

基于土地利用的沂河流域生态系统服务价值动态变化

李子君, 刘金玉, 姜爱霞, 于元赫

(山东师范大学 地理与环境学院, 济南 250300)

摘要:为了保护生态环境和合理利用土地资源,以 1978 年、1985 年、1995 年、2005 年、2015 年 5 个时点的土地利用数据为基础,采用生态系统服务价值评估法、空间自相关分析、热点分析等方法分析了 1978—2015 年沂河流域生态系统服务价值时空演变规律。结果表明:(1) 流域土地利用变化趋势为耕地和草地减少,建设用地、水域、林地、未利用地增加。各地类间的转移以耕地向建设用地的转移为主,其次是耕地向林地以及耕地和草地之间的转移。(2) 流域生态系统服务总价值变化呈“先减少后增加再减少”的波动减少趋势。耕地和草地的服务价值减小,林地、水域和未利用地的服务价值增加;土壤形成与保护、食物生产、生物多样性保护、气体调节、原材料和气候调节的服务价值减小;水源涵养、娱乐文化和废物处理的服务价值增加。(3) 流域生态系统服务价值呈空间集聚分布格局且集聚程度略有减弱。冷点区范围呈明显的扩张趋势,且集中分布于平邑县、费县和兰山区的城区内;热点区范围基本保持不变,主要分布在蒙山山脉、水库、河流和低山丘陵。

关键词:土地利用变化;生态系统服务价值;时空变化;沂河流域

中图分类号:X171; F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0269-07

Temporal and Spatial Dynamics of Ecosystem Service Value in Benghe River Basin Based on Land Use Change

LI Zijun, LIU Jinyu, JIANG Aixia, YU Yuanhe

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250300, China)

Abstract: In order to protect the regional ecological environment and rational use of land resources, based on land use data in five time points in 1978, 1985, 1995, 2005 and 2015, the temporal and spatial evolution of ecosystem service value in the Benghe River Basin from 1978 to 2015 was analyzed by means of the adjusted equivalent factor valuation model of ecosystem service value, spatial autocorrelation analysis and hot spot analysis. The results showed that: (1) the trend of land use change in the basin is the reduction of cultivated land and grassland, and the increase of construction land, water area, forestland and unused land; the transfer between land use types is mainly based on the transfer of cultivated land to construction land, followed by the transfer of cultivated land to forestland and the transfer between cultivated land and grassland; (2) the change of ecosystem service value generally presents the decreasing trend; the specific change process was reduced at first, and then increased, and finally decreased; the ecosystem service value of cultivated land and grassland reduced, and the ecosystem service value of the forestland, water area and unused land increased; the ecosystem service value of soil formation and conservation, food production, biodiversity conservation, gas regulation, raw materials and climate regulation reduced, and the ecosystem service value of water conservation, recreational culture and waste disposal increased; (3) the ecosystem service value of the Benghe River Basin showed the spatial agglomeration distribution pattern and the degree of agglomeration was slightly weakened; the cold spot area had a clear expansion trend and concentrated in the built-up areas of Pingyi County, Fei County and Lanshan District, the hotspots area remained fundamentally unchanged, and the hotspots mainly distributed in the Mengshan Mountains, reservoirs, river and low hills.

收稿日期:2019-04-11

修回日期:2019-04-26

资助项目:国家自然科学基金(41101079);教育部人文社会科学研究规划资助项目(17YJAZH050)

第一作者:李子君(1974—),女,山东莒县人,教授,博士,主要从事区域土地利用变化与资源环境管理研究。E-mail:lizijun@sdnu.edu.cn

通信作者:姜爱霞(1961—),女,山东文登人,高级实验师,主要从事土地利用变化研究。E-mail:jaixia79@sina.com

Keywords: land use change; ecosystem service value; temporal and spatial variation; Benghe river basin

生态系统是人类赖以生存和发展的基础,生态系统结构的变化可以改变生态系统服务功能,而土地利用变化是影响生态系统的主要驱动力^[1]。在城市化快速发展时期,经济发展和人类高强度活动使土地利用和土地覆被发生变化,影响生态系统的服务功能,从而导致生态系统服务价值的变化^[2-3]。因此,土地利用变化对生态系统服务功能有重要的影响^[4-5]。土地利用变化的生态效应及其对生态系统服务功能的影响成为土地利用变化研究的重要内容 and 热点之一^[6-7]。

