

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.041.

高春莲, 胡宝清, 黄思敏, 等. 山江海耦合关键带生态系统服务价值时空变化及其权衡研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 264-274.

Gao Chunlian, Hu Baoqing, Huang Simin, et al. Spatio-temporal Changes and Trade-offs of Ecosystem Service Value in Mountain-River-Sea Coupling Key Zone Research[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 264-274.

山江海耦合关键带生态系统服务价值 时空变化及其权衡研究

高春莲^{1,2}, 胡宝清¹, 黄思敏^{1,2}, 黄丽芳^{1,2}, 李彩茶^{1,2}

(1. 南宁师范大学 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室/广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001; 2. 南宁师范大学 地理科学与规划学院, 南宁 530001)

摘要: [目的] 量化和分析山江海耦合关键带生态系统服务价值及时空变化, 有助于深入了解其生态系统服务现状, 进而阐明山江海耦合关键带生态服务之间的权衡/协同关系, 对提高生态系统服务之间相互作用的认识, 促进区域全面可持续发展和生态环境保护与修复具有重要意义。 [方法] 基于 1990—2020 年 7 期土地利用数据及结合修订后的当量因子表, 运用网格法、地理加权回归等方法分析了山江海耦合关键带 1990—2020 年 ESV 时空变化和各项生态系统服务相互关系及其空间分异特征。 [结果] 1990—2020 年山江海耦合关键带总 ESV 从 788.55 亿元增加至 792.30 亿元, 增幅为 0.48%, 林地、耕地、水域地类 ESV 较高, 为区内总 ESV 主要贡献因子, 建设用地 ESV 较低, ESV 在空间上呈现从西北向东南降低的趋势; 1990—2020 年各项生态系统服务相互关系以协同关系为主, 约占 85.45%, 其中权衡高值区主要分布在山江海耦合关键带中部及南部地区, 低值区主要分布在百色市喀斯特山区; 协同低值区主要分布在人口密集、人类活动频繁、经济较为发达的市县级城区及沿海地区。 [结论] 1990—2020 年山江海耦合关键带生态系统服务整体协调且保持动态平衡, 食物生产活动会影响其他生态服务的能力, 未来地方应严格把控生产活动开展边界, 注重对生产地区的环境保护与修复。

关键词: 生态系统服务价值; 土地利用; 时空变化; 权衡/协同; 山江海耦合关键带

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0264-11

Spatio-temporal Changes and Trade-offs of Ecosystem Service Value in Mountain-River-Sea Coupling Key Zone Research

Gao Chunlian^{1,2}, Hu Baoqing¹, Huang Simin^{1,2}, Huang Lifang^{1,2}, Li Caicha^{1,2}

(1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education,

Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University,

Nanning 530001, China; 2. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530001, China)

Abstract: [Objective] Quantifying and analyzing the value and spatiotemporal changes of ecosystem services in the key coupling zone of mountain-river-sea is helpful to understand the current situation of ecosystem services, and then clarify the trade-off / synergy relationship between ecosystem services in the key coupling zone of mountain-river-sea. It is of great significance to improve the understanding of the interaction between ecosystem services and promote the comprehensive sustainable development of the region and the protection and restoration of ecological environment. [Methods] Based on the landuse data from 1990 to 2020 and the revised equivalent factor table, the grid method and geographically weighted regression were used to analyze the spatial and temporal changes of ESV and the relationship between various ecosystem services and their

收稿日期: 2023-04-25

修回日期: 2023-05-22

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“喀斯特峰丛洼地土壤养分过程及其生态系统服务权衡”(42071135); 广西科技基地与人才专项(桂A19110142); 国家自然科学基金项目“北部湾红树林滩涂响应陆海水沙变化的沉积动力过程”(41930537); 国家社会科学基金项目(21XGL015); 自然资源数字产业学院建设项目

第一作者: 高春莲(1999—), 女, 广西钦州人, 硕士研究生, 研究方向资源开发与国土整治。E-mail: Gaochunlian25@163.com

通信作者: 胡宝清(1966—), 男, 江西抚州人, 教授, 研究方向为脆弱环境与整治。E-mail: h bq1230@nnu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

spatial differentiation characteristics in the mountain-river-sea coupling key zone from 1990 to 2020. [Results] From 1990 to 2020, the total ESV in the key zone of mountain-river-sea coupling increased from CNY 78,855 billion to CNY 79,230 billion, with an increase of 0.48%. The ESV of forest land, cultivated land and water land was higher, which was the main contribution factor of the total ESV in the area. The ESV of construction land was lower, and the ESV showed a trend of decreasing from northwest to southeast in space. From 1990 to 2020, the interrelationships of various ecosystem services were mainly synergistic, accounting for about 85.45%. The high-value areas of trade-offs mainly distributed in the central and southern regions of the mountain-river-sea coupling key zone, and the low-value areas mainly distributed in the karst mountainous area of Baise City; the synergistic low-value areas mainly distributed in urban and coastal areas with dense population, frequent human activities and relatively developed economy. [Conclusions] From 1990 to 2020, the ecosystem services in the key coupling zone of mountain-river-sea were coordinated and maintained a dynamic balance. Food production activities would affect the ability of other ecological services. In the future, local governments should strictly control the development boundary of production activities and pay attention to environmental protection and restoration of production areas.

Keywords: ecosystem service value; land use; temporal and spatial changes; balancing synergy; mountain-river-sea coupling key zone

地球关键带是美国国家研究委员会(National Research Community)2001年提出的人类与地球联系最为密切影响最为深刻的关键区域,是处于地球岩石圈、水圈、大气圈、土壤圈和生物圈五大圈层异质交叉地带的陆地表层系统^[1]。地球关键带科学是未来地球科学研究的重点方向,国内外学者对关键带的物理、化学和生物过程进行了全面、系统、持续、深入的跨学科研究^[2]。其中“关键带服务(Critical-Zone services)”作为地球关键带研究的未来发展方向之一^[3],其生态系统服务对维持陆地生态系统平衡和人类生存发展至关重要。由于关键带是处于异质的地表环境及其要素、结构和过程的复杂性,目前地球关键带生态系统服务研究仍处于起步阶段,但也有不少学者进行了相关研究,如有学者通过生态系统服务价值评估构建14个地球关键带生态系统服务指标,评估地球关键带5个重要组成部分的价值量^[4],张丽等^[5]基于地球关键带创建土壤生态系统服务评价方法,陈琪等^[6]针对陆地生态系统构建地球关键带生态系统服务评价方法和指标体系,陈金珂等^[7]基于土地利用情景模拟和模型评估方法研究喀斯特关键带生态系统服务特征及权衡关系等。可见,目前针对地球关键带生态系统服务的研究较多关注以某一种类型的关键带为研究对象构建生态系统服务评价指标体系以及分析某一种类型关键带的生态系统服务特征,较少涉及对地球关键带服务的经济价值进行量化评估或将多种关键带作为一个连续的整体,研究不同关键带的耦合过程与功能,分析其在空间上呈现不同生态功能与服务等方面的研究。

