

旅游型乡村景观格局变化及生态系统服务价值响应

——以江苏省无锡市太湖国家旅游度假区为例

柳迪子¹, 杜守帅¹, 王晨旭²

(1.江南大学 设计学院, 江苏 无锡 214122; 2.北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875)

摘要: [目的] 探究旅游型乡村景观格局演变过程及生态系统服务价值(ESV)响应, 为合理规划乡村景观资源提供科学依据。[方法] 以无锡市太湖国家旅游度假区马山半岛为例, 选取 1984—2020 年 5 期遥感影像进行景观分类, 计算土地利用动态度、转移矩阵、景观格局指数。基于当量因子法评估生态系统价值(ESV), 并计算各景观类型 ESV 敏感性指数。此外, 运用 SPSS 对 ESV 与景观格局指数进行相关性和回归分析。[结果] ① 1984—2020 年, 马山半岛景观格局变化显著, 各类景观转换频繁。建设用地、灌草丛面积增加, 阔叶林地、水系、裸地和其他用地缩减。景观格局趋于破碎化、复杂化, 且连通性减弱。② 马山半岛水系、阔叶林地 ESV 的比例最大, 对区域 ESV 贡献最高。ESV 呈下降趋势, 累计缩减 7.08×10^5 元, 且各单项 ESV 均降低, 调节服务缩减最严重。③ 马山半岛 ESV 与景观格局指数相关性显著, 但各指数影响程度不同。[结论] 随着旅游业建设发展, 度假区马山半岛景观格局、ESV 变化显著, 且二者相关性显著, 通过调整关键景观格局特征可提高生态系统服务效益。

关键词: ESV; 乡村振兴; 土地利用变化; 景观格局指数; 相关性分析; 旅游度假区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)05-0264-12

中图分类号: F301.2, X171.1

文献参数: 柳迪子, 杜守帅, 王晨旭. 旅游型乡村景观格局变化及生态系统服务价值响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 264-275. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.035; Liu Dizi, Du Shoushuai, Wang Chenxu. Landscape pattern change and its response to ecosystem services value in a rural tourism area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 264-275.

Landscape Pattern Change and Its Response to Ecosystem Services Value in a Rural Tourism Area

—A Case Study at Taihu National Tourism Resort in Wuxi City of Jiangsu Province

Liu Dizi¹, Du Shoushuai¹, Wang Chenxu²

(1. School of Design, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The evolution process of rural landscape tourism patterns and the response of ecosystem services value were studied in order to provide a scientific basis for the rational planning of rural landscape resources. [Methods] Five remote sensing images of Mashan Peninsula, Taihu Lake National Tourism Resort in Wuxi City, Jiangsu Province from 1984 to 2020 were selected for landscape classification. Land use dynamic degree, transfer matrix, and landscape pattern indexes were calculated. The ecosystem services value (ESV) was evaluated based on the equivalent factor method. The coefficient of sensitivity for each landscape type was calculated. Additionally, correlation analysis and regression analysis between ESV and landscape pattern indexes were carried out using SPSS. [Results] ① From 1984 to 2020, the landscape pattern of Mashan Peninsula changed significantly, and the various types of landscape changed frequently. The area of construction land and shrubs and grass increased over time. In contrast, the area of broad-leaved forest land, bodies of water, bare land, and other land decreased. The landscape patterns tended to be fragmented

收稿日期: 2021-06-28

修回日期: 2021-08-25

资助项目: 江南大学产品创意与文化研究中心、中央高校基本科研业务费专项基金“江南地域文化传承研究”(2017JDZD02)

第一作者: 柳迪子(1997—), 男(汉族), 江苏省徐州市人, 硕士研究生, 研究方向为环境设计方法与理论。Email: liudizi1997@163.com。

通讯作者: 杜守帅(1978—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 教授, 主要从事城乡规划研究。Email: Tosyusui@jiangnan.edu.cn。

and complicated, and connectivity weakened over time. ② Mashan Peninsula water system and broad-leaved forest land had the largest proportion of ESV, and contributed the most to regional ESV. ESV declined over time, with a cumulative reduction of 7.08×10^5 yuan. The value of each individual ecosystem service decreased, and the reduction in value of regulating service was the most significant. ③ ESV was strongly correlated with the landscape pattern index in Mashan Peninsula, but the degree of influence for each index was different. [Conclusion] With the development of tourism, the landscape pattern and ESV of Mashan Peninsula have changed significantly, and the correlation between the two was significant. Ecosystem service benefits can be improved by adjusting key landscape pattern characteristics.

Keywords: ecosystem services value (ESV); rural revitalization; land use change; landscape pattern index; correlation analysis; tourist resort

全球 60% 的生态系统正在或已经退化,其中人类活动是主要诱因之一^[1]。近年来,乡村旅游迅速发展,旅游建设已经成为乡村社会—生态系统中重要活动类型,促进产业转型、经济增收,为乡村振兴起到重要作用。然而,旅游业对生态资源具有较强的依赖性,盲目地建设对生态环境造成压力,引发植被破坏、环境污染、物种减少等生态问题^[2-3],势必也会对景观格局、生态系统服务造成影响。目前对旅游型乡村的研究不足,景观格局变化过程、生态系统服务响应机制尚不明晰,造成景观规划、生态建设缺乏依据。因此,亟需对旅游型乡村展开研究,探究景观格局及生态系统服务变化过程,分析二者之间的影响机制。这对于旅游型乡村景观规划、资源配置具有现实意义,进而推动乡村可持续发展。

景观格局变化是景观生态学研究的核心内容,是自然、人为因素共同作用的结果,也是人类活动作用于生态系统的直接表现^[4]。景观格局指数能够高度浓缩景观格局信息,是反映景观结构组成、空间配置特征的简单量化指标^[5],是常用的分析方法。目前,相关研究已取得丰硕的成果:研究区域涵盖了不同的地貌特征类型,如山地丘陵、平原、流域等^[6-7],总结了景观格局变化规律和驱动因素。近年来,更关注到景观格局与生态过程之间的关系,如:范雅双等^[8]探讨水质对流域景观格局的响应,陈羚等^[9]分析了森林火灾与景观空间特征的关系,这些对相关研究具有重要意义。生态系统服务价值(ecosystem services value, ESV)是将生态系统惠益于人类社会价值进行量化,是生态系统监测管理、资源合理配置的重要依据,已成为国际生态学、经济学、社会学研究热点^[10-11]。1997 年,Costanza 等^[12]发表关于全球 ESV 评估的文章,Daily^[13]梳理了生态系统服务概念、发展历程和评估方法,成为后续研究的基础。2001 年联合国千年生态系统评估将服务类型划分为供给、调节、支持、文化服务,被广泛应用^[14-16]。国内研究起步较晚,早期

代表性研究如:欧阳志云等^[17]探讨了中国生态系统的间接经济价值,谢高地等^[18]在 Costanza 等的研究基础上,制定“我国陆地生态系统单位面积生态系统服务价值当量表”,对国内研究起到推动作用。近些年,相关研究取得较大进展,包括不同类型、尺度区域 ESV 时空变化^[14]、气候和土地利用变化的影响机制^[15]、与人类福祉关系等^[16],更强调人类活动与生态系统服务的相互作用,例如,陈婧祎等^[19]分析 ESV 与社会经济发展的关系,杨雪婷等^[16]识别了影响居民福祉的主导生态系统服务因子。此外,生态系统服务权衡、供需关系也是研究的热点问题^[20]。然而,对于生态系统服务与景观格局关系研究仍处于起步阶段,前人更多从景观面积变化展开研究,忽视景观结构的作用^[21]。并且相关研究更偏重于大中尺度,如流域^[22]、市县域等^[14],对乡村地区的聚焦明显不足,难以将研究成果直接应用于乡村景观规划,有必要展开村域及村域群尺度的研究。

江苏省无锡市太湖国家旅游度假区是 1992 年批准建设的国家级旅游度假区,核心区域马山半岛由 6 个行政村组成,是典型的旅游型乡村。本文以马山半岛为例,选取 1984—2020 年 5 期遥感影像进行景观分类,计算土地利用动态度、转移矩阵、景观格局指数,揭示景观格局变化过程。基于当量因子法评估 ESV,并利用敏感性指数比较各类景观对 ESV 的贡献。此外,通过 ESV 与景观格局指数的相关性、回归分析,识别影响 ESV 的关键格局特征,建立定量模型揭示二者相互作用机制,进而提出 ESV 增效策略,为旅游型乡村景观规划、生态资源配置提供科学依据。

