

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.053.

罗金玲, 谢余初, 刘秋华, 等. 流域生态系统服务权衡/协同关系时空格局及热点区识别[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 397-407.

LUO Jinling, XIE Yuchu, LIU Qiuhua, et al. Spatiotemporal Patterns and Hot-Spots of the Trade-off and Synergy Relationship Among Ecosystem Services in Nanlijiang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 397-407.

流域生态系统服务权衡/协同关系 时空格局及热点区识别 ——以南流江流域为例

罗金玲^{1,2}, 谢余初^{1,2,3}, 刘秋华^{1,2}, 童凯^{1,2}, 胡宝清^{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, 南宁 530001;

2. 南宁师范大学 地理科学与规划学院 广西地表过程与智能模拟重点实验室,

南宁 530001; 3. 中国科学院 环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘要: [目的]在经济快速发展与生态环境保护双重压力背景下,分析和揭示南流江流域生态系统服务权衡与协同关系及其热点区,对广西北部湾入海河流的可持续发展具有重要意义。[方法]基于遥感影像、DEM、气象、土壤、野外观测和调研结果等多源数据,综合 InVEST 模型、GIS、R 语言和 GeoDa 软件等,定量测算和分析了 2000—2020 年南流江流域食物供给、固碳、生物多样性维持和土壤保持服务 4 种主要生态系统服务的时空分异特征及权衡/协同关系,辨识流域生态系统服务热点区。[结果]近 20 年间南流江流域食物供给服务不断下降,固碳服务、生物多样性维持和土壤保持服务总体呈增长趋势。2000—2020 年流域食物供给服务与固碳服务、生物多样性维持和土壤保持服务均表现权衡关系,权衡关系不断增强,权衡集中区域主要分布在玉林市城乡结合部、以浦北县城为核心的小江流域中游地区。而固碳服务、生物多样性维持与土壤保持服务则表现出协同关系,且协同相对集中区域主要是南流江中游自然资源禀赋较好的乡镇,但协同关系呈现逐渐减弱的趋势。南流江流域生态系统服务热点区以固碳服务、生物多样性维持和土壤保持服务为主,主要分布在六万大山、勾头嶂山、云开大山、大容山等山林地和自然保护区。食物供给服务主导热点区分布在玉州平原、博白盆地和下游三角洲地区,固碳服务主导区域在大容山农林交错带,生物多样性维持服务主导热点区集中在自然保护区、山林岗地和丘陵地区。[结论]南流江流域生态系统服务变化总体呈上升趋势,各项生态系统服务权衡协同关系存在明显时空异质性,未来应在空间上促进生态系统服务协同发展,优化和保障流域生态空间。

关键词: 生态系统服务; 时空变化; 权衡; 热点区; 南流江流域

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0397-11

Spatiotemporal Patterns and Hot-Spots of the Trade-off and Synergy Relationship Among Ecosystem Services in Nanlijiang River Basin

LUO Jinling^{1,2}, XIE Yuchu^{1,2,3}, LIU Qiuhua^{1,2}, TONG Kai^{1,2}, HU Baoqing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 2. Key Laboratory of Earth Surface Process and Intelligent Simulation, School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 3. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, CAS, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

Abstract: [Objective] Nanlijiang River Basin (NRB) is a typical watershed of land-sea transition zone in Beibu Gulf Economic Zone of Guangxi, and the rapid economic development brought great pressure to the eco-

收稿日期: 2022-07-12

修回日期: 2022-08-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(41761039, 42071135); 广西科技基地与人才专项(桂 AD19110142, 桂 AD20238046)

第一作者: 罗金玲(1997—), 女, 广西大化人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务与 GIS 应用。E-mail: nnjl160@163.com

通信作者: 谢余初(1983—), 男, 广西南宁人, 博士, 副研究员, 主要从事遥感 GIS 应用与生态评价。E-mail: xiehxc2004@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

logical environment. Trade-off and synergy of ecosystem services and their interrelated changes, hot spots in the NRB had great significance for the sustainable development in this economic area were quantitatively analyzed. [Methods] Based on multi-source data of remote sensing images, DEM, meteorology, soil, field observation and investigation, the InVEST model, GIS, R and GeoDa software were comprehensively used to calculate the four key ecosystem services of food supply (FS), carbon storage (CS), biodiversity maintenance (BM) and soil conservation (SC) from 2000 to 2020, and to analyze the spatialtemporal characteristics and their inter-related changes of trade-off and synergy between ecosystem services. The spatial heterogeneity and hot spots of ecosystem services at the town scale were explored. [Results] Food supply decreased, CS, BM and SC increased in general. The FS with the CS, BM and SC were trade-offs relationships, and their trade-offs relationships were increasing during the period of 2000—2020, while the relationship between adjustment services (CS and SC) and support service (BM) was synergistic, and showed the trend of weakening gradually. The areas with high trad-off intensity between the FS-BM and FS-CS mainly concentrated in the urban-rural fringe area of Yulin City, farming area and river valley of Xiaojiang in Pubei county. The high intensity of synergistic among CS, BM and SC concentrated in forest areas of the middle reaches in the NRB with high vegetation coverage. Moreover, the hot spots of ecosystem services mainly distributed in mountain forest areas and nature reserves, while the high-value clusters of food supply services were mainly located in the Yuzhou Plain, Bobai Basin and the lower reaches of the Delta with frequent human activities. The hot-spot areas of primary biodiversity maintenance service services were mainly located in nature reserves, forests area in the mountain and hills, while the hot-spot areas distribution of SC concentrated in the ecotones of agriculture and forestry in the low Darong mountain. [Conclusion] The overall change of ecosystem service in the NRB was on an upward trend, and the trade-off and synergistic relationship between different ecosystem services had obvious spatial heterogeneity. In the future, synergistic development of ES should be promoted spatially for optimizing and ensuring the ecological space.

Keywords: ecosystem service; temporal and spatial variation; trade offs; hot-spots; Nanlijiang River Basin

生态系统服务是生态系统能够提供的维持和满足人们生活生产需求的各种环境效用和惠益^[1],是人类赖以生存发展的关键资源环境要素^[2]和连接生态系统与社会经济系统的桥梁^[3]。生态系统服务种类繁多,且人们对生态系统服务需求存在偏好性^[4-5],使得各项生态系统服务之间常表现出此消彼长的权衡现象(即生态系统服务权衡)或者相互同增或同减的协同关系(即生态系统服务协同)^[6-7]。由于对生态系统服务重要性缺乏认识,生态系统长期超载与破坏^[8],致使全世界 60% 以上的生态系统服务正处于退化或不可持续利用状态^[9-10]。生态系统服务的退化和丧失直接影响着人类健康与社会安全,甚至全球生态安全与人类可持续发展^[11-12]。同时,生态系统服务之间关系复杂多变,彼此之间相互作用关系可能是单向的或双向的、积极的或消极的^[13]。因此,面向人类可持续发展进程,厘清生态系统服务之间的动态权衡关系及其热点区,对维护区域生态系统安全格局,引导人们合理利用自然资源、制定区域社会经济发展与生态环境保护“双赢”政策具有重要意义^[14-15]。

