	4.267
	总计	16 911.282	11 395.801	10 409.104	372.786	1 413.072	3.841	40 505.888

表 3 汾河流域 1980—2020 年各地类 ESV 时间变化

土地类型	ESV/(10 ⁸ 元·a ⁻¹)					变化率/%	
	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年	1980—2000 年	2000—2020 年
耕地	138.790	138.175	137.972	132.083	130.339	-0.589	-5.532
林地	295.766	295.561	294.975	300.722	299.030	-0.268	1.375
草地	89.509	89.496	88.828	83.762	83.275	-0.761	-6.251
水域	20.355	19.974	19.001	16.070	16.254	-6.653	-14.456
建设用地	-16.095	-17.097	-18.708	-31.706	-35.499	-16.238	-89.749
未利用地	0.002	0.004	0.004	0.003	0.002	123.052	-49.862
总计	528.327	526.114	522.071	500.935	493.402	-1.184	-5.491

从表 4 可以看出,1980—2020 年汾河流域 4 类一级 ESV 与总 ESV 变化一致,均为逐年减少(调节服务减少最多),仅文化服务于 2010 年略有上升。一级服务类别中,占主要的为支持服务和调节服务,分别平均占总 ESV 的 47.695%和 36.268%。支持服务中

以土壤形成与保护服务价值最高,平均占该类服务的 42.896%;调节服务中以气体调节服务价值最高,平均占该类服务的 35.926%。各二级服务 ESV 中,水源涵养服务价值降幅最大,为 29.116%;其次是废物处理,为 13.473%;原材料服务略有上升。

表 4 汾河流域不同生态服务项目的 ESV 值

10⁸ 元/a

一级服务类别	二级服务类别	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年	变化率/%
供给服务	食物生产	25.209	25.119	25.059	24.030	23.754	-5.772
	原材料	37.825	37.792	37.714	38.277	38.047	0.587
支持服务	土壤形成与保护	106.262	106.094	105.770	104.213	103.420	-2.675
	废物处理	70.790	70.222	69.219	62.756	61.252	-13.473
	生物多样性保护	73.539	73.460	73.256	73.047	72.685	-1.161
调节服务	气体调节	67.310	67.231	67.049	66.983	66.532	-1.155
	气候调节	65.754	65.644	65.453	64.746	64.253	-2.283
	水源涵养	61.678	60.640	58.769	47.061	43.720	-29.116
文化服务	娱乐文化	19.960	19.912	19.784	19.821	19.738	-1.114
合计		528.327	526.114	522.071	500.935	493.402	-6.611

2.3 生态系统服务价值及动态空间分布特征

以县为单元,对汾河流域所辖区生态系统服务价值(ESVD)进行空间分析,采用自然断点法,将 1980—2020 年 ESVI 由低到高分 5 个等级,将 ESVI 变化的动态度(EV)分为快速下降(-0.827%~-0.539%),较快下降(-0.539%~-0.216%),缓慢下降(-0.216%~-0.065%),缓慢下降至上升(-0.065%~0.017%),平稳上升(0.017%~0.233%)5 个等级,结果如图 2 所示。

汾河上游生态系统服务价值整体处于较高水平,1980 年除岚县 ESVI 为 IV 级外,其他 4 县均处于 V 级。2020 年除岚县 ESVI 为 III 级外,其余 4 县为 IV 级。EV 除岚县为较快下降,其余 4 县为缓慢下降。汾河上游地处山区,林草覆盖率较高,根据土地利用数据图(图 1),上游林地和草地面积占比约 66%,林草覆盖率是中游的 1.2 倍,下游的 1.9 倍,但同时由于自然条件的限制,经济发展水平较低,土地开发利用程度低,因此研究期内 ESVI 和 EV 变化较缓。

