

DOI: 10.5846/stxb202002280364

马勇, 凌旋, 童昀. 网格尺度下典型旅游城市生态服务价值估算和时空分异特征——以三亚为例. 生态学报, 2021, 41(19): 7542-7554.

Ma Y, Ling X, Tong Y. Ecosystem service value estimation and spatiotemporal differentiation characteristics of typical tourism cities at grid scale: a case of Sanya. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7542-7554.

网格尺度下典型旅游城市生态服务价值估算和时空分异特征

——以三亚为例

马 勇^{1,2}, 凌 旋^{1,*}, 童 昀¹

1 海南大学旅游学院, 海口 570228

2 湖北大学绿色发展研究院, 武汉 430062

摘要:以典型旅游城市三亚市为案例地, 利用 2006—2018 年 4 期 Landsat 遥感影像数据, 借助 ENVI、ArcGIS 平台定量识别土地利用演变特征, 在 1km×1km 网格尺度下估算旅游地生态系统服务价值, 并结合空间探索性数据分析揭示生态系统服务价值时空分异特征及其与旅游地发展的时空耦合关系。结果表明: (1) 2006—2018 年间, 三亚市生态系统服务价值总量呈逐年下降趋势, 由 6.73×10^9 元降至 5.76×10^9 元, 累计减少 9.78×10^8 元; (2) 空间格局上, 三亚市呈“南低北高”空间分异格局, 2006—2018 年增值区域连片分布于崖州区、天涯区、吉阳区南部区域, 且呈逐年减少趋势, 减值区域集聚于天涯区东北部、海棠区; (3) 空间集聚上, 生态系统服务价值截面各年份均呈显著空间正相关且相关性先降后增。高高集聚区位于天涯区北部区域, 低低集聚区分布于沿海、海湾地区; (4) 旅游发展与生态系统服务价值时空演化特征关联性较强。三亚市天涯区北部林地生态环境良好, 生态系统服务价值略有下降但绝对数值稳定, 是生态系统服务价值主要来源; 旅游发展较为迅速的三亚湾、崖州湾以及海棠湾, 相对增值区域较多, 但绝对生态系统服务价值损失显著, 严重滞后于其他区域。

关键词:生态系统服务价值; 时空分异特征; 典型旅游城市; 网格尺度

Ecosystem service value estimation and spatiotemporal differentiation characteristics of typical tourism cities at grid scale: a case of Sanya

MA Yong^{1,2}, LING Xuan^{1,*}, TONG Yun¹

1 School of Tourism Hainan University, Haikou 570228, China

2 Academy of Green Development, Hubei University, Wuhan 430062, China

Abstract: Taking Sanya, a typical tourist city, as a case study, this paper uses Landsat remote sensing image data of four periods from 2006 to 2018, quantitatively identifies the land use evolution characteristics with ENVI and ArcGIS platform, and estimates the ecosystem service value (ESV) of tourism destination at the scale of 1km×1km. Combined with spatial exploratory data analysis, the spatiotemporal differentiation of ecosystem service value and its spatio-temporal coupling relationship with tourism development is revealed. The results are as follows: (1) From 2006 to 2018, the total value of ecosystem services in Sanya decreased from 6.73 billion to 5.76 billion, a cumulative decrease of 978 million. (2) From 2006 to 2018, the value-added areas were distributed in Yazhou District, Tianya District and the southern Jiyang District, showing a decreasing trend year by year. The impairment areas were concentrated in the northeast of Tianya District and Haitang District. (3) In the spatial agglomeration, the ecosystem service value showed significantly positive spatial

基金项目: 国家社会科学基金项目 (19BJL036)

收稿日期: 2020-02-28; 网络出版日期: 2021-06-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxuan_hermione@163.com

correlation and the correlation decreased first and then increased. The high concentration area is located in the northern Tianya District, and the low concentration area is distributed in the coastal and gulf areas. (4) The tourism development and the spatial and temporal evolution characteristics of ecosystem service value are closely related. The woodland ecological environment in northern Tianya District of Sanya City is good. The ESV slightly decreased, but the absolute value was stable, which is the main source of ecosystem service value. Sanya Bay, Yazhou Bay and Haitang bay with rapid tourism development have more relative value-added areas, but the absolute ESV loss is significant, seriously lagging behind other areas.

Key Words: ecosystem service value; spatiotemporal differentiation; typical tourism city; grid scale

生态文明建设不仅是我国可持续发展的内在需要,更是维护全球生态安全、构建人类命运共同体的重要使命。生态系统服务价值可为生态文明建设提供科学而有力的理论支持,随着 Costanza 等率先在全球尺度上明确生态系统服务价值估算理论及方法^[1],生态系统服务价值的相关研究迅速在全球范围内展开。谢高地等人则对 Costanza 研究结果进行修正,提出适用于中国情境的生态系统服务评估当量体系,并于 2015 年对单位面积价值当量因子静态评估方法做出改进和发展^[2-3]。此后,学术界围绕生态系统服务价值理论框架^[4-7]、价值估算^[8-14]、土地利用变化^[15-20]等领域开展了丰富研究,并在此基础上,进一步拓展了生态系统服务价值的科学应用情境,关注其权衡与协同关系^[21-24]、应用其进行科学研究决策及管理^[25-29]等,并且更加关注生态系统服务与人类福祉的耦合关系。生态系统服务价值的估算作为生态系统服务相关延伸研究的基础,目前估算成果涵盖全球^[1]、国家^[3]、区域^[9,14]等不同尺度,以及森林^[12-13,30]、草地^[14]、流域^[21,23]、农田^[25,31]等各类生态系统。在研究的空间粒度方面,部分研究集中在市县^[9,14,16],而以格网尺度开展的较高精度研究成为近来生态系统服务价值估算及空间演变特征探究的新技术和趋势,并提供了更为科学精准的分析视角^[32]。

旅游业作为重要的经济社会活动,人地交互特征鲜明,旅游发展所引致的生态系统服务价值影响,近些年逐渐引起学术界关注。部分学者认为旅游开发活动使生态系统服务价值减值。究其原因,主要来源于对旅游地建设盲目发展促使“去自然化”的地类转移,耕地、林地等自然地类被分割转化为建设用地,加上旅游区不合理开发,使得旅游地域并未真正体现“生态旅游”内涵,最终导致旅游活动对生态系统服务价值产生负增长影响^[33-35]。但也有部分学者认为,旅游发展是生态系统服务价值置换的重要方式,合理规划旅游开发经营活动,有效保障土地利用类型自然转变,有利于发挥旅游地生态系统服务价值的增值效应^[36-39]。在为数不多的旅游地生态系统服务价值测算中,基于某一旅游区为案例地展开,旅游目的地城市尺度的研究有限。其二,部分研究尚停留在静态分析层面,缺乏对旅游地生态系统服务价值的多年历时性动态分析。其三,较少运用格网分析技术以提高生态系统服务价值测算分析精度。