地球关键带生态系统服务被定义为是由地球关键

带特定的、完整的物理系统提供的广泛人类惠益^[8],其生态服务可以分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务,这很大程度上与生态系统服务尤为相似^[9],因此,对于地球关键带服务评价,可以从生态系统服务中已经广泛使用的方法延伸至地球关键带,即“生态系统服务”到“地球关键带服务”^[10]。土地利用作为地球关键带中的重要组成部分^[11],其对生态系统服务功能及其相互关系转化具有重大的影响^[12],快速的土地利用变化能够直接改变生态系统结构且在一定程度上影响地域气候、水文、土壤、生物多样性以及地球化学循环过程^[13]。例如,1999年的退耕还林工程,迫使 $2.33 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的耕地转为林地,很大程度上影响了区域生态系统服务及其之间的相互关系^[14]。当前,许多学者从土地利用类型、时空尺度、地域范围等不同方面对生态系统服务功能类型、价值评估、权衡/协同效应等开展了大量研究^[15],其中谢高地学者的生态系统服务价值当量因子表法在国内广泛运用^[16],该方法主要通过土地利用现状评估不同土地利用提供的生态系统服务价值,从而确定不同生态系统服务间的关系^[17]。

山江海耦合关键带是涵盖山地、流域、海岸关键带三者的简称,是山地丘陵、江河流域、海岸带3种地貌类型共同耦合的过渡性陆地表层系统,该区域因地形地貌、土地利用与植被覆盖动态变化等而呈现出不同结构、功能和特征,表现出独特的时空差异性和演变规律^[18]。广西桂西南喀斯特—北部湾地区是山江海耦合关键带的典型代表,该地区由桂西南喀斯特山区、左右江流域和北部湾海岸3个典型地带共同构成,在空间上形成由高山—丘陵—滨海平原组成,江

河流域贯穿整个陆地表层系统且由西北向东南倾斜降低的过渡性特殊空间,是人与自然相互作用的过渡性地理空间^[19]。多年来,由于该地区受地质地貌、气候、水文、历史文化发展等影响以及社会发展,人口数量增多,其生态系统服务受人类活动干扰强度大,生态环境脆弱。因此,为合理充分利用各地区优势,打通山区、流域、海岸带发展系统边界,形成山江海联动综合发展的形式,实现山江海过渡性地理空间社会生态系统可持续发展,本文在前人的基础上,通过将山地、流域、海岸 3 个关键带耦合作为一个连续的整体进行研究,基于 1990—2020 年 7 期土地利用数据及采用修订后的当量因子表,运用网格法分析桂西南喀斯特—北部湾地区生态系统服务价值的时空变化特征,探讨山江海耦合关键带生态系统服务现状,利用相关性分析和地理加权回归方法分析不同生态系统服务的相互关系及其空间分异特征,提高对生态系统服务之间相互作用的认识,为地球关键带生态系统服务的研究提供新视角、新思路,对促进区域多种关键带生态系统服务总体效益最大化及经济可持续发展与生态环境保护实现“双赢”具有重要意义。

1 研究区概况

广西桂西南喀斯特—北部湾地区是由喀斯特山区和北部湾海岸带构成复杂的陆地表层系统,同时被左江、右江河流贯穿其中的异质性国土空间,是典型的山江海过渡地区(图 1)。该区域由百色市、崇左市、南宁市、防城港市、北海市、钦州市、崇左市 7 个地级市组成,涵盖 50 个县(市、区),土地面积达 108 398.524 5 km²,占广西总面积的 45.80%,至 2021 年底,桂西南喀斯特—北部湾地区共有 2 922.05 万人,占广西总人口的 50.97%,经济总量达 13 717.49 亿元,人均 GDP 达 56 167.14 元。该区域沿云贵高原山麓向北部湾沿海地区呈自上而下倾斜的过渡地带,在空间上呈现出西北—东南地势逐渐降低的地域分异规律,具有亚热带季风气候和热带海洋性季风性气候两种,气温 2.8~40.4℃,平均气温 23.19℃,雨量充沛,平均降水量达 1 377.8 mm,水资源丰富。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文基于 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 7 期土地利用数据,空间分辨率为 30 m,影像数据来源于武汉大学杨杰教授团队制作的中国土地覆盖数据集(CLCD)^[20],根据其土地利用分类,根据研究区实际情况提取耕地、林地、草地、水域、未利用地、建设用地 6 类地类的分类结

果。研究区和全国粮食播种面积及产量数据从《广西统计年鉴》和《国家统计年鉴》中获取,全国粮食平均出售价格及广西居民消费价格指数(Consumer Price Index, CPI)分别来源于《全国农产品成本收益资料汇编(1990—2020 年)》和《广西统计年鉴》。

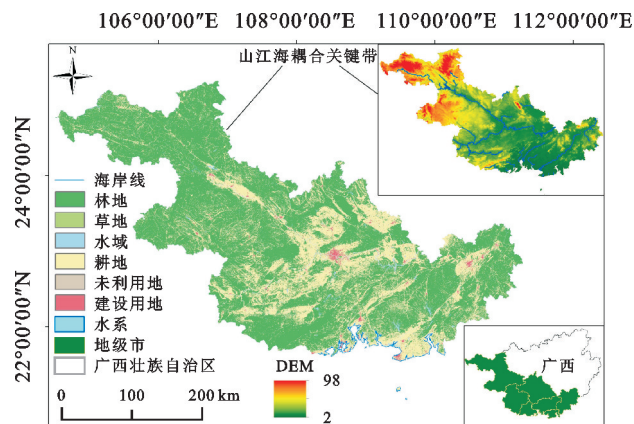


图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

2.2 生态系统服务价值估算

基于谢高地等^[21]修订的当量因子表,结合桂西南喀斯特—北部湾地区实地生产能力,采用粮食修正方法进行修正,当量基准由农田平均粮食产量来测算单位面积食物生产服务的经济价值。1990—2020 年全国单位粮食面积与桂西南喀斯特—北部湾地区平均产量分别为 476 678.65 kg/km², 302 180.46 kg/km²,因此研究区粮食平均产量当量因子修订系数为 0.634。从《全国农产品成本收益资料汇编(1990—2020)》中计算研究区平均粮食出售价格为 1.6 元/kg,在无其他干扰情况下,自然生态系统提供的经济价值是现有农田单位面积提供食物生产服务经济价值的 1/7^[22]。为消除粮食价格物价变动及通货膨胀影响,提高测算精度,引入 CPI 对所求得的 VC 进行修正^[23],最后通过计算得出研究区 1 个当量因子的经济价值量为 445.27 元/km²,将耕地、林地、草地、水域、未利用地分别与农田、森林、草地、水体及荒漠 5 类生态系统相对应,建设用地单位面积生态服务价值单量参考邓元杰^[24]和高振斌^[25]等研究确定,最终得到山江海耦合关键带土地利用类型生态系统服务价值系数表(表 1)。桂西南喀斯特—北部湾地区生态系统服务价值计算方法为^[26]:

$$ESV = \sum (S_k \times VC'_{ik}) \quad (1)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值(元); S_k 为 k 类土地利用类型面积(km²); VC'_{ik} 为修正后 k 种地类生态系统服务价值系数(元/km²)。

2.3 生态敏感性分析

生态系统服务价值敏感性指数(Coefficient of Sensitivity, CS)是指由 VC 变化引起 ESV 变化^[27]。为了确认

ESV 的计算是否符合研究区,引入生态系统价值敏感性系数进行敏感性指数分析,计算公式为:

$$CS=\left|\frac{(ESV_b-ESV_a)/ESV_a}{(VC_{bl}-VC_{al})/ESV_{al}}\right| \tag{2}$$