自生态系统服务功能提出以来,在生态系统服务功能概念及其内涵、价值量化评估的方法和应用等方面取得了较大的进展。Costanza 等^[8]开展的“全球生态系统服务价值评估”研究使之成为生态学等相关学科的研究热点,也是众多学者进行生态系统服务价值评估的理论基础;Daily^[9]详尽描述了生态系统服务功能的概念、研究简史、价值评估等。我国学者也越来越重视对生态系统服务价值的评估,欧阳志云等^[10]论述了生态系统服务价值的内涵和评估方法,探讨了生态服务功能与可持续发展研究的关系;谢高地等^[11]基于专家知识提出了中国陆地生态系统服务价值当量表,奠定了国内生态系统服务价值评估研究的基础,基于此国内众多学者在不同尺度上对森林、城市、流域、湖泊、绿洲、湿地等生态系统服务的经济价值进行了评估^[12-19]。国内外学者在生态系统服务价值的量化计算、当量因子的修正、敏感性分析、时空分布格局及影响因素分析等方面已取得丰硕的成果,近年来利用 GIS 技术评估区域生态服务价值的研究日益增多,对区域 ESV 总体及内部空间分布格局的差异分析也不断增多^[20-25]。

沂河是沂河的一条重要支流,沂河流域是沂蒙山区的重要组成部分,也是全国生态建设重点区域。近几十年由于全球气候变化和人类活动的影响,流域土地利用发生了一定程度的变化,生态服务功能必然会随之变化,影响着区域生态安全和社会经济的可持续发展。因此,本文以土地利用数据为基础,定量研究流域生态系统服务价值的时空变化规律,为流域土地利用和生态建设提供科学依据。

1 研究区概况

沂河属沂河水系的一级支流,发源于山东省平邑县,流经费县、临沂市兰山区,在临沂市城北汇入沂河。沂河全长 153 km,流域面积 3 355.97 km²,地理位置位于 117°21′—118°21′E, 35°01′—35°43′N。主

要包括平邑县、费县的大部分和兰山区的一部分。沂河流域属于低山丘陵区,北部蒙山山脉峰峦叠嶂,西部和南部山岭环绕,东部为平原,流域地势西北高东南低。河流自西流向东南,大体与山脉的走向一致,具有树枝状发育格局。流域气候类型属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 13.1~13.9℃,年内降雨分配不均匀,多集中于夏秋季节,降水年际变化大。植被主要是暖温带落叶阔叶林,土壤类型有棕壤、褐土、潮土、砂姜黑土等。2015 年沂河流域总人口为 169.5 万人,GDP 为 524.9 亿元,第一、二、三产业比重为 13.28 : 44.75 : 41.97。根据 2015 年沂河流域的土地利用调查资料,流域内土地利用类型以耕地为主,占土地总面积的 62.54%,其次是林地、建设用地、草地、水域和未利用地。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

遥感影像分别是 1978 年美国马里兰大学地球数据中心的 MSS 影像(空间分辨率为 60 m×60 m),以及 1985 年、1995 年、2005 年和 2015 年地理空间数据云的 Landsat TM/ETM 遥感影像(空间分辨率为 30 m×30 m)。用 ENVI 软件对影像进行波段融合、几何纠正、拼接剪裁等预处理后,采用目视解译进行土地利用分类。将流域土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大类。分类结果经检验 Kappa 指数均在 0.8 以上,解译分类精度较好,满足应用精度要求。粮食作物播种面积及产量数据来源于《临沂统计年鉴》、《山东省统计年鉴》、《新中国农业 60 a 统计资料》;粮食价格数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用变化研究方法 土地利用变化的速度可以用土地利用动态度表示。单一土地利用动态度能够直观地反映各种地类变化的剧烈程度。计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:K 是单一土地利用动态度;U_a, U_b 分别为研究早期和晚期某一种土地利用类型的面积;T 是某种土地利用类型变化年份。

土地利用转移矩阵模型是分析区域土地利用变化方向的基础,可以反映研究区各土地利用变化的结构特征和转化方向^[26]。同时基于土地利用转移矩阵

分析生态系统服务价值的空间转移及数值变化,可以进一步明确生态系统服务价值的空间变化特征。

2.2.2 生态系统服务价值计算方法 谢高地等^[27]提出的当量因子表反映的是全国生态系统服务功能的平均水平,并不适合沂河流域的生态系统现状,因此本文根据该流域的情况对当量表进行适当修订。根据区域修正系数表^[28]获得山东省农田生态系统的生物量因子为 1.38,又由于沂河流域平均粮食产量是山东省平均粮食产量的 1.01 倍,因此沂河流域农田生态系统服务价值系数是全国水平的 1.39 倍。1978—2015 年沂河流域平均粮食产量为 4 815 kg/hm²,2015 年山东省平均粮食价格为 2.28 元/kg,计算出沂河流域生态系统服务价值当量因子为 1 568.31 元/hm²。将此与各生态服务价值当量值相乘,最终得出沂河流域生态系统单位面积服务价值系数表(表 1)。沂河流域生态系统服务价值的计算公式如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^n (A_k \times VC_k) \quad (2)$$

$$ESV_f = \sum_{i=1}^n (A_k \times VC_{fk}) \quad (3)$$

式中:ESV 和 ESV_f 分别是生态系统服务总价值和第 f 项服务功能价值; A_k 代表土地利用类型 k 的面积(hm²); VC_k 和 VC_{fk} 分别是土地利用类型 k 的生态系统服务价值系数和第 f 项服务功能价值系数。