1 研究区概况

马山半岛位于江苏省无锡太湖国家旅游度假区内($120^{\circ}05' - 120^{\circ}14'N$, $31^{\circ}36' - 31^{\circ}45'E$),三面太湖环绕,陆地面积约 $3\,300\text{ hm}^2$ 。区域属太湖流域丘陵地貌,自然资源丰富,森林覆盖率达 70%,海拔在

5~266 m 之间。马山半岛日照充沛、气候温润,年均气温约 17.4℃,日照时数 1 613.6 h,降水量 1 030.5 mm,属亚热带季风气候。区域自 1992 年批准建旅游度假区至今已有近 30 a 的发展历程,汇集各种旅游产业,如景区“灵山胜境”和“拈花湾”、酒店民宿、疗养基地、采摘园等,地产企业也投资建设大批别墅住宅。据统计,岛内现存 6 个行政村,19 个居民点,是典型的旅游型乡村。

2 材料与方法

2.1 数据来源及预处理

本研究以批准年份 1992 年为时间节点,受制于数据获取限制,最终选取 1984, 1991, 2001, 2010, 2020 年 5 期 Landsat 遥感影像,均摄制于 5—9 月植物生长季、无云量干扰。数据源于美国地质勘探局 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>),分辨率为 30 m × 30 m。首先,利用 ENVI 5.3 对遥感影像预处理,包括:辐射定标、大气校正、影像裁切等。此外,运用 ENVI 中最大似然法对研究区进行监督分类,分类标准参考《土地利用现状分类》标准及谢高地等^[23]对生态系统的二级分类结果,将景观类型确定为:建设用地、阔叶林地、水田地、灌丛地、裸地、水系、其他用地。分类后,结合实地调查及高分辨率卫星图像比对、修正,运用 Ground Truth ROIs 模块进行精度验证,得出 Kappa 系数大于 0.92,证明分类结果可靠。另外,相关社会经济数据源于《无锡市统计年鉴》《马山志》等资料集。

2.2 马山半岛土地利用及景观格局变化分析

(1) 土地利用动态度。土地利用动态度分析包括单一土地利用动态度和综合土地利用动态度,该方法可表征区域某一时段景观变化的剧烈程度。单一土地利用动态度描述某类景观在某时段变化的剧烈程度,而综合土地利用动态度反应整个区域在某时段变化的剧烈程度^[24],公式如下:

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

式中:K 为单一土地利用动态度,即研究时段中某一景观类型的变化速率; U_a 、 U_b 分别为该地类在研究起止时刻的面积; T 为研究时长。

$$L_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: L_c 为综合土地利用动态度; LU_i 为研究起止时刻第 i 类景观类型面积; ΔLU_{i-j} 为研究时段第 i

类景观类型转为非 i 类景观类型面积的绝对值; T 为研究时长。

(2) 景观类型转移矩阵。转移矩阵能够揭示研究期间景观类型之间的转移情况,该方法在土地利用变化研究中广泛应用^[25]。基于 ENVI5.3 中的变化检测模块,计算出 1984—1991, 1991—2001, 2001—2010, 2010—2020 年 4 个时段及 1984—2020 年完整研究时段的转移矩阵。根据计算结果绘制桑基图,图中延伸分支的宽度对应景观类型转移规模大小,景观类型转移情况更直观。

(3) 景观格局指数分析。景观格局指数是定量描述景观格局演变及生态过程的重要方法,本文选取以往研究中广泛应用的指数^[6-7],运用 Fragstats 4.2 计算。景观格局指数包括景观水平和类型水平,从规模、形态、连通性、破碎度等多方面表征景观格局特征。景观水平包括:斑块数目(NP)、最大斑块指数(LPI)、蔓延度(CONTAG)、面积加权平均分维数(以下简称“分维数”,FRAC_AM 省略为 FRAC)、聚集度(AI)、分离度(SPLIT)、香浓多样性(SHDI)、香浓均匀度(SHEI);类型水平包括:斑块面积(CA)、最大斑块指数(LPI)、斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、分维数(FRAC)、凝聚度(COHESION)。

2.3 马山半岛生态系统服务价值响应分析

(1) 生态系统服务价值评估。运用“单位面积价值当量因子法”评估马山半岛 1984—2020 年 ESV,参照谢高地等^[23]修正后的单位面积 ESV 当量。查阅《无锡市统计年鉴》得到 2020 年无锡市谷物及其他作物农业产值(1.84×10^9 元)、粮食作物总面积(7.95×10^4 hm²),根据公式(3)计算出单位面积农田自然粮食产量的经济价值(3 300.11 元/hm²),记为标准当量。值得说明的是,自然粮食产量的经济价值需排除人力投入产生的价值,谢高地等^[18]的研究确定每 hm² 农田自然粮食产量价值是当年实际粮食市场价值的 1/7,该系数被广泛认可^[14-15]。根据公式(4),得到单位面积各类景观的各单项 ESV(表 1)。最后,根据公式(5)计算出区域各类景观 ESV 及总量。

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_i \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (3)$$

式中: E_a 为单位农田自然粮食产量的经济价值(元/hm²); i 为作物种类; m_i 为第 i 种粮食作物的面积(hm²); p_i 为第 i 种粮食作物的平均价格(元/kg); q_i 为第 i 种粮食作物单产(kg); M 为粮食作物总面积; n 为粮食作物种类。

$$E_{ij} = e_{ij} E_a \quad (4)$$

式中: E_{ij} 为 j 景观类型的 i 生态服务功能的单位面

积 ESV; e_{ij} 为 j 类生态系统的 i 生态服务功能相对标准当量的当量因子。

$$ESV=\sum A_j\times VC_j$$

(5)

式中:ESV 为生态系统服务价值总量; A_j 为第 j 类景观类型的面积; VC_j 为第 j 类景观类型单位面积 ESV。

表 1 马山半岛单位面积各景观类型各单项生态系统服务价值 ESV

元/hm²

生态系统分类		生态系统服务价值 ESV				
		水田地	阔叶林地	灌草丛	裸地	水系
供给服务	食物生产	4 488.15	957.03	1 254.04	0.00	2 640.09
	原料生产	297.01	2 178.07	1 848.06	0.00	759.03
	水资源供给	−8 679.29	1 122.04	1 023.03	0.00	27 357.91
调节服务	气体调节	3 663.12	7 161.24	6 501.22	66.00	2 541.08
	气候调节	1 881.06	21 450.72	17 193.57	0.00	7 557.25
	净化环境	561.02	6 369.21	5 676.19	33.00	18 315.61
	水文调节	8 976.30	15 642.52	12 606.42	99.00	337 403.25
支持服务	土壤保持	33.00	8 745.29	7 920.26	66.00	3 069.10
	维持养分循环	627.02	660.02	594.02	0.00	231.01
	生物多样性	693.02	7 953.27	7 194.24	66.00	8 415.28
文化服务	美学景观	297.01	3 498.12	3 168.11	33.00	6 237.21
合 计		12 837.43	75 737.52	64 979.17	363.01	414 526.82

(2) 敏感性指数分析。引入经济学中敏感性指数(coefficient of sensitive, CS)是为了核实区域 ESV 随时间变化对某类景观单位面积 ESV(VC)的依赖程度,并可验证 VC 准确性^[26]。CS 越大,ESV 对该类景观 VC 变化越敏感,说明其 ESV 贡献度越高。若 $CS<1$,认为 ESV 缺乏弹性,计算结果可信;若 $CS>1$,则认为 ESV 具有弹性,计算结果准确度低。本文将研究区各类景观 VC 分别上下调整 50%,来评价 ESV 对该类景观 VC 变化的敏感性,公式如下:

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

(6)

式中:CS 为敏感性指数; ESV_i 为初始 ESV 总量; ESV_j 为调整后 ESV 总量; VC_{ik} 为第 k 种景观类型的初始 ESV 系数; VC_{jk} 为第 k 种景观类型调整后 ESV 系数。

(3) 相关性分析。景观格局指数与 ESV 的相关性分析是探究二者关系的重要步骤^[21],帮助识别对 ESV 影响显著的景观格局特征。以 1984—2020 年马山半岛的景观格局指数及 ESV 为数据源,运用 SPSS 23.0 进行 Pearson 相关性检验,当显著性 $p<0.05$,说明该组变量存在相关性。

(4) 回归分析。为进一步探究景观格局变化对 ESV 的作用机制,需在 ESV 与景观格局指数之间建立定量模型。将相关性表现显著的景观格局指数逐一与 ESV 进行线性回归,建立回归模型,并根据回归模型中自变量的标准回归系数(调整后 R^2),进行解释度排序,以此评价景观格局指数对 ESV 作用力大小^[27]。标准回归系数消除了不同变量之间所取

