

浙闽山地丘陵地区地域景观时空演变与 多情景模拟预测*

——基于 PLUS-ESV 模型分析

任 维^{1,2} 张嘉林^{1,2} 卢俊涵^{1,2} 林欣玮¹ 周敏盈³

1 福建农林大学风景园林与艺术学院 福州 350100

2 海峡美丽乡村人居环境研究中心 福州 350100

3 福建农林大学戴尔豪西大学联合学院（国际学院） 福州 350100

摘要：聚焦浙闽地区地域景观既有研究对内陆地区关注不足，且中尺度县域研究与定量研究相对较少的问题，文章以福建沙县为对象，基于卫星遥感数据、自然与社会开源数据、统计年鉴等，运用景观格局指数、PLUS 模型、生态系统服务价值（ESV）评估等方法，模拟预测 2030 年 3 个发展情景，以揭示 1990 年来地域景观空间格局及 ESV 的时空演变，为以沙县为代表的浙闽内陆人居环境可持续发展提供有力支撑。结果表明：1) 1990—2020 年，林地与耕地此消彼长，建设用地显著增长。2) 1990—2020 年，景观破碎度、复杂度、离散性及异质性增加，景观优势斑块的连通性与聚合度下降；ESV 加速下降，较高及以上价值区向中及以下价值区加速转化。3) 2030 年，生态保护情景下的总体景观破碎度最低、ESV 最高。综上可知，生态保护情景能最大化保留沙县山水林田城乡一体的地域景观特征，也最符合地区“生态宜居”“生活幸福”等高质量发展要求。

关键词：地域景观；PLUS 模型；生态系统服务价值评估；多情景模拟；山地丘陵地区

DOI: 10.12169/zgcsly.2024.01.26.0001

Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation Prediction of Regional Landscapes at Hilly Mountainous Areas in Zhejiang and Fujian Based on PLUS-ESV Model

Ren Wei^{1,2} Zhang Jialin^{1,2} Lu Junhan^{1,2} Lin Xinwei¹ Zhou Mingying³

(1. College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China; 2. Research Center for Strait Beautiful Rural Human Settlements, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China; 3. FAFU-DAL Joint College (International College), Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China)

Abstract: The established studies focusing on the regional landscape in Zhejiang and Fujian have paid insufficient attention to inland areas, and there are relatively few mesoscale county studies and quantitative

收稿日期：2024-01-26

* 基金项目：教育部人文社会科学研究青年基金项目（20YJC760079）；福建省财政厅专项资助（202315）；2021 年福建省本科高校教育教学改革研究项目（FBJG20210091）；福建农林大学科技创新专项基金项目（社科类）（CXZX2022057, CXZX2023005）

第一作者：任维（1988-），男，博士，副教授，硕士生导师，福建农林大学风景园林与艺术学院风景园林系主任，海峡美丽乡村人居环境研究中心副主任，研究方向为国土景观、地域景观、景观感知与评价、风景园林规划设计。

E-mail: Ren-wei@fafu.edu.cn

studies. Taking Shaxian County of Fujian as a research object, we simulate and predict three development scenarios in 2030 using the landscape pattern index, PLUS model, and ecosystem service value assessment (ESV) based on remote sensing data, nature and society open-source data and statistical yearbooks, to reveal the spatial pattern of regional landscapes and the spatio-temporal evolution of the ESV since 1990. It is aimed to provide strong supports for the sustainable development of the inland human settlements in Zhejiang and Fujian, represented by Shaxian County. The results show that: 1) From 1990 to 2020, the forestland conversion to farmland increased, and construction area increased significantly; 2) From 1990 to 2020, landscape fragmentation, complexity, dispersion and heterogeneity increased, and connectivity and aggregation of dominant patches of the landscapes decreased. The ESV declines at an accelerated rate, and the conversion of the areas with higher values to the areas with medium and lower value areas were accelerated; and 3) In 2030, landscape fragmentation will be the lowest while the ESV will be the highest under the scenario of ecological protection. The ecological protection scenario can maximize the preservation of the regional landscapes with the characteristics of Shaxian County, which integrates mountains, waters, forests, farmlands, urban area and rural area, and remains the most consistent with the requirements for high-quality development, such as “eco-livability” and “happy life” in the region.

Keywords: regional landscape; PLUS model; ecosystem services valuation; multi-scenario simulation; hilly mountainous area

国土空间是人地耦合系统^[1],在一定地域内表征为自然和人文相融、特征独特的地域景观^[2]。“看得见山,望得见水,记得住乡愁”强调了地域山水环境与居民集体记忆、情感纽带间的紧密联系。在“人与自然生命共同体”“两山理论”等时代背景下,地域景观成为衔接精神文明建设和生态文明建设的重要桥梁。快速城镇化背景下,土地利用剧烈变化对地域景观造成了不小冲击。因此,亟待从格局特征、时空演变、生态服务等方面深化土地利用的定量解析与模拟预测。

浙闽地区是地域景观研究的重点与热点区域之一,既有成果丰硕:一是基于传统图文数据的景观生成机制定性研究,大多对方志、舆图、测绘图、航拍图等进行系统性解读,以梳理地域景观及传统人居智慧^[3-10];二是利用遥感数据等解译土地利用/覆被变化,揭示其景观格局、驱动因素、生态系统服务等时空演变机制^[11-14]。然而,既有研究尚存两方面不足:一是多集中在滨海平原,对内陆地区关注不足,且中尺度县域研究相对缺乏;二是多为基于传统图文资料的定性研究,定量研究相对较少。这制约了对浙闽内陆山地丘陵地区地域景观的精细化、量化与动态化的科学认知,不利于地区人居环境的高质量发展。