表 1 沂河流域生态系统单位面积服务价值系数
元/hm²

生态系统服务功能	耕地	林地	草地	水域	未利用地
食物生产	2179.95	719.38	937.38	980.98	43.60
原材料	850.18	6496.25	784.78	653.99	87.20
气体调节	1569.56	9417.39	3269.93	3182.73	130.80
气候调节	2114.55	8872.40	3400.72	17025.42	283.39
水源涵养	1678.56	8916.00	3313.53	35119.01	152.60
废物处理	3030.13	3749.52	2877.54	31892.68	566.79
土壤形成与保护	3204.53	8763.40	4883.09	2615.94	370.59
生物多样性保护	2223.55	9831.58	4076.51	7760.63	871.98
娱乐文化	370.59	4534.30	1896.56	9962.38	523.19

2.2.3 空间统计分析方法 空间自相关分析是指某一空间变量的取值与相邻空间单元上该变量取值的相似性程度分析。运用全局 Moran's I 指数和 G^* 指数测度沂河流域生态系统服务价值的空间格局。

全局 Moran's I 指数可反映研究区生态系统服务价值空间相关性的总体趋势。计算公式为:

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中: n 为研究区网格数量; x_i 和 x_j 分别为网格 i 和 j

的生态系统服务价值; \bar{x} 为平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵;Moran's I 指数的范围为 $[-1, 1]$ 。用统计量 $Z(I)$ 来进行显著性水平的检验,其计算公式为:

$$Z(I) = [1 - E(I)] / \sqrt{\text{var}(I)} \quad (5)$$

式中: $E(I)$ 和 $\text{var}(I)$ 分别为指数 I 的理论期望与理论方差值。

热点分析 G_i^* 指数可以反映生态系统服务价值的冷热点分布格局,能有效揭示生态系统服务提供能力的空间差异^[29]。计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{i=1}^n w_{ij}}{s \sqrt{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2] / (n-1)}} \quad (6)$$

$$\text{且有: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2}$$

其中 G_i^* 指数的 Z 得分越高,热点区域的聚集越明显;得分越低,冷点区域的聚集越明显。

2.2.4 敏感性分析 敏感性指数是生态系统服务总价值对价值系数变化的响应^[30]。本研究将各土地利用类型的生态服务价值系数 VC 分别增加或减少 50% 来计算 CS 。

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_{jk} - VC_{ik}) / VC_{ik}} \right| \quad (7)$$

式中: ESV_i , ESV_j 为价值系数调整前后的生态系统服务总价值; VC_i , VC_j 为调整前后的价值系数。如果 $CS > 1$, 说明 ESV 对 VC 是富有弹性的,则价值系数准确度差和可信度较低;如果 $CS < 1$, 则说明 ESV 对 VC 是缺乏弹性的,结果可信。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

3.1.1 土地利用结构变化 1978—2015 年沂河流域土地利用结构以耕地为主,平均面积比例为 66.54%,其次是林地、建设用地和草地,分别占 11.67%,9.65%,8.86%,而水域和未利用地仅占 3.21%,0.08%。由图 1 和表 2 可见,流域各土地类型的数量和结构发生了不同程度的变化,耕地和草地面积减少,建设用地、水域、林地、未利用地面积增加。在动态度和变化率上,建设用地变化幅度最大,变化率达 82.58%,动态度达 2.23%;其次是未利用地和水域,变化率分别为 34.03%,22.54%,动态度分别为 0.92%,0.61%;草地、耕地、林地的变化率分别为 -11.26%, -8.93%, 1.22%,动态度分别为 -0.30%, -0.24%, 0.03%。

在不同的研究时期,各地类的变化趋势有所不同。其中耕地处于持续减少状态,其所占比例从

1978 年的 68.67% 减少至 2015 年的 62.54%，净减少 20 586.80 hm²，尤其在 2005—2015 年耕地面积减少迅速，主要是建设用地面积不断增加占用大量耕地。建设用地处于持续扩张状态，面积增加量最大，增加了 21 076.31 hm²。林地 在 1978—1985 年面积减少了 203.56 hm²，这是因为建设用地占用林地所致；1985—2015 年面积增加了 680.28 hm²，这主要受国家退耕还林等生态政策和政府近年来大力加强林业产业基地建设的影响，导致流域的林地面积恢复增长。1985—1995 年由于退耕还林还草政策使草地面积增加，其余时间段草地面积均减少，共减少 3 386.36 hm²。未

