

# 基于土地利用的滇池流域生态系统 服务价值时空分异及影响

金 杰

(云南财经大学 城市与环境学院, 昆明 650221)

**摘 要:**为了揭示滇池流域生态系统服务价值的时空演变规律和主要成因,明确生态保护的着力点,通过对 1974—2016 年多尺度滇池流域土地利用的生态服务价值(ESV)评估测算,采用遥感、GIS 技术和可拓展的随机性环境影响评估模型(STIRPAT)结合地理加权回归方法(GWR)分析了 1974—2016 年 5 个时期流域 ESV 时空分异和影响因素。结果表明:(1)研究期内,各尺度 ESV 时空变化剧烈,流域整体呈 ESV 降低、聚集趋势。(2)不同栅格单元 ESV 等级分布变化和空间差异显著,呈滇池北岸和东南部远高于流域四周。(3)滇池流域 ESV 空间聚集程度呈先略微减弱后持续增强的趋势,整体有增强;地均生态服务价值(UAESV)从分散到集中,明显受人口、土地城镇化,产业集聚和人类活动干扰。(4)滇池流域 UAESV 影响最大的是绿化率,人口、人均 GDP、第三产业比重、万元 GDP 能耗和城市化率等有负面影响。综上,高原湖滨区域生态安全格局构建需求强烈,需限制建设用地蔓延扩张,划定国土“三区三线”,加快流域脆弱区生态隔离带建设,严格生态指标监测。

**关键词:**土地利用;生态服务价值;时空分异;滇池流域

**中图分类号:**F301.2; X826

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)06-0344-08

## Spatio-temporal Differentiation of Ecosystem Service Value in Dianchi Basin and Its Influencing Factors Based on land Use

JIN Jie

(School of Urban and Environment, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China)

**Abstract:** In order to reveal the spatio-temporal evolution and its causes, and to define the focus of ecological protection, Dianchi Basin was closely studied as a research object. Based on the estimation of the land use ecological service value (ESV) of the multi-scale Dianchi Lake Basin from 1974 to 2016, RS, GIS technology, methods of ESV accounting, STIRPAT model and GWR were used to calculate the spatio-temporal differentiation and analysis of influencing factors. The results show that: (1) The overall ESV of the basin decreased during the study period, mainly due to construction and human land encroachment on forestland and the watershed area; the change of ESV is affected by the direction of urban development and major policy activities. (2) Areas of high ESV are mainly concentrated near forests and waterways, especially protected forest areas and drinking water sources; ESV in counties, towns and villages show the most drastic changes from 1974 to 2008, mainly affected by the rapid expansion of construction land. (3) The variation of ESV grade distribution and spatial differentiation of various grid cells were significant, 86.38% of the regional ecological service grade decreased, and the ESV spatial aggregation degree decreased slightly at first and then increased continuously, disturbed by urbanisation. (4) The greening rate has the greatest influence on per capita ESV in the Dianchi Basin. Population, per capita GDP, proportion of tertiary industry, energy consumption of ten thousand yuan GDP and urbanisation have negative influence on ESV. Strong demand for the construction of the ecological security pattern in the Plateau Lakeside region, which limits the spread and expansion of construction land, delimits the ‘three zones and three lines’ space of the territory, speeds up the construction of ecological isolation zones in vulnerable areas of the Lake Basin, and strictly monitors ecological indicators.

收稿日期:2021-08-10

修回日期:2021-09-17

资助项目:云南省社科规划项目(YB2019013);云南省教育科研基金(2019J0957)

第一作者:金杰(1981—),男,浙江平湖,人,博士,副教授,主要从事土地利用与环境生态研究。E-mail:414980408@qq.com

**Keywords:**land use; ecological service value; spatio-temporal differentiation; Dianchi Lake Basin

土地利用与生态系统服务相互影响制约。土地利用变化对生态系统服务价值的影响,对于识别区域生态环境变化、指导土地利用格局优化、促进经济社会和生态协调可持续发展具有重要意义。Costanza 等<sup>[1]</sup>首先估算了全球生态系统服务的经济价值,《千年生态系统评估报告》(MA)将生态系统服务划分为供给、调节、支持和文化 4 类。国内外众多学者在不同尺度上对不同生态系统服务价值进行了评估<sup>[2-5]</sup>,一直是国内外生态学研究的热点之一<sup>[6-7]</sup>。谢高地等<sup>[8]</sup>探索建立了符合中国实际的生态服务价值当量,为大多数学者研究生态服务价值核算及其时空分异研究奠定了基础<sup>[9-16]</sup>,结合不同年份、区域的特殊情况,不断改进调整价值系数,进行不同尺度土地利用变化下的区域 ESV 的时空变化规律研究,提出优化的时序方案和空间发展策略及不同情景模拟下的 ESV 差异。土地利用格局会影响生态系统服务价值,袁周炎妍等<sup>[17]</sup>认为根据研究区及周边社会环境的特征,选择合适的尺度进行评估研究至关重要。不同的土地利用空间格局对 ESV 的影响也不同,国内学者已经就自然、社会、经济等多个方面的影响因素或驱动机制开展分析研究,包含环境污染、土地利用、人口、地价等多个方面,研究方法较为丰硕和成熟,主要的研究方法有相关分析、地理加权回归(GWR)、地理探测器等。程琳等<sup>[18]</sup>研究发现生态服务空间差异主要由于不同尺度生态系统本身和环境条件多样性,决定单位面积 ESV(UAESV)大小的原因是地上生物量和空间位置的差异影响。现有文献对长时期多尺度时空分布研究仍然偏少<sup>[7]</sup>,尤其是生态脆弱且快速城镇化地区用地扩张对生态系统格局的影响<sup>[19-20]</sup>,对典型区域及其分异影响非常值得研