本文以浙闽内陆山地丘陵地区的福建沙县为对象。基于1990—2020年的4期土地利用数据,

自然、社会、经济、距离4类14个影响因子,借助PLUS模型实现3种发展情景下2030年土地利用的模拟预测,进而综合运用景观格局指数和生态系统服务价值评估,解析地域景观的时空演变并比较不同发展情景下的异同,探寻沙县地域景观发展的指导性策略,为以沙县为代表的浙闽内陆人居环境可持续发展决策提供有力支撑。

1 研究区域概况

沙县地处福建中部(26°06′—26°40′N, 117°32′—118°06′E),是浙闽内陆的重要交通枢纽。气候属亚热带大陆性气候,年均气温18.8~19.6℃,年均降水量1510~1840mm。沙县总面积约1798.7km²,“八山一水一分田”是浙闽内陆山地丘陵地区地域景观的典型样本。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

1) 1990、2000、2010及2020年30m土地利用数据来源于武汉大学遥感院遥感信息处理研究所^[15]。土地利用类型依据《土地利用现状分类》(GB/T21010-2017),结合实地考察,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地5类。

2) DEM高程数据来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为

30 m×30 m。

3) 人口、GDP、年平均气温、年平均降水、土壤类型分布等数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1 km×1 km。

4) 行政边界及驻地、道路、铁路、水系等矢量数据来源于全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/>)。

5) 其他社会经济数据来自《沙县志(1989—2005)》《沙县统计年鉴 2020》《2020 全国农产品成本收益资料汇编》等。

以上数据用 ArcGIS 软件完成投影变化、裁剪、重分类、欧氏距离等预处理, 统一转化为 30 m×30 m 的栅格数据。

2.2 研究方法

2.2.1 土地转移矩阵

土地转移矩阵可定量反映土地类型结构变化^[16]:

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

式(1)中: S 表示面积; n 代表土地利用类型数; i 代表转移前的土地利用类型; j 代表转移后的土地利用类型; S_{ij} 代表 i 地类转换成 j 地类的

面积^[17]。

2.2.2 景观格局指数

景观格局指数能描述土地利用类型变化对区域景观结构的影响, 可为土地利用结构调整改进及土地资源优化配置提供参考^[18-20]。基于 Fragstats4.2 软件, 结合研究区域的独特性, 从类型水平、景观水平选取 7 个景观指数^[21-26], 即斑块密度(PD)、最大斑块面积指数(LPI)、边缘密度指数(ED)、景观形状指数(LSI)、聚合度(AI)、蔓延度指数(CONTAG)与香农多样性指数(SHDI)。

2.2.3 生态系统服务价值

以谢高地等^[27]修正后的单位面积 ESV 当量表为基础, 结合沙县情况, 筛选出单位面积 ESV 当量表。因 1 个 ESV 当量因子的经济价值量等于当年全国平均粮食单产市场价值的 1/7^[28], 参考《沙县统计年鉴 2020》《2020 全国农产品成本收益资料汇编》等, 得到沙县 1 个标准单位 ESV (1 023.98 元·hm⁻²) 及各地类单位面积 ESV (表 1)。ESV 计算公式如下:

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

式(2)中: ESV 为生态系统服务总价值(元); A_i 是第 i 类土地类型面积(hm²); VC_i 是第 i 类土地类型单位面积生态系统服务价值系数(元·hm⁻²)^[29]。

表 1 沙县单位面积 ESV

元·hm⁻²

一级服务	二级服务	耕地	林地	草地	水系	建设用地
供给服务	食物生产	1 392.61	269.65	307.19	819.18	0.00
	原料生产	92.16	614.39	455.67	235.51	0.00
	水资源供给	-2 693.05	317.43	250.87	8 488.75	0.00
调节服务	气体调节	1 136.61	2 024.06	1 592.28	788.46	20.48
	气候调节	583.67	6 061.93	4 213.66	2 344.90	0.00
	净化环境	174.08	1 774.89	1 392.61	5 683.06	102.40
	水文调节	2 785.21	3 959.37	3 087.29	104 691.22	30.72
支持服务	土壤保持	10.24	2 467.78	1 940.43	952.30	20.48
	维持养分循环	194.56	187.73	148.48	71.68	0.00
	生物多样性	215.03	2 245.92	1 766.36	2 611.14	20.48
文化服务	美学景观	92.16	986.43	778.22	1 935.31	10.24

2.2.4 土地利用格局情景模拟

以 PLUS 模型为土地利用情景模拟软件^[30], 选取高程、坡度、年平均气温、年平均降水量、土壤类型、人口密度、地区生产总值、距铁路距离、距高速距离、距二级道路距离、距三级道路距离、距四级道路距离、距河流距离、距政府驻

地距离 14 个影响因子^[31-32]。结合 1990、2000、2010 及 2020 年土地利用数据, 领域权重参数采用公式(3)计算^[33]。运用用地扩张分析策略、Markov 模型、基于多类随机种子的 CA 模型等工具进行模拟结果精度评估。模拟预测 2020 年土地利用数据 Kappa 系数为 0.75>0.7, 模拟结果一致

性与精度较高^[34]。

$$X_i = \frac{\Delta TA_i - \Delta TA_{\min}}{\Delta TA_{\max} - \Delta TA_{\min}} \tag{3}$$

式 (3) 中： X_i 为某一地类 i 的领域权重参数； ΔTA_i 为研究时段内该地类 TA 的变化量； $\Delta TA_{\max}$ 、 $\Delta TA_{\min}$ 分别为研究时段内 TA 的最大、最小变化量^[35]。

设置自然发展 (ND)、城镇发展 (UD) 与生态保护 (EP) 3 种沙县 2030 年土地利用预测情景，将水域作为约束条件，限制其任意转换。ND 情景延续 2020 年以前的土地利用类型转移情况，以预测 2030 年各地类面积及空间分布；UD 情景将耕地、林地、草地向建设用地的转移概率增加 20%，建设用地向其他类型转移概率降低 30%；