汾河中游 17 个县,1980 年有阳曲县、寿阳县、交城县和交口县 ESVI 为 V 级,2020 年只有交城县 ESVI 为 V 级,ESV 变化除汾西县和阳曲县为缓慢下降至上升外,太原市市辖区、清徐县、孝义市和介休市 4 个县为快速下降,变化速度为平均水平的 3 倍,6 个县为较快下降,5 个县为缓慢下降。汾河中游地处太原盆地,地形平坦,人口密集,城镇化水平较高,伴随着建设用地面积的快速增加及耕地面积的减少,研究期内 ESVI 和 EV 变化较多。汾河下游生态系统服务价值总体较低,1980 年只有洪洞县和古县 ESVI 为 IV 级,2020 年均均为 III 级及以下。13 个县中,9 个县 EV 的变化为下降。其余 4 个县为缓慢下降至上升。汾河下游地势较为平坦,交通便利,有利于社会经济快速发展,但由于未科学合理地利用土地使得 ESV 较低。

通过相关分析可知,建设用地面积的变化是空间 EV 差异的主要影响因素($r^2=0.42, p<0.001$),其次是耕地和水域面积的变化($r^2=0.29, p<0.001$; $r^2=0.15, p<0.01$)。快速的工业化和城市化导致汾河流域草地和水域等高价值地类的破坏,流域生态系统服务价值有所下降,生态环境保护需求迫切。

2.4 土地利用变化对生态系统服务价值的影响

2.4.1 生态系统服务价值流向特征 通过计算马尔科夫转移矩阵得到 1980—2020 年研究区 ESV 损益流向(表 5),并分析 LUCC 对 ESV 的影响。分析结果表明,耕地转建设用地和草地转建设用地是 ESV 减少的主要原因,分别是 ESV 减少 2 889.73 和 595.71 万元,对 ESV 减少的贡献率分别为 59.59%

和 12.28%;草地转林地和建设用地转耕地是主要的生态服务增值类型,分别使 ESV 增加了 421.72 和 304.06 万元,对 ESV 增加的贡献率分别为 32.47%和 23.41%。其他土地利用类型向建设用地的转移是研究区 ESV 下降的主要原因,而其他土地类型转为林地和水域可使 ESV 价值升高,研究结果可以对制定改善生态系统服务功能的政策提供参考意见。

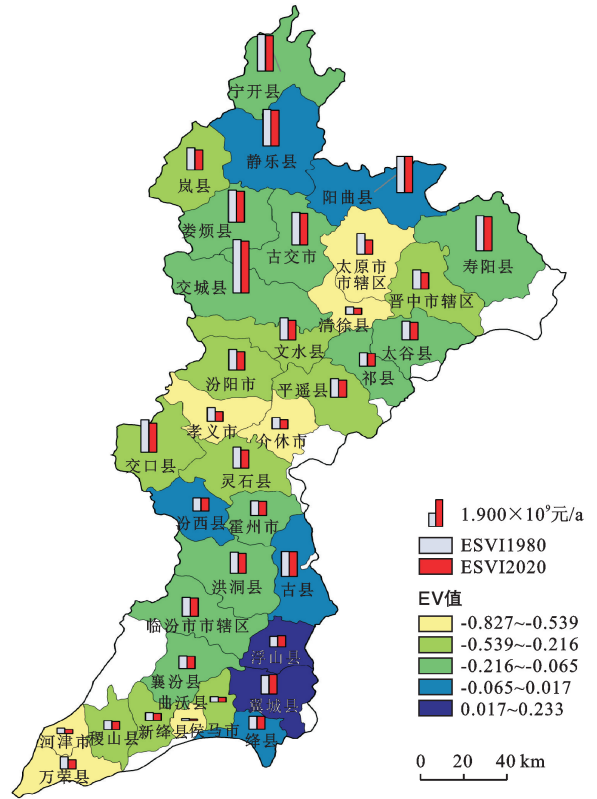


图 2 汾河流域生态系统服务价值(ESV)及动态度(EV)空间分布

表 5 汾河流域 1980—2020 年生态系统服务价值损益流向

万元

项目	2020 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1980年						
耕地	—	219.33	10.55	241.28	-2 889.73	-0.53
林地	-153.75	—	-117.51	11.46	-403.05	-1.86
草地	-20.96	421.72	—	55.01	-595.71	-1.01
水域	-411.34	-4.44	-56.44	—	-182.59	-8.82
建设用地	304.06	9.11	16.59	8.58	—	0.10
未利用地	0.45	0.28	0.04	0.43	-1.87	—