近年来,生态系统服务之间权衡协同关系及其综合管理已成为生态系统服务研究的重要议题和热点^[16-17]。从研究内容上看,国内外学者主要集中在生态系统服务权衡协同的概念、内涵、空间格局、演变特征和尺度效应^[18-19];研究方法上主要有定量统计描述、空间分析和情景模拟法等^[20]。例如,Zheng 等以中国三江源区为研究对象,利用生态系统服务价值模型、相关系数和双变量空间自相关等方法分析了 1990—2015 年三江源地区生态系统服务在县域尺度和格网尺度上的权衡/协同效应^[21]。Chen 等以乡镇为研究单元,分析和揭示北京湾区 9 种典型生态系统的空间异质性及其权衡、协同的梯度效应^[22]。Peng 等在利用 CLUE-S 模型模拟中国大理市土地利用变化基础上,分析退耕还林政策下 4 种不同情景生态系统服务的空间格局及其相互关系^[23]。赵文祯等通过多情景下的生态系统服务权衡和 OWA 模型,模拟和识别生态系统服务优先保护区,构建了大连市瓦房店生态安全格局^[24]。这些研究在不同尺度上探究生态系统服务及其权衡协同关系,并取得了一系列的成果,尤其是在长江流域、黄河

流域等知名江河流域和黄土高原等典型生态脆弱区。但由于不同区域地理环境差异性以及生态系统服务机制的复杂性,生态系统服务关系形成机制、权衡与协同时空差异性及空间表达等方面研究相对较少,亟需从全流域上中下游视角开展流域多重生态系统服务权衡研究及中小尺度的实践应用案例。

流域是一个以水系为纽带联接上、中、下游系统的各种自然要素和人文活动的综合地理单元。区域生态环境问题和社会经济发展之间的矛盾常常与流域的资源不合理利用和非理性人类活动密切相关。在社会经济快速发展背景下,从流域视角去探讨生态系统服务时空变化及其权衡协同动态关系,将有助于提高流域生态系统管理效率^[25],为流域综合管理的有效决策和可持续发展提供科学支撑。南流江流域是广西最大的独支入海河流,更是北部湾经济区生态保护安全格局关键组成部分,地理位置战略突出。近年来,随着北部湾经济区的发展,流域内产生了一系列生态问题以及上中下游之间的矛盾逐渐凸显,如水土流失、环境污染和生物多样性减少等,这些生态问题的本质是生态系统服务的缺失及各服务之间相互不协调^[26-27]。因此,利用遥感 GIS 技术、InVEST 模型、地统计分析和 R 语言等多种手段,量化分析流域生态系统服务时空格局、权衡协同关系及其空间异质性,探讨流域生态系统服务热点区及其管控措施,旨在为流域生态环境管理与可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

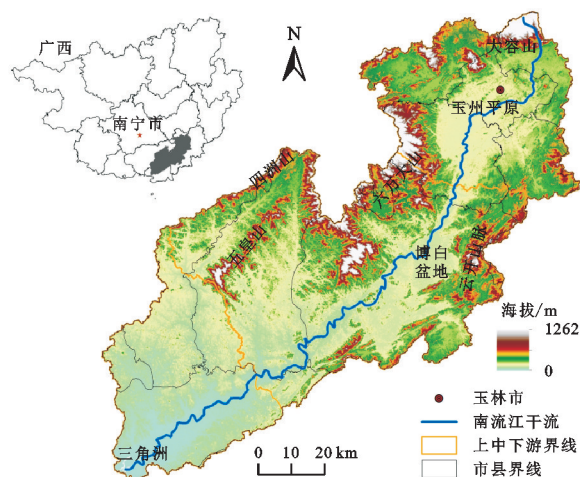
南流江流域地处广西北部湾经济区,位于北纬 21°21′—23°04′和东经 105°47′—107°41′(图 1),是广西桂东南地区的粮仓和林权改革的示范区。河流发源于大容山自然保护区,干流约 287 km,流域总面积达 9 331.26 km²,主要流经玉州区、福绵区、北流市、博白县、浦北县、合浦县等 11 个县区。南流江流域自东北向西南倾斜,六万大山和云开山脉呈弧形环绕于流域东西两侧;流域内盆地、丘陵、山地、江河、湖库等多种自然地理景观交错分布,植被覆盖较好、天然林和人工林等森林资源丰富^[28]。南流江流域属于亚热带季风气候,热量充足,降水丰沛,多年平均气温 21.5~22.4℃,年均降雨量 1 400~1 760 mm。

2 研究方法与数据来源

2.1 数据来源

DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m。Landsat TM/OLI 遥感影像数据主要来源于美国地质调查局

(<https://www.usgs.gov/>),空间分辨率为 30 m。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)和玉林市、北海市土地利用变更调查数据。土壤数据来自寒区旱区科学数据中心的 1:100 万比例尺的中国土壤数据集(Harmonized World Soil Database v1.2)和广西土壤类型分布图,包括土壤质地、土壤厚度、土壤类型与有机物含量等信息。气象数据主要来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)和流域各县区气象站点。其他数据主要是各市县社会统计年鉴、野外实地调研等,如粮食、蔗糖、蔬菜瓜果、油类等农产品产量的统计、土壤水分含量、植被丰度和覆盖度调查等。



注:基于自然资源部标准底图服务站下载的审图号为 GS(2019)1816 的标准地图制作,底图无修改。下同。

图 1 南流江流域地理位置和高程图

2.2 生态系统服务估算

南流江流域是广西粮食生产的重要基地和北部湾经济生态安全格局重要组成部分,且近些年来生态环境问题突出,故选取食物供给服务、固碳服务、土壤保持服务和生物多样性维持服务作为南流江流域关键性生态系统服务功能。其中,食物供给服务主要以土地农产品产量作为评估指标,考虑到各类农产品的量纲不同,统一转化为食物热量(能量)来表征流域食物供给能力^[29]。即将各类农产品产量折算成食物热量,计算每一类土地利用类型上食物热量供给状况^[30]。固碳服务选取净生态系统生产力(NEP)来表征,NEP 能有效地反映植被生态系统生产有机物的能力,是评估区域碳循环和固碳能力的重要指标^[31-32]。生境质量的高低在一定程度上反映着区域生物多样性状况及其水平,因此采用 InVEST-Habitat Quality 模型,结合研究区威胁因子、生境敏感性因子等参数,计算获得南流江流域生物多样性维持服务^[33]。土壤保持服务主要基于土壤流失方程的原理,通过 InVEST 模型计算获得^[33]。各项生态系统服务具体计算方法见表 1。