单位不同的影响,其绝对值大小反映 X 对 Y 的影响程度^[28]。

3 结果与分析

3.1 马山半岛景观类型及演变特征

(1) 景观面积变化特征。马山半岛土地利用景观类型分为:建设用地、阔叶林地、水田地、灌草丛、裸地、水系和其他用地。由图 1 和表 2 可知,阔叶林地是区域主要景观类型,占 35%~51%;其次为水田地和水域,分别占 12.7%~17.3%和 11.7%~16.8%;裸地面积最小,仅占 0.3%~6.1%。从各类景观面积变化情况来看:①总体来说,建设用地、灌草丛增加,阔叶林地、水系、裸地和其他用地缩减,水田地基本持平;②建设用地增幅最大,且持续增加,不断向周边景观类型侵占,其中 1991—2010 年增速最快;灌草丛增幅次之,其中 1991—2001 年增幅最大;③阔叶林地缩减最严重,1984—2010 年减至最低值,2010—2020 年少量回升;④水系次之,1984—2001 年减至最低值,2001—2020 年少量回升;裸地的缩减幅度最大。

(2) 土地利用动态度。据表 3 可知,马山半岛综合土地利用动态度呈上升趋势,2001 年以后明显高于之前,2010—2020 年动态最剧烈,1991—2001 年最稳定。1984—1991 年,裸地动态最剧烈,其次为水田地、灌草丛、水系。1991—2001 年,大部分景观类型动态度增加,灌草丛、其他用地最剧烈,建设用地、水田地次之。2001—2010 年,多数景观类型动态度下降,建设用地、其他用地最活跃。2010—2020 年,裸地、水田地、阔叶林地动态剧烈,而建设用地趋于稳定。

表 21984—2020 年马山半岛不同景观类型面积

hm²

年 份	景观类型面积						
	建设用地	阔叶林地	水田地	灌草丛	裸 地	水 系	其他用地
1984	1.01	18.19	4.77	2	0.73	6.3	1.48
1991	1.12	19.05	3.71	1.59	2.31	5.03	1.67
2001	1.74	14.1	5.58	3.33	1.7	4.39	3.65
2010	2.46	13.16	6.51	3.8	1.31	4.97	2.26
2020	2.95	16.53	4.77	3.25	0.11	4.7	2.17
1984—2020 年变化	+1.94(+192.1%)	−1.66(−9.1%)	0	+1.25(+62.5%)	−0.62(−84.9%)	−1.6(−25.4%)	+0.69(+46.6%)

注:括号内表示该类型增长/减少面积占初始时期面积的比值;“+”表示增加,“−”表示减少。

表 31984—2020 年马山半岛土地利用动态度

%

年 份	土地利用动态度							综合动态度
	建设用地	阔叶林地	水田地	灌草丛	裸 地	水 系	其他用地	
1984—1991	1.56	0.68	−3.17	−2.93	30.92	−2.88	1.83	1.64
1991—2001	5.54	−2.60	5.04	10.94	−2.64	−1.27	11.86	1.63
2001—2010	4.60	−0.74	1.85	1.57	−2.55	1.47	−4.23	1.99
2010—2020	1.99	2.56	−2.67	−1.45	−9.16	−0.54	−0.40	2.04

(3)景观转移过程。根据桑基图可知(图 2a—2d):1984—1991 年,水系明显向水田地、其他用地转移,部分景观类型向裸地转移,而裸地主要向建设用地转移。1991—2001 年,阔叶林地大规模向灌草丛、水田地、裸地转移,裸地向建设用地、水田地转移;2001—2010 年,阔叶林地持续向灌草丛、水田地转移,建设用地主要由水田地、裸地转移;2010—2020 年,阔叶林地大规模由水田地、灌草丛转移,裸地向建设用地、水田地转移。从整体转移情况来看(图 2e):各类景观之间转换频繁,阔叶林地主要向灌草丛、水田地、建设用地转移;建设用地主要向阔叶林地、水田地、灌草丛、裸地侵占。

3.2 马山半岛景观格局变化特征

(1)类型水平景观格局指数。根据景观格局指数增降情况(图 3)可知,研究期间,建设用地形态破碎化、复杂化,并趋于聚集;阔叶林地优势性减弱,形态破碎、复杂化;水田地和灌草丛破碎化,并且边缘复杂化;裸地形态结构简化,趋于聚集;其他用地形态破碎、复杂化,趋于聚集;水系几乎保持稳定。

(2)景观水平景观格局指数。由图 4 可知,研究期间,区域景观破碎化、结构复杂化,连通性和优势度均减弱。具体来看,1984—1991 年,斑块趋于聚集、连通性加强,景观丰度下降、斑块形态趋于复杂;1991—2001 年,各景观指数增降幅度最大,斑块趋于离散,形态变得复杂、破碎,连通性和优势性均减弱;2001—2010 年各项指数持续之前的态势,但变化速

率明显降低;2010—2020 年,各项指数与 1991—2010 年的趋势相反,景观的连通性、优势度增强,结构简化,斑块趋于聚集。

3.3 马山半岛生态系统服务价值变化及敏感性分析

(1)生态系统服务价值变化。根据 1984—2020 年马山半岛不同时期各类景观的各单项 ESV 及其变化情况(表 4—5)来看,1984—2020 年,ESV 总量呈下降趋势,累计减少 7.08×10^5 元。具体来看:1984—1991 年,ESV 缩减 5.01×10^5 元,其中水系 ESV 缩减最严重;1991—2001 年,ESV 持续缩减 5.03×10^5 元,阔叶林地 ESV 缩减最严重,灌草丛 ESV 明显增加;2001—2010 年,ESV 显著回升,主要因为水系 ESV 明显增加;2010—2020 年,ESV 少量回升,阔叶林地 ESV 增加显著,但水系 ESV 缩减抵消了部分阔叶林地增量。

从各类景观 ESV 比重来看(表 4),水系与阔叶林地ESV 远高于其他景观类型,具体排序为:水系>阔叶林地>灌草丛>水田地>裸地。从各类景观 ESV 的增降情况来看,1984—2020 年,水系 ESV 缩减最严重,缩减 6.63×10^5 元;阔叶林地次之,缩减 1.26×10^5 元;灌草丛增加 8.12×10^4 元;水田地、裸地基本持平。从各单项 ESV 来看(表 5):各单项 ESV 均减少。其中调节服务损失最严重,缩减 6.17×10^5 元,占总损失的 87.2%。由此可见,旅游业发展对水系、阔叶林地 ESV 影响较大,且调节服务衰退最严重。