利用地和水域的面积均呈波动增加趋势，分别增加 88.20, 2 311.15 hm²。

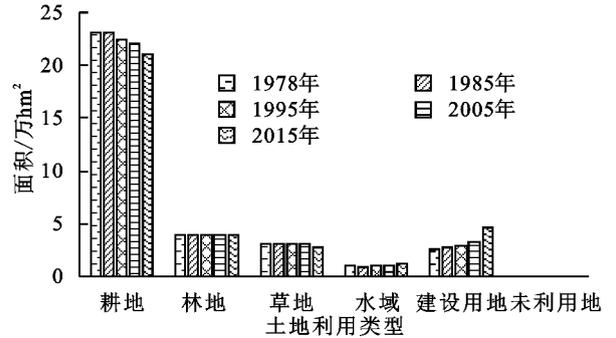


图 1 1978—2015 年沂河流域土地利用类型面积变化

表 2 1978—2015 年沂河流域土地利用面积百分比和动态度

土地利用类型	土地面积比例/%					1978—2015 年变化率/%	单一土地利用动态度/%
	1978 年	1985 年	1995 年	2005 年	2015 年		
耕地	68.67	68.64	66.86	65.97	62.54	-8.93	-0.24
林地	11.63	11.57	11.67	11.71	11.77	1.22	0.03
草地	8.96	8.95	9.36	9.09	7.95	-11.26	-0.30
水域	3.06	2.68	3.32	3.24	3.74	22.54	0.61
建设用地	7.60	8.10	8.73	9.91	13.89	82.58	2.23
未利用地	0.08	0.07	0.06	0.09	0.10	34.03	0.92

3.1.2 土地利用空间转移特征 由表 3 可以看出，1978—2015 年，沂河流域各地类之间的转移以耕地向建设用地的转移为主，其次是耕地向林地以及耕地和草地之间的转移。其中建设用地变化最为剧烈，转入 25 081.36 hm²，转出 3 996.93 hm²，共计增加 21 084.43 hm²，主要是由耕地向建设用地的转移，转移面积为 22 977.65 hm²。临沂市作为全国重要的物流周转中心和商贸批发中心，也是山东省人口最多的城市，逐渐增大的住房需求、高速发展的经济和交通运输设施不断占用大量耕地，由此表明研究区建设用地的扩张主要源于对耕地的占用。而人口的快速增长也扩大了粮食需求，为达到耕地占补平衡从而加快了对草地的垦殖，有 12 297.88 hm² 的草地被开垦为

耕地，同时也有 8 576.37 hm² 的耕地恢复为草地，这说明退耕还林还草等生态环境政策使得生态用地得到较好恢复。林地的增加主要由耕地和草地转移而来，转入面积分别是 6 505.96, 4 039.38 hm²。这主要是由于 20 世纪 90 年代全国实行退耕还林还草政策，坡耕地以及弃耕地等转变为林地，另外农村大量青壮年劳动力外流也在一定程度上促进了耕地向林地的转变。近年来山东省高度重视沂蒙鲁中南山地丘陵区水土流失及森林资源修复问题，加强荒山造林绿化、退耕还林、水土流失防护等工程建设。水域主要转移为耕地，转出面积为 1 954.86 hm²，有 4 142.43 hm² 的耕地转移为水域。未利用地近 40 年来面积变化不大，主要表现为耕地转入为未利用地和未利用地转出为草地。

表 3 1978—2015 年沂河流域土地利用转移矩阵

hm²

土地利用类型	2015 年						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
耕地	188080.35	6505.96	8576.37	4142.43	22977.65	166.55	230449.31
林地	4217.84	28577.48	5320.81	144.87	716.40	51.82	39029.23
草地	12297.88	4039.38	12308.07	169.91	1171.54	88.33	30075.11
1978 年 水域	1954.86	121.92	92.64	7887.49	194.03	2.40	10253.35
建设用地	3242.71	261.21	246.28	210.81	21518.99	35.92	25515.92
未利用地	80.18	0.03	145.03	9.85	21.74	2.33	259.17
总计	209873.83	39505.98	26689.20	12565.37	46600.35	347.37	335582.09

3.2 生态系统服务价值时空动态变化

3.2.1 生态系统服务价值时间变化 (1) 不同生态系统类型价值变化。由表 4 可知，沂河流域 1978 年、1985 年、1995 年、2005 年、2015 年的生态系统服务总价值

分别为 82.47 亿元、80.93 亿元、82.80 亿元、81.85 亿元、80.88 亿元，呈“先减少后增加再减少”的波动减少趋势，减少了 1.93%。1995 年流域生态系统服务价值较前一个时间节点要高，归因于水域、林地、草地