EP 情景将耕地、林地向建设用地的转移概率降低 30%，草地、水域向建设用地的转换概率降低 20%，建设用地向其他类型转移概率增加 10%^[36]。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

3.1.1 土地利用空间格局

由图 1、表 2 可知：林地为主要景观，构成人居环境生态本底；耕地为次要景观，集中于西北部的夏茂镇、富口镇与高桥镇，东南部零星分布；水域为一般景观，主要为沙溪河水系；建设用地为一般景观，集中于中部城区，其余散布于溪河水系周边；草地为一般景观。

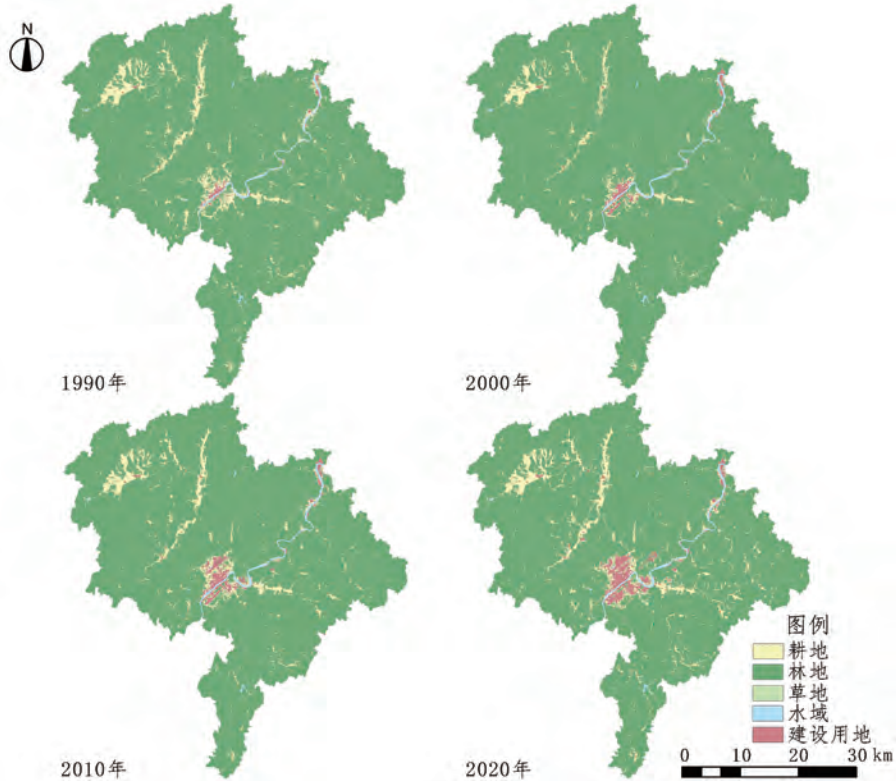


图 1 1990—2020 年沙县土地利用类型

表 2 1990—2020 年沙县各地类面积及占比

用地类型	1990 年		2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/ hm ²	占比/%	面积/ hm ²	占比/%	面积/ hm ²	占比/%	面积/ hm ²	占比/%
耕地	11 867. 31	6. 60	7 424. 91	4. 13	9 984. 51	5. 55	13 244. 58	7. 36
林地	165 950. 91	92. 26	169 691. 85	94. 34	165 976. 83	92. 28	161 452. 26	89. 76
草地	29. 61	0. 01	8. 91	0. 01	17. 46	0. 01	10. 26	0. 01
水域	1 218. 69	0. 68	1 407. 78	0. 78	1 428. 12	0. 79	1 388. 79	0. 77
建设用地	803. 88	0. 45	1 336. 95	0. 74	2 463. 48	1. 37	3 774. 51	2. 10
总计	179 870. 40	100. 00	179 870. 40	100. 00	179 870. 40	100. 00	179 870. 40	100. 00

3.1.2 土地利用时空演变及多情景模拟预测

1990—2020年单类用地首末期时空演变方面(表2):林地、草地分别减少了4 498.65 hm²(降幅2.71%)与19.35 hm²(降幅65.35%)。耕地、水域与建设用地分别增长了1 377.27 hm²(增幅11.61%)、170.10 hm²(增幅13.96%)与2 970.63 hm²(增幅369.54%)。

1990—2020年各区间土地利用时空演变方面(表3、图2、图3):1) 1990—2020年变化总面积为10 081.71 hm²(占比5.60%)。变化面积大小依次为:林地>耕地>水域>建设用地>草地。2)

1990—2000年,耕地是转出主体(82.25%),多转为林地;林地次之(15.19%),多转为耕地。3) 2000—2010年,林地是转出主体(77.65%),多转为耕地;耕地次之(20.20%),多转为林地与建设用地。4) 2010—2020年,林地与耕地仍是土地转出主体(78.74%与20.06%),其他地类土地变化活跃度减弱。