究。借鉴上述主流研究成果,考虑滇池流域实际,利用遥感和 GIS 技术对 1974—2016 年 5 期滇池流域 ESV 进行评估量化,以县(区)、乡镇、村三级不同区域尺度进行格局研究基础上,探讨分析挖掘滇池流域 ESV 的时空分异规律及影响,以期为流域今后生态文明保护和建设发展科学决策参考。

1 研究区概况与数据来源

滇池地处昆明市,地理坐标为 102°37′—102°48′E, 24°40′—25°02′N,是中国西南地区最大的高原淡水湖泊,滇池流域位于云贵高原中部,滇中产业新区核心,是我国面向南亚东南亚辐射中心。近 40 年来,随着流域城市化快速发展,滇池水体污染和生态环境问题成为制约流域社会、经济发展的限制性因素。研究数据以 1974 年、1988 年、1998 年、2008 年、2016 年 Landsat MSS/TM/ETM+ 遥感影像数据、全国土地利用调查数据库成果及变更数据为主,及研究区自然、社会经济和生态环境数据:包括滇池流域基础地理信息、行政区划图、道路交通以及历年昆明市县统计年鉴等。经过遥感影像解译及人机交互、野外踏勘综合判读,分类处理并验证提取得到滇池流域 5 时期土地利用与变化信息,见表 1 和图 1。

表 1 滇池流域土地利用现状分类面积 km<sup>2</sup>

年份	耕地	林地	建设用地	水域	其他用地
1974	517.93	1322.14	87.65	320.45	660.62
1988	450.55	1323.50	131.74	323.22	679.78
1998	435.67	1293.63	183.63	322.86	673.01
2008	285.36	1285.76	404.50	320.67	612.49
2016	251.36	1253.04	538.12	318.97	547.30

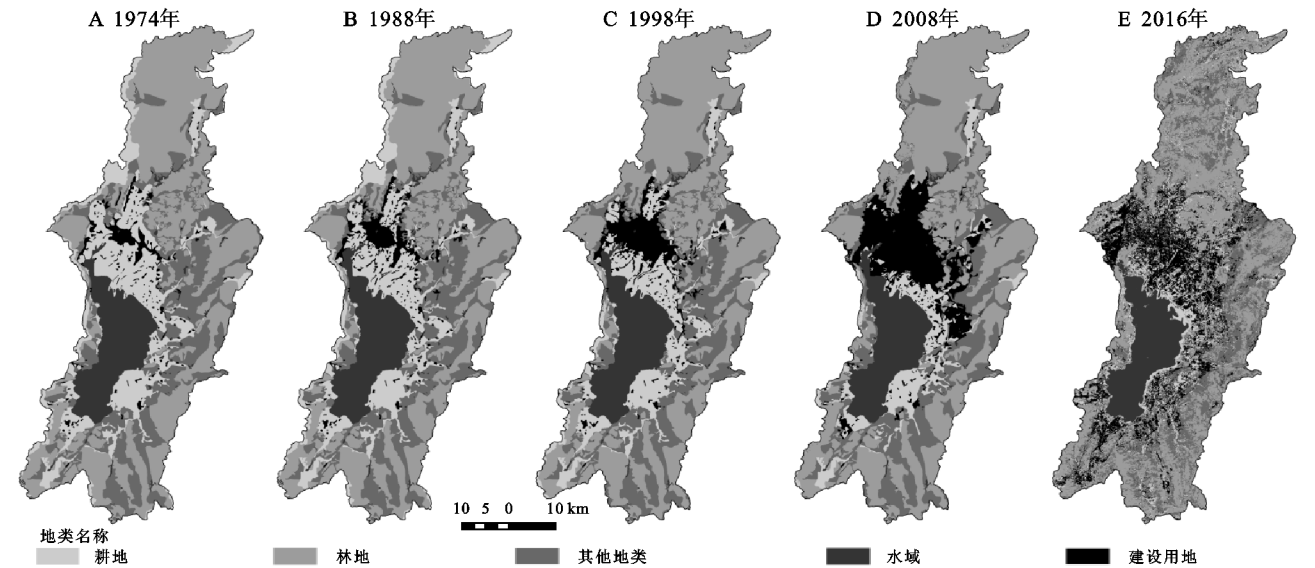


图 1 滇池流域土地利用分类结果

2 研究方法

2.1 生态服务价值评估与测算

当量因子评估法仍然是目前 ESV 评估主要方法之一,谢高地等<sup>[2-3]</sup>长期研究和发布全国当量因子表并不断进行更新和完善,该表亦是目前中国最科学和系统的当量因子表之一<sup>[21]</sup>,结合张明阳等<sup>[4]</sup>相关研究,滇池流域土地利用变化的生态系统服务价值评估与服务功能测算公式如下:

$$ESV = \sum_{k=1}^n A_k \times VC_k \tag{1}$$

$$ESV_d = \sum_{k=1}^n A_k \times VC_{dk} \tag{2}$$

式中:ESV、ESV<sub>d</sub> 分别为生态服务总价值和单项价值;VC<sub>k</sub> 为生态价值系数;A<sub>k</sub> 为 k 种土地利用类型的面积;VC<sub>dk</sub> 为单项服务功能价值系数;n 为土地利用类型数量;d 为生态系统类型。