鉴于此,本文以典型旅游城市三亚市作为案例地,基于 ENVI 和 ArcGIS 平台,通过监督分类与人工目视解译得到 2006、2010、2014、2018 年三亚市土地利用信息,在格网尺度下测算旅游地生态系统服务价值,并结合空间探索性数据分析揭示生态系统服务价值时空分异特征及其与旅游地发展的时空耦合关系。对于生态系统服务价值理论应用情境的拓展以及旅游地生态可持续发展具有重要意义。

1 研究区域概况

海南省三亚市是中国著名海滨旅游目的地,研究期内旅游经济规模迅速扩张,旅游专业化水平(即旅游总收入占 GDP 比重)波动上升。特别是 2011—2018 年间,旅游专业化水平由 56% 提高至 88%,旅游业在产业结构中的主导地位进一步强化。以三亚市作为典型案例,定量探究旅游发展对生态系统服务价值的影响效应,将有助于生态系统服务价值理论贡献深化到旅游地实际发展当中,有效辨识典型旅游目的地社会经济生态化发展态势,推动旅游产业可持续发展。

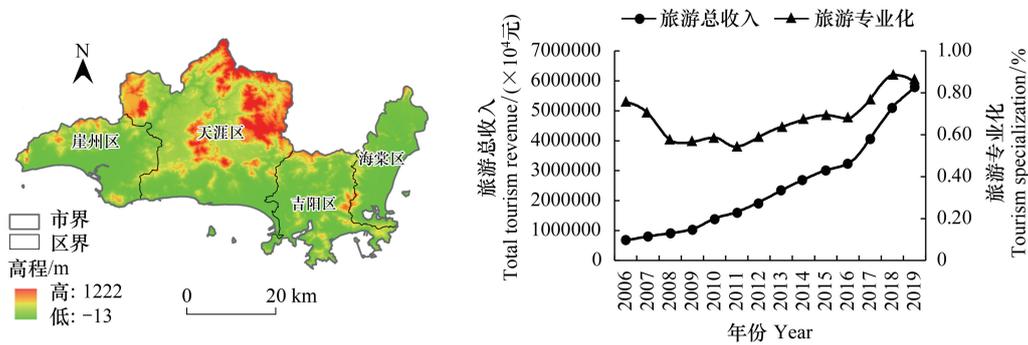


图1 研究区示意图

Fig.1 Location of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 数据来源

本文选取 2006—2018 年间 4 个时段 (2006 年 10 月、2010 年 12 月为 Landsat7 卫星影像; 2014 年 1 月、2018 年 2 月为 Landsat8 卫星影像) 分辨率 30 m 的遥感影像作为基础数据,《海南统计年鉴》、《三亚统计年鉴》、以及《三亚市土地利用总体规划 (2006—2020 年)》为社会统计数据源。

基于 ENVI 5.3、ArcGIS 10.2 软件平台, 分别对 4 期遥感影像进行几何校正、数据融合、去条带及裁剪等预处理后, 采用监督分类和目视解译相结合的方法划分不同土地利用类型, 其中根据四期 TM 数据中不同土地利用类型的影像色调、纹理等特征, 在野外实地调查基础上结合专家经验进行解译, 通过对图斑信息的拓扑检查修正以及图斑分割合并, 最终得到四期土地利用类型数据。参照我国遥感解译分类标准和三亚市实际土地利用特点, 将研究区土地类型划为园地、建设用地、林地、水域、滩涂、农田、红树林湿地、草地、未利用地 9 种。分类结果经混淆矩阵精度检验, Kappa 系数均达到 0.95 以上, 分类精度较好。

2.1.2 基于格网尺度的数据处理

由于格网法以格网单元作为相关指标数据载体和基本分析单元, 能大幅度提升研究区域生态系统服务价值的分析精度, 且每个格网面积相等, 使生态系统服务价值更具可比性^[32]。本文为揭示城市尺度下生态系统服务价值时空格局细节特征, 采用格网法对研究区域进行空间分割: 在综合考虑研究区域面积, 以及最小可塑性单元对测算结果的尺度效应, 经多次试验, 选择 1km×1km 作为格网单元大小, 再运用 ArcGIS 10.2 软件 Create Fishnet 工具对研究区域进行格网划分。

格网下生态系统服务价值计算公式为:

$$ESVP_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} Z_i \quad (1)$$

式中, $ESVP_k$ 为 k 格网生态系统服务价值, A_{ki} 为 k 格网 i 地类面积, A_k 为 k 格网面积, Z_i 为 i 地类的生态系统服务价值当量, n 为地类数量。

2.1.3 基于植被覆盖度 (FVC) 的单元格网空间修订

研究虽根据三亚市实际情况修订单位面积当量因子, 但在同一生态系统下存在显著空间差异性。绿色植被覆盖对于城市生态系统的可持续性至关重要, 是生态系统服务的主要来源之一, 城市植被的丧失会降低自然界提供生态系统服务的能力^[40-41]。随着城市化日益加剧, 城市植被覆盖已受到负面影响。土地利用和土地覆盖 (LULC) 变化对生态系统服务价值 (ESV) 的影响空间差异显著, 生物量、NDVI 及植被覆盖度之间具有

高度相关性^[42-43]。归一化植被指数(NDVI)可以反映土地覆盖和生态环境的变化^[44]。已有研究表明归一化植被指数与生态系统服务价值存在相关性^[45]。选取植被覆盖度作为参数指标,参照 FVC 与 NDVI 的对应关系^[46],采用公式(2)、(3)、(4)可逐个单元对生态系统服务价值进行修订。由于建设用地、水域、未利用地、红树林湿地等植被稀少,NDVI 基本为负值,故只选取植被覆盖度较高的林地、农田、园地、草地生态系统服务做格网化修订。

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (2)$$

$$F_i = \frac{f_i}{f} \quad (3)$$

$$E = E_i \times F_i \quad (4)$$

式中,NDVI 为归一化植被指数;FVC 为植被覆盖度; F_i 为第 i 个格网单元的植被覆盖度修订系数; f_i 为第 i 个评估单元的 FVC 平均值; f 为研究区 FVC 均值; E 、 E_i 分别为 FVC 格网化修订前后的生态系统服务价值。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用时空分异测算

囿于篇幅,Landsat 遥感影像解译以及土地利用时空分析涉及的动态度、转移矩阵等方法参照文献^[47-48]。

2.2.2 当量因子法

参照近年来生态系统服务价值相关研究计算生态系统服务价值供给服务与调节服务价值。以谢高地等提出的中国陆地生态系统单位面积生态服务当量表为基础^[2-3],确定中国 1 个生态系统服务当量因子为 3406.50 元/hm²。根据研究期内全国单位面积平均粮食产量 5765.352kg/hm²,同期三亚市粮食单产为 4646.846kg/hm²,以此确定三亚市生态系统服务价值当量表的修订系数为 0.806,即换算得到三亚市一个标准当量因子的生态系统服务价值为 2745.936 元/hm²。