运用PLUS模型,实现自然发展(ND)、城镇发展(UD)与生态保护(EP)3种情景下2030年沙县土地利用的模拟与预测,结果如图4、表4所示。

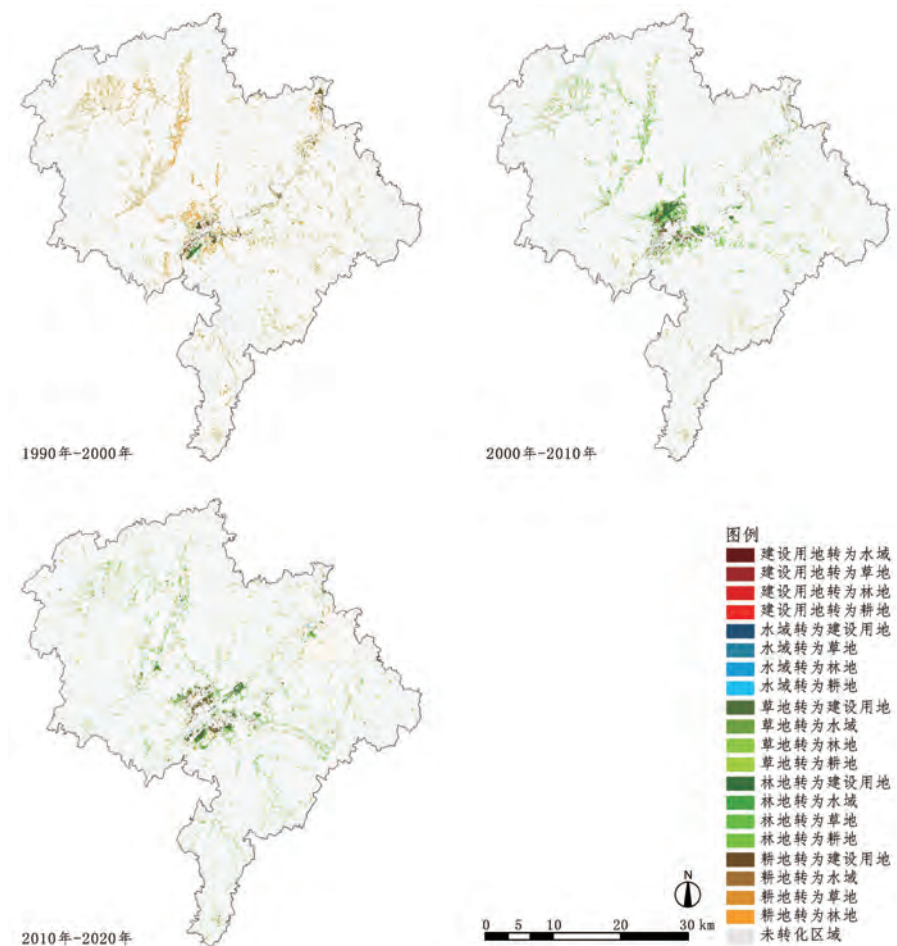


图2 1990—2020年沙县土地利用变化图谱

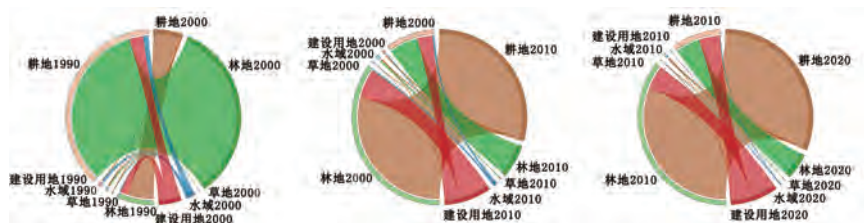


图3 1990—2020年沙县土地利用面积转移

表 3 沙县土地利用转移矩阵

							hm ²
时段	土地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	变化面积
1990—2000 年	耕地	6 426.98	4 881.07	1.34	157.84	399.31	5 439.56
	林地	768.98	164 785.96	1.03	26.66	207.92	1 004.60
	草地	8.13	11.90	5.29	2.26	2.03	24.32
	水域	6.89	37.03	0.00	1 164.14	9.31	53.23
	建设用地	26.31	7.19	0.01	57.98	712.38	91.50
2000—2010 年	耕地	6 007.36	774.11	5.15	49.78	400.89	1 229.94
	林地	3 914.52	164 995.23	8.38	35.85	769.17	4 727.92
	草地	3.06	0.97	3.11	0.00	0.54	4.57
	水域	25.86	41.32	0.60	1 330.95	10.15	77.94
	建设用地	32.85	5.16	0.22	10.21	1 282.51	48.44
2010—2020 年	耕地	8 652.51	701.91	4.86	18.18	607.05	1 332.00
	林地	4 532.22	160 749.45	2.07	1.71	691.38	5 227.38
	草地	5.13	0.81	3.06	0.27	8.19	14.40
	水域	54.27	0.09	0.27	1 366.20	7.29	61.92
	建设用地	0.45	0.00	0.00	2.43	2 460.60	2.88
1990—2020 年	耕地	8 449.02	1 976.31	2.79	169.02	1 270.17	3 418.29
	林地	4 750.47	159 443.00	4.95	8.91	1 743.30	6 507.63
	草地	10.53	10.26	2.25	1.53	5.04	27.36
	水域	30.15	22.23	0.27	1 152.09	13.95	66.60
	建设用地	4.41	0.18	0.00	57.24	742.05	61.83