式中:CS 表示生态系统价值敏感性系数,是指生态价

值系数变动 1%引起 ESV 发生变化;VC 为当量因子;*b* 为调整后的状态;*a* 为调整前的状态。VC_{*b*} 和 VC_{*al*} 表示第 *l* 种初始和调整后 (VC±50%) 土地利用类型的价值系数。当 VC>1 时,表示 ESV 对 VC 富有弹性;反之,ESV 对 VC 缺乏弹性,研究结果可信。

表 1 山江海耦合关键带土地利用类型生态系统服务价值系数 (ESV)

Table 1 Landuse type ecosystem service value coefficient (ESV) in the key coupling zone of mountain-river-sea

		元/km ²					
一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
供给服务	食物生产	50922.69	11636.18	10752.91	30184.94	230.42	460.84
	原料生产	11290.55	26728.65	15822.13	16820.62	691.26	1382.52
	水资源供给	—60139.46	13825.16	8755.94	250696.31	460.84	—26.76
调节服务	气体调节	41014.65	87905.00	55607.88	61521.98	2995.45	5069.23
	气候调节	21429.00	263023.75	147007.58	135717.03	2304.19	4608.39
	净化环境	6221.32	77075.29	48541.69	210833.75	9447.20	—14286.00
	水文调节	68895.40	172123.29	107682.67	2914114.15	5530.07	—9677.61
支持服务	土壤保持	23963.62	107029.81	67743.30	74655.89	3456.29	5990.90
	维持养分循环	7143.00	8179.89	5222.84	5760.49	230.42	460.84
	生物多样性	7834.26	97467.41	61598.79	240097.01	3225.87	5530.07
文化服务	美学景观	3456.29	42742.80	27189.49	152537.64	1382.52	2304.19
总计		182031.33	907737.23	555925.21	4092939.80	29954.52	1816.60

2.4 生态系统服务权衡协同关系

基于 R.4.2 软件中“corrplot”包利用皮尔逊(pearson)相关性分析确定生态系统服务的相互关系,若计算结果大于 0,则两个生态系统服务之间为协同关系,反之则为权衡关系,数值大小表示变量相关性的强弱。此外,为了凸显不同生态系统服务相互关系的空间分异特征,基于 R.4.2 软件中“GWmodel”包的 GWR 模型对不同生态系统服务进行分析。GWR 是基于传统的回归框架对 GWR 进行修改,使其能够测试空间非平稳性^[28],由于生态系统服务之间在空间上是非平稳的,受空间异质性的影响,而在本文中,只使用 ESV 作为自变量和因变量,分析时不存在多重共线性问题,因此能够用 GWR 结果中的系数来体现不同生态系统服务间的空间交互相关性。公式如下:

$$y_i=\beta_0(\mu_i,\nu_i)+\sum_{k=1}^p\beta_k(\mu_i,\nu_i)\chi_{jk}+\epsilon_i \tag{3}$$

式中:(*μ_i*,*ν_i*)表示点 *i* 的空间位置;*ρ* 为独立变量个数;*y_i* 为因变量;*χ_{jk}* 为独立变量;*ε_i* 为随机误差;*β₀*(*μ_i*,*ν_i*)表示在 *i* 的截距;*β_k*(*μ_i*,*ν_i*)为回归系数,数值大小表示强度的强弱,正值表示生态系统服务在空间上为协同关系,负值则为权衡关系。

3 结果与分析

3.1 土地利用类型面积及变化

由表 2 可知,1990—2020 年来研究区林地面积最广,占总面积 67%以上,其次是耕地,占 27%以上,

水域、建设用地、草地和未利用地占比较小,其中在研究期间草地面积趋向于缩减,建设用地面积不断增加。1990—1995 年草地、未利用地面积大幅度锐减,减幅分别为 38.89%,38.98%,建设用地面积增加,增幅为 26.83%;1995—2000 年,建设用地面积持续增加,增幅达 38.86%,主要是由于耕地和林地面积的转入;2000—2005 年,建设用地、耕地、水域面积增加,耕地面积增幅达 6.82%,主要由于林地、草地、未利用地面积的转入;2005—2010 年期间,2008 年国家坚守耕地保护红线,注重生态环境保护,强调退耕还林、还草、还湖,区内耕地面积缩减 7.49%,林地、水域等生态用地面积增加,此外,工业等建设用地面积大大增加;2010—2015 年,党的十八大大力推进生态文明建设,国家对石漠化地区生态环境开展实际性治理,桂西南喀斯特地区水土流失等生态环境问题逐渐改善,裸土逐渐变成旱地、林地等用地,林地和水域面积不断增加,林地在研究期间达到最大面积;2015—2020 年,广西城镇化和工业化快速发展,区内建设用地面积达到 1 488.24 km²,主要由于草地和水域面积的转入。

3.2 生态系统服务价值时空变化

3.2.1 生态系统服务价值时间变化 根据公式(1)求出山江海耦合关键带 1990—2020 年各土地利用类型生态服务价值和单项生态系统服务价值(表 3 和表 4)。1990—2020 年来研究区总 ESV 从 788.55 亿元增加到 792.30 亿元,增幅 0.48%,表明山江海耦合关

键带生态环境趋于改善,但改善的水平较低。31 年来,研究区总 ESV 为先增加后减小再增加再减小的变化趋势,其中 1990—2000 年和 2005—2015 年呈持续增加的趋势,增幅为 0.41%,2.97%,2000—2005 年和 2015—2020 年为减小的趋势,减幅为 1.64%,1.20%。2015 年总 ESV 最高,为 801.90 亿元,2005 年最低,为 778.78 亿元,主要原因是由林地面积变化所致,2015 年林地在研究期间内面积最大,2005 年最小,表明研究区应重视退耕还林及喀斯特山区石漠化治理,坚定绿色发展的理念,注重生态文明建设。从

各土地类型 ESV 总体组成看,1990—2020 年期间林地 ESV 最大,其次是耕地和水域,平均贡献率分别为 86.11%,7.11%,6.66%,为研究区 ESV 最主要的贡献因子。从 ESV 变化看,31 年来,研究区 ESV 变化主要是建设用地、草地和未利用地 ESV 变化所致,建设用地的 ESV 变化幅度最大,为 259.58%,林地变化幅度最小,为 0.18%,表明建设用地 ESV 较低,受环境、人类活动干扰等因素的影响变化较大,地方应该科学划定“三区三线”,确保城镇和耕地有序发展,擦亮广西“山清水秀生态美”的金字招牌。

表 2 1990—2020 年山江海耦合关键带土地利用类型面积及占比

Table 2 Landuse type area and proportion of the key coupling zone between mountain-river-sea from 1990 to 2020

年份	统计类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
1990 年	面积/km ²	31126.94	75375.70	364.27	1115.20	2.54	413.88
	占比/%	0.29	0.70	0.00	0.01	0.00	0.00
1995 年	面积/km ²	31172.10	75308.60	222.59	1168.76	1.55	524.93
	占比/%	0.29	0.69	0.00	0.01	0.00	0.00
2000 年	面积/km ²	30958.82	75298.18	165.72	1244.72	2.20	728.89
	占比/%	0.29	0.69	0.00	0.01	0.00	0.01
2005 年	面积/km ²	33069.52	73012.10	136.14	1344.98	1.12	834.68
	占比/%	0.31	0.67	0.00	0.01	0.00	0.01
2010 年	面积/km ²	30592.40	75200.00	123.66	1461.24	1.05	1020.17
	占比/%	0.28	0.69	0.00	0.01	0.00	0.01
2015 年	面积/km ²	29626.20	75956.47	124.61	1411.56	0.91	1278.78
	占比/%	0.27	0.70	0.00	0.01	0.00	0.01
2020 年	面积/km ²	30044.22	75512.04	90.81	1261.42	1.79	1488.24
	占比/%	0.28	0.70	0.00	0.01	0.00	0.01