表 1 各项生态系统服务计算公式和说明

生态系统服务	计算公式	公式说明
食物供给服务	$\sum_{i=1}^n (M_i \times EP_i \times A_i)$	NUTR 表示食物热量(kJ); M_i 为区域第 i 种食物的产量; EP_i 表示第 i 种食物可食部分的比例; A_i 为第 i 种食物 100 g 可食部分所含热量; $i=1, 2, \dots, n$ 为研究区食物种类
固碳服务	$NEP = NPP - RH$ $RH = 0.22 \times (e^{(0.013T)} + \ln(0.3145P + 1)) \times 30 \times 46.5\%$	NEP 为植被净生态系统生产力 [$\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]; NPP 为植被净初级生产力 [$\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$], 通过 CASA 模型计算获得; RH 为土壤异养呼吸; T 为月均气温 $^{\circ}\text{C}$; P 为月均降水量
生物多样性 维护服务	$Q_{xj} = H_j [1 - (\frac{D_{ij}^z}{D_{ij}^z + k^2})]$	Q_{xj} 为第 j 类生境类型中栅格 x 的生境质量, 数值范围为 $[0, 1]$, 越接近 1 表明区域生境质量越好, 生物多样性越高; H_j 为第 j 类生境的生境适宜度; D_{xj} 为第 j 类生境类型中栅格单元 x 的生境退化度; k 为半饱和系数, 模型默认值为 0.5; z 是归一化常量, 模型中默认值为 2.5
土壤保持服务	$A_x = R \times K \times LS \times (1 - C \cdot P)$	A_x 为实际土壤保持量 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为地形因子; C 为地表植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子

2.3 生态系统服务权衡与协同关系分析

参考前人研究结果,将各项生态系统服务归一化处理,采用 R 软件 chart.Correlation 函数计算分析南流江流域食物供给、固碳服务、土壤保持和生物多样性维持服务彼此之间的权衡协同相互关系,并绘制散点图矩阵^[2,34]。当两种生态系统服务相关系数为正,且通过 0.05(或 0.01)水平显著性检验时,表明这两种生态系统服务间存在协同关系(或显著性协同关系);反之系数为负且通过显著性检验则为权衡关系^[34]。其次,基于线性拟合的原理,构建生态系统服务权衡/协同模型(ESTD)来分析各项生态系统服务相互作用方向、程度^[19,35]。其计算公式见公式(1)。同时,以乡镇为单元,利用 GeoDA 软件进行生态系统服务双变量空间自相关分析,分析不同生态系统服务在空间上的权衡/协同关系^[36]。

$$ESTD_{ab} = \frac{ESC_{ai} - ESC_{aj}}{ESC_{bi} - ESC_{bj}} \quad (1)$$

式中: $ESTD_{ab}$ 为 a, b 两种生态系统服务权衡协同度; ESC_{ai}, ESC_{aj} 表示第 a 种生态系统服务分别在 i, j 时刻的变化量; ESC_{bi}, ESC_{bj} 表示 b 种生态系统服务分别在 i, j 时刻的变化量。当 $ESTD > 0$ 时, a, b 两种生态系统服务为协同关系,当 $ESTD < 0$ 时, a, b 两种生态系统服务为权衡关系。

2.4 生态系统服务热点区识别与可视化

将南流江流域食物供给服务、固碳服务、生物多样性维护和土壤保持服务等生态系统服务量大于其平均值的区域视为该项生态系统服务的热点区,然后利用 GIS 平台进行空间叠加,统计每个栅格单元上提供各项生态系统服务能力。根据栅格单元上各生态系统服务热点区出现的频次^[37-38],将流域栅格单元上能够提供 1 项或 2 项或 3 项以上(含 3 项)超过自身平均值的生态系统服务的区域,对应地划分为一、

二和三类服务热点区;栅格单元上的各项生态系统服务均低于平均值的区域视为非热点区。同时,对 4 种生态系统服务进行极差标准化,以乡镇为单元,每个乡镇标准化后最大值对应的生态系统服务作为该项服务的主导区,从而实现乡镇尺度的主导生态系统服务的可视化和热点区制图。计算公式如下:

$$ES_{std} = \frac{ES_i - ES_{min}}{ES_{max} - ES_{min}} \quad (2)$$

式中: ES_{std} 为生态系统服务标准化的值(介于 0~1); ES_i, ES_{max}, ES_{min} 分别为第 i 项生态系统服务栅格值、最大值和最小值。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务时空变化特征

由图 2 可知,2000—2020 年南流江流域生态系统食物供给总体呈现下降的趋势,其食物热量供给从 2000 年的 $4.42 \times 10^{18} \text{ kJ}$ 降至 2010 年的 $4.40 \times 10^{18} \text{ kJ}$,至 2020 年又降至 $4.35 \times 10^{18} \text{ kJ}$ 。固碳服务则表现为不断增长的态势,其总量和年均值分别从 2000 年的 $1.63 \times 10^7 \text{ gC}/\text{m}^2$, $686.34 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 增至 2020 年的 $1.67 \times 10^7 \text{ gC}/\text{m}^2$, $706.12 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,近 20 年里年均增速为 2.3%。2000—2020 年南流江流域生物多样性维持服务表现为先下降后上升,总体呈现上升增长的趋势,其年均增速率为 0.059%。其中 2000—2010 年生物多样性维持服务均值从 0.760 下降至 0.755,年均下降率为 0.9%;2010—2020 年生物多样性维持服务明显变好,至 2020 年其均值达 0.771。土壤保持服务与生物多样性维持服务相似,也表现为先减少后增加的趋势。2000—2010 年流域土壤保持量从 5.26 亿 t 减少至 5.18 亿 t,2010—2020 年流域土壤保持量增加显著,增加量约为 2.61 亿 t,年均增长速率达 2.09%。在空间分布上,流域食物供给服务总

体格局变化不大,其高值区主要分布在玉州平原、博白盆地和下游三角洲地带等农业种植密集区,低值区则主要集中在城镇区和水域,如玉林城区和博白县、合浦线、浦北线等城镇区以及小江水库、星岛湖等区域。流域生态系统固碳服务较高的区域($NEP \geq 700 \text{ gC/m}^2$)主要分布在大容山自然保护区、六万大山森林保

护区、五皇山、云开大山等等自然保护区和山林区域,而低值区($NEP < 550 \text{ gC/m}^2$)主要位于河流岸堤、水库区、滩涂和人类活动频繁的城乡区、农耕区。生物多样性维护服务和土壤保持服务的空间分布格局与固碳服务的相似,均表现出山林地和自然保护区等区域较高,平原缓丘地带相对较低的特点。