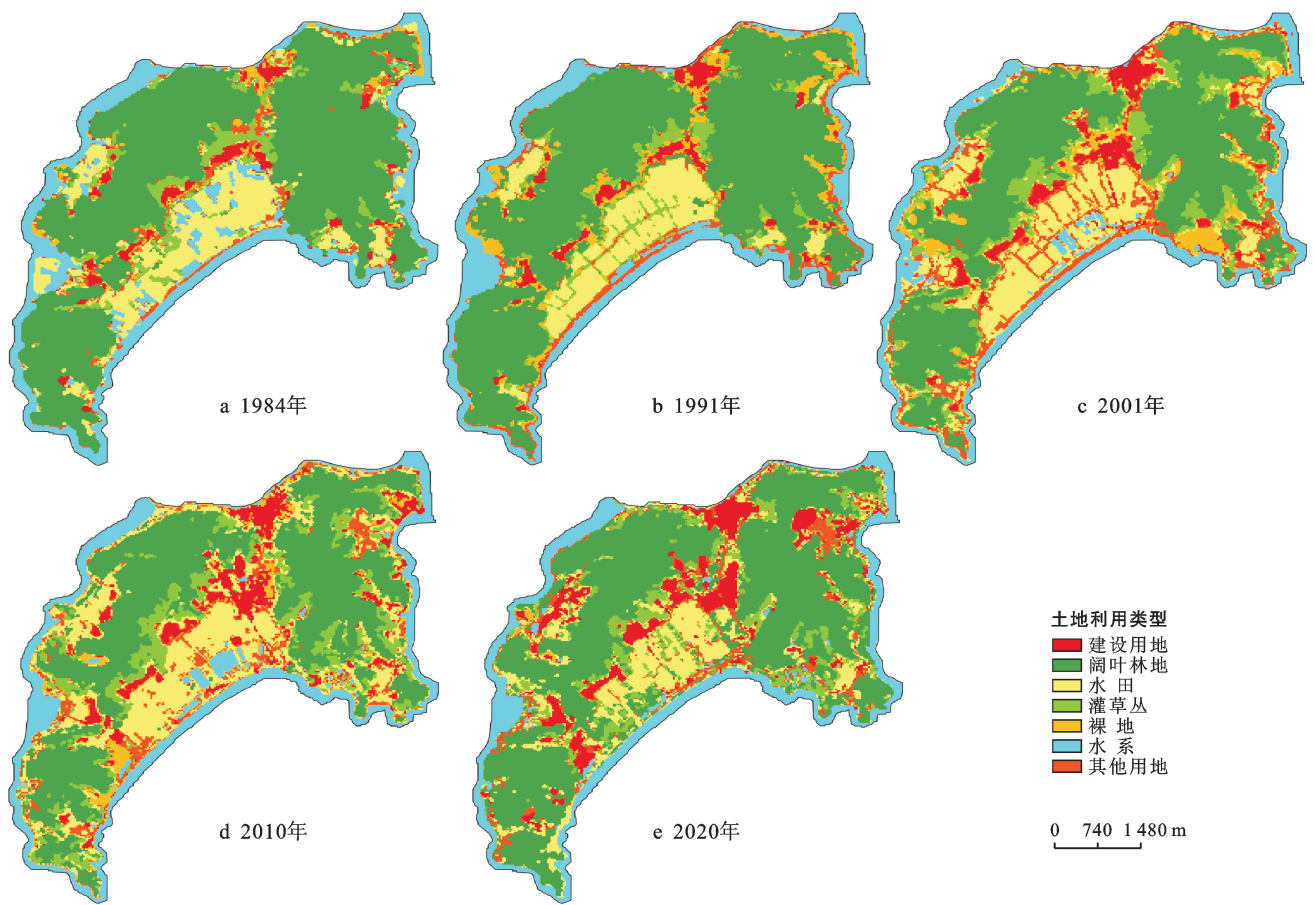


图 1 1984—2020 年马山半岛土地利用景观分类

表 4 1984—2020 年马山半岛各景观类型生态服务价值 (ESV) 及总量变化 10⁴ 元

年 份	不同景观类型 ESV 值					合 计
	阔叶林地	水田地	灌草丛	裸 地	水 系	
1984	137.77	6.12	13.00	0.03	261.15	418.06
1991	144.28(+6.51)	4.76(−1.36)	10.33(−2.67)	0.08(+0.05)	208.51(−52.64)	367.97(−50.09)
2001	106.79(−37.49)	7.16(+2.4)	21.64(+11.31)	0.06(−0.02)	181.98(−26.53)	317.63(−50.34)
2010	99.67(−7.12)	8.36(+1.2)	24.69(+3.05)	0.05(−0.01)	206.02(+24.07)	338.79(+21.16)
2020	125.19(+25.52)	6.12(−2.24)	21.12(−3.57)	0.00(−0.04)	194.83(−11.19)	347.27(+8.48)
变化	−12.58	0	+8.12	−0.03	−66.32	−70.79

注:括号内表示该景观类型当年与前一年相比,ESV 增降情况;“+”表示增加,“−”表示减少。下同。

(2) 敏感性指数分析。敏感性指数分析可比较各类景观对 ESV 贡献度差异。据表 6 可知,各类景观 CS 均小于 1,说明 ESV 对各类景观 VC 缺乏弹性,计算结果可信。各类景观 CS 差异显著,排序为:水系>阔叶林地>灌草丛>水田地>裸地。水系 CS 最高,说明其 ESV 贡献最大,例如,2020 年水系 CS 为 0.561,表明水系 VC 每变化 1%,引起 ESV 变化 0.561%,原因

是水系 VC 远高于其他景观,并且面积较大;阔叶林地具有绝对的面积优势,VC 仅次于水系,因此它对 ESV 贡献也较高;水田地、裸地的贡献较低。从时间序列来看:水系由于面积缩减,ESV 贡献度在减弱;阔叶林面积虽然也在缩减,但其面积优势显著,其 VC 远不及水系,因此在水系的贡献度下降后,阔叶林贡献度便凸显;灌草丛的贡献也在上升,水田地较稳定。

表 5 1984—2020 年马山半岛各单项生态服务价值 (ESV) 变化 10⁴ 元

服务类型	生态服务价值 (ESV)					1984—2020 年变化
	1984 年	1991 年	2001 年	2010 年	2020 年	
供给服务	26.09	22.79(−3.3)	18.71(−4.08)	19.92(+1.21)	20.98(+1.06)	−5.11
调节服务	338.15	292.76(−45.39)	254.40(−38.36)	274.23(+19.83)	276.45(+2.22)	−61.70
支持服务	42.75	41.99(−0.76)	35.63(−6.36)	35.53(−0.1)	39.95(+4.42)	−2.80
文化服务	11.07	10.42(−0.65)	8.90(−1.52)	9.10(+0.2)	9.89(+0.79)	−1.18

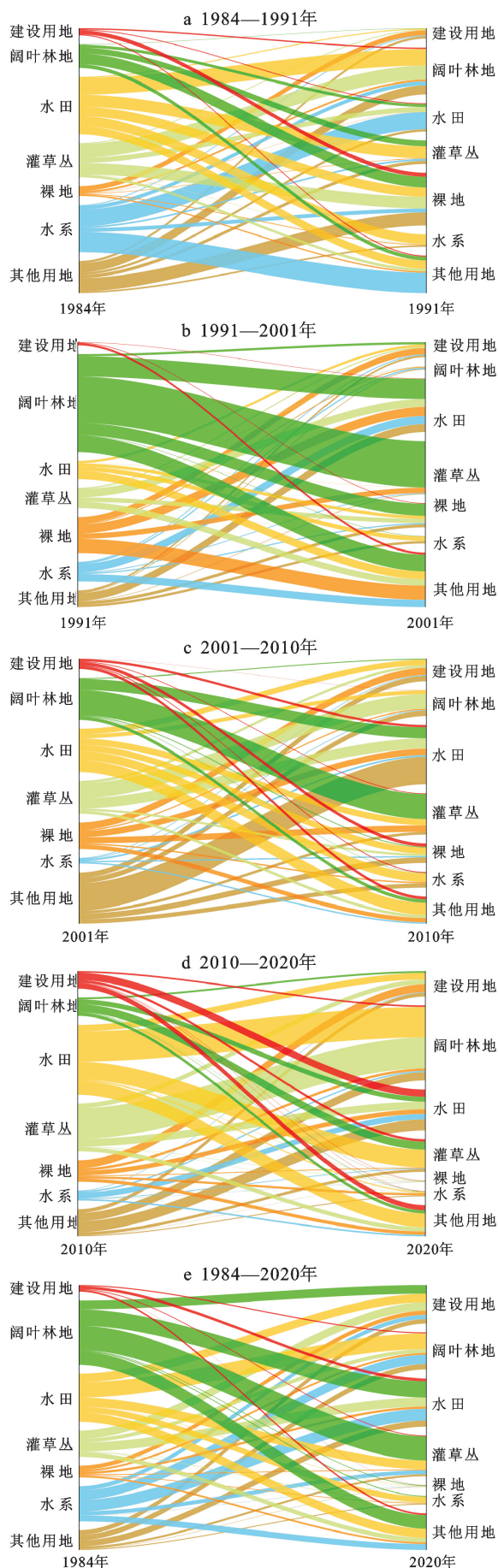


图 2 1984—2020 年马山半岛不同时期土地利用转移桑基图

3.4 马山半岛 ESV 与景观格局指数的相关性分析

(1) 景观格局指数与 ESV 总量的相关性。ESV 与景观格局指数的相关性分析(表 7)可知,1984—2020 年马山半岛 ESV 与水系面积呈显著正相关,与景观分维数、建设用地分维数、凝聚度呈负相关。说明水系面积越大,区域 ESV 越高;景观形态越复杂、建设用地越聚集,ESV 越低。