面积增加导致其生态系统服务价值增加。

从各地类生态系统服务价值变化来看,耕地的生态系统服务价值减少了 8.93%,草地减少了 11.26%,两者共计减少 4.41 亿元;水域和林地的生态系统服务价值分别增加了 22.54%,1.22%,共计增加 2.81 亿元。水域、林地和未利用地增加的生态系统服务价值远小于耕地和草地减少的服务价值,因此,1978—2015 年祁河流域生态系统服务价值下降的主要原因就是耕地和草地生态系统服务价值的减少。从各地

表 4 祁河流域不同生态系统类型的价值变化

土地利用 类型	生态系统服务价值/ 10^8 元					1978—2015 年		
	1978 年	1985 年	1995 年	2005 年	2015 年	比例/%	变化量/ 10^8 元	变化率/%
耕地	39.69	39.67	38.64	38.13	36.14	47.02	-3.55	-8.93
林地	23.93	23.80	24.01	24.09	24.22	29.35	0.29	1.22
草地	7.65	7.64	7.99	7.76	6.79	9.25	-0.86	-11.26
水域	11.20	9.81	12.15	11.87	13.72	14.37	2.52	22.54
未利用地	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	34.03
合计	82.47	80.93	82.80	81.85	80.88	100	-1.59	-1.93

(2) 不同服务功能类型价值变化。如图 2 所示,从各单项生态系统服务功能价值变化来看,1978—2015 年,土壤形成与保护、食物生产、生物多样性保护、气体调节、原材料、气候调节的价值量均呈下降趋势,其中土壤形成与保护、食物生产、生物多样性、气体调节减少较多,对总价值减少的贡献率分别为 33.8%,21.13%,17.37%,15.02%,对总价值减少的贡献率之和为 87.32%;水源涵养、娱乐文化、废物处理的价值量均呈增加趋势,其中水源涵养增加最多,达 0.40 亿元。

从各单项生态系统服务功能价值构成来看,废物处理、土壤形成与保护、水源涵养、气候调节、生物多样性保护、气体调节 6 项服务占生态系统服务总价值的 82.24%,其中废物处理的价值最大,占总价值的 15.31%,且这 6 项分别占总价值的 10%以上;食物生产、原材料、娱乐文化 3 项占总价值的比例均在 5%左右。

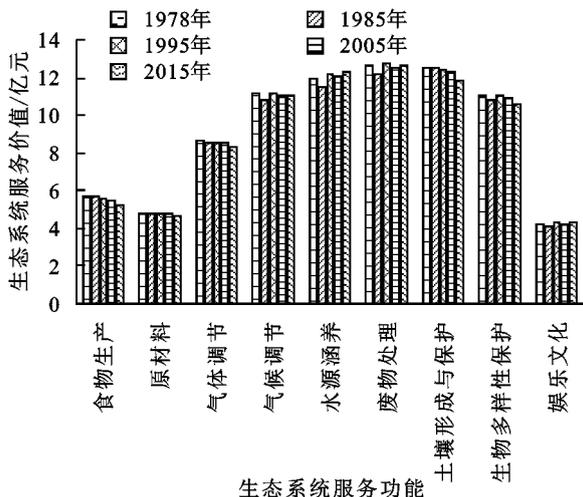


图 2 1978—2015 年祁河流域生态系统不同服务功能价值变化

类的生态系统服务价值所占比例来看,耕地生态系统服务价值最大,其次是林地、水域和草地,未利用地所占比例较小。其中耕地生态系统服务价值占 47.02%,其对流域生态系统服务总价值影响较为显著。水域的生态系统服务价值占总价值的 14.37%,其面积仅占 3.21%,说明水域面积的变化对流域生态系统服务价值具有较大的影响,也从侧面反映了生态系统服务价值系数较高的土地利用类型面积变化会使区域生态系统服务价值发生显著改变^[6]。

3.2.2 生态系统服务价值空间变化

(1) 总体空间分布格局。本文以 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的正方形网格为单元,计算 5 个时期生态系统服务价值的均值,从而得到祁河流域生态系统服务价值空间分布格局图(图 3)。根据流域生态系统服务价值的数值大小和变化趋势,分成低(小于 125 万元)、较低(125 万~250 万元)、中(250 万~375 万元)、较高(375 万~500 万元)、高(大于 500 万)5 个等级。从图 3 可以看出,祁河流域生态系统服务价值空间分布等级差异比较明显,ESV 高值区和较高值区主要聚集在北部蒙山地区、祁河主干河道、水库以及西部和南部的低山丘陵地带,这些地区明显特点是林地、水域资源丰富,面积覆盖较大;ESV 中值区多分布在地、丘陵边缘地区;ESV 较低值区则镶嵌在高低值之中,散乱分布;ESV 低值区主要是分布在兰山区、费县和平邑县的城区等人类活动密集区域。