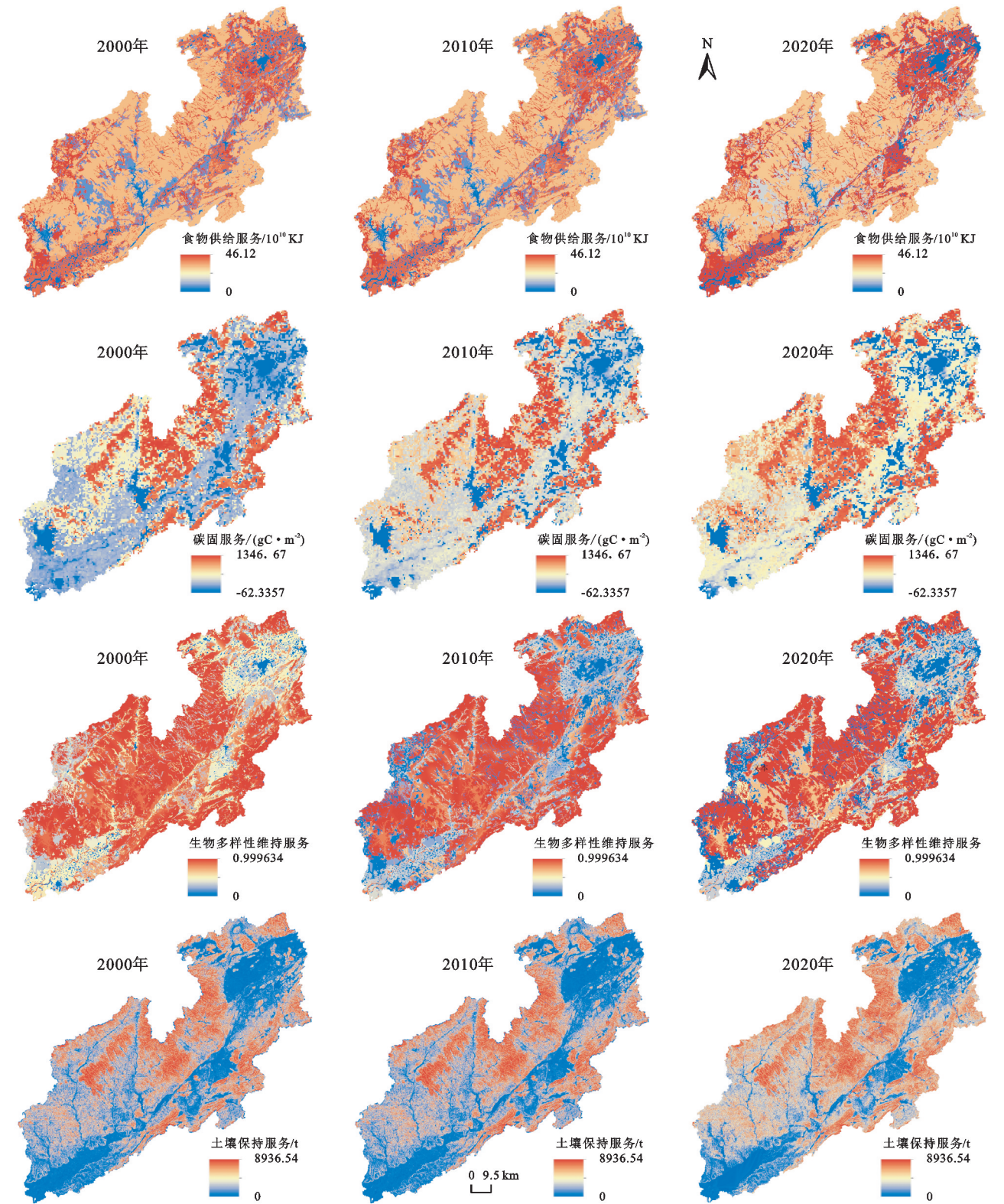


图 2 2000—2020 年南流江流域生态系统服务空间分布

3.2 生态系统服务权衡协同关系分析

(1) 生态系统服务权衡与协同关系的数值分析。图3生态系统服务散点图矩阵中,对角线为4种服务的直方图和核密度曲线,直方图能反映横轴数据(生态系统服务数值)的分布特征,核密度曲线反映横轴数据分布集中程度;对角线以上部分是服务间的相关系数及显著性结果,对角线以下部分是两两服务间的散点图及平滑拟合曲线^[2]。由图3可知,南流江流域食物供给服务、固碳服务、生物多样性维护和土壤保持服务彼此之间均通过 $p=0.01$ 显著性水平,表明各项生态系统服务两两之间存在显著性相关关系。食物供给服务与固碳服务、生物多样性维持和土壤保持服务之间均为显著性权衡关系,其中与生物多样性维持服务的相关系数性最高,且其相关系数绝对值呈现不断增强的趋势,相关系数最强达到 -0.47 。固碳服务与生物多样性维持、土壤保持服务均呈现协同关系,呈现逐年减弱的趋势,其相关系数分别从2000年的 $0.47, 0.52$ 下降至2020年的 $0.39, 0.44$ 。生物多样性维持与土壤保持服务也呈现协同关系且逐年下降,但下降的强度相对较低,2000—2020年其协同相关性系数年均减少速率仅为 0.02% 。从生态系统服务类型上看,供给服务(食物供给)与支持服务(生物多样性维持)、调节服务(固碳服务和土壤保持服务)均呈现权衡关系,且供给服务与支持服务权衡关系明显高于供给服务与调节服务的权衡关系。调节服务彼此之间(固碳服务和土壤保持服务)、调节服务与支持服务(生物多样性维持)之间是协同关系,且相关性较高,其相关系数均在 0.39 以上。

(2) 生态系统服务权衡与协同关系的空间差异性表达。由图4和图5可知,食物供给服务与固碳服务空间均衡分布格局相对比较零散,其权衡区域面积为 $2\,383.63\text{ km}^2$ (占比 25.53%),主要分布在流域上游的玉州平原、下游三角洲和中游六万大山、泗州山的农林过渡带;而协同关系的面积相对分散(占比 23.26%),其他区域空间均衡/协同显著性不明显。食物供给服务与生物多样性维护服务、土壤保持服务的空间均衡或协同分布格局相似,权衡集中区域主要体现在玉林市城郊结合部、以浦北县城为核心的小江流域中上游地区等。固碳服务、生物多样性维持和土壤保持服务彼此之间以空间协同关系为主。其中,固碳服务与生物多样性维持服务空间协同面积为 $5\,185.62\text{ km}^2$,占全流域面积的 55.54% ,整体上分布相对集中,协同相对聚集区域主要是南流江中游自然

资源禀赋较好的乡镇,如平睦镇、永安镇、那林镇、江宁镇和上游大容山林区;权衡区的面积仅为 $3\,643.14\text{ km}^2$ (39.02%),主要分布在玉州盆地、五皇山、勾头嶂山、六万大山和中游博白段沿岸。固碳服务与土壤保持服务、生物多样性维持服务与土壤保持服务的空间均衡与协同分布格局相似,其权衡区域面积占比分别为 44.56% 和 35.52% ;协同区域面积占比则分别为 54.35% 和 61.15% ;其余区域均衡/协同关系不显著。