2.2 生态系统服务价值空间相关性分析

为进一步探索滇池流域土地利用变化的生态系统服务价值空间分异规律及影响,对单位生态服务价值 UAESV 进行空间相关性分析。空间相关性分析主要利用 ArcGIS 空间统计工具箱空间自相关(Global Moran's I)工具方法,包括全局和局部莫兰指数(Moran's I 指数),高/低聚类(Getis-Ord General G 指数)<sup>[22]</sup>。

2.3 基于 GWR 和 STIRPAT 改进模型的空间分异驱动因素分析

研究引入空间计量经济模型用于生态环境影响因素分析中<sup>[23-24]</sup>,并将其应用到生态系统服务价值的驱动因素分析中,结合地理加权回归方法(GWR)分

析,用可拓展的随机性的环境影响评估模型(STIRPAT)及其改进模型对滇池流域生态系统服务价值空间差异的驱动因素进行分析。

可拓展的随机性的环境影响评估模型 STIRPAT 最早是由美国学者 Ehrlich 等<sup>[25]</sup>提出的 IPAT 模型,其表达式为:

$$I = P \times A \times T \tag{3}$$

式中:I 为环境压力;P 为人口数量;A 为富裕度;T 为技术水平。

将上述公式优化为:

$$I = c P^\alpha A^\beta T^\gamma e \tag{4}$$

式中:c 为常系数;e 为模型误差; $\alpha, \beta, \gamma$  为弹性系数。

并对模型公式(4)等式两边取对数得到:

$$\ln I = \ln c + \alpha \ln P + \beta \ln A + \gamma \ln T + \ln e \tag{5}$$

研究通过改进公式(5)的 STIRPAT 模型,参考唐秀美等<sup>[26]</sup>已有研究,结合前述土地利用变化的生态效应研究,进行生态系统服务功能价值变化的空间驱动力因素分析。改进指标及其公式为:

$$E = c P^{a_1} A^{a_2} G^{a_3} S^{a_4} N^{a_5} U^{a_6} k \tag{6}$$

式中: $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  为弹性系数;k 为随机变量。其他各指标模型含义及解释,见表 2。

根据指标区域空间特性并引入空间计量经济学中的地理加权回归模型(GWR),研究对滇池流域 ESV 驱动因素的空间分异性进行分析。公式为:

$$\begin{aligned} \ln E_i = & \ln c(u_i, v_i) + a_1(u_i, v_i) \ln P_i + a_2(u_i, v_i) \ln A_i + \\ & a_3(u_i, v_i) \ln G_i + a_4(u_i, v_i) \ln S_i + a_5(u_i, v_i) \\ & \ln N_i + a_6(u_i, v_i) \ln U_i + e_i \end{aligned} \tag{7}$$

式中:i 为区域中心点序号;(u<sub>i</sub>, v<sub>i</sub>) 为 i 区域中心点的地理坐标。

表 2 各指标模型含义及解释

指标	改进指标含义		定义	STIRPAT 模型定义
E	人均生态系统服务功能价值	环境压力		I
P	总人口	人口数量		P
A	人均 GDP	富裕度		A
G	绿化率(绿地率)	生态用地、自然环境影响	ESV	c
S	第三产业比重	产业结构比例调整反映土地集约利用的变化,影响	ESV	A
N	万元 GDP 能耗	资源耗费、社会经济发展		T
U	城市化率	建设用地扩展、经济发展阶段		T

借鉴刘桂林等<sup>[27]</sup>研究实践和推算,把每一种生态系统类型与最接近的土地利用类型联系起来,并考虑了建设用地较为明显的两项负效应;最终计算得到滇池流域不同用地生态服务价值系数(表 3);利用公式(1)—(2)、表 2,分别计算滇池流域 1974—2016 年 5 期不同土地利用类型的 ESV(表 4)。

3 结果与分析

3.1 不同尺度生态系统服务价值时空变化

3.1.1 县、乡、村生态服务价值时空变化 根据流域土地利用与变化数据,利用 ArcGIS 10.5 统计各行政区不同时期生态系统服务价值(ESV)和单位面积生

态系统服务价值(UAESV)。利用空间分析栅格运算,并分别按 Jenks 自然间断点法划分成 I—V 共 5 个级别,采用标准差分级法将不同行政区域的 UAESV 划分为高、较高、中、较低、低生态服务价值区 5 类。分别得到基于县、乡、村三级尺度 1974—2016 年 5 期生态服务价值时空变化情况,见图 2—4。

3.1.2 基于栅格网的生态服务价值时空变化 采用 ArcGIS 10.5 对流域空间划分为 1 km×1 km 相同的栅格单元,共 3 153 个,按照单元格进行生态系统服务价值评价,结合空间插值法计算每个栅格网单元生态系统服务总价值(ESV)或网格单元价值(dESV),作为栅格网中

心点的生态服务价值水平,计算公式如下:

$$dESV_e = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ei}}{A_e} VC_i \tag{8}$$

式中:dESV<sub>e</sub>为第 e 个栅格网单位面积生态服务价值指数,当其单位面积为 1 时即为单元内地均生态系统服务价值,dESV=UAESV;A<sub>e</sub> 为第 e 个栅格网单元总面积;A<sub>ei</sub>为第 e 个栅格网中第 i 类土地类型的总面积;VC<sub>i</sub> 为第 i 类土地利用类型的生态服务价值系数;e 为栅格网序号;n 为土地利用类型数量。生成 1974—2016 年不同时期生态系统服务价值等级分布图(图 5)。

