

## ◆特邀栏目◆

# 基于能值-三维生态足迹模型的珠江干流 4 省区资源利用分析及生态补偿研究<sup>\*</sup>

刘璐瑶<sup>1,2,3</sup>, 张建兵<sup>1,2,3\*\*</sup>, 龚慧芹<sup>1,2,3</sup>, 光家材<sup>1,2,3</sup>, 黄丽排<sup>1,2,3</sup>, 胡宝清<sup>1,2,3</sup>

(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, 广西南宁 530001; 2. 南宁师范大学, 广西地表过程与智能模拟重点实验室, 广西南宁 530001; 3. 南宁师范大学地理科学与规划学院, 广西南宁 530001)

**摘要:**开展珠江流域资源利用时空格局、自然资源消耗与经济发展协调性及生态补偿研究,有利于揭示珠江流域内部资源消耗格局、生态补偿区与受偿区,推动全流域协调发展、生态环境统一保护与治理。本文基于能值-三维生态足迹模型,核算 2010-2019 年珠江干流 4 省区[云南(滇)、贵州(黔)、广西(桂)、广东(粤)]的能值生态足迹和能值生态承载力;综合绿色贡献系数、基尼系数和重心模型、重心距离模型,评估 4 省区自然资源消耗与经济协调性;结合生态补偿模型,计算各省生态应付及社会应付生态补偿金额。结果表明:① 2010-2019 年,珠江干流 4 省区能值生态承载力呈现出滇>黔>桂>粤的格局,但资源消耗程度(能值生态足迹)与之相反;同时,下游地区(黔、桂、粤)足迹深度均大于 1,呈生态赤字及不可持续状态;②流域能值生态足迹综合基尼系数超过 0.5,贵、黔绿色贡献系数小于 1,经济重心、人口重心、能值生态足迹重心均偏向下游的粤,均表明流域内资源利用与社会经济发展在空间上失衡,需通过生态补偿进行调节;③2014-2019 年,除滇为受偿区外,粤、桂、黔均为补偿区,补偿金额为粤>桂>黔,且受偿与补偿金额均呈逐年增长趋势;受社会支付能力限制,桂、黔补偿区的社会应付金额低于生态应付金额。珠江流域应加快提升资源利用效益,形成生态补偿机制,以抑制流域资源过度利用、生态赤字及社会经济进一步失衡,达到实现新时期流域协调发展与生态和谐的目标。

**关键词:**能值-三维生态足迹模型;自然资源分配;自然资源利用率;时空格局;生态补偿

中图分类号: X321 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2023)02-0383-11

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20221214.001

流域是一个完整且相对独立的地理单元,由于下垫面因子与生态服务功能的差异,流域不同空间存在自然资源及其承载力、主体功能差异,导致不同地区内部及相互间社会-经济-生态系统发展的失衡,流域

收稿日期: 2022-10-31 修回日期: 2022-11-28

\* 国家自然科学基金项目(42167040, 42071135, 41930537), 广西科技基地和人才专项项目(桂科 AD19110142)资助。

#### 【第一作者简介】

刘璐瑶(1997-),女,在读硕士研究生,主要从事土地利用变化及其生态环境效应研究。

#### 【\*\*通信作者】

张建兵(1984-),男,博士,副研究员,主要从事土地利用变化及其生态环境效应研究, E-mail: zjb1166@163.com。

#### 【引用本文】

刘璐瑶, 张建兵, 龚慧芹, 等. 基于能值-三维生态足迹模型的珠江干流 4 省区资源利用分析及生态补偿研究[J]. 广西科学, 2023, 30(2): 383-393.  
LIU L Y, ZHANG J B, GONG H Q, et al. Resource Utilization Analysis and Ecological Compensation Study of Four Provinces in the Mainstream of Pearl River Based on the Three-Dimensional Emery Ecological Footprint Model [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(2): 383-393.