3.3 南流江流域生态系统服务热点区识别

2000—2020年南流江流域多重生态系统服务热点区的分布格局变化不大(图6)。其中,生态系统服务非热点区提供的服务能力相对较弱,但其面积规模呈不断增加的趋势,由2000年 441.36 km^2 增至2020年的 638.15 km^2 ,20年间平均增长率为 $1.86\%/a$ 。南流江流域多重生态系统服务一类热点区面积最大(占比超过 44.98% 以上),主要以食物供给服务为主(面积比重约占一类热点区的 54.14%),其次是生物多样性维持服务(面积占比为 24.31%)。2000—2020年,一类热点区呈现不断下降减少态势,其面积由2000年 $4\,476.99\text{ km}^2$ 减少至2020年 $4\,178.80\text{ km}^2$ 。南流江流域生态系统服务二类热点区主要以固碳服务和生物多样性维持服务为主,近20年里生态系统服务二类热点区面积呈先减少后增加趋势,其面积比重由2000年的 29.95% 减少至2010年的 29.47% ,之后在2020年又增至 30.93% 。生态系统服务三类热点区主要以固碳服务、生物多样性维持和土壤保持服务等调节和支持服务为主,总体呈现增加的趋势,20年间其面积共增加了 61.62 km^2 ,年均增速为 $3.08\text{ km}^2/a$ 。空间分布上,生态系统服务非热点区主要分布在人类活动频繁、工农业发达的城镇区域,如玉林市区、博白县、浦北县、合浦县的县城等区域。一类热点区主要集中在上游的玉州盆地和兴业县城的缓丘谷地、中游的博白盆地、下游的合浦三角洲等区域。二类热点区主要分布在农林相间的丘陵、旱地、谷地等交错区域,例如西垠镇、大里镇、新圩镇、成均镇、沙田镇、江城镇等。三类热点区主要分布在海拔较高的山林区和自然保护区,如六万大山、云开大山、五皇山等山林地和大容山自然保护区等区域。

从主导服务分析结果来看,在乡镇尺度上,主导生态系统服务热点区的分布格局空间差异性明显(图7),但在过去20年里整体空间格局变动不大。食物供给服务主导热点区分布范围相对较大,主要集聚分布在玉州平原、博白盆地和下游三角洲地区,涉及党江镇、廉州镇、旺茂镇、福绵镇、城北街道办、玉城街道办、城西街道办、北流镇、仁东镇等33个,占全部乡镇比例为 42.85% 。

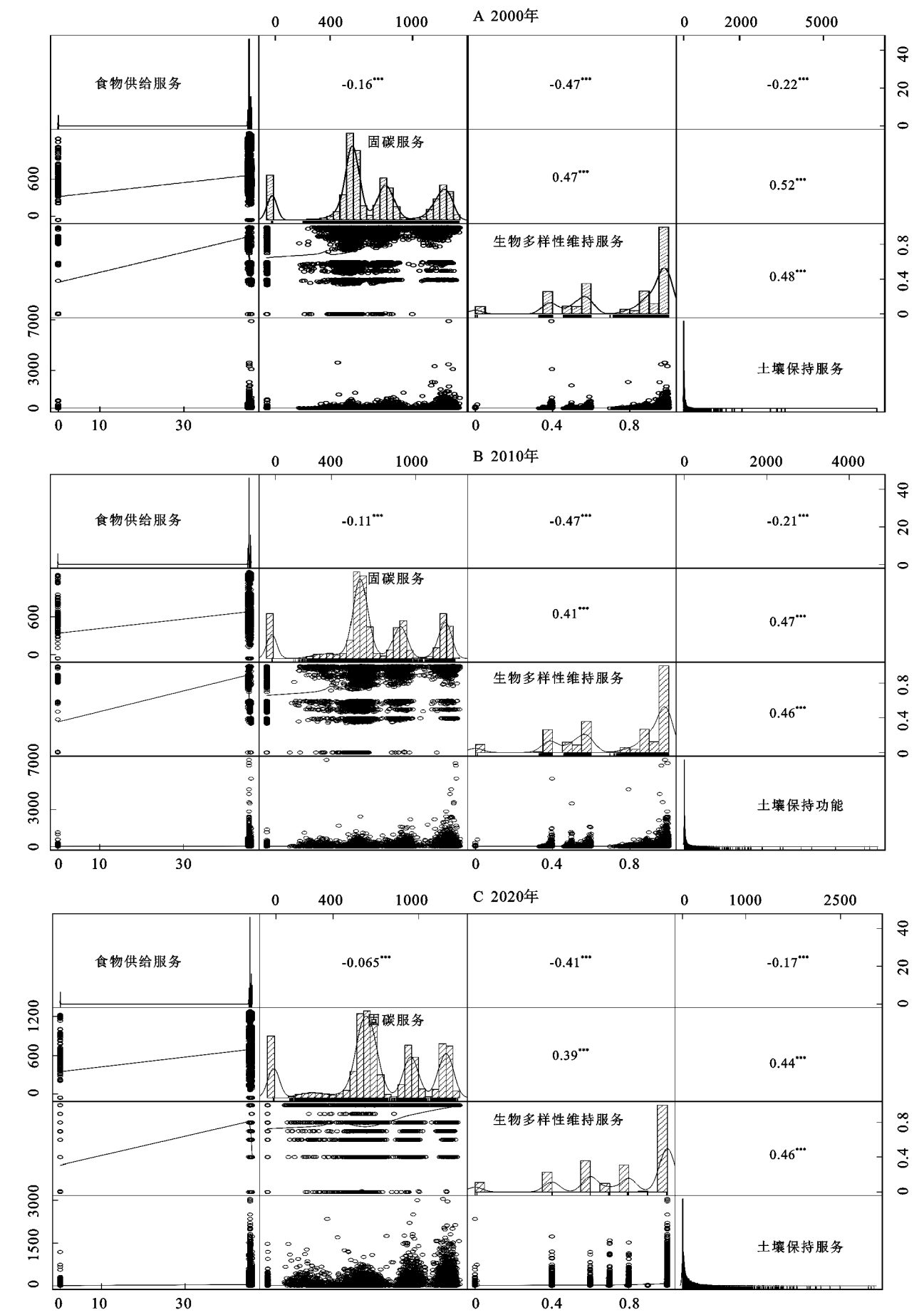
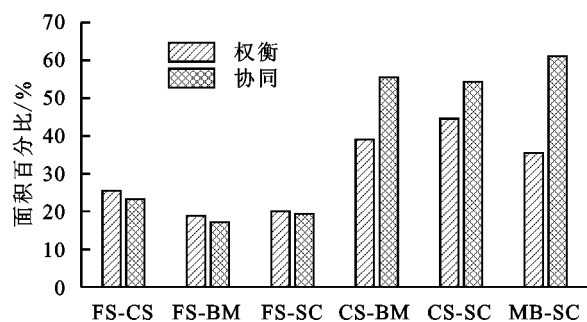