结合雷金睿等修订的海南省单位面积生态服务价值当量表以及三亚市生物量、社会经济状况等进行修订^[49-50]。其中农田当量因子对应其农田;园地为森林和草地的均值;林地对应其森林;草地对应其草地;水域对应其河流、湖泊;未利用地和滩涂对应荒地;建设用地当量值取 0,不纳入测算^[1]。由于生物量与生态系统服务价值呈线性关系,故以生物量对生态系统服务价值进行校正修订^[3],全国农田生态系统生物量因子为 1.00,三亚市则取海南省均值 0.72^[49]。最终得到三亚市单位面积供给、调节、文化服务价值系数表(表 1)。

表 1 三亚市各土地利用类型单位面积生态系统服务价值系数/(元/hm²)

Table 1 Average value of per-hectare of land ecosystem services in Sanya

一级类别 First category	二级类别 Second category	林地 Forest land	园地 Garden land	草地 Grassland	农田 Farmland	水域 Waters	荒地 Unused land	湿地 Wetland
供给服务 Provisioning service	食物生产	713.943	543.695	796.321	2828.314	1812.318	27.459	1008.308
	原材料生产	1647.562	1018.193	1180.752	796.321	1015.996	82.378	988.537
	水资源供给	851.240	543.695	659.025	-2498.802	14937.892	54.919	5120.621
调节服务 Regulating servicing	气体调节	5436.953	3449.994	4146.363	2251.668	3679.554	274.594	3756.440
	气候调节	16255.941	9806.287	10983.744	1180.752	8100.511	247.134	7117.466
	净化环境	4750.469	3015.038	3624.636	329.512	12576.387	796.321	7117.466
文化服务 Cultural service	水文调节	10626.772	6722.051	8045.592	3102.908	173652.993	521.728	47904.501
	美学景观	2636.099	1680.513	2031.993	192.216	9089.048	137.297	9351.560
	合计	42918.980	26779.466	31468.427	8182.889	224864.699	2141.830	82364.900

2.2.3 探索性空间分析方法

(1) 全局空间自相关

采用全局 Moran's I 指标对 1km×1km 格网下三亚市生态系统服务价值进行全局自相关度量和检验,其计

算公式为^[50]：

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (5)$$

式中, n 为格网数量; x_i 、 x_j 为格网 i 、 j 的属性值; \bar{x} 为属性均值; w_{ij} 为空间权重矩阵, 本文采用反距离权重矩阵。Moran's I 显著为正表示生态系统服务价值存在空间正相关, 显著为负表示生态系统服务价值存在空间负相关。

(2) 局部空间相关性

LISA 局部空间自相关通过分析空间单元与周围单元的差异程度及显著性水平, 揭示空间单元属性的局部聚类特征, 其计算公式为^[51]：

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j, \quad z_i = \frac{n (x_i - \bar{x})^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})}, \quad z_j = (x_j - \bar{x}) \quad (6)$$

式中, z_i 、 z_j 分别为格网 i 、 j 上观测值的标准化。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空演变分析

对土地利用数据中各地类面积进行统计, 得到三亚市土地利用类型动态度(表 2)。结果表明:(1)从用地变化来看, 以林地、园地、建设用地、农田、滩涂的变化为主, 其中林地面积大幅度减少, 总计降低 458.279 km²。(2)滩涂动态度最高, 高达 59.82%; 建设用地次之, 为 15.11%。(3)各用地类型动态度变化大小排序为: 滩涂 > 建设用地 > 草地 > 园地 > 未利用地 > 林地 > 水域 > 农田 > 红树林湿地。

表 2 三亚市 2006—2018 年土地利用动态度

Table 2 Land use dynamics of Sanya from 2006 to 2018

土地利用类型 Land use type	建设用地 Build-up land	园地 Garden land	未利用地 Unused land	水域 Waters	林地 Forest land	农田 Farmland	草地 Grassland	滩涂 Mudflat	红树林湿地 Mangrove wetlands
2006—2010 变化量/km ²	52.790	235.016	-4.328	5.661	-310.909	25.575	-3.965	1.879	-0.956
2006—2010 动态度/%	16.653	10.927	-1.002	4.969	-7.367	9.970	-18.115	54.011	-5.915
2010—2014 变化量/km ²	61.403	48.441	-74.413	-1.049	-39.089	-1.287	0.394	3.278	0.783
2010—2014 动态度/%	11.626	1.567	-17.943	-0.768	-1.313	-0.359	6.534	29.812	6.345
2014—2018 变化量/km ²	29.493	85.941	15.847	-1.266	-108.280	-17.265	-0.391	1.087	0.355
2014—2018 动态度/%	3.812	2.616	13.537	-0.956	-3.839	-4.882	-5.141	4.507	2.292
2006—2018 变化量/km ²	143.686	369.398	-62.893	3.346	-458.279	7.023	-3.962	6.244	0.182
2006—2018 动态度/%	15.109	5.725	-4.853	0.979	-3.620	0.913	-6.034	59.820	0.374

利用 ArcGIS 的分析工具得到 2006—2018 年土地利用转移矩阵(表 3)。三亚市土地利用转移主要特点如下:(1)林地转出面积最多, 为 484.127 km², 主要转变为园地和农田。(2)园地转入面积最多, 建设用地次之, 分别为 369.398、143.686 km²。其中园地主要转入源为林地; 建设用地为园地、未利用地及农田。(3)三亚市 2006—2018 年 12 年间, 城市化进程不断加快, 三亚旅游产业蓬勃发展, 在一定程度上推动旅游经济快速发展, 整个城市基础设施以及产业配套设施的建设进程, 突出表现为建设用地转入面积不断增加。