表 3 1990—2020 年山江海耦合关键带各地类生态系统服务价值及变化

Table 3 Value and changes of ecosystem services in the key coupling zone of mountain-river-sea from 1990 to 2020

土地利用 类型	ESV/亿元							1990—2020 年 变化幅度/%
	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	
耕地	56.66	56.74	56.35	60.20	55.69	53.93	54.69	-3.48
林地	684.21	683.60	683.51	662.76	682.62	689.49	685.45	0.18
草地	2.03	1.24	0.92	0.76	0.69	0.69	0.50	-75.07
水域	45.64	47.84	50.95	55.05	59.81	57.77	51.63	13.11
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-29.61
建设用地	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	259.58
合计	788.55	789.43	791.75	778.78	798.82	801.90	792.30	0.48

分析山江海耦合关键带单项生态系统服务价值及变化(表 4),结果表明单项服务 ESV 变化整体上与总 ESV 变化趋势一致。研究时期内调节服务功能 ESV 贡献率最大,均占总 ESV67%以上,其次是支持服务,占 22%以上,供给服务占 5%左右,最小是文化服务功能,占 4%左右,其中气候调节和水文调节为调节服务 ESV 的主要贡献因子,土壤保持和生物多样性为支持服务 ESV 的主要贡献因子,食物生产和原料生产为供给服务 ESV 的主要贡献因子。2005 年供给服务功能中食物生产 ESV 增加,原料生产和水资源供给减少,主要是由于 2005 年耕地面积增加所致,耕地面积增加,农业生产强

度加大,所需水量大,从而水资源供给量大大减少,而 2005 年调节服务功能中的气体调节、气候调节、净化环境功能 ESV 大大减少,这与林地总 ESV 变化一致,原因是林地面积的减少。研究区水域面积的变化趋势为先增加后减少,1990—2010 年增加,2010 年增加至最高,随后 2010—2020 年逐渐减少,水文调节 ESV 变化与之一致,说明该研究区内水文调节 ESV 变化主要是受水域面积变化所影响。

3.2.2 生态系统服务价值空间变化 为进一步体现山江海耦合关键带 1990—2020 年 ESV 空间变化特征,本文选择格网作为研究尺度,拟定以 5 km ×

5 km 格网将研究区划分为 4 375 个基本单元。基于 Kriging 插值方法对格网进行进一步处理,通过自然断点法将 ESV 值划分为:低、较低、中等、较高和高 5 个等级^[24],得到 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 7 期山江海耦合关键带 ESV 空间分布格局(图 2)。

表 4 1990—2020 年山江海耦合关键带单项生态系统服务价值及变化

Table 4 Value and changes of individual ecosystem services in the key coupling zone of mountain-river-sea from 1990 to 2020								
一级类型	二级类型	ESV/亿元						
服务功能	服务功能	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
供给服务	食物生产	25.00	25.02	24.92	25.76	24.79	24.37	24.48
	原料生产	23.91	23.91	23.87	23.51	23.83	23.92	23.82
	水资源供给	-5.47	-5.39	-5.07	-6.41	-4.33	-3.77	-4.46
调节服务	气体调节	79.94	79.85	79.78	78.69	79.67	79.92	79.60
	气候调节	206.99	206.70	206.65	201.19	206.56	208.29	206.97
	净化环境	62.50	62.48	62.56	61.11	62.86	63.24	62.56
	水文调节	184.03	185.35	187.32	187.71	193.13	192.29	187.39
支持服务	土壤保持	89.24	89.13	89.10	87.22	89.05	89.61	89.11
	维持养分循环	8.47	8.47	8.45	8.42	8.43	8.42	8.41
	生物多样性	78.83	78.82	78.95	77.11	79.33	79.89	79.12
文化服务	美学景观	35.10	35.12	35.22	34.46	35.49	35.71	35.30

结果表明 1990—2020 年研究区 ESV 空间分布与土地利用类型空间分布格局基本吻合,城镇等建设用地密集地区 ESV 较低,林地、耕地、水域等用地 ESV 较高。1990—2020 年,山江海耦合关键带 ESV 空间变化总体上变化不明显,基本稳定,从空间上看,ESV 呈现从西北向东南降低的趋势,较高级和高级 ESV 分布范围较广,主要分布在桂西南喀斯特山区和东南方向的十万大山、六万大山等地区,如百色市、崇左市的山区和防城港市,南宁市隆安县,钦州市钦北区、浦北县,北海市合浦县,玉林市容县等森林覆盖率高的地区,由于这些地区林地面积广,植被覆盖率高,区域内物种丰富,也是众多江河湖泊的发源地,生

态环境优越,具有较高的 ESV;中级 ESV 主要分布在高级和较高级 ESV 周边丘陵盆地、河流洼地等地区,这些地区地势平坦,土壤质地比较好,适宜种植农作物和发展渔业,主要以耕地、水域为主,林地较少;低级和较低级 ESV 分布较集中,主要分布在人口密集、人类活动频繁的市县级地区及沿海地区,如南宁市宾阳县、横州市,崇左市江州区、扶绥县,钦州市钦南、钦北区和灵山县,北海市合浦县、玉林市等中心城区,低级和较低级 ESV 地区的分布与山江海耦合关键带城镇化的发展方向一致,由城镇中心逐渐向四周扩散,这些地区主要以建设用地为主,土地利用开发强度较高,生态环境较差,ESV 相对较低。

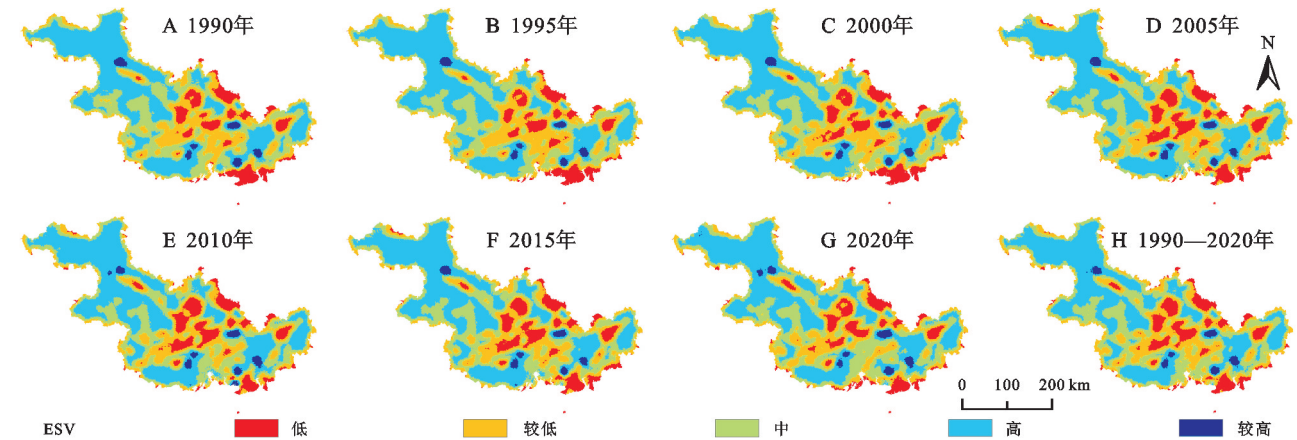


图 2 1990—2020 年山江海耦合关键带生态系统服务价值空间变化

Fig. 2 Spatial changes in the value of ecosystem services in the key coupling zone of mountain-river-sea from 1990 to 2020