(2) 景观格局指数与各单项 ESV 的相关性。供给、调节、支持、文化服务功能价值分别与景观格局指数进行相关性分析(表 7)。

①供给服务价值与蔓延度、水系面积呈正相关,与多样性、分维数及建设用地分维数、凝聚度呈负相关。说明景观连通性越强、水系规模越大,供给服务越强;景观结构越复杂、建设用地越聚集、复杂,供给服务越弱。②调节服务价值与水系面积呈显著正相关,与分维数、建设用地凝聚度呈负相关。说明水系规模越大,调节功能越强;景观整体形态越复杂、建设用地越聚集,调节功能越弱。③支持服务价值与蔓延度呈显著正相关,与多样性、分离度呈负相关。说明景观连通性越强,支持服务越强;景观结构越复杂、分离,支持服务越弱。另外,在类型层面,阔叶林面积、灌草丛分维数与支持服务价值的相关性显著,表现为:阔叶林面积越大,支持服务越强;灌草丛形态越复杂,支持服务越弱。另外,支持服务还与建设用地分维数、灌草丛面积呈负相关,建设用地形态越复杂、灌草丛面积越大,支持服务越弱。④文化服务价值与多样性呈显著负相关,说明景观结构越复杂,文化服务越弱。另外,文化服务价值还与分离度、建设用地分维数、灌草丛分维数呈负相关,与蔓延度、聚集度及阔叶林面积呈正相关。这说明景观连通性、聚集程度越高,文化服务越强;建设用地、灌草丛斑块形态越复杂,文化服务价值越低。

3.5 马山半岛 ESV 与景观格局指数的回归分析

将与 ESV 相关性显著的景观格局指数再分别与各类 ESV 进行回归分析,进一步揭示景观格局变化对 ESV 的作用机制,并建立回归模型(表 8)。根据标准化回归系数排序,列出对 ESV 及各单项 ESV 解释度最高的前 3 项指数,以此识别对不同类型生态系统服务效能影响最大的景观格局特征。

①ESV 总量、供给服务及调节服务受水系面积、建设用地聚集度、景观形态复杂性的影响最大,究其原因:水系生态价值极高,尤其以水文调节和水资源供给功能,几乎主导着马山半岛的供给、调节以及生态系统综合服务能力。随着旅游开发强度增加,建设用地规模、密度加大,人类对景观的扰动范围也在扩

大,侵占生态用地导致 ESV 降低;另外,马山半岛以丘陵地貌为主,人类对景观的扰动主要发生在地势平缓的山坳处,建设用地、灌草丛不断向山坳深处蔓延,阔叶林地持续收缩(图 5),造成景观形态复杂化,同时高生态价值的阔叶林地也严重缩减。②支持服务受景观多样性、灌草丛形状复杂性、阔叶林面积的影响最大,究其原因,景观异质性很大程度受景观基质(阔叶林地)影响,阔叶林为马山半岛提供强大的土壤保持、维持养分循环、生物多样性等支持功能,生态价

值极高,其规模决定着马山半岛整体支持服务效能;而随着灌草丛向山林蔓延,阔叶林地被侵占,造成景观整体的连通性下降、ESV 缩减。③文化服务受景观多样性、建设用地和灌草丛形状复杂性的影响最大,究其原因:景观异质化伴随着景观结构复杂化、破碎化,尤其阔叶林地表现最明显,非常不利于马山半岛整体美感;建设用地和灌草丛向山林蔓延,造成形状复杂化,意味着阔叶林收缩严重(图 5),其美学价值也严重降低。

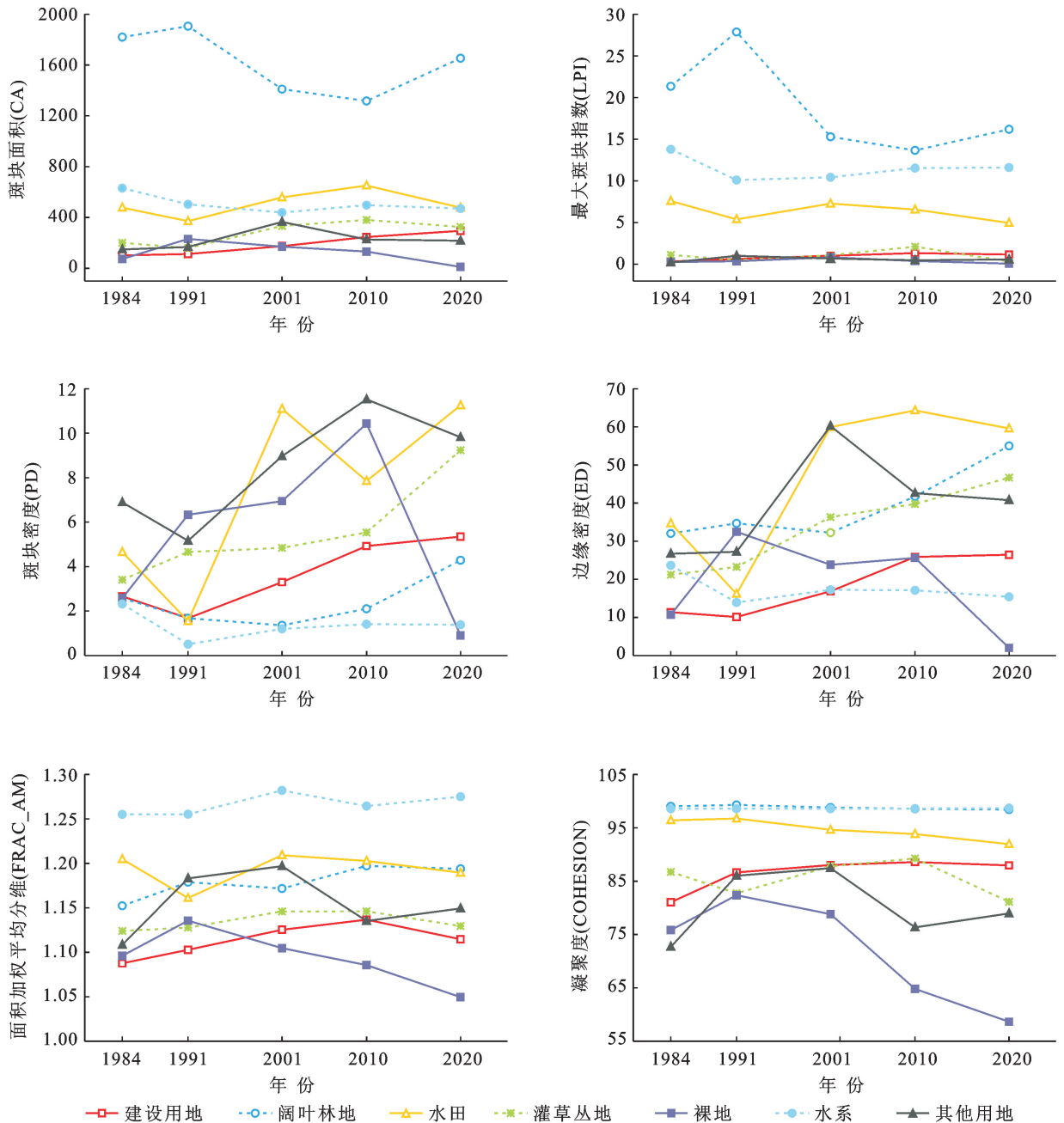


图 3 1984—2020 年马山半岛景观水平景观指数变化情况

表 6 1984—2020 年马山半岛各景观类型生态服务系统价值 ESV 敏感性分析

项 目	敏感性指数 CS/%					1984—2020 年 VC 变化/%
	1984 年	1991 年	2001 年	2010 年	2020 年	
阔叶林地 (VC±50%)	0.330	0.392	0.336	0.294	0.361	+0.031
水田地 (VC±50%)	0.014	0.012	0.022	0.025	0.018	+0.004
灌草丛 (VC±50%)	0.031	0.028	0.068	0.073	0.061	+0.030
裸地 (VC±50%)	—	—	—	—	—	—
水系 (VC±50%)	0.625	0.567	0.573	0.608	0.561	−0.064

注:①“—”表示敏感性指数 CS<0.001; ②本文将研究区各类景观 VC 分别上下调整 50%来评价 ESV 对该类景观 VC 变化的敏感性。

表 7 马山半岛生态系统服务价值与景观格局指数的相关性

景观格局 指数	供给服务		调节服务		支持服务		文化服务		ESV 总量	
	R	p	R	p	R	p	R	p	R	p
CONTAG	0.879 *	0.050	—	—	0.961 **	0.009	0.941 *	0.017	—	—
AI	—	—	—	—	—	—	0.879 *	0.049	—	—
SPLIT	—	—	—	—	−0.928 *	0.023	−0.883 *	0.047	—	—
SHDI	−0.889 *	0.043	—	—	−0.999 **	0.000	−0.970 **	0.006	—	—
SHEI	−0.889 *	0.043	—	—	−0.999 **	0.000	−0.970 **	0.006	—	—
FRAC	−0.921 *	0.026	−0.906 *	0.034	—	—	—	—	−0.911 *	0.031
FRAC_B	−0.921 *	0.026	—	—	−0.944 *	0.016	−0.956 *	0.011	−0.890 *	0.043
COHESION_B	−0.927 *	0.023	−0.944 *	0.016	—	—	—	—	−0.936 *	0.019
CA_F	—	—	—	—	0.972 **	0.006	0.906 *	0.034	—	—
CA_S	—	—	—	—	−0.879 *	0.050	—	—	—	—
FRAC_S	—	—	—	—	−0.987 **	0.002	−0.953 *	0.012	—	—
CA_W	0.935 *	0.020	0.978 **	0.004	—	—	—	—	0.961 **	0.009