由表 5 可以看出,研究区 5 个年份生态系统服务价值的全局空间自相关指数 I 值均大于 0,且 $Z(I)$ 值远大于显著性水平标准值 1.65,表明流域生态系统服务价值的空间自相关性较强且空间呈集聚分布格局;另外,5 个时期的 I 值与 $Z(I)$ 值总体上呈波动下降趋势,说明流域的生态系统服务价值的空间自相关性和集聚趋势略有减弱。

(2) 热点分析。分别对祁河流域 5 个时期的生态系统服务价值进行热点分析,用自然断点分级法将 G_i^* 的标准化 Z 值划分成 7 个等级: <-2.58 , $-2.58 \sim -1.96$, $-1.96 \sim -1.65$, $-1.65 \sim 1.65$, $1.65 \sim 1.96$, $1.96 \sim 2.58$, >2.58 。 Z 得分越高,表明热点的聚集越紧

密; Z 得分小于零且越低, 表明冷点的聚集越紧密; Z 得分接近于零, 则表示不存在明显的空间聚类。

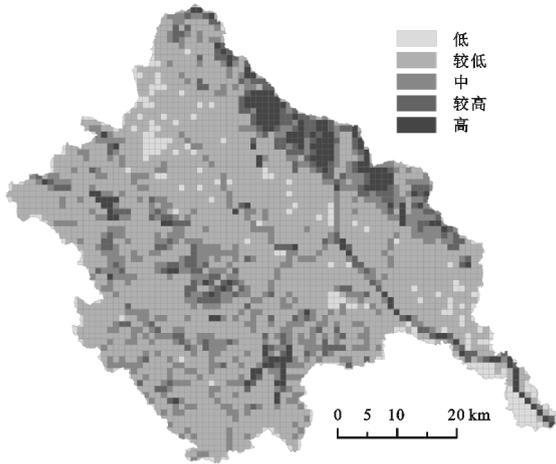


图 3 沭河流域生态系统服务价值空间分布格局

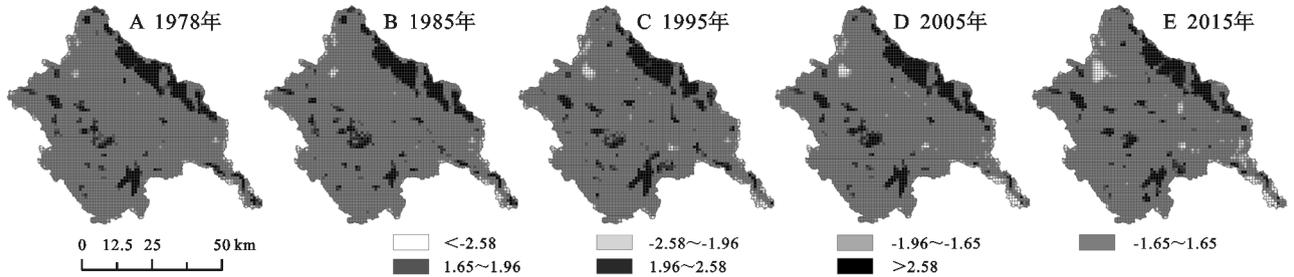


图 4 沭河流域 ESV 冷热点区空间演化

1978—1985 年, 流域热点区和冷点区范围总体变化不大, 流域北部蒙山地区热点区范围基本保持不变, 由于这一时期水域面积减少导致南部热点区范围有所收缩, 冷点区范围呈微弱增大趋势。1985—1995 年, 流域东部热点区有所收缩, 流域南部热点区范围有微弱扩张, 主要是因为东部地区耕地面积减小, 南部地区水域面积增大; 由于平邑县、费县、兰山区等地扩张及基础设施的建设导致建设用地大量占用耕地, 流域冷点区范围明显增大。1995—2005 年, 流域北部热点区范围增大, 主要得益于 2000 年前后全国大规模实施退耕还林还草等生态保护政策, 使林地、草地比例增大, 导致生态系统服务价值增加扩大热点区范围, 冷点区范围继续扩张。2005—2015 年, 南部热点区范围变化不大, 冷点区范围明显扩张, 这一时期城市化发展迅速, 经济发展较快, 建设用地扩张占用大量耕地, 导致生态系统服务价值损失。

3.3 敏感性分析

从表 6 可以看出, 不同土地利用类型的敏感性指数区别较大, 但是同一类型不同年份之间差别不大, 且敏感性指数均小于 1, 数值由大到小依次是耕地、林地、水域、草地、未利用地。其中, 耕地的敏感性指数最大, 为 0.45~0.49; 未利用地的敏感性指数最低,

表 5 沭河流域生态系统服务价值空间自相关

年份	Moran's I	$Z(I)$	p
1978	0.528	42.761	0
1985	0.511	41.389	0
1995	0.521	42.210	0
2005	0.539	43.611	0
2015	0.517	41.869	0