表 3 滇池流域不同土地利用类型的生态服务价值系数 元/hm<sup>2</sup>

生态系统类型	耕地	林地	建设用地	水域	其他用地
气体调节	745.39	5217.70	0.00	0.00	1192.62
气候调节	1326.79	4025.08	0.00	685.75	1341.69
水源涵养	894.46	4770.46	−11255.31	30381.89	1192.62
土壤形成与保护	2176.52	5814.00	0.00	14.91	2907.00
废物处理	2444.86	1952.91	−3667.29	27102.20	1952.91
生物多样性保护	1058.45	4859.91	0.00	3712.02	1624.94
食物生产	1490.77	149.08	0.00	149.08	447.23
原材料	149.08	3876.00	0.00	14.91	74.54
娱乐文化	14.91	1908.19	0.00	6469.94	59.63
合计	10301.22	32573.32	0.00	68530.70	10793.17

表 4 1974—2016 年滇池流生态服务价值变化

年份	项目	耕地	林地	建设用地	水域	其他用地	合计
1974	价值/亿元	5.34	43.07	−1.31	21.96	7.13	76.19
	所占比重/%	7.01	56.53	−1.72	28.82	9.36	100.00
1988	价值/亿元	4.64	43.11	−1.97	22.15	7.34	75.27
	所占比重/%	6.16	57.27	−2.62	29.43	9.75	100.00
1998	价值/亿元	4.49	42.14	−2.74	22.13	7.26	73.28
	所占比重/%	6.13	57.51	−3.74	30.20	9.91	100.00
2008	价值/亿元	2.94	41.88	−6.04	21.98	6.61	67.37
	所占比重/%	4.36	62.16	−8.97	32.63	9.81	100.00
2016	价值/亿元	2.59	40.82	−8.03	21.86	5.91	63.15
	所占比重/%	4.10	64.64	−12.72	34.62	9.36	100.00
1974—1988	净变量/亿元	−0.69	0.04	−0.66	0.19	0.21	−0.91
	变比率/%	−12.92	0.09	50.38	0.87	2.95	−1.19
1988—1998	净变量/亿元	−0.15	−0.97	−0.77	−0.02	−0.07	−1.98
	变比率/%	−3.23	−2.25	39.09	−0.09	−0.95	−2.63
1998—2008	净变量/亿元	−1.55	−0.26	−3.30	−0.15	−0.65	−5.91
	变比率/%	−34.52	−0.62	120.44	−0.68	−8.95	−8.06
2008—2016	净变量/亿元	−0.35	−1.07	−1.99	−0.12	−0.70	−4.23
	变比率/%	−11.90	−2.55	32.95	−0.55	−10.59	−6.28
1974—2016	净变量/亿元	−2.75	−2.25	−6.72	−0.10	−1.22	−13.04
	变比率/%	−51.50	−5.22	−512.98	−0.46	−17.11	−17.12

3.2 生态系统服务价值时空分异分析

3.2.1 数量变化分析 滇池流域生态服务总价值呈现出逐年降低的态势(表 4),其中建设用地变化率最大,在 1974—2016 年期间,变化率高达 −512.98%,导致各地类

流向建设用地会带来生态服务价值的降低;耕地在 1974—2016 年期间变化率为 −51.50%,耕地生态服务价值量下降了一半,这与社会进步和经济发展,致使耕地利用强度提升,耕地面积压缩密切相关。