2.4.2 土地利用程度指数对 ESVI 的影响 为进一步探究汾河流域各行政区土地利用程度与 ESVI 之间的空间关系,采用双变量空间自相关分析结果显示, Moran'I 指数均小于 0,表明土地利用程度与 ESVI 之间存在显著的空间负相关关系。1980—2020 年,局部 Moran'I 指数呈减少趋势(1980 年为 -0.305 169; 2000 年为 -0.302 468; 2020 年为 -0.277 611),体现了研究区局部空间负向自相关程度呈增加趋势。在 z 检验的基础上($p=0.05$)绘制双变量局部空间自相

关 LISA 图(图 3),表征区域土地利用程度与其相邻 ESVI 之间的局部空间关系。

由图 3 可知,土地利用程度与 ESVI 呈高一高聚集的太原市;呈高一低集聚的区 1980 年是翼城和侯马,2000 年增加了新绛县,到 2020 年只剩侯马地区;呈现低—高聚集的区县分布最为广泛,主要分布在汾河中上游地区,包括宁武县、静乐县、阳曲县、岚县、娄烦县古交等地;呈低—低集聚的区只有绛县,未发生空间分布变化。

1980—2020 年研究区局部空间集聚存在明显的相似性。汾河上游多是林地、草地分布区,林草地分布占所在区县 52% 至 76%,生态优势明显。但是这些地区由于受到地形和交通的限制,经济发展落后,

因此空间上表现为低—高聚集特点。翼城、侯马和新绛等地势低平,多为黄土丘陵区。但交通便捷,发展规模较快,使得空间上表现为明显的高土地利用程度—低生态系统服务强度的聚集格局。