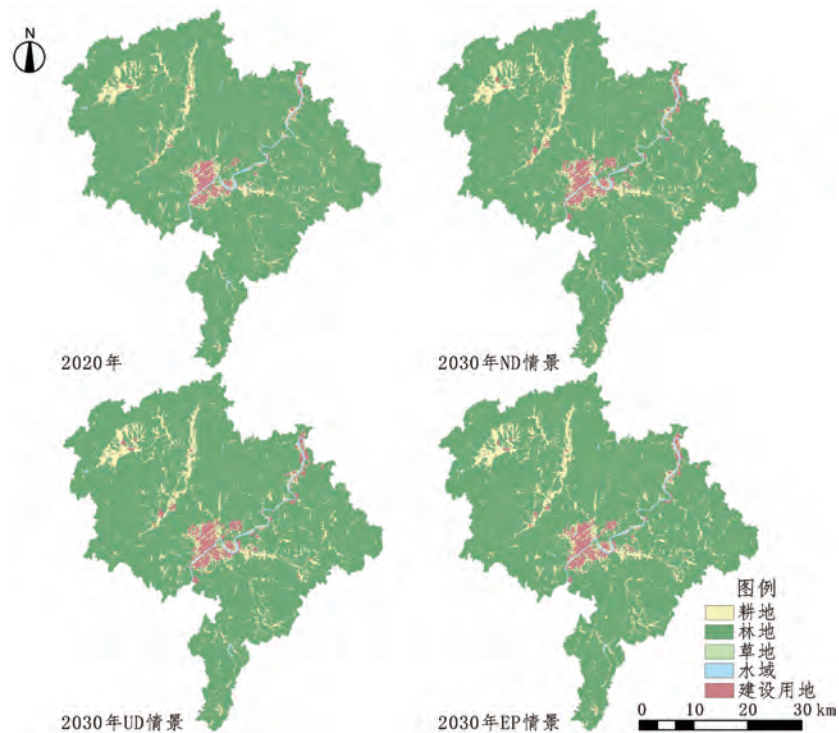


图 4 2030 年 3 种发展情景下沙县土地利用类型

表 4 2030 年 3 种情景下沙县各地类面积及占比

用地类型	2020 年土地利用现状		2030 年 ND 情景		2030 年 UD 情景		2030 年 EP 情景	
	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%
耕地	13 244.58	7.36	15 942.78	8.86	15 789.73	8.78	16 171.85	8.99
林地	161 452.26	89.76	157 299.03	87.45	157 156.17	87.37	157 513.55	87.57
草地	10.26	0.01	10.53	0.01	10.05	0.01	10.89	0.01
水域	1 388.79	0.77	1 358.28	0.76	1 356.73	0.75	1 360.42	0.75
建设用地	3 774.51	2.10	5 259.78	2.92	5 557.73	3.09	4 813.69	2.68
总计	179 870.40	100.00	179 870.40	100.00	179 870.40	100.00	179 870.40	100.00

3 种情境下，城镇化均延续了既有的扩张趋势，城市建设内聚化特征更加显著。不同情境下，城镇化扩张的速度与趋势各异，各土地利用类型面

积呈现多样的变化：1) 耕地与建设用地增长。东南部有较大的耕地斑块，主要分布在虬江街道西部；建设用地于城区周边、沙溪下游和西北主要耕

地区显著扩张。2) 草地保持稳定。3) 林地与水域减少。林地于中部主城区及西北部夏茂镇、高桥镇、富口镇显著减少;水域略有减少(图4~5)。

由表4、图5可知:与2020年相比,2030年ND情景下的林地、水域分别减少了2.57%与2.20%,耕地、草地、建设用地分别增加了20.37%、2.63%与39.35%;2030年UD情景下的林地、草地、水域分别减少了2.66%、2.05%与2.31%,耕地、建设用地分别增加了19.22%与47.24%;2030年EP情景下的林地、水域分别减少了2.44%与2.04%,耕地、草地、建设用地分别增加了22.10%、6.14%与27.53%。

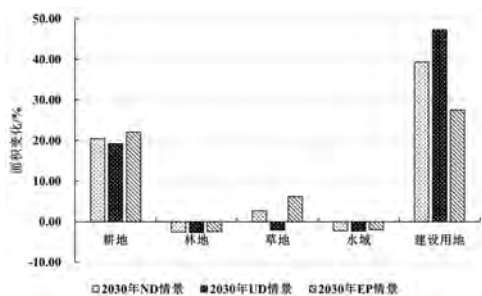


图5 2030年3种情景下各地类面积较2020年的变化

3.2 景观格局指数

3.2.1 景观层级的景观格局指数变化

如表5所示:1990—2020年,PD、ED、LSI与SHDI先减后增,其中PD以2010年为低点呈U型变化,景观破碎度先减后增;ED、LSI与SHDI以2000年为低点呈U型变化,景观复杂度、不规则度、离散度与异质性增大。CONTAG与AI以2000年为高点呈倒U型变化,景观优势斑块的连接性与聚合度下降。

表5 沙县景观层级景观格局指数

年份	PD	ED	LSI	CONTAG	SHDI	AI
1990	4.49	22.20	26.38	86.24	0.31	96.56
2000	2.97	15.70	19.50	88.84	0.26	97.53
2010	2.73	17.01	20.88	86.27	0.33	97.34
2020	3.13	21.79	25.95	83.12	0.41	96.63
2030年ND情景	3.00	28.66	33.23	79.93	0.23	95.60
2030年UD情景	3.04	28.73	33.31	79.78	0.23	95.59
2030年EP情景	2.98	28.37	32.93	80.18	0.22	95.64

相较于2020年,2030年3种情景中PD、CONTAG、SHDI与AI减少,ED与LSI增加。景观破碎度减少,景观复杂度增加。总体景观格局破碎度程度为:UD情景>ND情景>EP情景。

3.2.2 类型层级的景观格局指数变化

1990—2020年,各地类景观格局指数总体特征(表6)表明:PD上,耕地>林地>建设用地>水域,耕地显著高于其他地类,分布数量最多、最密;LPI上,林地>耕地>水域>建设用地,林地显著高于其他,占绝对优势;ED上,耕地>林地>建设用地>水域,耕地、林地显著高于其他地类,破碎度更高;LSI上,耕地>建设用地>林地>水域,耕地显著高于其他地类,斑块复杂度最高;AI上,林地>水域>建设用地>耕地,林地比其他稍高,聚集度也稍高。综上,林地的LPI与AI最高,景观优势度高,是主导景观;耕地的PD、ED与LSI最高,分布数量最多、最密,斑块破碎度及形状复杂度;建设用地的各景观格局指数均值均不显著。