注:①R 为皮尔逊相关系数;p 为显著性;FRAC_B 为建设用地分维数;COHESION_B 为建设用地凝聚度;CA_F 为阔叶林地面积;CA_S 为灌草丛面积;FRAC_S 为灌草丛分维数;CA_W 为水系面积。②* * 表示相关性在 0.01 水平上显著;* 表示相关性在 0.05 平上显著;“—”表示该组变量计算结果 p>0.05,相关性不显著,故剔除。下同。

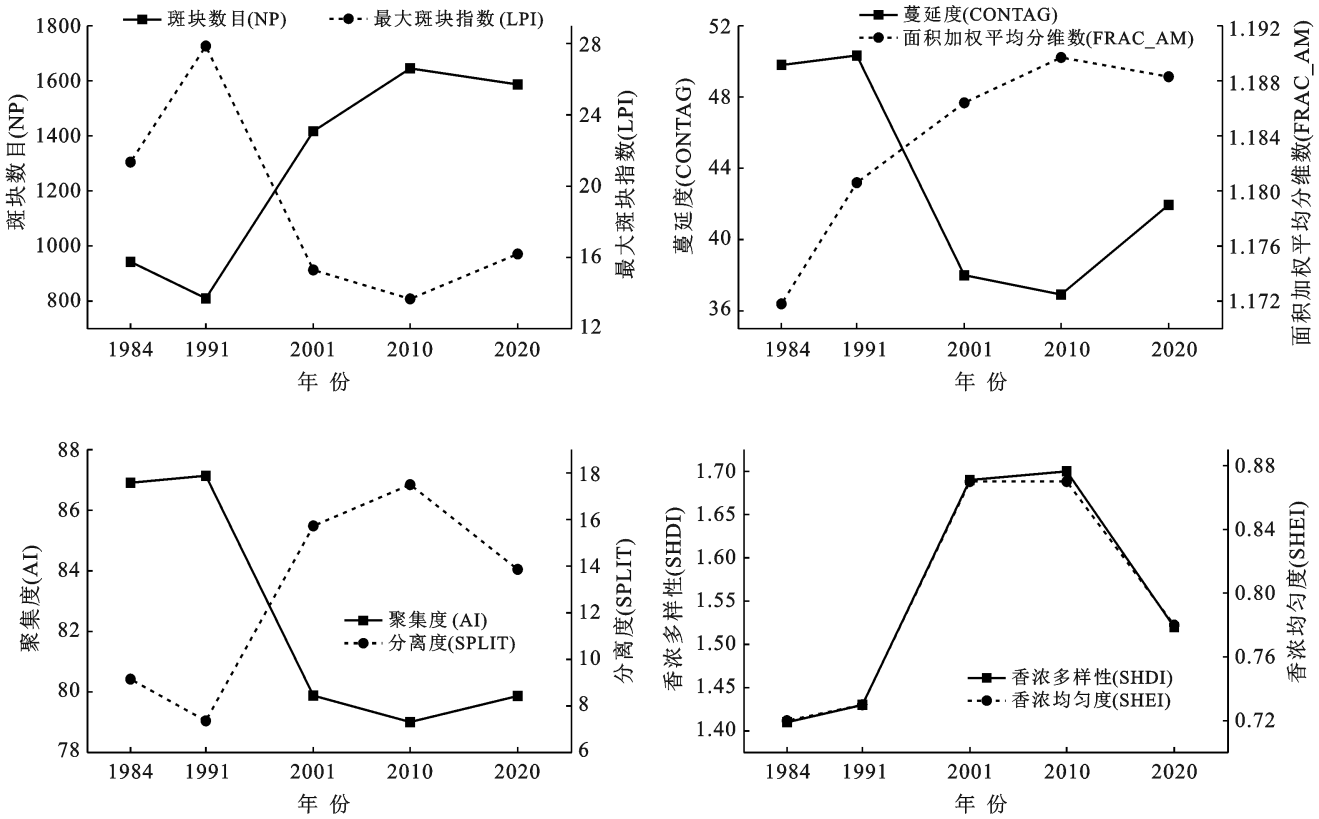


图 4 1984—2020 年马山半岛景观水平景观指数变化情况

表 8 马山半岛生态系统服务价值与景观格局指数的回归分析

项 目	模 型	未标准化系数		标准化系数 (Beta)	<i>t</i>	<i>p</i>	回归方程	调整后 <i>R</i> ²
		<i>B</i>	标准误差					
ESV	1 (常量) CA_W	102.818	42.876		2.398	0.096	$Y_1=102.818+0.503 X_1$	0.897
		0.503	0.084	0.961	5.999	0.009		
	2 (常量) COHESION_B	1 353.177	215.759		6.272	0.008	$Y_1=1 353.177-11.513 X_2$	0.835
		-11.513	2.495	-0.936	-4.615	0.019		
	3 (常量) FRAC	5 966.313	1 465.586		4.071	0.027	$Y_1=5 966.313-4 739.361 X_3$	0.773
		-4 739.361	1 238.477	-0.911	-3.827	0.031		
ESV_P	1 (常量) CA_W	2.988	4.147		0.721	0.523	$Y_2=2.988+0.037 X_1$	0.831
		0.037	0.008	0.935	4.549	0.020		
	2 (常量) COHESION_B	96.000	17.350		5.533	0.012	$Y_2=96-0.86 X_2$	0.813
		-0.860	0.201	-0.927	-4.285	0.023		
	3 (常量) FRAC	449.112	104.450		4.300	0.023	$Y_2=449.112-361.187 X_3$	0.797
		-361.187	88.264	-0.921	-4.092	0.026		
ESV_R	1 (常量) CA_W	72.197	26.450		2.730	0.072	$Y_3=0.423+0.052 X_1$	0.943
		0.423	0.052	0.978	8.196	0.004		
	2 (常量) COHESION_B	1 117.219	168.341		6.637	0.007	$Y_3=1 117.219-9.602 X_2$	0.854
		-9.602	1.946	-0.944	-4.933	0.016		
	3 (常量) FRAC	4 905.139	1 242.067		3.949	0.029	$Y_3=4 905.139-3 902.397 X_3$	0.762
		-3 902.397	1 049.594	-0.906	-3.718	0.034		
ESV_S	1 (常量) SHDI	77.852	0.798		97.571	0.000	$Y_4=77.852-24.99 X_4$	0.998
		-24.990	0.514	-0.999	-48.632	0.000		
	2 (常量) FRAC_S	403.146	33.749		11.945	0.001	$Y_4=403.146-320.774 X_5$	0.966
		-320.774	29.742	-0.987	-10.785	0.002		
	3 (常量) CA_F	17.903	3.015		5.937	0.010	$Y_4=17.903+0.013 X_6$	0.926
		0.013	0.002	0.972	7.122	0.006		
ESV_C	1 (常量) SHDI	19.776	1.429		13.840	0.001	$Y_5=19.776-6.396 X_4$	0.922
		-6.396	0.920	-0.970	-6.950	0.006		
	2 (常量) FRAC_B	60.254	8.875		6.789	0.007	$Y_5=60.254-45.246 X_7$	0.886
		-45.246	7.970	-0.956	-5.677	0.011		
	3 (常量) FRAC_S	102.515	16.930		6.055	0.009	$Y_5=102.515-81.644 X_5$	0.879
		-81.644	14.920	-0.953	-5.472	0.012		

注:ESV (Y_1)为生态系统服务总价值;ESV_P (Y_2)为供给服务价值;ESV_R (Y_3)为调节服务价值;ESV_S (Y_4)为支持服务价值;ESV_C (Y_5)为文化服务价值;CA_W (X_1)为水系面积;COHESION_B (X_2)为建设用地凝聚度;FRAC (X_3)为分维数;SHDI (X_4)为香浓多样性指数;FRAC_S (X_5)为灌草丛分维数;CA_F (X_6)为阔叶林地面积;FRAC_B (X_7)为建设用地分维数;*B* 为非标准化系数;Beat 为标准化系数;*t* 为检验过程值;*p* 为显著性。