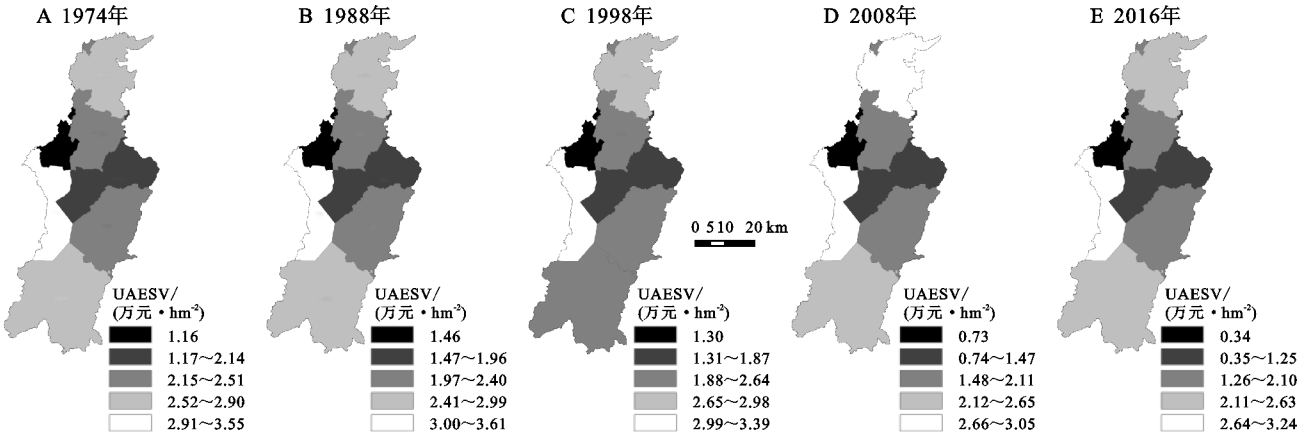


图 2 基于县区 1974—2016 年滇池流域生态服务价值等级变化

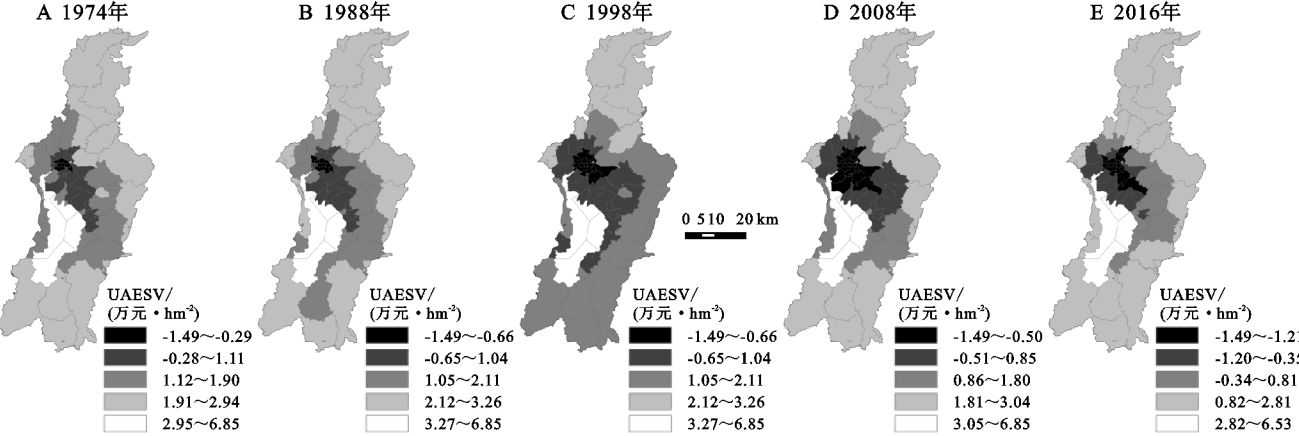


图 3 基于镇的 1974—2016 年滇池流域生态服务价值等级变化

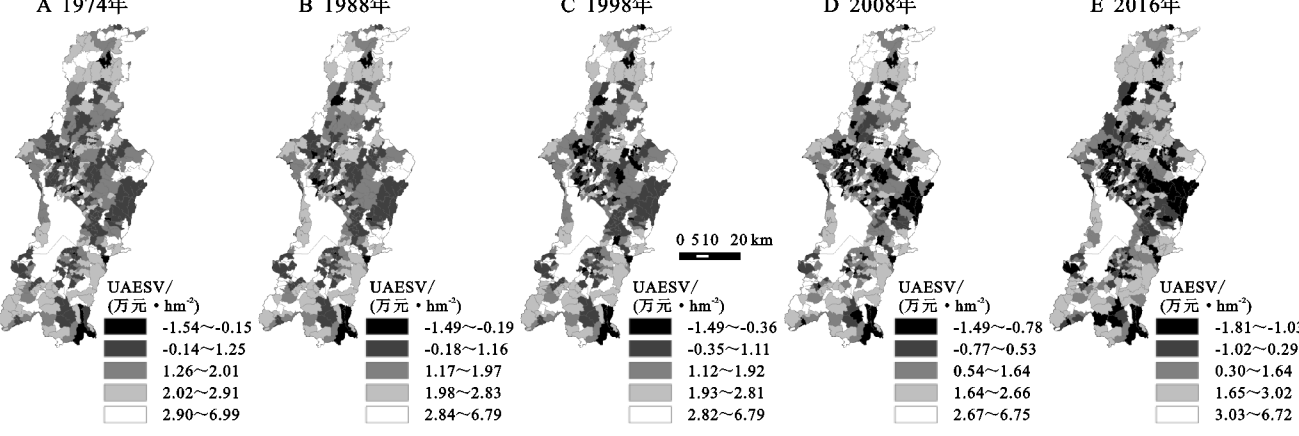


图 4 基于村的 1974—2016 年滇池流域生态服务价值等级变化

3.2.2 基于县域(区、县)时空分异分析 由图 2 使用 ArcGIS 栅格数据统计得到图 6, UAESV 最高的是 1974 年的西山区 3.55 万元/hm<sup>2</sup>, 最低的是 2016 年的五华区仅为 0.34 万元/hm<sup>2</sup>。生态服务价值较低地区集中在流域中部, 南北和西部地区生态服务价值相对较高。1974—2016 年, 整体生态服务价值呈下降趋势, 五华区在 1974—1988 年生态服务价值提升了 0.3 万元/hm<sup>2</sup>, 而 2008—2016 年期间, 西山区和盘龙区生态服务价值略有提升。

3.2.3 基于镇(镇、乡、街道)时空分异分析 由图 3

可知, 1974—2016 年滇池流域各镇地均生态服务价值介于(−1.49~6.84)万元/hm<sup>2</sup>, 最低值出现在五华区护国、双龙, 官渡日新街道(2016 年), 最高值出现在官渡、呈贡、晋宁滇池水面, 地均 6.84 万元/hm<sup>2</sup>(1974 年、1988 年); 低 ESV 镇逐年增加, 2016 年最多, 除高 ESV 区与低 ESV 区外, 其余 ESV 等级区数量波动下降。

3.2.4 基于村(村委)时空分异分析 如图 4 所示, 1974—2016 年, 滇池流域农村 ESV 起初变化较小, 自 1988 年开始, 低 ESV 村迅速增加, 同时较低 ESV 村迅速减少, 二者基本呈负相关态势。较高 ESV 村

个数早期和前期阶段稳定,高 ESV 区先上升后下降,得益于前期滇池流域城镇化建设缓慢、植树造林和积极有效的森林保护措施;随着城市建设用地扩张,致使改建村生态服务价值大幅降低。