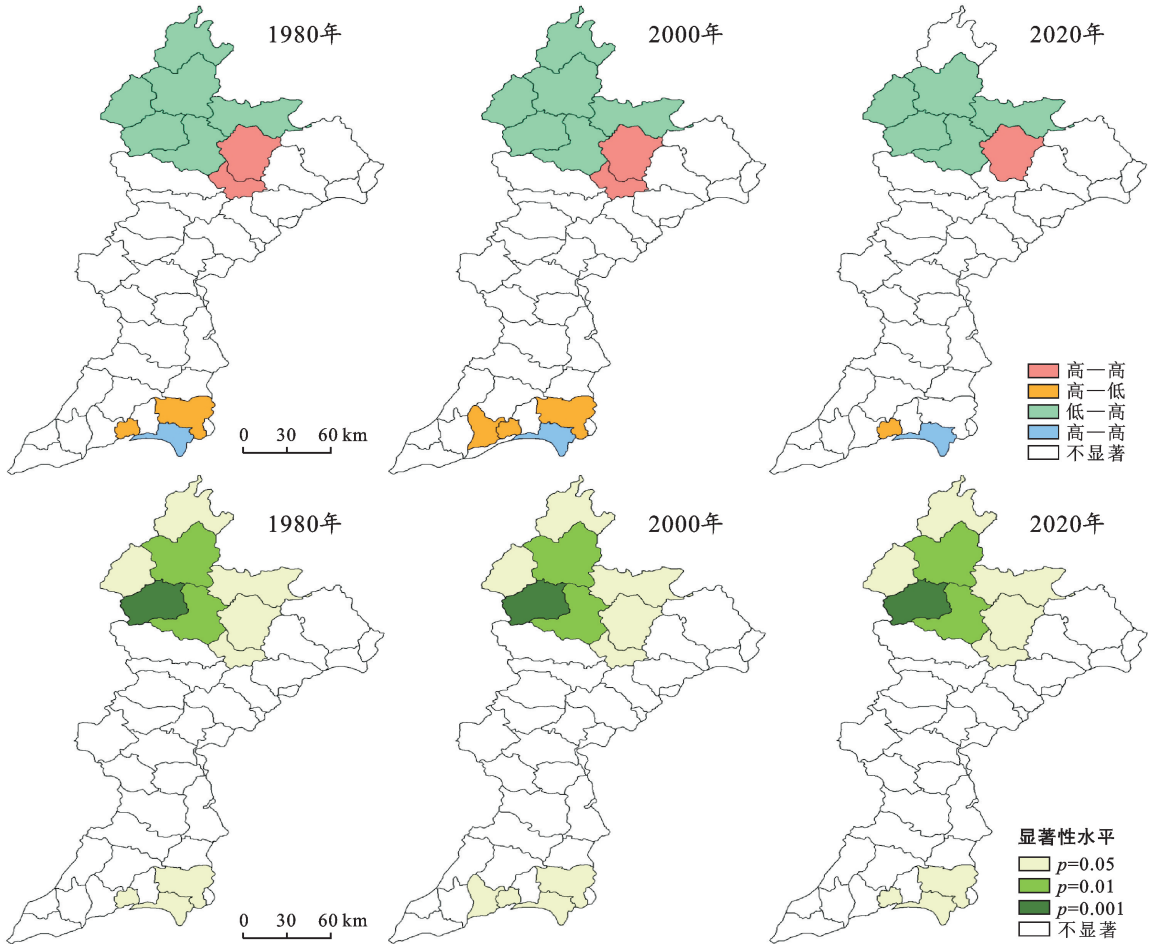


图 3 汾河流域双变量 LISA 分布及显著性水平

3 讨论

本研究利用汾河流域 1980—2020 年 5 期 Landsat-MSS/TM/ETM 遥感影像解译数据研究了流域土地利用变化特征,结果显示 1980—2020 年生态系统服务价值降低。从 2000 年开始的退耕还林还草工程取得了一定成效,林地面积有所恢复,但整个流域生态系统服务价值并没有呈现增加态势,如何科学合理利用土地和协调经济发展依然任重道远。此结论与伍博炜等^[23]在研究汾河流域 LUCC 对 ESV 的影响时得出的 2010—2016 年汾河流域 ESV 呈现减少的趋势一致。从空间分布来看,汾河上游县域生态系统服务价值整体高于中下游地区,但呈现低土地利用程度—高生态系统服务价值聚集的分布情况。汾河流域中下游地区地形平坦,人口密度高,城镇化较高,建设用地快速扩张对生态环境造成了较大影响,使得区

域生态系统服务价值相对较低^[36]。

本文在揭示土地利用变化对生态系统服务价值的时空影响对该地区生态保护政策的制定具有一定意义,但限于数据和参数设定的局限性,不能完全反映流域的变化情况。特别是有关建设用地的生态服务价值计算没有统一的评价方法,因此关于建设用地的生态服务价值核算将是下一步的研究重点。在今后的研究中,应进一步识别生态系统服务功能的变化特征,描述生态系统服务与人类活动的影响,为增加流域内生态系统服务供给能力制定措施。

4 结论

(1) 1980—2020 年,耕地、林地和草地在汾河流域土地利用中处于主导地位,土地利用整体变化主要表现为耕地和草地的减少,建设用地的扩张。不同时期汾河流域土地利用变化不同,但 2000—2020 年比