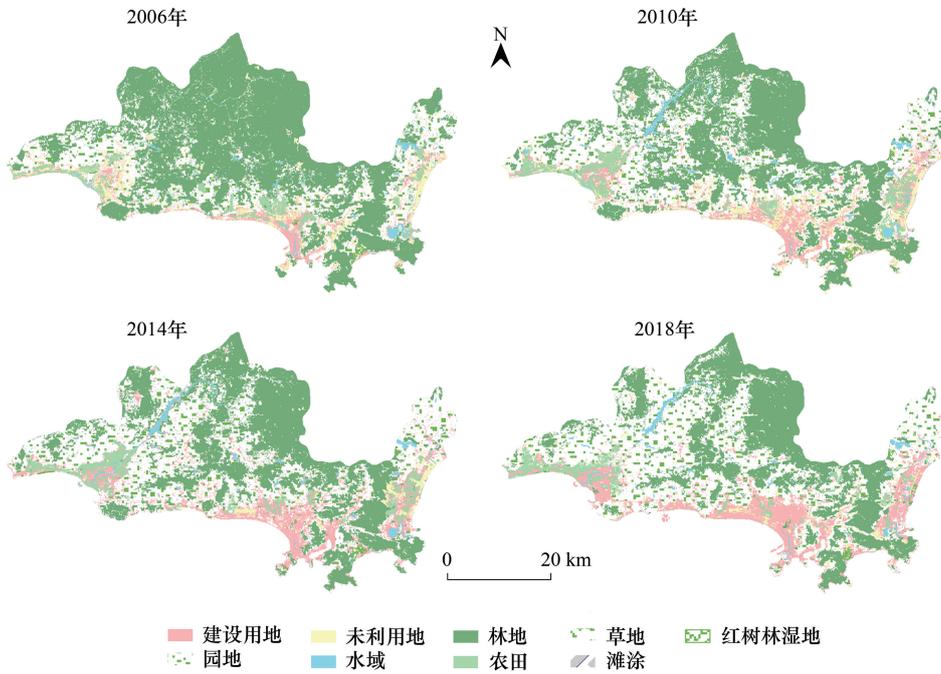


图 2 三亚市 2006—2018 年土地利用空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of land use in Sanya city from 2006 to 2018

表 3 三亚市 2006—2018 年土地利用转移矩阵

Table 3 Land use Transfer matrix of Sanya from 2006 to 2018

2006	2018									总计 Total
	建设用地 Build-up land	园地 Garden land	未利用地 Unused land	水域 Waters	林地 Forest land	农田 Farmland	草地 Grassland	滩涂 Mudflat	红树林湿地 Mangrove wetlands	
建设用地 Build-up land	55.260	10.585	4.213	0.863	0.482	6.689	0.084	0.567	0.225	78.969
园地 Garden land	78.066	385.624	19.703	4.258	17.103	27.503	0.787	2.722	0.520	536.285
未利用地 Unused land	41.122	31.199	9.139	4.182	5.877	14.080	0.230	0.505	1.414	107.7480
水域 Waters	4.398	6.014	1.153	14.117	1.735	0.566	0.013	0.049	0.168	28.211
林地 Forest land	6.913	459.460	7.170	7.948	570.563	1.508	0.199	0.037	0.894	1054.690
农田 Farmland	27.727	11.933	2.886	0.296	0.527	20.209	0.198	0.276		64.050
草地 Grassland	3.172	1.127	0.392	0.058	0.001	0.487		0.011	0.147	5.394
滩涂 Mudflat	0.093	0.022						0.571		0.686
红树林湿地 Mangrove wetlands	1.855	0.848	0.433	0.037	0.014				0.855	4.041
总计 Total	218.605	906.812	45.088	31.757	596.301	71.040	1.510	4.738	4.223	1880.074

3.2 生态系统服务价值分析

3.2.1 生态系统服务价值时间变化特征分析

依据《三亚市统计年鉴》及《国家统计年鉴》数据,运用价值当量因子法,确定三亚市一个标准当量因子的生态系统服务价值为 2745.936 元/hm²。结合雷金睿等修订的海南省单位面积生态服务价值当量表以及三亚市农田生态系统生物量因子 0.72。通过各土地利用类型面积数据,计算三亚市生态系统服务价值,得到三亚市 2006—2018 年各类土地生态系统服务价值变化及生态系统服务二级类型结构对比图表(表 4、图 3)。

表 4 三亚市 2006—2018 年各类土地生态系统服务价值变化/(100 万元/km²)

Table 4 Changes of land ecosystem service value in Sanya City from 2006 to 2018

	年份 Years	林地 Forest land	园地 Garden land	草地 Grass land	农田 Farmland	水域 Waters	荒地 Unused land	湿地 Wetland	总计 Total
生态系统服务价值 Ecosystem service value	2006	4528.264	1439.923	17.220	52.476	640.464	23.320	33.287	6734.955
	2010	3193.874	2069.283	4.742	73.404	767.767	22.795	25.411	6157.276
	2014	3026.108	2196.400	5.982	72.793	741.453	8.606	31.861	6083.202
	2018	2561.380	2361.630	4.751	79.054	702.632	13.008	34.782	5757.238
占比/% Proportion	2006	67.235	21.380	0.256	0.779	9.510	0.346	0.494	100.000
	2010	51.872	33.607	0.077	1.192	12.469	0.370	0.413	100.000
	2014	49.745	36.106	0.098	1.197	12.189	0.141	0.524	100.000
	2018	44.490	41.020	0.083	1.373	12.204	0.226	0.604	100.000

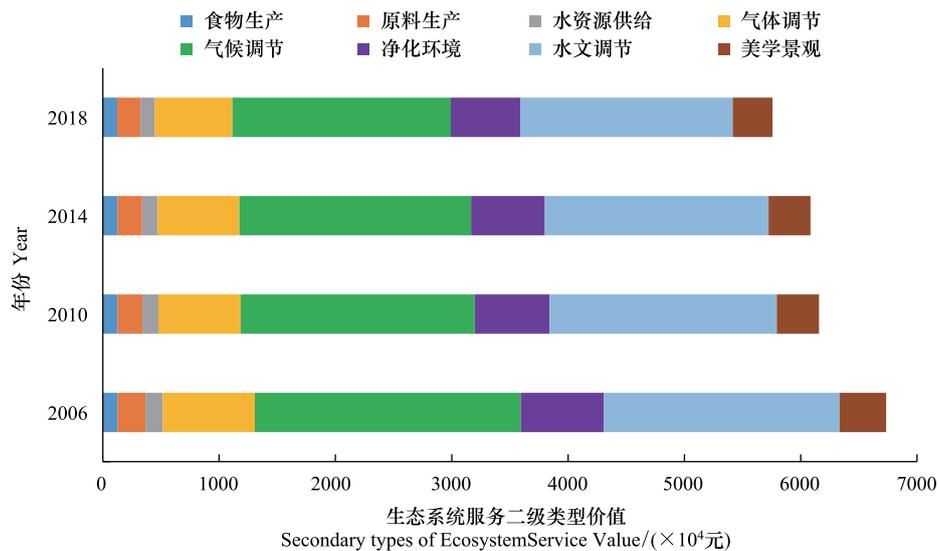


图 3 2006—2018 年三亚市生态系统服务二级类型结构对比图

Fig.3 Structure comparison of secondary types of ecosystem services in Sanya City from 2006 to 2018