3.3 生态系统服务价值敏感性分析

根据公式(2),通过上下调整 50%各土地利用类型 ESV 系数,计算出山江海耦合关键带 ESV 敏感性系数(表 5)。结果显示不同年份不同土地利用类型的 ESV 敏感性系数均小于 1,表明计算的 ESV 符合

研究区。研究区内 ESV 敏感性系数从大到小依次为林地、耕地、水域、草地和未利用地、建设用地,该结论与陈相标等计算石林喀斯特岩溶区 ESV 敏感性指数结论一致^[29]。因此,本文采用修订的当量因子表计算结果符合研究区的实际情况,研究结果可信度高。

表 5 1990—2020 年山江海耦合关键带生态系统服务价值敏感性分析

Table 5 Sensitivity analysis of ecosystem service value in the key coupling zone of mountain-river-sea from 1990 to 2020

土地利用类型	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地 VC±50%	0.072	0.072	0.071	0.077	0.070	0.067	0.069
林地 VC±50%	0.868	0.866	0.863	0.851	0.855	0.860	0.865
草地 VC±50%	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
水域 VC±50%	0.058	0.061	0.064	0.071	0.075	0.072	0.065
未利用地 VC±50%	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
建设用地 VC±50%	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

3.4 生态系统服务权衡协同关系分析

3.4.1 生态系统服务权衡协同关系时间变化 运用 R.4.2 软件中“corrplot”包对研究区 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年生态系统服务进行相关性分析,分析不同生态系统服务间的相互关系及时间变化特征(图 3)。结果表明区内 1990—2020 年各项生态系统服务之间共形成 55 组相关关系,其中权衡关系约占 14.55%,协同关系占 85.45%,体现了研究区 31 年来各项生态系统服务之间主要为协同关系。各项生态系统服务权衡关系主要体现在食物生产—原料生产、食物生产—水资源供给、食物生产—气体调节、食物生产—气候调节、食物生产—净化环境、食物生产—土壤保持、食物生产—生物多样性、食物生产—美学景观之间,其余均为协同关系。1990 年、2010 年和 2020 年 3 个时期中,不同生态系统服务之间权衡/协同关系不发生转换,仅作用程度发生变化,最强权衡关系均体现在食物生产—水资源供给服务之间,最大协同度均体现在原料生产—气体调节、净化环境—生物多样性、净化环境—美学景观之间。2000 年各项生态系统服务之间相互程度和方向均发生改变,权衡关系增至 9 组,食物生产—气候调节服务由协同关系转变为权衡关系,权衡极值减小,最强权衡关系发生改变,体现在食物生产—生物多样性服务之间,最大协同度比其他时期增加了气候调节—美学景观服务,说明山江海耦合关键带食物生产功能 ESV 较低,易受人类活动干扰,对其他生态系统服务的影响主要是以权衡关系为主,使生态系统调节能力降低,因此,地方进行食物生产活动时要注重对其他生态系统服务功能进行保护和修复,注重生态文明建设。

3.4.2 生态系统服务权衡协同关系空间分异特征 运用 R.4.2 软件中“GWmodel”包对不同生态系统服务进行 GWR 分析,探讨不同生态系统服务相互关系的空间分异特征。结果表明 1990—2020 年研究区内有 10 组生态系统服务在空间上主要为权衡关系,其余 45 组为协同关系,由于协同关系空间分异较为一致,仅协同值高低分布有所差异,因此,本文仅对其中权衡/协同面积占比较大的结果展开讨论(图 4)。图 4 中权衡关系面积占比较大的生态系统服务为食物生产—原料生产、食物生产—水资源供给、食物生

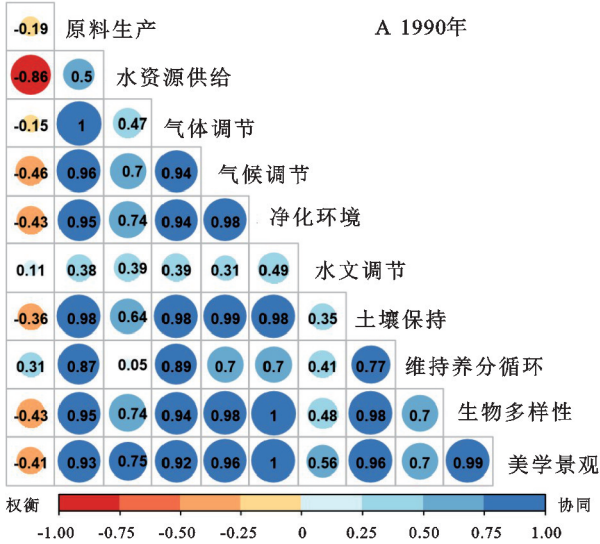
产—气体调节、食物生产—气候调节、食物生产—净化环境、食物生产—水文调节、食物生产—土壤保持、食物生产—维持养分循环、食物生产—生物多样性、食物生产—美学景观服务,面积占比分别为 70.58%, 93.60%, 73.05%, 73.73%, 74.13%, 64.90%, 74.55%, 63.17%, 76.22%, 74.72%, 其中权衡高值区主要分布在山江海耦合关键带中部及南部地区,低值区主要分布在百色市喀斯特山区,权衡值呈现从左江—右江—邕江—南流江等一带人类活动频繁及耕地、建设用地集中连片的区域向四周山林较多的区域降低的空间分布特征。协同关系中面积占比较大生态系统服务为净化环境—美学景观、土壤保持—生物多样性、土壤保持—美学景观、生物多样性—美学景观,面积占比分别为 73.81%, 70.67%, 80.42%, 77.80%, 协同低值区主要分布在人口密集、经济较发达的市县城区及沿海地区,如百色市右江区、靖西市,南宁市横州市、上思县,钦州市钦南区、浦北县,北海市海城区、铁山港区、合浦县等。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 量化和分析山江海耦合关键带生态系统服务价值及时空变化特征,不仅有助于认识区域整体的生态系统服务水平,利于区内生态环境保护与国土空间优化管控,而且有助于促进社会经济可持续发展,提升人类福祉。在本文研究中,近 31 年来,桂西南喀斯特—北部湾地区 ESV 整体呈上升的趋势,表明山江海耦合关键带生态环境趋于改善,此结果与其他学者评价广西地区的生态系统服务价值结论基本一致^[30],这主要得益于地方根据当地实情对喀斯特山区开展石漠化治理和注重滨海地区红树林生态环境保护、合理利用海洋资源,区内生态环境得到逐渐改善。该地区 ESV 主要贡献因子为林地、耕地、水域,此结果与珠江—西江广西段生态系统服务价值评价的结果相同^[31],由于林地、水域、耕地被侵占转为建设用地,总体上使关键带服务中原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节生态服务 ESV 大大减少,可见生产、生活用地与生态环境保护存在着一定的冲突。1990—2020 年来,该区域建设用地、林地、水域面积分别增加 1 074.35 km², 136.34 km²,

146.22 km², 对应 ESV 增加 0.02, 1.24, 5.99 亿元, 耕地面积减少 1 082.72 km², ESV 减少 1.97 亿元, 表明地方应该统筹规划“三区三线”, 坚守生态保护红线、永久基本农田红线和城镇开发边界, 继续加强喀斯特关键带石漠化综合治理与修复, 提高山地森林覆盖率, 减少食物生产