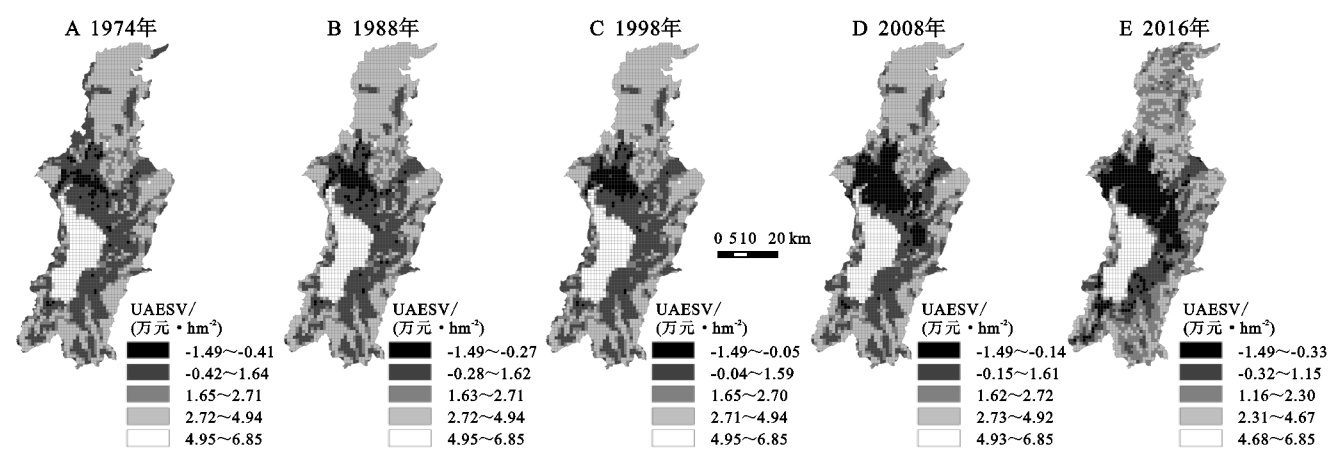


图 5 基于格网的 1974—2016 年滇池流域生态服务价值等级变化

3.2.5 基于栅格网的滇池流域生态服务价值时空分异分析 从图 5 可以看出,1974—2016 年生态系统服务价值以较低 UAESV 区和低 UAESV 区为主,占比由 1974 年的 28.54% 增加到 2016 年的 42.84%,累计增加了 726.82 km<sup>2</sup>,并呈逐年继续增加趋势;流域 UAESV 空间差异显著,整体呈中间和东南部远低于四周。时间上,仅有 0.16% 的区域 UAESV 等级上升,主要分布于流域中西、南部高海拔和环湖周边,可能是大面积耕地转化为林地和退耕还湖、环滇湿地保护;空间上北部和南部 UAESV 等级未发生变化,面积占 13.46%,东、南部中心城镇建设区等级下降明显,面积累积达 86.38%,受城乡建设和开发影响,局部低 UAESV 等级区快速增加且集中连片。

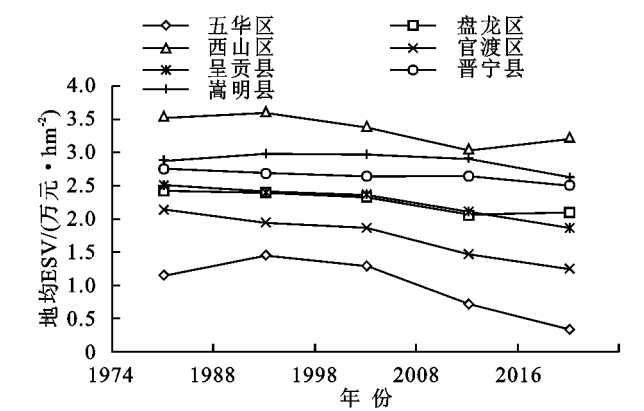


图 6 基于县域的各时期单位生态服务价值变化趋势

3.3 生态系统服务价值空间分异影响因素分析

3.3.1 空间相关性分析 滇池流域 UAESV 空间相关性分析通过软件 Geoda 计算,空间权重采用两点间直线距离的倒数法,结果表明 1974—2016 年五期 UAESV 的全局 Moran's I 值(显著性水平 0.05)分别为:0.820 4,0.807 1,0.820 3,0.836 1,0.857 1,(Z 值分别为:71.10,71.05,71.06,69.46,62.49),5 个时期全局 Moran's I 值呈现先下降后持续增加的趋势,

表明生态系统服务价值空间分布存在明显的正自相关性,UAESV 呈现聚集分布。图 7 显示,1974—2016 年 UAESV 的高值和低值空间聚集变化相似,滇池水体区域高,滇池北部、中东部地区高于其他地区。G 指数分析 UAESV 的热点区(深色)从分散到集中,研究期内生态系统服务价值高值集中在土地利用方式单一的滇池水体和城镇集中连片区域,分别成为高、低值区。1974 年流域热点相对较多,分散明显,范围较广,主要此时期城镇建设用地发展规模相对较小,成片林地和耕地分散分布用地较多,后期随着城市建设对耕地及林地的占有逐渐消失殆尽,到 2016 年热点集中成片明显,主要分布于主城四区—经开区—呈贡—马金铺—晋城—晋宁及滇池水域,呈集中扩大趋势,明显受人口、土地城镇化,产业集聚和人类活动干扰影响。

3.3.2 空间分异驱动因素分析 根据前面的研究方法,为了避免截面数据分析可能造成的偶然性,研究选用 1974—2016 年 5 期各年份滇池流域所在地 7 个区县经济数据值经过取对数和标准化处理后进行模型计算结果见表 5。