1990—2020年,各地类景观格局指数变化特征(表6)表明:耕地各指数先减后增,其中PD、LSI于2010年达最低值;LPI、ED及AI于2000年达最低值。林地的PD、ED与LSI先减后增,于2000年达最低值;LPI先增后减,于2000年达最高值;AI小幅波动。水域中的LSI先减后增,于2000年达最低值;LPI与AI先增后减,分别于2010年、2000年达最高值;PD与ED小幅波动。建设用地各指数增长,其中PD与LSI先减后增,于2000年达最低值;LPI、ED与AI持续增长。总体而言,水域与林地受人类活动干扰小,其中水域更稳定,景观优势度、破碎度与聚集度缓慢增长;林地景观密度、破碎度与复杂度先减后增,景观优势度先增后减。建设用地与耕地受人类活动干扰大,其中建设用地最活跃,景观密度、优势度、破碎度、复杂度与聚集度均显著增长;耕地活跃度次之,景观密度、优势度、破碎度、复杂度与聚集度先减后增。

与2020年相比,2030年3种情景的变化结果(表6)表明:耕地的PD与AI由增转减,LPI、ED与LSI持续增长,景观密度与聚集度减少,景观优势度、破碎度与复杂度增长。UD情景下,耕地的景观聚集度最低;EP情境下,耕地的景观密度最低,破碎度与复杂度最高。林地的PD、ED与LSI持续增长,LPI与AI减少,景观密度、破碎度与复杂度增长,景观优势度与聚集度减少。

表6 沙县类型层级景观格局指数

土地利用类型	指数	1990年	2000年	2010年	2020年	1990—2020年 均值	2030年ND 情景	2030年UD 情景	2030年EP 情景
耕地	PD	3.37	2.19	1.67	2.05	2.32	1.69	1.70	1.66
	LPI	0.91	0.67	0.81	1.18	0.89	1.38	1.32	1.38
	ED	21.26	14.42	15.38	20.15	17.80	25.50	25.34	25.71
	LSI	87.75	75.21	69.19	78.75	77.72	90.88	90.75	90.96
	AI	76.02	74.05	79.44	79.66	77.29	78.59	78.52	78.72
林地	PD	0.62	0.41	0.58	0.52	0.53	0.81	0.84	0.80
	LPI	54.39	56.04	54.49	53.06	54.50	51.81	51.79	51.94
	ED	20.16	13.86	14.20	17.79	16.50	24.45	24.51	24.15
	LSI	25.16	18.02	18.57	22.85	21.15	30.67	30.77	30.33
	AI	98.22	98.76	98.70	98.37	98.51	97.75	97.75	97.78
水域	PD	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10
	LPI	0.57	0.64	0.68	0.65	0.64	0.65	0.65	0.65
	ED	1.23	1.22	1.25	1.24	1.23	1.27	1.28	1.26
	LSI	16.23	15.00	15.31	15.37	15.48	15.68	15.70	15.51
	AI	86.79	88.68	88.54	88.31	88.08	88.13	88.11	88.22
建设用地	PD	0.30	0.24	0.33	0.42	0.32	0.37	0.37	0.38
	LPI	0.13	0.20	0.54	0.77	0.41	0.80	0.84	0.79
	ED	1.57	1.85	3.09	4.33	2.71	6.04	6.27	5.57
	LSI	24.75	22.73	28.04	31.69	26.80	37.67	38.08	36.30
	AI	74.47	82.01	83.55	84.93	81.24	84.69	84.94	84.61

注：因草地占比不足0.02%，无法用Fragstats4.2正常运算，故不作分析。

UD情景下，林地的景观密度、破碎度与复杂度最高，景观优势度最低。水域的PD与LPI基本保持不变，AI略减，ED与LSI略增，聚集度略减，破碎度与复杂度略增。UD情景下，水域的聚集度最低，破碎度与复杂度最高。建设用地的PD与AI由增转减，LPI、ED与LSI持续增长，景观密度与聚集度减少，景观优势度、破碎度与复杂度增长。UD情景下，建设用地的景观优势度、破碎度与复杂度最高；EP情景下，建设用地

的景观聚集度最低。

3.3 ESV变化

3.3.1 ESV总体变化

由表7可知，1990—2020年，ESV先增后减（-6 640.19万元）。30年间各地类ESV变化情况为：耕地先减后增（548.56万元）；林地占比最大且变化最多，先增后减（-9 406.53万元）；草地最少且变化剧烈（-30.85万元）；水域先增后减（2 187.83万元）。

表7 研究区ESV变化

万元

土地利用类型	ESV						
	1990年	2000年	2010年	2020年	2030年ND情景	2030年UD情景	2030年EP情景
耕地	4 727.10	2 957.54	3 977.09	5 275.66	6 350.43	6 289.47	6 441.67
林地	346 996.30	354 818.40	347 050.46	337 589.77	328 905.55	328 606.82	329 354.09
草地	47.20	14.20	27.82	16.35	16.78	16.01	17.36
水域	15 675.00	18 107.08	18 368.70	17 862.83	17 470.40	17 450.47	17 497.96
建设用地	16.50	27.38	50.45	77.30	107.72	113.82	98.58
总计	367 462.10	375 924.60	369 474.51	360 821.91	352 850.87	352 476.58	353 409.66

2030年3种情景下，ESV均低于2020年，其中林地与水域ESV减少，耕地ESV微增。EP情景下，林地、草地、水域的生态用地ESV最高，且ESV总量最高。说明严格保护生态用地对保护生态安全具有重要作用^[37]。

3.3.2 ESV时空演变

采用网格法构建600 m×600 m的网格单元，并通过自然间断点法对ESV进行5级分类，即低价值区（0，22.20万元]、较低价值区（22.20万元，47.90万元]、中价值区（47.90万元，67.30万元]、较高价值区（67.30万元，139.00