1980—2000 年的土地变化程度更剧烈。

(2) 流域生态系统服务价值逐年减少,由 1980 年的 528.327 亿元减少至 2020 年的 493.402 亿元,减少了 6.611%。林地和水域对汾河流域生态服务价值贡献较大。一级服务中调节服务减少最多,二级服务中水源涵养价值降幅最大。

(3) 汾河流域 ESVI 空间分布总体上呈上游高,中下游低的趋势。通过分析动态度(EV)发现空间差异明显,汾河中下游地区 EV 变化大于汾河上游。建设用地和耕地、水域面积的变化是空间 EV 差异的主要影响因素。

(4) 研究期间,耕地和草地转建设用地是 ESV 减少的主要原因,不同土地利用程度与 ESVI 双变量 LISA 聚集图呈现出明显的空间负相关性,且在不同时期异质性程度变化不大,主要以汾河上游低土地利用程度与高 ESVI 聚集分布为主。

[参 考 文 献]

- [1] Mendoza M E, Granados E L, Geneletti D, et al. Analysing land cover and land use change processes at watershed level: A multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico(1975—2003)[J]. *Applied Geography*, 2011, 31(1):237-250.
- [2] 宋小青.论土地利用转型的研究框架[J].*地理学报*, 2017, 72(3):471-487.
- [3] 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.
- [4] Alcamo J. *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment* [M]. UK: Island Press, 2003.
- [5] Wilson M A, Carpenter S R. Economic valuation of freshwater ecosystem services in the United States: 1971—1997 [J]. *Ecological Application*, 1999, 9(3): 772-783.
- [6] 杨越, 哈斯, 社会石, 等.基于 RS 和 GIS 的宁夏盐池县土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].*水土保持研究*, 2014, 21(5):100-105.
- [7] 陈端吕, 陈哲夫, 彭保发.土地利用生态服务价值与经济发展的协调及空间分异:以西洞庭湖区为例[J].*地理研究*, 2018, 37(9):1692-1703.
- [8] Seppelt R, Fath B, Burkhard B, et al. Form follows function? Proposing a blueprint for ecosystem service assessments based on reviews and case studies [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 21:145-154.
- [9] Andrew M E, Wulder M A, Nelson T A, et al. Spatial data, analysis approaches, and information needs for spatial ecosystem service assessments: A review [J]. *Giscience & Remote Sensing*, 2015, 52(3):344-373.
- [10] Fu Bojie, Zhang Liwei, Xu Zhihong, et al. Ecosystem services in changing land use [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 833-843.
- [11] 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.
- [12] 赵志刚, 余德, 韩成云, 等.鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力[J].*生态学报*, 2017, 37(24): 8411-8421.
- [13] 汤洁, 黄璐思, 王博.吉林省辽河流域生态系统服务价值对 LUCC 的响应分析[J].*环境科学学报*, 2015, 35(8): 2633-2640.
- [14] 何毅, 唐湘玲.1998—2018 年漓江流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].*湖北农业科学*, 2020, 59(22):75-80.
- [15] 朱利英, 魏源送, 王春荣, 等.1980—2015 年北运河流域土地利用时空变异及其对生态服务价值的影响[J].*环境科学学报*, 2021, 41(1):301-310.
- [16] Hasan S S, Zhen L, Miah M G, et al. Impact of land use change on ecosystem services: A review [J]. *Environmental Development*, 2020, 34: 100527.
- [17] 刘园, 周勇, 杜越天.基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J].*长江流域资源与环境*, 2019, 28(10):2429-2440.
- [18] 王怡帆, 师学义.基于小流域的汾河上游生态服务价值演变[J].*水土保持研究*, 2020, 27(4):262-269, 278.
- [19] 刘焕才, 崔敏华, 李园园, 等.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[J].*安徽农业大学学报*, 2021, 48(4):635-640.
- [20] 董敏, 苏常红, 王亚璐.汾河上游流域景观破碎化与生态系统服务关系研究[J].*山西大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(1):186-195.
- [21] 高婧, 李晋昌, 杨永刚.汾河源区生态系统服务价值的时空变化[J].*中国沙漠*, 2015, 35(3):814-820.
- [22] 张静, 任志远, 张嘉琪.汾河中下游土地生态系统固碳释氧动态测评[J].*干旱地区农业研究*, 2018, 36(2): 242-249.
- [23] 伍博炜, 杨胜天, 邵南方, 等.黄土高原生态脆弱区土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以汾河流域为例[J].*水土保持研究*, 2019, 26(5):340-345.
- [24] 韩佳, 任世芳.基于生态足迹法的汾河流域水资源可持续利用研究[J].*水利科技与经济*, 2019, 25(2):8-15.
- [25] 山西省水利厅.汾河志[M].山西太原:山西人民出版社, 2006.
- [26] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等.中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC).中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018.