模型及各指标都通过 1% 检验,拟合度为 92.8%,都是滇池流域 ESV 的驱动因素。绿化率对 ESV 有着正面影响,而其他指标有着负面影响。绿化率每增加 1% 会带来人均 ESV 增加 4.184%,正向变化最为明显;第三产业比重每增加 1% 会带来人均 ESV 减少 2.12%,负向变化最为明显。研究表明,滇池流域增加绿化率是提高 ESV 的首要因素和直接措施,即滇池流域城镇化建设过程中可以通过改善土地利用结构,不断提高绿化率(绿地率)改善生态环境;影响 ESV 最重要的负面因素是第三产业比重和人均 GDP,尤其是 1998 年以来城镇化扩展侵占了大量生

态用地,以及人均收入水平的不断提高导致生态系统服务功能价值逐渐减少。因此流域可通过提高土地,尤其是第三产业用地集约化,提升土地利用强度改善生态系统服务水平;万元 GDP 能耗量每增加 1%,人均 ESV 减少幅度为 1.394%,说明提高第三产业比值

(产业结构升级),创新集约有利于生态系统服务;区域人口城市化及建设用地扩展侵占了林、耕等生态功能用地,对 ESV 产生负效应,人均 ESV 减少,说明城市经济发展本身对区域生态环境造成压力,滇池流域城镇化需要协调控制人口规模。

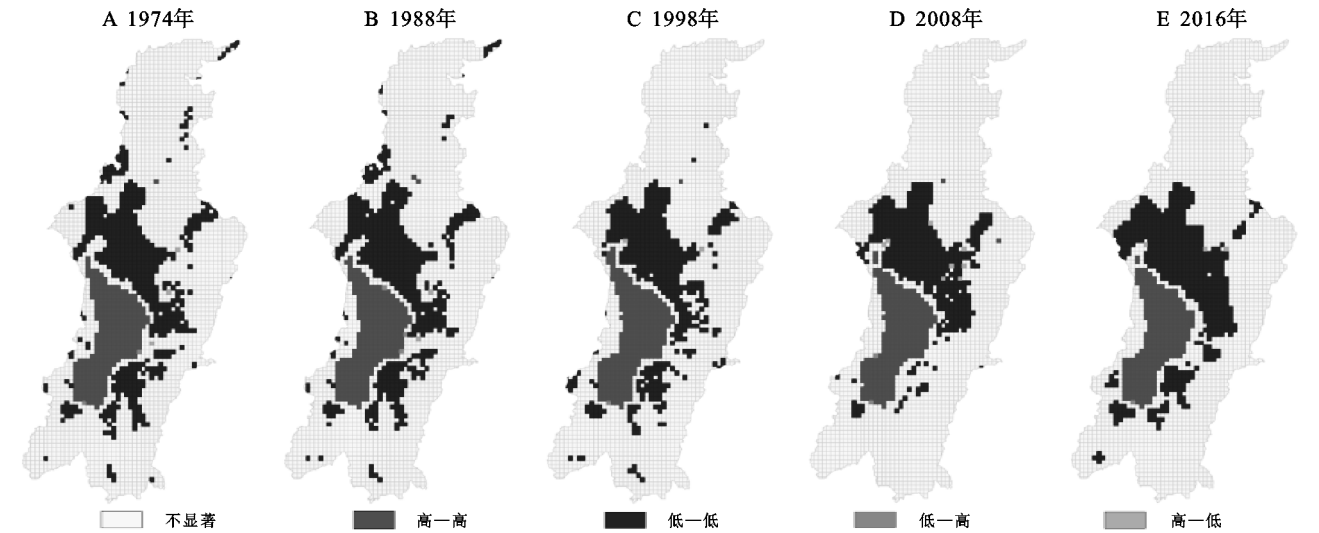


图 7 1974—2016 年滇池流域生态服务价值空间自相关 LISA 图

表 5 STIRPAT 模型 OLS 估计结果

变量	系数	标准误差	统计量	$R^2$	$F$
$E$	26.364	0.932	10.597		
$\ln P$	-0.935	0.406	-1.81		
$\ln A$	-1.659	0.816	-0.82		
$\ln G$	4.184	0.606	3.65	0.928	31.173
$\ln S$	-2.12	0.551	-1.611		
$\ln N$	-1.394	0.043	-5.58		
$\ln U$	-0.78	0.042	-0.48		

4 讨论与结论

(1) 滇池流域 1974—2016 年间各尺度生态服务价值时空变化剧烈,生态服务价值整体呈降低、聚集趋势。从县域看,从中心城区向外部区县逐步拓展辐射,特别是五华、官渡、盘龙等,原因是城市化、建设用地持续扩张,人类活动扰动导致生态功能用地面积不断压缩,生态服务价值降低。从乡镇看,ESV 等级变化较为剧烈,但整体空间格局依然保持基本稳定,高生态服务价值区主要分布在滇池水域及流域北部、西部的乡镇、街道,主要源于区域自然、水源地保护和较大面积森林覆盖。从村级看,ESV 较高等级集中稳定分布在流域的北部和西部,如昭宗、松华坝水库及西山国家森林公园、海口林场,受人类干扰活动的扰动小的区域。ESV 等级变化频繁集中在流域的中部和东南部快速城镇化地区,说明高原湖滨区域作为人类活动密集、政策影响明显和改变地表强烈的区域单元,生态安全问题尤为突出,生态安全格局构建需求强烈。