结果表明:(1)三亚市 2006—2018 年,生态服务总价值分别是 6734.95×100 万元、 6157.28×100 万元、 6083.20×100 万元、 5757.24×100 万元,且总量呈逐年减少态势。以 4 年时间尺度为跨度,分别逐期减少 577.68×100 万元、 74.07×100 万元、 325.96×100 万元,减少变化率分别为 8.58%、1.20%、5.36%。(2)生态系统服务供给的主体地类依次为:林地、园地、水域、农田、湿地、荒地、草地。林地、园地是三亚市生态系统服务价值主要构成部分,其生态系统服务供给总占比高达 85%。(3)三亚市生态系统各项服务功能结构基本稳定,各功能价值次序由高到低为:气候调节、水文调节、气体调节、净化环境、美学景观、原材料生产、水资源供给、食物生产。绝对数值上,气候调节、水文调节、气体调节及净化环境服务价值变化显著,分别降低 406.80×100 万元、 202.38×100 万元、 124.99×100 万元、 114.52×100 万元。

3.2.2 生态系统服务价值空间变化特征分析

借助 ArcGIS 10.2 平台,采用空间格网化数据分割,将林地、草地、园地及农田生态系统服务价值利用植被覆盖度再次进行空间格网化修订,最终计算出每个格网修订后的生态系统服务价值,并生成 2006、2010、2014、2018 年生态系统服务价值空间格网分布图(图 4)。

结果表明:(1)总体格局上,三亚市生态系统服务价值呈现“南高北低”的空间特征。山区居多的北部地区生态系统服务价值较高(主要集中于天涯区和吉阳区),靠近东部、南部的沿海市区整体生态系统服务价值

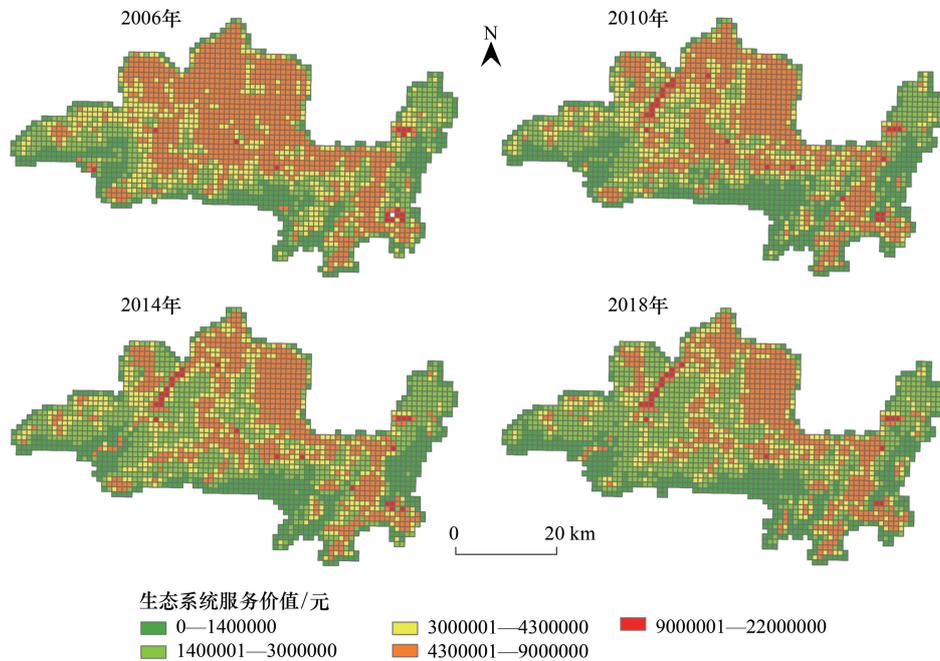


图 4 三亚市 2006—2018 年生态系统服务价值空间分布图

Fig.4 The spatial distribution of ESV in Sanya from 2006 to 2018

偏低(主要集中于崖州区和海棠区)。(2)格局演化上,三亚市中北部地区生态优势逐渐减弱,生态系统调节服务下降趋势明显,从而凸显出以旅游为主导的城镇化演进,并未呈现良好的生态效应。尤其是三亚市林地、园地、耕地逐步向建设用地转变带来的负面生态效应值得引起关注。城市规划中生态红线的绘制及执行尤为重要,在微观旅游开发和城市建设活动中应当将生态服务价值损益纳入经济活动成本管控中,通过人类理性社会经济活动促进三亚市生态环境的增值响应。

为进一步识别三亚市各区域生态系统服务价值变化的空间分异特征,利用 ArcGIS 10.2 绘制三亚市 2006—2018 年生态系统服务价值空间网格增减分布图(图 5)。

结果表明:(1)在空间分布上,2006—2010 年与 2010—2014 年 ESV 增减变化基本一致,减少区域连片分布全境,增加区域均集聚于天涯区、海棠区,且 2014 年前三亚市海棠区生态系统状况良好,ESV 整体呈上升趋势(图 5),但 2014—2018 年出现块状减少区域,此时三亚市生态系统服务价值减少区域主要集中在天涯区及吉阳区北部区域,表明该区域原有生态环境受人工过渡开发影响,ESV 呈大片减少趋势。

(2)整体上来看,三亚市生态系统服务价值在空间格局上,ESV 增加网格明显高于减少网格数量,且 2018 年三亚基本形成的三大旅游经济海湾区:亚洲湾、三亚湾以及海棠湾,在空间上存在大量增加网格,但在绝对值上,历年均呈下降趋势,表明减少区域囿于城镇建设和旅游业发展过程中,河道、湿地等不断被挤占,挖山、采石、毁林、取土导致山体破坏屡见不鲜;城市建成区河流、湿地、生态绿地等要素破碎、片段化现象明显,城市热岛效应明显。土地资源快速消耗,目前滨海地区建设用地已几乎耗尽,未来城市拓展空间大大受限。未来随着国际旅游岛建设发展,旅游业与城镇化加速带来人口增加,三亚将面临更大资源环境压力。

(1) 全局空间自相关结果

利用 GeoDa 软件,计算格网尺度下空间自相关 Moran's I 指数。2006 年、2010 年、2014 年以及 2018 年三亚市生态系统服务价值 Moran's I 指数为 0.637、0.597、0.567、0.599,表明在 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 的格网尺度上三亚市生态系统服务价值空间存在正相关,且相关性呈先降后增趋势。