万元]，高价值区（139.00万元，340.00万元）。

如图6所示，1990—2020年，大部分地区ESV为较高及以上。高价值区集中在沙溪等水域；较高价值区主要分布于林地，是ESV主要类型；中价值区主要分布于耕地及草地，散布于建设用地周边；较低及以下价值区分布于中心城区与西北部村镇等建设用地。1990—2000年，中价值区大面积升为较高价值区；2000—2010年，中部较低及以下价值区增加，部分较高价值区降为中价值区；2010—2020年，中部与西北部较低及以下价值区显著增长，且大部分较高价值区降为中价

值区,人类活动侵蚀自然生态区域状况加剧。

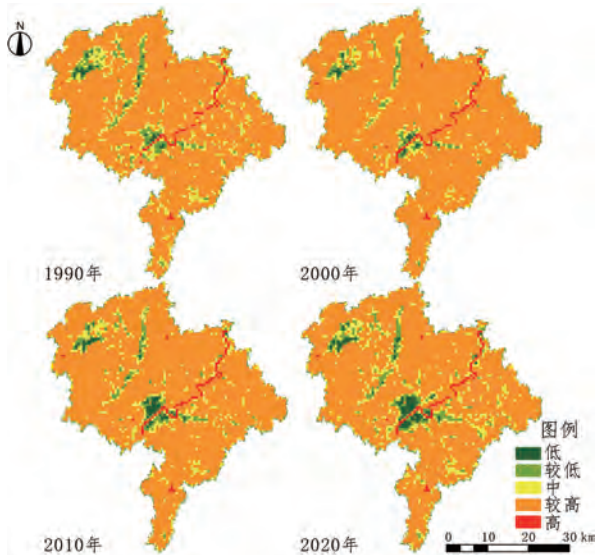


图6 1990—2020年沙县ESV空间分布

与2020年ESV相比,结果(图7)显示,3种情景下2030年的较高价值区大幅减少,中价值区散点扩张,较低与低价值区环状圈层式扩张。ND情景下,较低价值区零星散布;UD情景下,低价值区面积最大,聚集特征显著;EP情景下,中价值区面积大,散布特征显著。

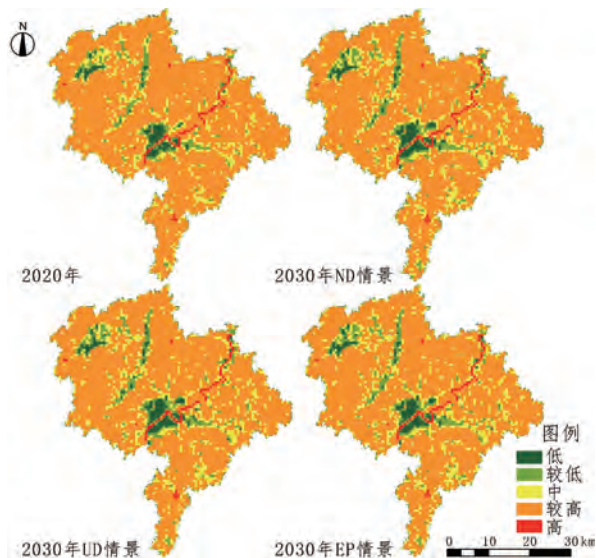


图7 2030年3种情景下沙县ESV空间分布

4 讨论与结论

4.1 讨论

1990—2020年,以事件、人口流动、政策为主导的经济社会变迁对沙县地域景观影响显著。1990—2000年,“倒会”风波和旧城改造致使常

住人口流失^[38]、建设用地增长缓慢、生态用地大幅增长,景观格局破碎度改善,ESV增长2.30%。2000—2010年,人口先增后减(2010年达最低值22.67万),经济状况好转,耕地与建设用地大量增加,景观破碎度加剧,ESV下降1.72%。2010—2020年,“生态优先”“遗产保护”“三区三线”等政策下,建设用地扩张减缓,林地与水域保护较好,景观破碎度趋缓,ESV下降2.34%。

相较于平原城市,山地城市建设用地紧张,生态环境更为敏感^[39]。30年间,林地是景观主体,城市发展因地形限制呈内聚化特征^[40]。建设用地与耕地协同外推,加剧了低海拔林地的转出。建设用地与生态用地间缺乏缓冲带。

2030年3种情景下,景观破碎度增加,ESV减少。仅EP情景在建设用地增长的同时,极大地缓解了地域景观破碎化程度,且ESV最高。因此,EP情景可更好地兼顾城镇良性发展与生态用地妥善保护^[41]。

本研究仍有一定的局限性:部分数据分辨率为1 km×1 km,精度有待提高;PLUS模型模拟中只选取了14种发展影响因子。未来将提高研究数据精度与丰富度。

4.2 结论

1) 1990—2020年,沙县地域景观变动剧烈。林地与耕地此消彼长,后者波动大;水域稳定;建设用地显著增长。景观破碎度加剧,景观复杂度、离散度及异质性增加,景观优势斑块连通性与聚合度下降。ESV先增后减且加速下降。较高及以上价值区虽仍占主体,但降为中及以下价值区的趋势加剧。中价值区散布于以建设用地为主的较低及以下价值区周边,三者协同扩张与外推。

2) 2030年3种情景中,EP情景景观破碎度最低、ESV最高。EP情景能最大化保留沙县山水林田城乡一体的地域景观特征,也最符合沙县十四五规划“生态宜居”“生活幸福”等高质量发展要求。