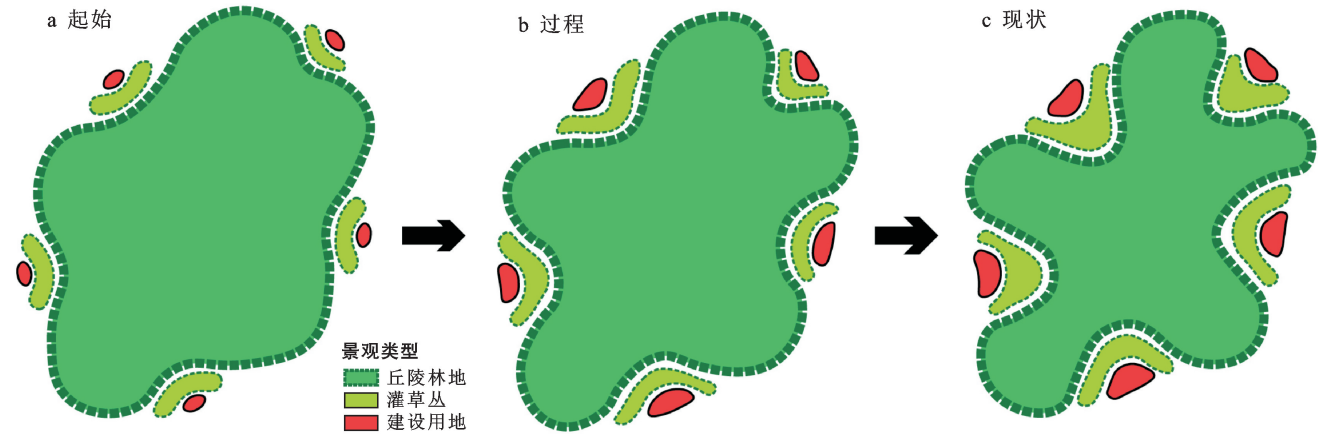


图 5 人类干扰丘陵景观导致景观形态复杂化过程示意图

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 马山半岛不同时期土地利用景观格局、ESV变化的影响因素。通过梳理马山半岛地方志及相关历史资料,探讨1984—2020年4个时段景观格局、ESV变化的影响因素:①1984—1991年,马山半岛还未发展旅游业,景观动态相对稳定。此时最明显的变化是,部分水系(主要为内陆坑塘)向水田地转变,造成水系ESV下降严重。查阅资料了解到,20世纪80年代末,马山半岛淡水养殖效益下滑,挫伤农民“内塘养鱼”的积极性,故将坑塘填盖,投入到收益更稳定种植业使用。由此可见,旅游度假区建设之前,农业生产效益是造成景观格局及ESV变化的主要因素;②1991—2001年是旅游度假区建设初期,据1991,2001年景观类型图可知,旅游建设的影响仅体现在以灵山景区为中心的小范围区域,表现为建设用地向周边景观蔓延。该时期最明显的变化是阔叶林大面积向灌草丛转变,造成阔叶林地ESV严重下降。据《马山志》记载,20世纪80年代末,马山半岛林果业发展迅速,原村集体茶厂、林果场均分至个人承包经营,山林分到农户,激发了农民种植茶叶、杨梅等作物的积极性,这也引发灌草丛地激增、阔叶林地缩减,致使ESV下降。由此可见,此时景观格局及ESV受旅游业、种植业发展的共同影响。③2001—2010年,灵山景区初具规模,马山半岛吸引了大批投资建设,岛内新增多处度假酒店、康养基地等休闲娱乐产业,建设用地在岛内散布,区域景观破碎化。同时,灵山景区附近规划新农村居民点,人类对阔叶林地扰动范围进一步扩大,致使其ESV跌至最低。2007年,政府对太湖流域实施“退耕还湖”政策,沿太湖边缘的圩田转变为生态价值更高的水域,这对马山半岛ESV起到积极作用。④2010—2020年,随着旅游度假区建设不断完善,马山半岛步入稳定建设期。建设用地扩张速度明显减缓。2010年政府颁布的林地保护政策,引导全社会严格保护林地、优化林地资源配置。这推动了马山半岛退耕还林,林地ESV显著回升,也扭转了马山半岛景观持续破碎化的趋势,连通性显著增强。由此可知,随着旅游度假区建设程度不同,景观格局、ESV的主要影响因素也不同,农业活动、政策颁布与旅游建设共同作用于旅游型乡村景观格局与ESV。

(2) 影响马山半岛ESV的关键景观格局特征及增效策略。根据相关性分析、回归分析,可总结影响

马山半岛ESV的主要景观格局特征,并提出相应的景观格局优化策略(图6),实现ESV增效。其中,标准回归系数排序靠前的指数所对应的景观格局特征可作为主要措施,其他作为辅助措施:①生态系统服务综合效能方面,马山半岛要控制建设用地肆意蔓延,修复山坳深处已破坏植被;同时增加水体景观,发挥水生态系统服务能力。②供给服务方面,可通过建设水塘、疏通水系来满足水资源补给、食物生产灌溉的需求;限制建设用地扩张,保障水田、阔叶林等景观的供给服务。③调节服务方面,通过修复阔叶林、增加水域面积,加强空气净化、水文调节能力;另外,在高密度建设区域增加绿地和水景,调节微气候。④支持服务方面,首先要阻止苗圃、种植园等形式的灌草地向山林蔓延;构建生态安全格局、生态廊道,保障阔叶林斑块的优势性与连通性,为生物提供优质栖息地,维持物质能量流通。⑤文化服务方面,通过培育修复山林景观,恢复阔叶林地美学价值;整合补缀破碎斑块,提升马山半岛的整体美感。

(3) 本文以无锡太湖国家旅游度假区马山半岛为例,分析1984—2020年景观格局变化及ESV响应,揭示二者之间相互作用关系。研究方法来看:①利用遥感影像进行景观分类,结合土地利用动态度、转移矩阵、景观格局指数等方法,可以从规模、动态、过程、结构多方面呈现乡村景观格局的演变过程;②当量因子法适用于村域群尺度ESV评估,敏感度指数分析可比较景观类型对ESV贡献的差异;③基于SPSS软件对ESV与景观格局指数相关性、回归分析,成功识别影响生态系统服务的主要景观格局特征,定量表达景观格局与ESV之间的作用机制,为景观资源配置提供依据。

(4) 本文仍存在不足:①受到遥感影像分辨率限制,分析结果仅能反应大体变化趋势。获取更高精度数据有助于捕捉细节变化,使研究结果更准确;②本文仅研究马山半岛单一案例,缺少同类区域比较,具有一定的局限性。此外,我国地形地貌复杂多样,本案例对丘陵地貌乡村更具参考价值,普适性不足。后续可参考本文思路,对更多不同地貌区的旅游型乡村进行比较研究,形成更充分的结论;③由于乡村社会—生态系统的复杂性,本文仅对马山半岛ESV增效提出策略性措施,具体优化方案还需深入剖析乡村生态系统服务真实需求,解决各功能之间权衡配置,确定区域生态系统服务功能定位,这也是进一步展开乡村生态系统服务研究的关键。