(2) LISA 局部空间自相关聚类结果

全局 Moran's I 只揭示研究区域整体的集聚类型,利用 LISA 局部空间自相关聚类可分析三亚市生态系统

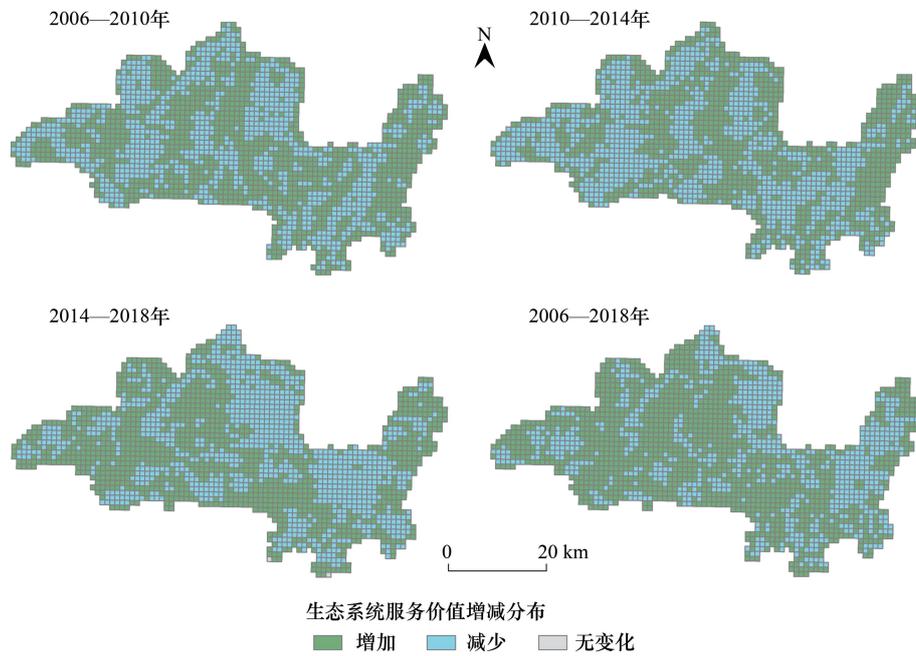


图 5 三亚市 2006—2018 年生态系统服务价值增减分布图

Fig.5 The spatial distribution of increase and decrease of ESV in Sanya from 2006 to 2018

服务价值领域之间的自相关性,将空间聚类分为 4 种:(1)高高集聚,格网与周边相邻格网生态系统服务价值都较高;(2)高低集聚,格网生态系统服务价值比较高,周边邻域格网生态系统服务价值较低;(3)低低集聚,格网与周边格网生态系统服务价值都较低;(4)低高集聚,在格网尺度下,格网生态系统服务价值较低,但周边格网生态系统服务价值较高。利用 ArcGIS 10.2 绘制三亚市 2006 年、2010 年、2014 年、2018 年 4 期的生态系统服务价值局部空间自相关图谱(图 6)。

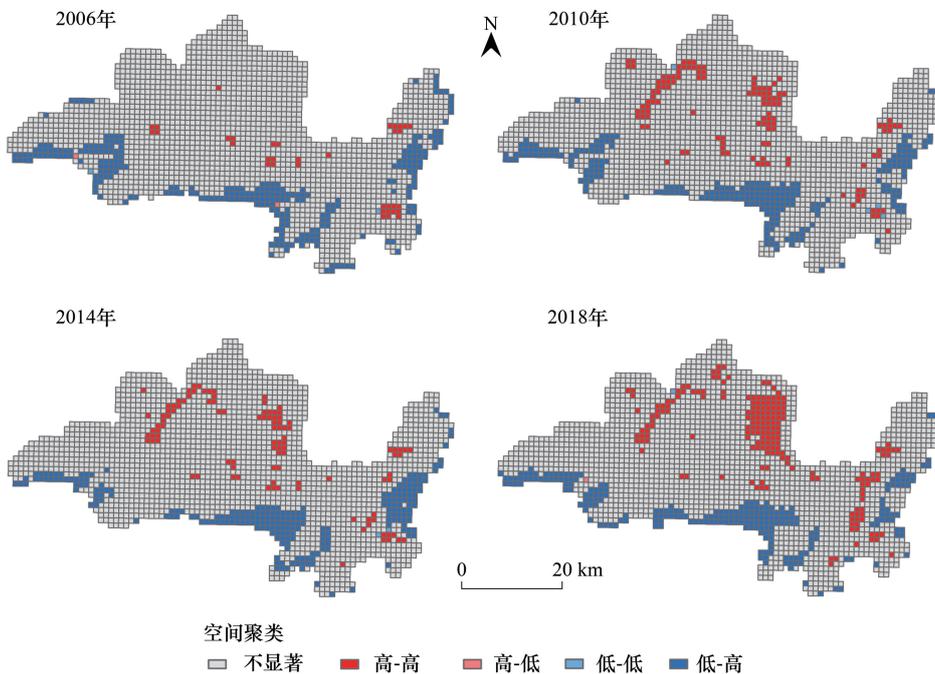


图 6 格网尺度下三亚市生态系统服务价值的 LISA 集聚图

Fig.6 The LISA aggregation of ESV in Sanya city at the Grid Scale

LSIA: 空间联系的局部指标图 Local indicators of spatial association

结果表明:三亚市的生态系统服务价值的空间集聚特征:从 2006—2018 年间,生态系统服务价值基本保持稳定,呈现“南低北高”空间集聚特征,高高、低低两类集聚类型显著性强;高低、低高分布集聚类型不显著。具体表现为:

(1)高高集聚区:主要分布在三亚市北部天涯区林地区域,三亚市依据《三亚市土地利用总体规划》严格控制三亚市生态环境保护机制,其中,三亚市北部山区天然林为重点保护对象,禁止诸如建设占用、毁林垦荒、商品林开发等迫使生态环境遭受直接或间接破坏的活动。严格遵守《中华人民共和国自然保护区条例》按照条例对自然保护区进行分层管理,并设立实施诸多管控措施,该举措在时间、空间上取得显著成效,但现有数据表明,在研究期内,北部天然林存在被开发利用迹象,导致南部城市建设核心及旅游周边发展不断侵占北部山地区域,北部山地作为三亚市生态系统服务价值的主要来源,定要严令禁止永久性破坏原有生态的建筑物等旅游开发项目。

(2)低低集聚区:主要集中在三亚沿海区域,崖州湾、三亚湾及海棠湾。三亚市海洋资源丰富,不断吸引新的开发项目建设,南部沿海海湾作为三亚市经济发展龙头区域,大部分经济收入来源于南部海湾。但由于生态文明理念薄弱,导致该片海湾区域的生态系统服务价值较低,在追求经济快速增长的同时,忽视生态系统涵养保护。

(3)其他集聚区:三亚市生态系统服务价值的高低、低高集聚区分布较少且零星散落在高高集聚区和低低集聚区的边界地区。且此类集聚区主要是林地、园地和农田的交界地带。

3.3 旅游发展与生态系统服务价值关系探究

2010 年初海南国际旅游岛建设正式步入正轨。三亚市抓住国际旅游岛建设等重大机遇,已逐步从边陲小城发展为国内外知名的旅游城市。近年来,三亚市基于《三亚市建设世界级滨海旅游城市行动方案》《三亚市幸福民生行动计划》推动产业融合与经济发展,积极落实全域旅游发展计划,策划改造传统景区、开发高质量旅游产品、建造顶级品牌滨海酒店带。在积极推动旅游业发展与金融产业兴隆的同时,忽视了优良生态环境的保护与维护。