图 3 2000—2020 年南流江流域生态系统服务权衡协同关系散点图



注:FS为食物供给服务,CS为固碳服务,BM为生物多样性维持服务,SC为土壤保持服务。

图4 南流江流域各项生态系统服务权衡/协同关系面积百分比

单纯以固碳服务为主导的关键服务热点区相对较少,主要集中在大容山山脚下的农林过渡带;生物多样性维持服务主导热点区主要分布在上游大容山

自然保护区、中下游的山岗林地、丘陵山岭等地区。同时提供两种生态系统服务以上的区域分布广泛。其中,食物供给与固碳服务为主导的生态系统服务热点区主要以福绵区樟木镇、陆川县平乐镇、浦北县三合镇3个乡镇为主。食物供给与生物多样性维持服务为主导的热点区主要集中在中下游的江城镇、张黄镇、沙河镇、常乐镇、东平镇等18个乡镇的农林过渡带的丘陵、谷地、土岭、盆地等区域,面积规模占比约为23.38%。食物供给与土壤保持服务为主导的热点区主要集中在顿谷镇、北通镇等少数区域。固碳服务、土壤保持和生物多样性维持等调节服务与支持服务类型为主导的热点区涉及14个乡镇,主要分布在上游大容山森林保护区、中游地区的六万大山、云开山脉及其周边的山林地和人工林地等区域。

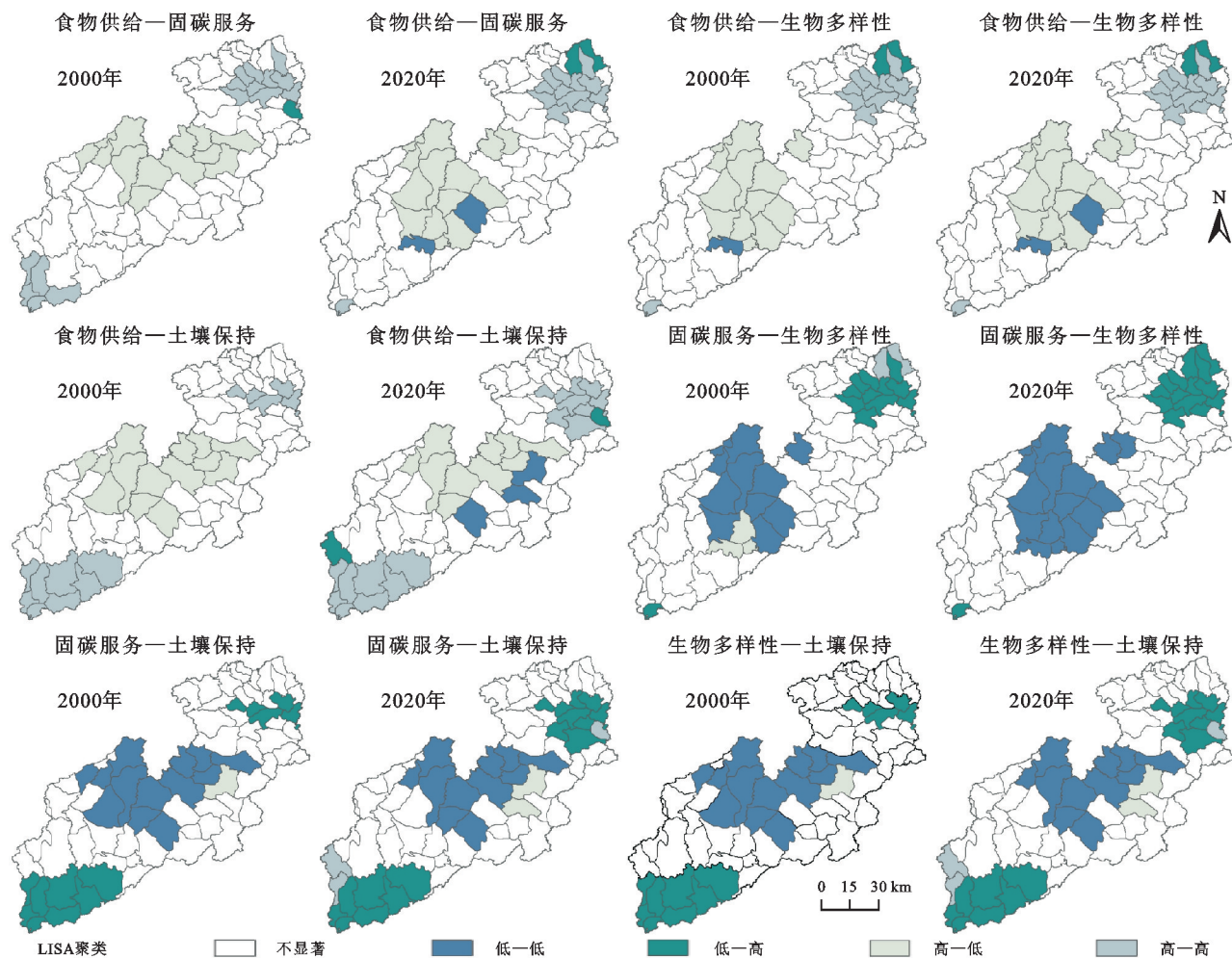


图5 2000—2020年南流江流域生态系统服务之间权衡协同度空间分布

4 讨论

(1) 厘清生态系统服务权衡/协同关系及其热点区,不仅有助于区域生态保护与国土空间规划,而且能促进区域可持续发展、提升人类福祉。本文选取人类活动频繁的北部湾经济区山江海过渡带的南流江

流域为案例,从数值、空间、热点区辨识等角度分析和探究了南流江流域生态系统服务权衡协同关系及其时空格局。研究表明,南流江流域生态系统服务空间差异明显,固碳服务、土壤保持服务、生物多样性维持服务等调节和支持服务呈协同关系,而它们与食物供给表现为权衡关系。这与其他学者在白龙江流

域^[36]、鄱阳湖流域^[38]、新安江流域^[39]、南方红壤区^[40]、喀斯特地区等^[41]我国南方地区或山地流域的研究结果相似。即在植被覆盖度高、生态环境较好的山地林区、自然保护区和农林交错区,固碳服务、土壤保持服务和生物多样性维持服务协同关系明显,但与

食物供给服务权衡关系强烈,表明食物生产供给用地与生态用地(特别是林地和草地)存在一定的竞争关系,粮食生产与生态环境保护存在一定的冲突,未来国土空间土地利用规划过程中应合理配置各类用地,优化生产、生活、生态空间,保障国土生态安全。