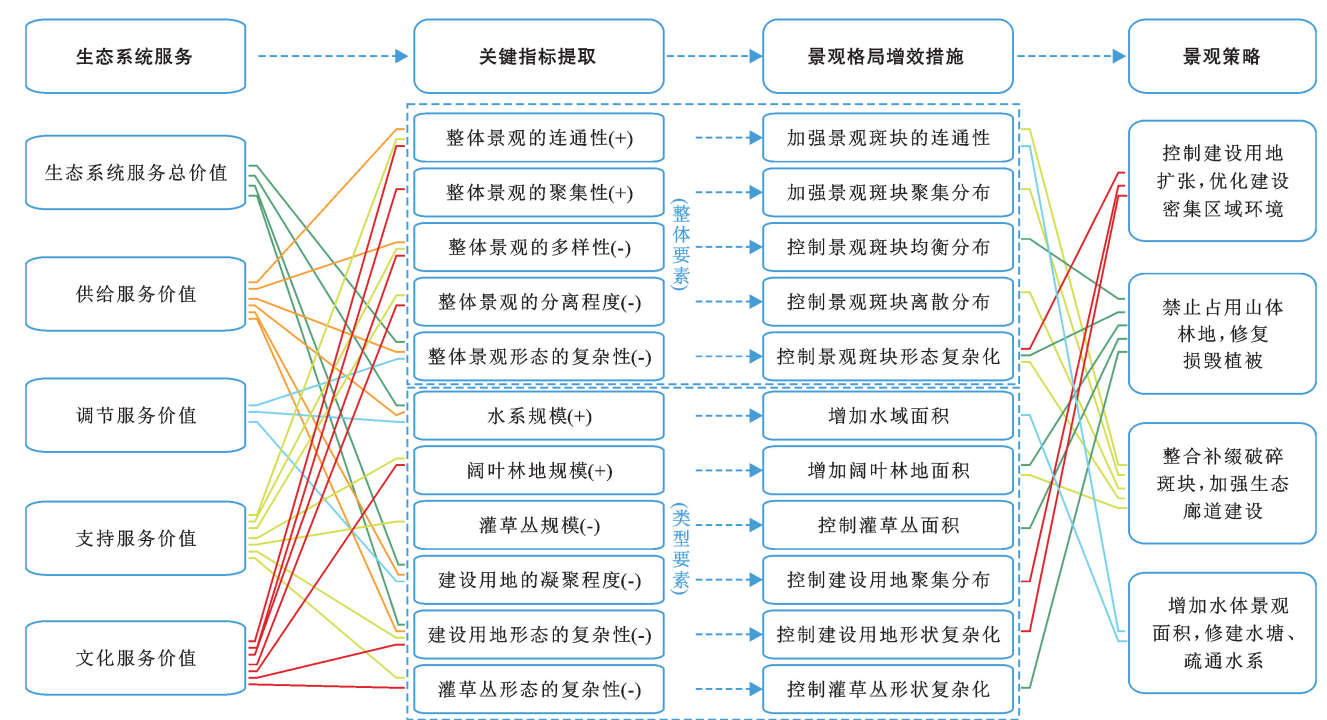


图 6 影响马山半岛生态系统服务的关键景观格局特征及相应增效措施

4.2 结 论

(1) 随着无锡市太湖国家旅游度假区建设发展,马山半岛土地利用景观格局、ESV 变化显著。各类景观转换频繁,阔叶林地缩减严重,建设用地持续扩张。景观格局复杂化、破碎化,连通性减弱。同时,区域 ESV 明显降低,各单项 ESV 均下降,调节服务功能衰退最严重。

(2) 旅游建设、农业需求、政策颁布是影响旅游型乡村景观格局、ESV 变化的主要因素。并且在旅游业发展的不同阶段,各因素的影响程度也不同。

(3) 旅游型乡村景观格局与 ESV 之间关系显著,不同的景观类型、格局特征对区域 ESV 的作用程度不同。通过相关性、回归分析,可识别影响区域 ESV 的主要景观格局特征,从而提出相应的 ESV 增效措施和策略,对科学配置、合理规划景观资源具有重要意义。

[参 考 文 献]

[1] 甄霖,刘雪林,李芬,等.脆弱生态区生态系统服务消费与生态补偿研究:进展与挑战[J].资源科学,2010,32(5):797-803.

[2] 汪洪旭.农业旅游开发对内蒙呼伦贝尔草原生态环境的影响[J].水土保持研究,2015,22(2):290-294.

[3] 朱芳,白卓灵,陈耿,等.旅游活动对武当山风景区生态环境的影响[J].林业资源管理,2015(3):89-95.

[4] Forman R, Godron M. Landscape Ecology [M]. New York: Wiley, 1986.

[5] 郭建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2007.

[6] 李桢,刘森,薛振山,等.基于 CLUE-S 模型的三江平原景观格局变化及模拟[J].应用生态学报,2018,29(6):1805-1812.

[7] 张飞,塔西甫拉提·特依拜,曹鑫,等.干旱区内陆艾比河流域景观格局时空变化及生态安全评价[J].水土保持通报,2015,35(1):249-255,363.

[8] 范雅双,于婉晴,张婧,等.太湖上游水源区河流水质对景观格局变化的响应关系:以东苕溪上游为例[J].湖泊科学,2021,33(5):1478-1489.

[9] 陈羚,陈锋,牛树奎,等.北京鹫峰景观格局空间特征与森林火险的关联分析[J].北京林业大学学报,2021,43(6):41-49.

[10] 刘颂,戴常文.自然资本流变及其对生态系统服务价值的演变路径[J].生态学报,2021,41(3):1189-1198.

[11] 刘文平,宇振荣.景观服务研究进展[J].生态学报,2013,33(22):7058-7066.

[12] 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.

[13] Daily G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington DC: Island Press, 1997.

[14] 吴攀,杨木壮,刘伟聪.2007—2015 年东莞市土地利用及其生态系统服务价值的时空演变[J].水土保持通报,2020,40(1):250-255.

- [24] 贺振,贺俊平.近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J].农业机械学报,2017,48(2):179-185.
- [25] 孙睿,刘昌明,朱启疆.黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系[J].地理学报,2001,56(6):667-672.
- [26] 杨胜天,刘昌明,孙睿.近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析[J].地理学报,2002,57(6):679-684.
- [27] 李春晖,杨志峰.黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系[J].地理研究,2004,23(6):753-759.
- [28] 刘宪锋,任志远,林志慧,等.2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2013,68(7):897-908.
- [29] 赵安周,张安兵,刘海新,等.退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J].自然资源学报,2017,32(3):449-460.
- [30] 李双双,延军平,万佳.近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2012,67(7):960-970.
- [31] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(5): 1111-1117.
- [32] Wang Fang, Ge Quansheng, Wang Shaowu, et al. A new estimation of urbanization's contribution to the warming trend in China [J]. Journal of Climate, 2015, 28(22):8923-8938.
- [33] Yin Lichang, Feng Xiaoming, Fu Bojie, et al. Irrigation water consumption of irrigated cropland and its dominant factor in China from 1982 to 2015 [J]. Advances in Water Resources, 2020,143:103661.
- [34] Yin Lichang, Wang Xiaofeng, Feng Xiaoming, et al. A comparison of SSEBop-model-based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River basin, China [J]. Remote Sensing, 2020,12(16):2528.
- [35] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].3 版.北京:高等教育出版社,2017:37-41.
- [36] Geerken R, Ilaivi M. Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation [J]. Remote Sensing of Environment, 2004,90(4):490-504.
- [37] Ostwald M Chen Deliang. Land-use change: Impacts of climate variations and policies among small-scale farmers in the Loess Plateau, China [J]. Land Use Policy, 2006,23(4):361-371.
- [38] 许炯心.农村社会经济因素变化对嘉陵江产沙量的影响[J].山地学报,2006,24(4):385-394.
- [39] 高江波,焦珂伟,吴绍洪.1982—2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析[J].地理学报,2019,74(3):534-543.
- [40] 白子怡,薛亮,薛东前,等.关中—天水经济区人类活动对植被覆盖变化的影响[J].中国农业大学学报,2020, 25(2):151-159.
- [41] 刘启兴,董国涛,景海涛,等.2000—2016 年黄河源区植被 NDVI 变化趋势及影响因素[J].水土保持研究, 2019,26(3):86-92.

(上接第 275 页)

- [15] 王航,秦奋,朱筠,等.土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2017,37(4):1286-1296.
- [16] 杨雪婷,邱孝桢,徐云,等.典型山区生态系统服务对居民福祉影响的空间差异及其动态特征研究:以川西山区为例[J].生态学报,2021,41(19). DOI: 10.5846/stxb202005261347.
- [17] 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):19-25.
- [18] 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.
- [19] 陈婧祎,罗红霞,胡林利,等.生态系统服务价值与社会经济相关性研究:以重庆市大都市区为例[J].水土保持研究,2017,24(4):330-336.
- [20] 马琳,刘浩,彭建,等.生态系统服务供给和需求研究进展[J].地理学报,2017,72(7):1277-1289.
- [21] 曹君,张正栋,陈宋佳,等.1996—2015 年粤港澳大湾区生态系统服务对景观格局变化的响应[J].华南师范大学学报(自然科学版),2020,52(5):93-105.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 董光,何兰,王艺积,等.1990—2017 年河北省易县土地利用时空格局动态变化[J].中国农业资源与区划, 2020,41(1):242-249.
- [25] Wang Jieyong, Liu Yansui, Liu Zhigao. Spatio-temporal patterns of cropland conversion in response to the “grain for green project” in China's loess hilly region of Yanchuan County [J]. Remote Sensing, 2013, 5(11):5642-5661.
- [26] 王雅敬,谢炳庚,苏维词,等.贵州省玉屏县土地利用格局时空变化对生态服务价值的影响[J].水土保持研究,2016,23(3):180-184.
- [27] 师满江,颜耀文,曹琦.干旱区绿洲农村居民点景观格局演变及机制分析[J].地理研究,2016,35(4):692-702.
- [28] 张文彤.SPSS 统计分析高级教程[M].北京:高等教育出版社,2004.