模数确定的土壤流失控制值一般在山区、丘陵区较高,在平原区较低。以它控制生产建设项目水土流失强度,可以满足维护生态系统文化服务功能的需求,但在山区不能满足维护供给服务功能的要求。将基于容许土壤流失量和背景土壤侵蚀模数两种方法结合起来,选取两者中更为严格的值作为北京市生产建设项目土壤流失控制值,能够起到维护不同区域多重生态系统服务功能的作用。本研究提出的维护多重生态系统服务功能的土壤流失控制值确定方法可以为有关管理部门制定水土流失防治目标值提供有益的补充。

[参 考 文 献]

- [1] 水利部水土保持监测中心.GB/T50434-2018 生产建设项目水土流失防治标准[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [2] 水利部水土保持司.SL190-96 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,1997.
- [3] 水利部水土保持司和水利部水土保持监测中心.SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [4] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.
- [5] 王志刚,韩培,周耀华,等.超大城市水土流失空间分布格局及其防治策略:以武汉市为例[J].水土保持通报,2018,38(5):128-132,359.
- [6] 焦菊英,贾燕锋,景可,等.自然侵蚀量和容许土壤流失量与水土流失治理标准[J].中国水土保持科学,2008,6(4):77-84.
- [7] 余新晓,吴岚,饶良懿,等.水土保持生态服务功能评价方法[J].中国水土保持科学,2007,5(2):110-113.
- [8] 张甘霖.城市土壤的生态服务功能演变与城市生态环境保护[J].科技导报,2005,23(3):16-19.
- [9] 傅伯杰.生态系统服务与生态系统管理[J].资源环境与发展,2013,7(7):6-8.
- [10] 王志刚,王家乐,韩培,等.北京市容许土壤流失量特征分析与空间分布图制作[J].中国水土保持科学,2020,18(5):89-95.
- [11] 北京市水土保持公报 2020[M].北京:北京市水务局,2021.
- [12] 北京市水土保持规划(2016—2030年)[M].北京市水务局,2017.
- [13] 全国水土保持规划编制工作领导小组办公室,水利部水利水电规划设计总院.中国水土保持区划[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
- [14] 北京市主体功能区规划[M].北京:北京市人民政府,2012.
- [15] 陈奇伯,齐实,孙立达.土壤容许流失量研究的进展与趋势[J].水土保持通报,2000,20(1):9-13.
- [27] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-650.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 李晓赛,朱永明,赵丽,等.基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J].中国生态农业学报,2015,23(3):373-381.
- [31] 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.
- [32] 杨国清,吴志峰,祝国瑞.广州地区土地利用景观格局变化研究[J].农业工程学报,2006,22(5):218-221.
- [33] 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.
- [34] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等.海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J].生态学报,2019,39(7):2366-2377.
- [35] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA[J]. Geographical Analysis, 1995,27(2):93-115.
- [36] 孟雅丽,苏志珠,马杰,等.基于生态系统服务价值的汾河流域生态补偿研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(8):76-81.

(上接第 329 页)