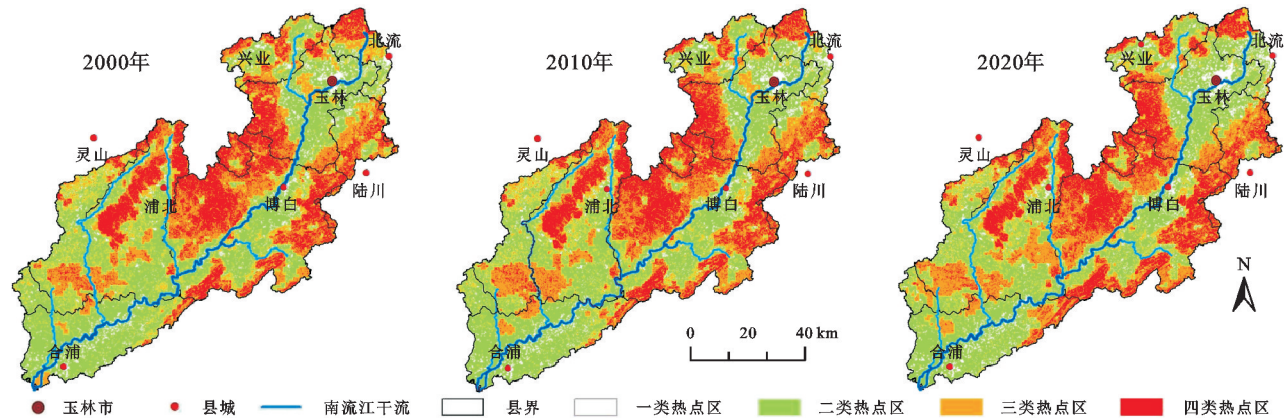


图 6 南流江流域多重生态系统服务热点分布

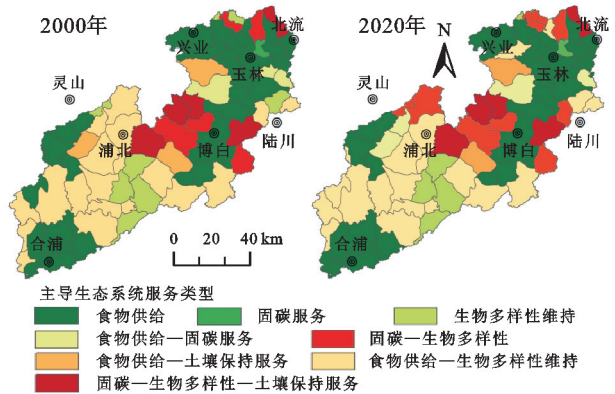


图 7 2000—2020 年南流江流域主导生态系统服务热点区

(2) 2000—2020 年,南流江流域调节与支持服务在流域地势平坦、工农业发达的平原—盆地地区协同关系不明显,甚至在个别区域呈现权衡关系,同时调节服务、支持服务与食物供给服务的权衡程度相对较低。这可能是由于近 20 年里南流江流域农业生产效率不断提高、种植结构逐渐偏向于非粮化,局部地区荔枝、龙眼、橙柚、茶叶以及大棚蔬菜种植面积规模不断扩大;同时,人工林(如速生桉树)面积增长迅速,尤其是人口较少的山岭丘陵地区。农林产业偏向于水果园林化发展和人工林的扩张,相较于传统的水稻和玉米种植而言,土壤翻耕频率较少、作物类型也更偏向于灌木、小乔木等类型发展,在一定程度上促进了植被净初级生长力及其碳汇能力、减少了水土流失,同时提高了农作物的产量及经济价值,但对提升区域生物多样性的作用相对不明显。与此同时,个别区域食物供给服务与调节服务、支持服务(如固碳服务、生物多样性维持等)呈现协同关系,主要体现在流域林改和生态修复工程示范区。这些区域通过各类工程措施进行环境

治理与生态修复,如面源污染整治、退耕还林、防护林保护、农作物种植结构与品种的变化、水利灌溉基础设施建设等,在一定程度上促进了生物多样性维持服务与固碳服务、土壤保持服务协同发展。尽管如此,生态系统服务形成机理及其权衡/协同之间相互作用机制、时空尺度效应仍有待进一步深入探究,未来应加强不同尺度下更精细化、模型化的生态系统服务权衡/协同及驱动机制研究,为制定优化生态系统服务及实现区域发展提供科学依据。

5 结论

(1) 2000—2020 年南流江流域生态系统食物供给服务呈现下降趋势,而固碳服务则呈显著上升的态势(年均增长速率达 2.3 %/a);生物多样性维持和土壤保持服务均表现为先降低后上升、总体呈增长的趋势。近 20 年里,各项生态系统空间分布格局变化不大,即食物供给服务主要分布在玉州平原、博白盆地以及下游三角洲等地势平坦、农业发达的区域;而固碳服务、生物多样性维持和土壤保持服务等调节与支持服务则集中在自然保护区和山林地,如大容山、六万大山、勾头嶂山、云开山脉等区域。

(2) 研究期间,南流江流域食物供给服务与固碳服务、生物多样性维持和土壤保持服务均表现权衡关系,而固碳服务、生物多样性维持与土壤保持服务则表现出协同关系;且在分布格局上存在明显空间异质性。

(3) 南流江流域多重生态系统服务热点区主要分布在海拔较高的山林区和自然保护区,且以调节和支持服务为主。其次,生态系统服务二类热点区主要以固碳服务和生物多样性维持服务为主、食物供给和

固碳服务次之,主要分布在农林交织的丘陵、旱地、谷地等区域。一类热点区面积最大,其面积比重约在44%以上,且以食物供给服务为主。

致谢:感谢余欣洁、周沛昂、闭丽琼等在数据处理与文字校对过程中给予的帮助以及南宁师范大学大学生创新创业项目(202110603065)的支持!

参考文献:

- [1] Costanza R, Darge R C, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387(6630):253-260.
- [2] 王川,刘春芳,乌亚汗,等.黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系:以榆中县为例[J].*生态学杂志*,2019,38(2):521-531.
- [3] Fu B J, Zhang L W, Xu Z H, et al. Ecosystem services in changing land use[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015,15(4):833-843.
- [4] Lars H, van Kris K, Rudolf S, et al. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services[J]. *Ecological Economics*, 2005,57(2):209-228.
- [5] Francis T, Michael L, Sander J, et al. When we cannot have it all: Ecosystem services trade-offs in the context of spatial planning[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 566-578.
- [6] Erik N, Guillermo M, James R, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009,7(1):4-11.
- [7] 李双成,张才玉,刘金龙,等.生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J].*地理研究*,2013,32(8):1379-1390.
- [8] 曹祺文,卫晓梅,吴健生.生态系统服务权衡与协同研究进展[J].*生态学杂志*,2016,35(11):3102-3111.
- [9] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being*[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [10] 巩杰,柳冬青,高秉丽,等.西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系:以甘肃白龙江流域为例[J].*应用生态学报*,2020,31(4):1278-1288.
- [11] 荣月静,郭新亚,杜世勋,等.基于生态系统服务功能及生态敏感性与PSR模型的生态承载力空间分析[J].*水土保持研究*,2019,26(1):323-329.
- [12] 彭建,胡晓旭,赵明月,等.生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策[J].*地理学报*,2017,72(6):960-973.
- [13] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. *Ecology Letters*, 2009,12:1394-1404.
- [14] 孙艺杰,任志远,赵胜男.关中盆地生态服务权衡与协同时空差异[J].*资源科学*,2016,38(11):2127-2136.
- [15] Gong J, Liu D Q, Zhang J X, et al. Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem services based on land use simulation in a mountain-basin area, western China[J]. *Ecological Indicators*, 2019,99:283-293.
- [16] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, et al. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in northern Shaanxi, China[J]. *Ecological Indicators*, 2014,43:103-113.
- [17] 李龙,吴大放,刘艳艳.国内外土地利用与生态系统服务研究热点与趋势:基于 CiteSpace 计量分析[J].*水土保持研究*,2020,27(5):398-404.
- [18] 苗培培,赵祖军,赵筱青,等.云南典型石漠化区生态系统服务权衡与协同研究[J].*水土保持研究*,2021,24(4):366-374.
- [19] 潘竟虎,李真.干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J].*农业工程学报*,2017,33(17):280-289.
- [20] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡:方法、模型与研究框架[J].*地理研究*,2016,35(6):1005-1016.
- [21] Zheng D F, Wang Y H, Hao S, et al. Spatial-temporal variation and tradeoffs/synergies analysis on multiple ecosystem services: A case study in the Three-River Headwaters region of China[J]. *Ecological Indicators*, 2020,116:106494.
- [22] Chen L, Pei S, Liu X N, et al. Mapping and analysing tradeoffs, synergies and losses among multiple ecosystem services across a transitional area in Beijing, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021,123:107329.
- [23] Peng J, Hu X, Wang X, et al. Simulating the impact of grain-for-green programme on ecosystem services trade-offs in northwestern Yunnan, China[J]. *Ecosystem Services*, 2019,39:100998.
- [24] 赵文祯,韩增林,闫晓露,等.基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建:以大连市瓦房店为例[J].*自然资源学报*,2020,35(3):546-562.
- [25] 金贵,吴锋,李兆华,等.快速城镇化地区土地利用及生态效率测算与分析[J].*生态学报*,2017,37(23):8048-8057.
- [26] Bai Y, Chen Y, Alatalo J M, et al. Scale effects on the relationships between land characteristics and ecosystem services: A case study in taihu lake basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,716:137083.
- [27] Ouyang Z, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. *Science*, 2016,352:1455-1459.
- [28] 杨坤士,卢远,翁月梅,等. Google Earth Engine 平台支持下的南流江流域生态环境质量动态监测[J].*农业资源与环境学报*,2021,38(6):1112-1121.
- [29] 王莉雁,肖焱,饶恩明,等.全国生态系统食物生产功能空间特征及其影响因素[J].*自然资源学报*,2015,30(2):188-196.
- [30] 谢余初,张素欣,刘巧珍,等.基于热量的食物供给服务

- 时空分异研究:以广西土地农产品为例[J].中国生态农业学报,2020,28(12):1859-1868.
- [31] 戴尔阜,李双元,吴卓,等.中国南方红壤丘陵区净生态系统生产力空间分布及其与气候因子的关系:以江西省泰和县为例[J].地理研究,2015,34(7):1222-1234.
- [32] 陈晓杰,张长城,张金亭,等.基于 CASA 模型的植被净初级生产力时空演变格局及其影响因素:以湖北省为例[J].水土保持研究,2022,29(3):253-261.
- [33] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, et al. InVEST 2.6.0 User's Guide[M]. Stanford C A: The Natural Capital Project,2013.
- [34] Jopke C, Kreyling J, Maes J, et al. Interactions among ecosystem services across europe: bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns[J]. Ecological Indicators, 2015,49:46-52.
- [35] 高艳丽,李红波,侯蕊.汉江流域生态系统服务权衡与协同关系演变[J].长江流域资源与环境,2020,29(7):1619-1630.
- [36] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报,2018,73(5):868-879.
- [37] 武文欢,彭建,刘焱序,等.鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J].地理科学进展,2017,36(12):1571-1581.
- [38] 冉凤维,罗志军,吴佳平,等.鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局[J].应用生态学报,2019,30(3):995-1004.
- [39] 李冬花,张晓瑶,王咏,等.新安江流域生态系统服务演化过程及权衡协同关系[J].生态学报,2021,41(17):6981-6993.
- [40] 王修文,于书霞,史志华,等.南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系演变对退耕还林的响应[J].生态学报,2021,41(17):1-13.
- [41] Feng Y Y, Zhao Y L, Yang Z M, et al. Spatio-temporal differentiation of trade-offs and synergies of ecosystem services in typical mountain areas of China [J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(2):268-279.

(上接第 386 页)

- [17] 李硕,沈占锋,刘克俭,等.大清河流域土地利用变化的地形梯度效应分析[J].农业工程学报,2021,37(5):275-284.
- [18] Li Q, Zhou Y, Mary A C, et al. Spatio-temporal changes in wildlife habitat quality in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1980 to 2100 based on the InVEST model[J]. Journal of Resources and Ecology, 2021,12:43-55.
- [19] 丁智强,华红莲,王平,等.哈尼梯田遗产核心区土地利用信息图谱及地形梯度效应[J].农业工程学报,2021,37(23):225-234.
- [20] 张国坤,邓伟,张洪岩,等.新开河流域土地利用格局变化图谱分析[J].地理学报,2010,65(9):1111-1120.
- [21] 赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(8):979-986.
- [22] 赵媛,杨足膺,郝丽莎,等.中国石油资源流动源:汇系统空间格局特征[J].地理学报,2012,67(4):455-466.
- [23] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].地理学报,2022,77(3):534-546.

(上接第 396 页)

- [25] 张玉,任建兰,刘凯.近 15 年山东省人地关系演变过程与驱动因素分析[J].湖南师范大学自然科学学报,2019,42(2):1-8.
- [26] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [27] 桑晚晴,柴剑峰.川甘青毗邻藏区农牧民生计困境调研:基于川甘青三省八县的调查实证[J].资源开发与市场,2018,34(2):211-217.
- [28] 李志东,刘某承.我国草原生态保护补助奖励政策效应评价研究进展[J].草地学报,2021,29(6):1125-1135.
- [29] 张佩佩,董锁成,李泽红,等.甘南藏族自治州生态足迹与生态承载力分析[J].生态科学,2017,36(2):171-178.
- [30] 孙梦华,牛文浩,张蚌蚌,等.黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应:以陕甘宁地区为例[J].应用生态学报,2021,32(11):3913-3922.
- [31] 温煜华.甘南黄河重要水源补给区生态经济耦合协调发展研究[J].中国农业资源与区划,2020,41(12):35-43.
- [32] 朱纹君,韩美,魏丹妮,等.黄河三角洲人地关系协调度时空演变及其驱动机制[J].水土保持研究,2023,30(12):388-396.
- [33] 杜三强,程云湘,周国利.生态奖补政策下的牧民收入影响因素分析:以肃南、甘南为例[J].中国草地学报,2019,41(4):118-127.