水土流失。山江海耦合关键带 ESV 从空间上呈现从西北向东南降低的变化趋势, 此研究结果与其他学者研究结果相似^[32], 说明在喀斯特、流域和海岸带关键带中, 流域、海岸关键带海拔较低, 地势平坦, 土地利用开发强度大, 生态服务易受人类活动干扰。

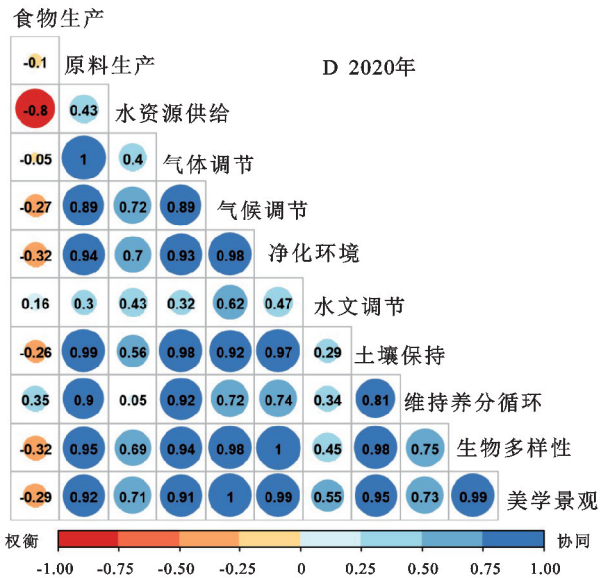
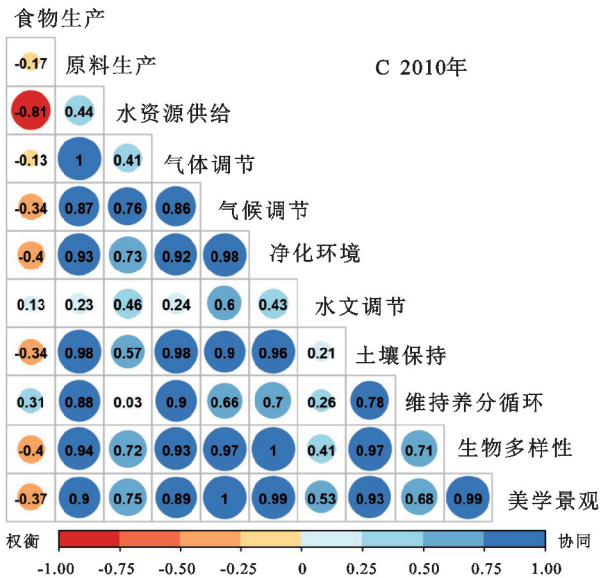
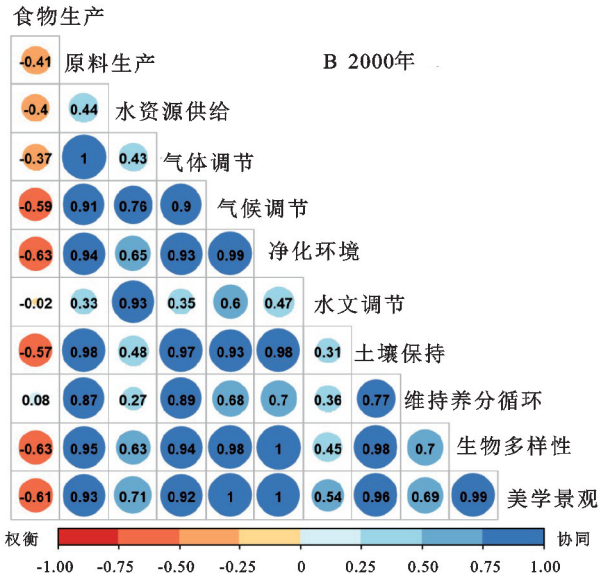


图 3 1990—2020 年山江海耦合关键带生态系统服务权衡/协同关系时间变化
Fig. 3 Time variation of ecosystem service trade-off/synergy relationship in the key coupling zone of mountain-river-sea from 1990 to 2020

(2) 1990—2020 年, 山江海耦合关键带各项生态服务的相互关系主要以协同关系为主, 且各项生态服务间相互关系基本稳定, 表明该地区各项生态服务整体上为协调状态且保持动态平衡。权衡高值区主要分布在山江海耦合关键带中部及南部地区, 这与人类活动强度有关, 尤其是近些年来, 广西在国家战略的支持下, 对北部湾地区施行大开发, 导致沿海地区土地利用强度大, 人口密集, 人类活动对生态环境的影响越来越大, 土地盐渍化、海岸线倒退、海水污染等生态环境问题突出; 低值区主要分布在百色市喀斯特

山区, 这主要由于地方近年来对喀斯特石漠化开展综合性治理, 实行退耕还林、封山育林措施, 使林地面积增加, 植被覆盖率增加, 从而增强生态系统对外界的干扰能力。此外, 区内食物生产功能 ESV 较高, 但与其他生态服务功能之间主要为权衡关系, 说明该地区进行食物生产活动时, 人类活动的频繁干扰会加剧地表水土流失、土地石漠化、化学污染等环境问题, 因此, 地方应严格把控生产活动开发边界, 注重对生产地区的环境保护与修复。本文通过将喀斯特关键带、流域关键带和海岸带关键带耦合作为一个连续的整

体,基于土地利用提供的生态服务价值来评估山江海耦合关键带的生态服务现状及确定各项生态服务间的相互关系,为合理充分利用各地区优势,打通山区、流域、海岸带发展系统边界提供理论依据,对实现区域全面、协调、可持续发展具有重要意义。但本文对于该区域多种生态系统服务相互影响的驱动机制仍无法进一步探究,后续研究还需要通过其他方法和技

术深入研究。此外,当前生态系统服务评价逐渐随着3S技术发展向模型法靠近^[33],在后续研究中,应关注山江海耦合关键带地表、地下、大气要素整体的生态服务功能,创建一个更加系统全面的生态系统服务评价指标体系和模型,准确评估山江海耦合关键带的生态服务现状,量化生态产品,为决策者做出更具有针对性的保护措施和科学决策提供参考。