由图 4 可知, 1978—2015 年, 流域生态系统服务价值冷点区范围成明显的扩张趋势, 且集中分布于平邑县、费县和兰山区的城区范围, 表明随着城镇化发展, 土地开发利用程度加大, 导致城市建设用地规模不断增加; 热点区范围基本保持不变, 在北部沂蒙山区腹地蒙山山脉集聚现象显著, 在南部水库、河流和山地附近呈零星分布。

其敏感性指数不足 0.000 2; 其他土地利用类型的敏感性指数为 0.08~0.30。研究区生态系统服务总价值对价值系数缺乏弹性, 因此本文计算所采用的价值系数适合沭河流域, 准确度较高, 研究结果可信。

表 6 1978—2015 年沭河流域生态系统敏感性指数

价值系数	敏感性指数				
	1978 年	1985 年	1995 年	2005 年	2015 年
耕地 $VC\pm 50\%$	0.48	0.49	0.47	0.47	0.45
林地 $VC\pm 50\%$	0.29	0.29	0.29	0.29	0.30
草地 $VC\pm 50\%$	0.09	0.09	0.10	0.09	0.08
水域 $VC\pm 50\%$	0.14	0.12	0.15	0.15	0.17
未利用地 $VC\pm 50\%$	0.00010	0.00008	0.00008	0.00011	0.00013

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文从土地利用变化的视角分析了研究区生态系统服务价值的时空变化特征, 着重从土地利用类型面积变化、土地利用类型转移变化等方面进行了分析, 在今后的研究中, 需要加强土地利用变化对区域生态系统服务的生态学过程和机理等方面的影响机制研究。由于建设用地对生态环境的影响极其复杂且范围极广, 难以量化评估建设用地的生态服务价

值,因此本文没有考虑建设用地的生态服务价值。另外,本文选用价值量评估法计算生态系统服务价值有较多不确定性,土地利用数据的解译精度、土地利用类型的分类、不同生态系统类型的价值系数的修正方法等都可能影响价值评估的精度。通过前文分析,发现沱河流域生态系统服务功能价值总体呈下降趋势,其中土壤形成与保护、食物生产、生物多样性保护、气体调节、原材料和气候调节的价值量均下降。土地利用结构变化是生态系统服务价值变化的直接原因,因此,为促进沱河流域生态环境建设,一方面需要制定合理的土地利用规划,严格保护和监测水域、林地、草地和耕地的面积,并严格控制建设用地的规模,防止建设用地盲目侵占耕地;另一方面,通过土地复垦和整理,增加耕地面积,提高粮食产量。同时,坚决打好污染防治攻坚战,改善土壤质量、空气质量和水质,减少污染物排放,加强环境综合治理。重视生物多样性的保护工作,完善相关法律法规和健全管理体制,开展生物多样性观测工作,加强公众的生态文明意识。

4.2 结论

(1) 流域土地利用结构以耕地为主,其次是林地、建设用地、草地、水域和未利用地。主要变化趋势为耕地和草地减少,建设用地、水域、林地、未利用地增加。各地类间的转移以耕地向建设用地的转移为主,其次是耕地向林地以及耕地和草地之间的转移。

(2) 流域 1978—2015 年生态系统服务总价值呈波动减少趋势。耕地和草地的生态系统服务价值减小,林地、水域和未利用地的生态系统服务价值增加。对于各单项生态系统服务功能价值来说,土壤形成与保护、食物生产、生物多样性保护、气体调节、原材料和气候调节的价值量均呈下降趋势;水源涵养、娱乐文化和废物处理的价值量均呈增加趋势。

(3) 流域生态系统服务价值呈空间集聚分布格局且集聚程度略有减弱。1978—2015 年,流域生态系统服务价值冷点区范围呈明显的扩张趋势,且集中于平邑县、费县和兰山区的城区;热点区范围基本保持不变,在北部沂蒙山区腹地蒙山山脉集聚现象显著,在南部水库、河流和山地附近呈零星分布。

参考文献:

[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[J].经济地理,2017,37(11):161-170.

[2] 段瑞娟,郝晋珉,张洁瑕,等.北京区位土地利用与生态服务价值变化研究[J].农业工程学报,2006,22(9):21-28.

[3] Turner B L I, Skole D L, Sanderson S, et al. Land-use and land-cover change: Science/research plan[J]. Global Change Report (Sweden), 1995,43:669-679.

[4] 薛明皋,邢路,王晓艳.中国土地生态系统服务当量因子空间修正及价值评估[J].中国土地科学,2018,32(9):81-88.

[5] 蒋卫国,李雪,蒋韬,等.基于模型集成的北京湿地价值评价系统设计与实现[J].地理研究,2012,31(2):377-387.