(2) 43 年间不同栅格单元 ESV 等级分布变化,空间差异显著,呈现出中部(滇池北岸)和东南部远高于流域四周的分布特点。较高、高 ESV 区主要集中在滇池流域的北部、西部及中部,该区域水域、保护区、林地比例较高;低 ESV 区分布在流域北部主城—经开—呈贡—大学城等城市建设带。总体上 86.38% 的区域生态服务等级下降,局部低等级区快速增加且集中连片,表明流域仍是城乡建设和开发的重点发展区,环湖区域农业、花卉种植、旅游和房地产开发带来 ESV 的持续下降,是今后生态服务价值改善和调控的重点区域。滇池流域 ESV 空间聚集程度先降后升,整体增加,因前期城镇化、旅游业分散点状分布,图斑破碎化;后期城镇化集聚开发建设,城市蔓延聚集。因此,控制滇池流域城市化带来的建设用地扩展规模,优化城市功能和产业结构,特别是沿滇池湖泊周边土地利用结构,增强土地利用生态承载力,减轻流域生态环境的压力。

(3) 43 年间滇池流域生态系统服务价值总体呈下降趋势,其中林地价值所占比重最大,其他依次为水域、其他用地和耕地,比重最低是建设用地。随着土地利用方式和覆被变化,ESV 也随之改变,整体上典型城市化集中地区的影响要大于生态涵养发展区县,不同县区的发展水平导致流域生态系统服务价值时空分异和驱动因素自然差异,故城镇村扩展快速区域(五华、盘龙等)要节约集约利用土地、增加生态绿地、高新技术产业用地和控制人口,相对经济欠发达、



农地比例高、生态良好地区(晋宁、嵩明等)是流域的生态安全屏障。因此,为保护自然生态和人类持续发展,减缓土地利用生态服务价值下降趋势,必须在尽可能保护生态环境价值的前提下谋求社会经济发展,严格限制建设用地蔓延扩张,划定生态红线等国土“三线”空间,加快流域生态脆弱区生态隔离带建设,严格生态指标监测。

(4) 本文以滇池流域为研究对象,基于土地利用变化理论和方法、通过对 1974—2016 年多尺度滇池流域土地利用 ESV 的时空分异和影响因素计量分析,揭示了流域生态服务价值的时空演变、分异规律和主要成因,明确了生态保护的着力点,为今后滇池流域生态文明建设、城镇建设用地扩展和社会经济发展提供参考。受限于滇池流域复杂的地形条件以及早期较低的遥感影像分辨率,仅将土地利用类型宏观划分为 5 类,今后考虑对分类方法做进一步细化研究;研究考虑了建设用地的负效应,但未对建设用地其他服务功能做详尽研究,可能对研究结果产生一定影响。但高原湖滨城镇化区域用地扩张对湖泊生态系统的影响日渐突出,如何进行生态系统服务之间的权衡协调关系,如何科学进行保护性适度开发,是当前乃至今后相当长时期流域高质量发展的难题。

#### 参考文献:

- [1] Costanza R, de Groot R, Farber S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] 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): 189-195.
- [3] 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.
- [4] 张明阳, 王克林, 陈洪松, 等. 喀斯特生态系统服务功能遥感定量评估与分析[J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 5891-5901.
- [5] 严恩萍, 林辉, 党永峰, 等. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 5007-5020.
- [6] 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.
- [7] Schirpke U, Tscholl S, Tasser E. Spatio-temporal changes in ecosystem service values: Effects of land-use changes from past to future (1860—2100)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 272: 111068.
- [8] 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.
- [9] 赵育恒, 曾晨. 武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(4): 1426-1440.
- [10] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 等. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [11] 谢启蛟, 刘进华. 1987—2016 年武汉城市湖泊时空演变及其生态服务价值响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7840-7850.
- [12] 宋敏敏, 张青峰, 吴发启, 等. 黄土沟壑区小流域景观格局演变及生态服务价值响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2649-2659.
- [13] 王奕洪, 李国平. 流域生态服务价值供给的补偿标准评估: 以渭河流域上游为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(1): 108-116.
- [14] 王显金, 钟昌标. 基于 CVM 的海涂湿地生态服务价值的模糊评估模型[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2974-2983.
- [15] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小华, 等. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 4760-4773.
- [16] 张鹏岩, 耿文亮, 杨丹, 等. 黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 277-288.
- [17] 袁周炎妍, 万荣荣. 生态系统服务评估方法研究进展[J]. *生态科学*, 2019, 38(5): 210-219.
- [18] 程琳, 李锋, 邓华锋. 中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变[J]. *生态学报*, 2011, 31(20): 6194-6201.
- [19] 陈端吕, 陈哲夫, 彭保发. 土地利用生态服务价值与经济协调及空间分异: 以西洞庭湖区为例[J]. *地理研究*, 2018, 37(9): 1692-1703.
- [20] 金贵, 吴锋, 李兆华, 等. 快速城镇化地区土地利用及生态效率测算与分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(23): 8048-8057.
- [21] 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.
- [22] 周筱雅, 刘志强, 王俊帝, 洪亘伟. 中国建制市人均公园绿地面积的探索性空间数据分析[J]. *生态经济*, 2019, 35(10): 86-93.
- [23] 刘淑花, 谭旭红, 陈梅. 基于 STIPAT 模型的碳排放驱动因子研究: 以黑龙江省为例[J]. *资源开发与市场*, 2014, 30(9): 1086-1091.
- [24] 陈志建, 王铮. 中国地方政府碳减排压力驱动因素的省际差异: 基于 STIPAT 模型[J]. *资源科学*, 2012, 34(4): 718-724.
- [25] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive[J]. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [26] 唐秀美, 郝星耀, 刘玉, 等. 生态系统服务价值驱动因素与空间异质性分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 336-342.
- [27] 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.