(1)从土地利用数据来看,生态系统服务中林地服务价值最高。2006—2018 年间三亚市林地呈骤降趋势,成为制约生态系统服务价值的直接原因;园地、建设用地面积激增,尤其是建设用地面积 12 年来增长 143.686km^2 ,三亚市旅游开发与发展的,很大程度上推动原有土地利用类型与利用方式的转变。土地利用方式的转变代表着土地自然景观的改变,继而影响生态系统服务价值变动。

(2)从生态系统服务价值来看,三亚市生态系统服务价值呈逐年减少态势,且减少幅度略有下降。表明三亚市虽在以旅游为主导的开发建设下,降低了区域生态系统服务价值,但依旧有生态环境保护措施做缓冲,减缓对三亚市生态环境的破坏与干扰。

(3)从空间全局自相关来看,四期 Moran's I 指数分别为 0.637、0.598、0.568、0.600,正相关显著,且呈先降后增趋势,表明三亚市各格网区域之间存在空间集聚性,且在 2006—2014 年间呈下降趋势,空间性逐渐不明显,旅游开发项目扩散分布在三亚市适合区域,降低了生态系统服务的空间集聚性;2015—2018 年间,全局空间自相关指数略有提升,在国家大力倡导生态文明建设时期,限制三亚市旅游开发项目的延展性,转变为有节制的开发利用,生态系统服务价值空间集聚性获得提升。

(4)从空间局部自相关可以看出,三亚市四类聚集区域基本保持稳定。三亚市北部林地山地区域为高高集聚区域,南部沿海区域、崖州湾、三亚湾以及海棠湾为低低集聚区域。林地与建设用地在空间上与生态系统服务价值呈现较高的契合度。在城市化的推动下,旅游开发对生态系统服务价值的影响愈发强烈,旅游专业化程度已接近 90%,三亚市生态系统服务价值变化与三亚市旅游发展关系密切。

旅游产业的快速发展在带动经济增长的同时,对旅游地的生态系统造成巨大威胁,城市建成区生态绿地、河流等要素的破碎化,生物多样性骤减以及城市热岛效应明显,对三亚市将面临巨大的资源环境压力,随着土地利用强度的上升,生态系统服务价值不断减少,呈现出负相关趋势。随着以旅游为主导的城市发展,“去自

然化”地类转移的与日俱增,生态旅游的实操性受到巨大冲击,城市建设的盲目发展,不注重生态经济的可持续发展,是导致生态系统服务价值出现负增长的主要原因。

鉴于此,三亚市应该鉴于不同生态功能区及区域划分制定科学完善的生态管理控制措施,杜绝在敏感脆弱的生态保护区域建设旅游基础设施,依据统计年鉴等面板数据科学预测旅游景区游客容量,在旅游经济不断提升过程中,严禁永久破坏性旅游设施开发建设。应对生态环境进行敏感性评价,量化数据分析区域生态环境现状,明确生态环境承载力,重新确定各区域生态功能划分,在不破坏现有生态保护条例的前提下合理安排产业布局,鉴于不同生态功能区及区域划分制定科学完善的生态管理控制措施。

4 结论与讨论

4.1 主要结论

以三亚市为研究对象,从时空分异角度分析生态系统服务价值估算的演变特征,进而探究旅游发展对生态系统服务价值的影响,得出以下结论:

第一,2006—2018年间,三亚市生态系统服务价值总量呈现逐年下降趋势,由 6.73×10^7 元降至 5.76×10^7 元,累计减少 9.78×10^6 元。从生态系统的服务价值构成来看,由高到低依次为:水文调节>气候调节>气体调节>净化环境>休憩娱乐>原材料生产>水资源供给>食物生产。

第二,生态系统服务价值呈“南低北高”空间格局。2006—2018年增值区域连片分布在崖州区、天涯区、吉阳区南部区域,且呈逐年减少趋势,减值区域集聚于天涯区东北部、海棠区。四期生态系统服务价值均呈显著空间正相关且相关性先减后降,高高集聚区集中在天涯区北部地区,低低集聚区集中在沿海、海湾地区。

第三,旅游发展与生态系统服务价值时空演化特征关联性较强。三亚市天涯区北部林地生态环境良好,ESV略有下降但绝对数值稳定,是生态系统服务价值主要来源;旅游发展较为迅速的三亚湾、崖州湾以及海棠湾,相对增值区域较多,但绝对ESV损失显著,严重滞后于其他区域。

4.2 讨论

文章的评估与分析有利于精确认识旅游发展对生态系统服务价值的影响态势,且以典型海岛型旅游城市作为案例地的研究是对当前宏观尺度相关研究的有益补充,为旅游城市土地利用开发提供更为科学严谨的理论依据。本文尝试采用 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 的格网细化生态系统服务价值,在空间上以ESV增减为突破口,找寻空间关联性,并基于空间探索性空间统计方法,刻画空间集聚区域,成为探究旅游发展与生态系统服务价值关系的有益尝试。但旅游发展、土地利用变化及生态系统服务价值呈现的趋势明显,但背后复杂的社会经济因素尚未得到有效考量分析,因此,旅游产业的可持续发展与生态环境的影响机制是一个值得深入探索的研究方向。与此同时,现有文化服务价值评估研究,多集中于休闲娱乐场所且数据源大多来自消费者偏好。随着大数据时代的到来,文化服务价值评估有望朝向大尺度、高分辨率发展。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [3] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 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. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [4] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [5] Arias-Arévalo P, Gómez-Baggethun E, Martín-López B, Pérez-Rincón M. Widening the evaluative space for ecosystem services: a taxonomy of plural values and valuation methods. *Environmental Values*, 2018, 27(1): 29-53.
- [6] Schirpke U, Leitinger G, Tasser E, Rüdiger J, Fontana V, Tappeiner U. Functional spatial units are fundamental for modelling ecosystem services in mountain regions. *Applied Geography*, 2020, 118: 102200.
- [7] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service

- provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [8] Demirbugan A. Changes in ecosystem service benefit in Soma lignite region of Turkey. *Resources Policy*, 2019, 64: 101522.
- [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. *生态学报*, 2019, 39(4): 1426-1440.
- [10] Paudyal K, Baral H, Lowell K, Keenan R J. Ecosystem services from community-based forestry in Nepal: realising local and global benefits. *Land Use Policy*, 2017, 63: 342-355.
- [11] Kubiszewski I, Costanza R, Anderson S, Sutton P. The future value of ecosystem services: global scenarios and national implications. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 289-301.
- [12] Kibria A S M G, Behie A, Costanza R, Groves C, Farrell T. The value of ecosystem services obtained from the protected forest of Cambodia: the case of Veun Sai-Siem pang national park. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 27-36.
- [13] Häyhä T, Franzese P P, Paletto A, Fath B D. Assessing, valuing, and mapping ecosystem services in Alpine forests. *Ecosystem Services*, 2015, 14: 12-23.
- [14] 茹克亚·萨吾提, 阿斯娅·曼力克, 李虎, 尼加提·卡斯木, 郑逢令, 李学森, 热娜·阿不都克力木, 亚森·喀哈尔. 乌鲁木齐山地草地生态系统服务价值变化评估——基于遥感与 GIS. *生态学报*, 2020, 40(2): 522-539.
- [15] Song X P. Global estimates of ecosystem service value and change: taking into account uncertainties in satellite-based land cover data. *Ecological Economics*, 2018, 143: 227-235.
- [16] Wu M, Ren X Y, Che Y, Yang K. A coupled SD and CLUE-S model for exploring the impact of land use change on ecosystem service value: a case study in Baoshan District, Shanghai, China. *Environmental Management*, 2015, 56(2): 402-419.
- [17] Cerretelli S, Poggio L, Gimona A, Yakob G, Boke S, Habte M, Coull M, Peressotti A, Black H. Spatial assessment of land degradation through key ecosystem services: the role of globally available data. *Science of the Total Environment*, 2018, 628-629: 539-555.
- [18] 张天海, 田野, 徐舒, 唐立娜, 郭蔚. 滨海城市土地利用格局演变及对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2018, 38(21): 7572-7581.
- [19] Arowolo A O, Deng X Z, Olatunji O A, Obayelu A E. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 597-609.
- [20] Li F, Zhang S W, Yang J C, Chang L P, Yang H J, Bu K. Effects of land use change on ecosystem services value in West Jilin since the reform and opening of China. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 12-20.
- [21] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务权衡与协同关系及驱动力——以江苏省太湖流域为例. *生态学报*, 2019, 39(19): 7067-7078.
- [22] Li X F, Tian Y C, Gao T, Jin L, Li S T, Zhao D, Zheng X, Yu L Z, Zhu J J. Trade-offs analysis of ecosystem services for the grain for green program: informing reforestation decisions in a mountainous headwater region, Northeast China. *Sustainability*, 2020, 12(11): 4762.
- [23] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究. *生态学报*, 2018, 38(21): 7582-7595.
- [24] Ding X H, Zhou C, Zhong W Z, Tang P P. Addressing uncertainty of environmental governance in environmentally sensitive areas in developing countries: a precise-strike and spatial-targeting adaptive governance framework. *Sustainability*, 2019, 11(16): 4510.
- [25] Li J, Zhang Z L, Jin X F, Chen J Q, Zhang S J, He Z, Li S, He Z M, Zhang H P, Xiao He. Exploring the socioeconomic and ecological consequences of cash crop cultivation for policy implications. *Land Use Policy*, 2018, 76: 46-57.
- [26] Stepniewska M. Ecosystem service mapping and assessment as a support for policy and decision making. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 2016, 44(10): 1414-1422.
- [27] Ghermandi A, Obura D, Knudsen C, Nunes P A L D. Marine ecosystem services in the Northern Mozambique Channel: a geospatial and socio-economic analysis for policy support. *Ecosystem Services*, 2019, 35: 1-12.
- [28] de Souza Queiroz L, Rossi S, Calvet-Mir L, Ruiz-Mallén I, García-Betorç S, Salvà-Prat J, de Andrade Meireles A J. Neglected ecosystem services: Highlighting the socio-cultural perception of mangroves in decision-making processes. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 137-145.
- [29] Zoppi C. Ecosystem services, green infrastructure and spatial planning. *Sustainability*, 2020, 12(11): 4396.
- [30] Morán-Ordóñez A, Rocas-Díaz J V, Otsu K, Ameztegui A, Coll L, Lefevre F, Retana J, Brotons L. The use of scenarios and models to evaluate the future of nature values and ecosystem services in Mediterranean forests. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(2): 415-428.
- [31] Pachoud C, Re R D, Ramanzin M, Bovolenta S, Gianelle D, Sturaro E. Tourists and local stakeholders' perception of ecosystem services provided by summer farms in the eastern Italian Alps. *Sustainability*, 2020, 12(3): 1095.
- [32] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 高建华. 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. *生态学报*, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [33] 赵志刚, 余德, 韩成云, 王凯荣. 2008—2016 年鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值的时空变化研究. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(2): 198-208.
- [34] 游巍斌, 何东进, 巫丽芸, 洪伟, 詹仕华, 黄德华, 覃德华, 游惠明. 山岳旅游地生态服务价值时空分异及其与环境因子关系——以武夷山风景名胜區为例. *山地学报*, 2012, 30(1): 113-120.
- [35] 李冬杰, 杨利, 余俞寒, 罗文斌, 王兆峰. 都市生态旅游区土地利用碎片化对生态系统服务价值的影响——以武汉东湖生态旅游区为例.

- 生态学报, 2019, 39(13): 4782-4792.
- [36] 卢婷, 姚娟, 赵向豪. 大喀纳斯旅游区生态系统供给服务价值评估及权衡分析. 生态经济, 2018, 34(7): 215-220.
- [37] 张娟, 陈凡, 角媛梅, 刘澄静, 赵冬梅, 刘志林, 徐秋娥, 邱应美. 哈尼梯田区不同旅游模式村寨土地利用变化对生态系统服务与人类福利的影响. 生态学报, 2020, 40(15): 5179-5189.
- [38] 朱顺顺, 章锦河, 胡欢, 陈草惠. 旅游发展的生态系统服务价值增值效应研究. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 603-613.
- [39] 李子琴, 赵成章, 苟芳珍, 任杰, 马俊逸. 2013 年和 2017 年甘肃酒泉花城湖国家湿地公园生态系统的服务价值. 湿地科学, 2019, 17(3): 365-371.
- [40] De Carvalho R M, Szlafsztein C F. Urban vegetation loss and ecosystem services: the influence on climate regulation and noise and air pollution. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 844-852.
- [41] Jin K, Wang F, Li P F. Responses of vegetation cover to environmental change in large cities of China. *Sustainability*, 2018, 10(1): 270.
- [42] 蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 张治国. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(22): 6708-6716.
- [43] Shao Y J, Yuan X F, Ma C Q, Ma R F, Ren Z X. Quantifying the spatial association between land use change and ecosystem services value: a case study in Xi'an, China. *Sustainability*, 2020, 12(11): 4449.
- [44] 王亚军, 马玉贞, 鲁瑞洁, 高尚玉. 祁连山东延余脉——兴隆山树木径向生长记录的公元 1845 年来夏季 NDVI 变化. 地理研究, 2016, 35(4): 653-663.
- [45] 毕晓丽, 葛剑平. 基于 IGBP 土地覆盖类型的中国陆地生态系统服务功能价值评估. 山地学报, 2004, 22(1): 48-53.
- [46] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [47] 侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 振民, 鲁亚楠, 郑雪, 李雅男. 格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景. 自然资源学报, 2019, 34(3): 539-552.
- [48] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [49] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 鲁春霞. 我国粮食生产的生态服务价值研究. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13.
- [50] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(14): 4760-4773.
- [51] Anselin L. Local Indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.