参考文献

- [1]郝庆,彭建,魏冶,等.“国土空间”内涵辨析与国土空间规划编制建议[J].自然资源学报,2021,36(9):2219-2247.
- [2]朱建宁.展现地域自然景观特征的风景园林文化[J].中国园林,2011,27(11):1-4.
- [3]任维,王向荣.温州传统人居环境景观体系研究[J].中国园

- 林,2021,37(10):30-35.
- [4] 张雪葳,王向荣.陂塘水利对城市及地域景观格局的影响:以杭州西湖为例[J].中国园林,2018,34(6):19-24.
- [5] 张雪葳,林超涵,任维,等.福州西湖水利遗产的景观多功能性与多主体博弈[J].中国园林,2023,39(8):36-42.
- [6] 张诗阳,王向荣.宁绍平原河网水系的形成、演变与当代风景园林实践[J].风景园林,2017(7):89-99.
- [7] 许少聪,郭巍,林管.泉州海港城市地域性景观特征与保护[J].中国城市林业,2020,18(1):82-86.
- [8] 黄楚梨,王晞月,王向荣,等.余杭南湖与“城-湖”风景体系研究[J].风景园林,2022,29(2):46-52.
- [9] 段威,梁彤.从海涂到新城:浙江萧山南沙地区圩田景观和聚落形态的历史演变[J].风景园林,2020,27(3):91-96.
- [10] 叶可陌,李雄.丽水瓯江流域古城山水风景系统构建特征研究[J].风景园林,2020,27(7):114-120.
- [11] 任维,张雪葳,李房英,等.基于景观破碎度分析的温州三垟湿地乡土景观保护研究[J].浙江农业学报,2019,31(11):1841-1854.
- [12] 娄艺涵,张力小,潘骏骏,等.1984年以来8个时期杭州主城区西部湿地格局研究[J].湿地科学,2021,19(2):247-254.
- [13] 王可心,刘欣,张云路.国土空间用地变化与生态系统服务价值时空演变关系[J].中国城市林业,2021,19(5):28-33.
- [14] 周道媛,王娟,周凤娟.基于PLUS模型多情景分析的土地利用变化及生态系统服务价值评估:以福州市为例[J].甘肃农业大学学报,2023,58(3):198-209.
- [15] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8):3907-3925.
- [16] 帅艳民,曲歌,邵聪颖,等.营口海岸带土地利用及景观格局35年变化[J].生态科学,2022,41(6):41-51.
- [17] 田培,龚雨薇,朱占亮,等.三峡水库坝区生态屏障区近25年土地利用变化评价[J].水土保持学报,2020,34(2):78-85.
- [18] 邬建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级:第2版[M].北京:高等教育出版社,2007:102-158.
- [19] 高艳丽,李红波.汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J].生态学报,2021,41(6):2248-2260.
- [20] 温玉玲,李红波,张小林,等.近30年来鄱阳湖环湖区土地利用与景观格局变化研究[J].环境科学学报,2022,42(7):501-510.
- [21] 吴婷婷,张广帅,闫吉顺,等.近30年鸭绿江口滨海湿地景观格局演变及其社会驱动力研究[J].海洋环境科学,2021,40(5):683-689,698.
- [22] 田雪,吴建召,杨鸿飞,等.汶川地震灾区典型小流域景观格局的演变特征:以龙溪河流域为例[J].应用与环境生物学报,2023,29(2):449-459.
- [23] 王圳峰,王欣珂,谢香群,等.基于GWR模型的福建省绿色空间景观格局演变影响因素及其空间差异[J].西北林学院学报,2022,37(5):242-250.
- [24] 张学文,郭晓华.石首市生态系统服务价值变化对景观格局演变的响应[J].中国城市林业,2022,20(3):61-68.
- [25] 吕大伟,蔡海生,张学玲,等.基于InVEST模型的万年县生境质量时空演变与景观格局分析[J].江西农业大学学报,2022,44(3):783-793.
- [26] 叶鑫,顾羊羊,林乃峰,等.自然保护区及周边的景观格局变化与驱动力分析:以贵州省兴义坡岗自然保护区为例[J].山地学报,2023,41(1):68-81.
- [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] 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] 谈旭,王承武.伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J].应用生态学报,2023,34(10):2747-2756.
- [30] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85:101569.
- [31] 王子尧,黄楚梨,李惊,等.耦合InVEST-HFI-PLUS模型的生态分区规划与动态评估:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J].生态学报,2022,42(14):5789-5798.
- [32] 朱寿红,孙玉杰,舒帮荣,等.规划政策影响下区域生态用地演变模拟研究:以南京市溧水区为例[J].地理与地理信息科学,2019,35(4):83-90.
- [33] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置:以闽三角城市群2030年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298.
- [34] 汪辉,刘媛,时艳,等.基于PLUS模型的溱湖国家湿地公园情景模拟与预测[J].浙江农林大学学报,2023,40(6):1311-1321.
- [35] 牛统莉,熊立华,陈杰,等.基于PLUS模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(2):129-141,151.
- [36] 李琛,高彬嫔,吴映梅,等.基于PLUS模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J].浙江农林大学学报,2022,39(1):84-94.
- [37] 高星,杨刘婉青,李晨曦,等.模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J].生态学报,2021,41(20):7974-7988.
- [38] 黄彩云.论沙县小吃产业的发展策略[J].内江科技,2010,31(7):4,9.
- [39] 卢峰.山地城市设计研究综述[J].室内设计,2012,27(6):3-6.
- [40] 邱宏,吴斌,卢亚娟.区域协同理念下山地城市空间统筹的规划应对:以福建省三明市为例[J].规划师,2016,32(1):35-39.
- [41] 席梅竹,赵中秋,赵颖丽.基于PLUS模型的2030年漳沱河流域山区段生态承载力时空格局多情景预测[J].农业资源与环境学报,2024,41(3):518-529.