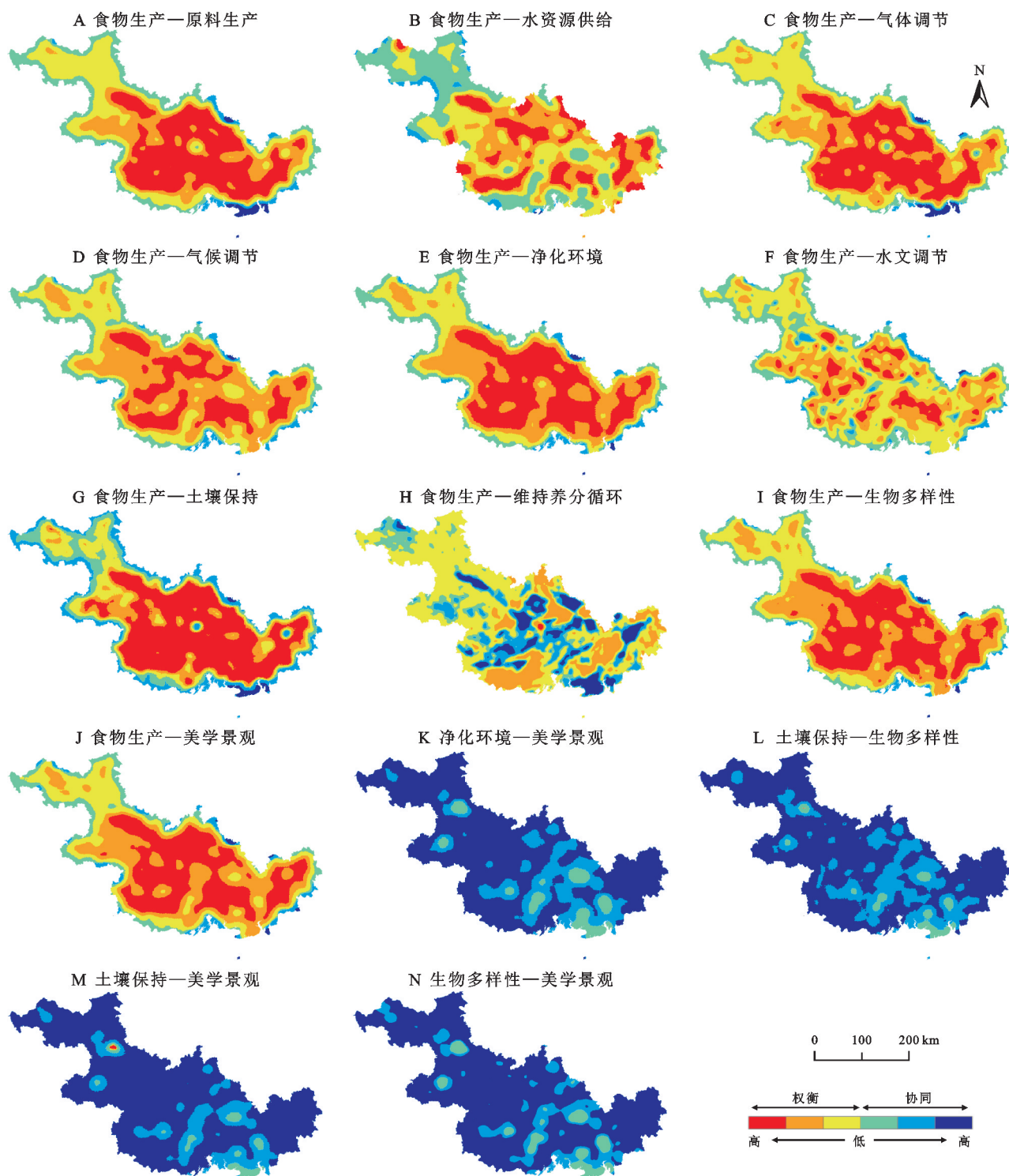


图4 1990—2020年山江海耦合关键带生态系统服务权衡/协同关系空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecosystem service trade offs/synergistic relationships in the key coupling zone of mountain-river-sea from 1990 to 2020

4.2 结论

(1) 1990—2020 年山江海耦合关键带地区总 ESV 从 788.55 亿元增加到 792.30 亿元,增幅 0.48%,总 ESV 为增加后减小再增加再减小的变化趋势,其中林地、耕地、水域为总 ESV 主要贡献因子,总 ESV 变化与林地面积变化有关。各单项服务 ESV 变化整体上与总 ESV 变化趋势一致,其中调节服务 ESV 贡献率最大,均占总 ESV 67% 以上,其次是支持服务,占 22% 以上。2005 年供给服务和调节服务 ESV 变化主要与耕地、林地面积变化有关。

(2) 1990—2020 年山江海耦合关键带地区建设用地 ESV 较低,林地、耕地、水域等地类 ESV 较高。ESV 在空间上呈现从西北向东南降低的趋势,其中较高级和高级 ESV 主要分布在桂西南喀斯特关键带的山区和东南方向的十万大山、六万大山等地区,中级 ESV 主要分布在地势低平的丘陵盆地、河流洼地等流域地区,低级和较低级 ESV 主要分布在人口密集、人类活动频繁、经济较为发达的市县级地区以及海岸带地区。

(3) 1990—2020 年山江海耦合关键带地区各项生态系统服务相互关系以协同关系为主,约占 85.45%,除 2000 年食物生产与气候调节服务相互关系由协同关系转变为权衡关系外,其他时期各项生态系统服务相互保持着动态平衡,不发生转换,仅作用程度发生变化;权衡关系的高值区主要分布在山江海耦合关键带中部及南部地区,低值区主要分布在百色市喀斯特山区,权衡值呈现从左江—右江—邕江—南流江等一带向四周降低的空间分布特征;协同关系的低值区主要分布在人口密集、人类活动频繁、经济较为发达的市县级城区及沿海地区。

参考文献(References):