[6] 王军,顿耀龙.土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J].长江流域资源与环境,2015,24(5):798-808.

[7] 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[J].农业机械学报,2017,48(4):149-153.

[8] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(15):253-260.

[9] Daily G. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[J]. Pacific Conservation Biology, 1997,6(2):220-221.

[10] 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):607-613.

[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[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.

[12] 潘鹤思,李英,陈振环.森林生态系统服务价值评估方法研究综述及展望[J].干旱区资源与环境,2018,32(6):72-78.

[13] 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.

[14] 张丽琴,渠丽萍,吕春艳,等.基于空间格局视角的武汉市土地生态系统服务价值研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(9):1988-1997.

[15] 陈明叶,刘素红,于连海,等.大清河阜平流域生态系统结构变化的服务价值响应研究[J].自然资源学报,2018,33(8):1376-1389.

[16] 涂小松,龙华楼.2000—2010 年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化[J].资源科学,2015,37(12):2451-2460.

[17] 谢春花,王克林,陈洪松,等.土地利用变化对洞庭湖区生态系统服务价值的影响[J].长江流域资源与环境,2006,15(2):191-195.

[18] 麦麦提吐尔逊·艾则孜,海米提·依米提,迪拉娜·尼加提,等.昆仑山北麓克里雅绿洲生态服务价值对土地利用变化的响应[J].地理科学,2012,32(9):1148-1152.

- 经济效益分析[J].生态经济,2011,244(10):69-72.
- [18] 张博胜.退耕还林工程驱动下的中国西南喀斯特山区土地利用变化及其生态效应研究:以云南省文山县为例[D].昆明:云南财经大学,2010.
- [19] Tian Y, Wang S, Bai X, et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China [J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 566: 1297-1308.
- [20] Yanqing L, Wei S. Trade-off Analysis of Ecosystem Services in a Mountainous Karst Area, China [J]. *Water*, 2018,10(3).DOI:10.3390/w10030300.
- [21] 陈洪元.贵州喀斯特山区雨洪资源高效利用方法:以普定县陈家寨喀斯特石漠化示范区为例[J].贵州科学,2015,33(5):22-26.
- [22] 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.
- [23] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003,25(1):37-38.
- [24] 李默然,丁贵杰.贵州黔东南主要森林类型碳储量研究[J].中南林业科技大学学报,2013,33(7):119-124.
- [25] 罗怀良,袁道先,陈浩.南川市三泉镇岩溶区农田生态系统有机碳密度[J].生态环境,2008,17(5):2014-2018.
- [26] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J].土壤学报,2004,41(1):35-43.
- [27] 褚琳,张欣然,王天巍,等.基于 CA-Markov 和 Invest 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J].应用生态学报,2018,29(12):4106-4118.
- [28] 李晶,李红艳,张良.关中一天水经济区生态系统服务权衡与协同关系[J].生态学报,2016,36(10):3053-3062.
- [29] 刘竞妍,张可,王桂华.综合评价中数据标准化方法比较研究[J].数字技术与应用,2018,36(8):84-85.
- [30] 武文欢,彭建,刘焱序,等.鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J].地理科学进展,2017,36(12):1571-1581.

(上接第 275 页)

- [19] 商慧敏,郝敏,李悦,等.胶州湾滨海湿地生态系统服务价值变化[J].生态学报,2018,38(2):421-431.
- [20] 陈端吕,陈哲夫,彭保发.土地利用生态服务价值与经济协调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.
- [21] 徐丽芬,许学工,罗涛,等.基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法:以渤海湾沿岸为例[J].地理研究,2012,31(10):1775-1784.
- [22] 刘永强,廖柳文,龙花楼.土地利用转型的生态系统服务价值效应分析:以湖南省为例[J].地理研究,2015,34(4):691-700.
- [23] 满苏尔·沙比提,娜斯曼·那斯尔丁,阿尔斯朗·马木提.托尔木峰国家级自然保护区土地利用/覆被生态服务价值变化分析[J].地理研究,2016,35(11):2116-2124.
- [24] 虎陈霞,杨空,郭旭东,等.嘉兴市土地利用时空变化与生态服务价值评估[J].农业现代化研究,2018,39(3):503-510.
- [25] 王宽,蔡正华,齐增湘,等.2000—2013年衡阳市土地利用格局转变对生态系统服务的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(7):1060-1070.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 谢高地,肖玉,甄霖,等.我国粮食生产的生态服务价值研究[J].中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.
- [29] 王壮壮,张立伟,李旭谱,等.流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征[J].生态学报,2019,39(3):1-12.
- [30] Bai Y, Xu H, Ling H. Eco-service value evaluation based on eco-economic functional regionalization in a typical basin of northwest arid area, China[J]. *Environmental Earth Sciences*. 2014,71(8):3715-3726.