- [1] 张波,曲建升,丁永建.国际临界带研究发展回顾与美国临界带研究进展介绍[J].世界科技研究与发展,2010,32(5):723-728.
Zhang B, Qu J S, Ding Y J. Review of international critical zone research and its development in America [J]. World Sci-Tech R&D, 2010, 32(5): 723-728.
- [2] 王立伟,张志强,安培浚,等.基于文献计量的地球关键带研究态势分析[J].世界科技研究与发展,2017,39(2):202-208.
Wang L W, Zhang Z Q, An P J, et al. Bibliometrical Analysis of Earth Critical Zone Research[J]. World Sci-Tech R & D, 2017, 39(2): 202-208.
- [3] 安培浚,张志强,王立伟.地球关键带的研究进展[J].地球科学进展,2016,31(12):1228-1234.
An P J, Zhang Z Q, Wang L W. Review of Earth Critical Zone Research[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(12): 1228-1234.
- [4] Nie W, Guo H, Yang L, et al. Economic valuation of earth's critical zone: A pilot study of the Zhangxi Catchment, China[J]. Sustainability, 2020, 12(4): 1699. DOI:10.3390/su12041699.
- [5] 张丽,夏炎,陈琪,等.基于地球关键带科学的土壤生态系统服务评价方法研究[J].南京大学学报:自然科学,2021,57(3):345-355.
Zhang L, Xia Y, Chen Q, et al. Research on soil ecosystem service assessment method based on Earth's Critical Zone science[J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 2021, 57(3): 345-355.
- [6] 陈琪,王晓丹,夏炎,等.地球关键带生态系统服务评价方法研究[J].南京大学学报:自然科学,2022,58(6):1070-1086.
Chen Q, Wang X D, Xia Y, et al. Research on the evaluation method of the ecosystem services of Earth's critical zone[J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 2022, 58(6): 1070-1086.
- [7] 陈金珂,蒲俊兵,李建鸿,等.基于土地利用情景模拟的喀斯特关键带生态系统服务权衡与协同分析:以蒙自喀斯特断陷盆地为例[J].中国岩溶,2023,42(1):94-108.
Chen J K, Pu J B, Ling J H, et al. Trade-off and synergy of ecosystem services of a karst critical zone based on landuse scenario simulation: Take Mengzi karst graben basin as a study case[J]. Karst of China, 2023, 42(1): 94-108.
- [8] Nie W, Guo H, Banwart S A. Economic valuation of earth's critical zone: framework, theory and methods [J]. Environmental Development, 2021, 40: 100654.
- [9] Alcamo J. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment [M]. Washington D C: Island Press, 2003.
- [10] 杨顺华,宋效东,吴华勇,等.地球关键带研究评述:现状与展望[J].土壤学报:1-14.
Yang S H, Song X D, Wu H Y, et al. A Review and Discussion on the Earth's Critical Zone Research: Status Quo and Prospect[J]. Journal of Soil Science, 1-14.
- [11] 李晓亮,吴克宁,冯喆,等.陆地表层系统分类研究进展:从土地类型到地球关键带类型[J].地理科学进展,2022,41(3):531-542.
Li X L, Wu K N, Feng Z, et al. Research progress of land surface system classification: From land type to Earth's critical zone type[J]. Progress in Geographic Science, 2022, 41(3): 531-542.
- [12] 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.
- [13] Sterling S M, Ducharne A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 385-390.
- [14] 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.
- [15] 涂小松, 龙花楼. 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.
- Tu X S, Long H L. Spatial patterns and dynamic evolution of ecosystem service values in Poyang Lake Region from 2000 to 2010[J]. *Resource Science*, 2015, 37(12): 2451-2460.
- [16] 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.
- Xie G d, Zhen L, Lu C X, et al. Expert Knowledge Based Valuation Method of Ecosystem Services in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.
- [17] 陈田田, 黄强, 王强. 基于地理探测器的喀斯特山区生态系统服务关系分异特征及驱动力解析: 以贵州省为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 6959-6972.
- Chen T T, Huang Q, Wang Q. Differentiation characteristics and driving factors of ecosystem services relationships in karst mountainous area based on geographic detector modeling: A case study of Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17): 6959-6972.
- [18] 邓伟, 张少尧, 张昊, 等. 人文自然耦合视角下过渡性地理空间概念、内涵与属性和研究框架[J]. *地理研究*, 2020, 39(4): 761-771.
- Deng W, Zhang S Y, Zhang H, et al. Transitional geospace from the perspective of human-nature coupling: Concept, connotations, attributes, and the research framework[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(4): 761-771.
- [19] 张泽, 胡宝清, 丘海红, 等. 基于山江海视角与 SRP 模型的桂西南—北部湾生态环境脆弱性评价[J]. *地球与环境*, 2021, 49(3): 297-306.
- Zhang Z, Hu B Q, Qiu H H, et al. Ecological Environment Vulnerability Assessment of Southwest Guangxi-Beibu Gulf Based on the Perspective of mountain-river-sea and SRP Model[J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(3): 297-306.
- [20] 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.
- [21] 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.
- Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the Evaluation Method for Ecosystem Service Value Based on Per Unit Area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1234-1254.
- [22] 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.
- Liu G L, Zhang L C, Zhang Q. Spatial and temporal dynamics of landuse and its influence on ecosystem service value in Yangtze River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3311-3319.
- [23] 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.
- Wang H, Qin F, Zhu J, et al. The effects of landuse structure and landscape pattern change on ecosystem service values[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(4): 1286-1296.
- [24] 邓元杰, 侯孟阳, 谢怡凡, 等. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6597-6612.
- Deng Y J, Hou M Y, Xie Y F, et al. Impact of the Grain for Green Project on the temporal and spatial evolution of ecosystem service value in northern Shaanxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 40(18): 6597-6612.
- [25] 高振斌, 王小莉, 苏婧, 等. 基于生态系统服务价值评估的东江流域生态补偿研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(6): 563-570.
- Gao Z B, Wang X L, Su J, et al. Ecological Compensation of Dongjiang River Basin Based on Evaluation of Ecosystem Service Value[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(6): 563-570.
- [26] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 等. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡—协同关系[J]. *地理研究*, 2020, 39(1): 64-78.
- Zhen D F, Hao S, Lv L T, et al. Spatial-temporal change and trade-off/synergy relationships among multiple ecosystem services in Three-River-Source National Park[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(1): 64-78.
- [27] 刘祗坤, 吴全, 苏根成. 土地利用类型变化与生态系统服务价值分析: 以赤峰市农牧交错带为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2015, 36(3): 56-61.
- Liu D S, Wu Q, Su G C. Study on the landuse changes and ecosystem services value of ecotone between agriculture and animal husbandry in chifeng city[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2015, 36(3): 56-61.

- (1):230-237.
- [25] 王渊,赵宇豪,吴健生.基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测:以粤港澳大湾区为例[J].生态学报,2020,40(23):8461-8473.
Wang Y, Zhao Y H, Wu J S. Dynamic monitoring of long time series of ecological quality in urban agglomerations using Google Earth Engine cloud computing: A case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8461-8473.
- [26] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].生态学报,2013,33(24):7853-7862.
Xu H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [27] 杨悦,赵雨,员学锋,等.乡村振兴背景下陕西省生态环境质量影响因素探究[J].生态与农村环境学报,2023,39(1):1-15.
Yang Y, Zhao Y, Yuan X F, et al. Study on the factors influencing ecological environment quality in Shaanxi Province in the context of rural revitalization[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(1): 1-15.
- [28] Morzillo A T, de Beurs K M, Martin-Mikle C J. A conceptual framework to evaluate human-wildlife interactions within coupled human and natural systems, *Ecology and Society*, 2014, 19(3): 732-740.
- [29] 薛选登,高佳琳.粮食主产区耕地生态足迹与粮食安全空间相关性分析[J].生态经济,2021,37(8):93-99.
Xue X D, Gao J L. Analysis of spatial correlation between ecological footprint of cultivated land and food security in main grain production areas[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(8): 93-99.
- [30] 刘愿理,廖和平,张茜茜,等.西南喀斯特区贫困空间剥夺的识别及空间格局分析[J].农业工程学报,2019,35(15):284-294.
Liu Y L, Liao H P, Zhang X X, et al. Identification and spatial pattern analysis of poverty space deprivation in southwest karst area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(15): 284-294.
- ~~~~~
- (上接第 274 页)
- [28] Dou H, Li X, Li S, et al. Mapping ecosystem services bundles for analyzing spatial trade-offs in inner Mongolia, China-ScienceDirect[J]. *Journal of Cleaner Production*, 256 [2023-07-17]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120444.
- [29] 陈相标,丁文荣.石林喀斯特岩溶区生态系统服务时空演变及权衡协同关系[J].水土保持研究,2023,30(2):285-293.
Chen X B, Ding W R. Spatial-temporal Evolution and Trade-off Synergy Relationships of Ecosystem Services in Karst Area of Shilin[J]. *Research on Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2): 285-293.
- [30] 丘海红,胡宝清,张泽.基于土地利用变化的广西近 20 年生态系统服务价值研究[J].环境工程技术学报,2022,12(5):1455-1465.
Qiu H H, Hu B Q, Zhang Z. Study on ecosystem service value of Guangxi in the past 20 years based on landuse change[J]. *Journal of Environmental engineering Technology*, 2022, 12(5): 1455-1465.
- [31] 王永琪,马姜明.基于县域尺度珠江—西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[J].生态学报,2020,40(21):7826-7839.
Wang Y Q, Ma J M. Effects of land use change on ecosystem services value in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt at the county scale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7826-7839.
- [32] Zhang L L, Hu B Q, Zhang Z, et al. Research on the spatiotemporal evolution and mechanism of ecosystem service value in the mountain-river-sea transition zone based on "production-living-ecological space": Taking the Karst-Beibu Gulf in Southwest Guangxi, China as an example [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 109889.
- [33] 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.
Yuan Z Y Y, Wang R R. A review on the methods of ecosystem service assessment[J]. *Ecological Science*, 2019, 38(5): 210-219.