性资源环境、社会经济发展、综合保护与治理等问题日益突出<sup>[1-5]</sup>。建立流域生态补偿机制有利于协调流域上、中、下游之间的资源分配、生态保护与经济发展问题,促进流域协调发展、生态环境一体化保护与治理,实现流域社会生态系统的可持续发展<sup>[6-8]</sup>,是流域社会生态系统平衡发展领域的研究热点。但当前流域生态补偿的研究更多侧重于理论分析<sup>[9,10]</sup>,补偿依据以水环境<sup>[11]</sup>、水质水量<sup>[12]</sup>、水污染强度<sup>[13]</sup>等指标为主,流域生态补偿标准尚不统一,补偿范围较窄,局限于对流域内单一要素的治理,缺乏对流域系统性、整体性、动态性、空间关联性的综合考虑<sup>[14,15]</sup>。如杜林远等<sup>[16]</sup>通过构建流域生态补偿效益综合评价指标体系,从生态、社会、经济3个方面对湘江流域生态补偿实施效果展开评估,发现流域生态补偿效益在研究期间呈逐年上升的态势,但还存在流域生态补偿标准设置不合理的问题,提出要考虑流域上下游发展差异,实行差异化补偿标准的建议。

生态补偿标准是生态补偿的核心,回答“补多少”“谁补给谁”的问题,是学界的重点研究对象<sup>[17]</sup>。机会成本法<sup>[18]</sup>、生态价值估算法<sup>[19,20]</sup>、市场价值法<sup>[21]</sup>、支付意愿法<sup>[22,23]</sup>是生态补偿标准核算中比较常用的几种方法,但这些方法普遍存在时间和空间范围的局限性,且弱化了自然资源消耗与社会经济之间的关系,未能充分考虑地理空间的异质性和社会经济发展的阶段性<sup>[24,25]</sup>。能值-三维生态足迹模型是对三维生态足迹模型的改进,将能值理论与传统的生态足迹模型相结合,并引入生态足迹广度和深度两项指标对自然资源流量和存量资本进行区分,利于分析区域自然资源消费的时空格局<sup>[26,27]</sup>,为开展区域生态补偿提供依据。如杨一昀等<sup>[28]</sup>结合三维生态足迹模型、生态资源转换效率和支付意愿指标,测算长江中游城市群各市的生态补偿金额;钱凤魁等<sup>[29]</sup>运用三维生态足迹模型,并结合生态系统服务价值估算方法,测算辽宁省各市的耕地生态补偿金额。

珠江是我国第二大、第三长河流,南方最大河系。珠江中上游的云南(滇)、贵州(黔)、广西(桂)地区是我国重要生态屏障区<sup>[30]</sup>,境内稀有物种繁多,水能资源蕴藏量巨大,矿产资源富集,但其生态脆弱,是我国石漠化主要分布区,社会经济发展相对落后<sup>[31]</sup>;下游的广东省(粤)社会经济发达,GDP位居我国首位,能源消耗大。流域上下游间自然资源、生态环境与社会经济发展的空间不均衡,导致各地利益诉求不一,自然资源利用及其效率差异明显,并导致了突出的流域

性生态环境问题,其上游地区已成为中国水土流失较严重的地区之一,而下游地区则面临着水资源短缺和水污染严重的双重困扰,开展珠江流域综合治理促进其协调发展迫在眉睫。在2020年全国两会期间,云南、贵州、广西、广东、湖南(湘)和江西(赣)6省区政协主席和驻桂全国政协委员联名提案,呼吁将珠江流域生态保护上升为国家重大战略,建立珠江流域综合补偿制度。

为探明珠江流域内部资源利用的时空格局及其协调程度,探索珠江流域生态补偿依据及标准,本文运用能值-三维生态足迹模型,分析2010-2019年珠江流域主要流经省区(滇、黔、桂、粤,流经面积占珠江流域总面积的95.76%)自然资源要素与经济发展要素的时空演变特征、公平性及协调度,并结合生态补偿模型,核算各省生态补偿应付金额和社会实付金额,以期对珠江流域生态补偿及生态环境协同治理与社会经济协调发展提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

珠江是我国南方最大水系,起源于云南省曲靖市沾益区的马雄山,干流主要流经滇、黔、桂、粤后注入南海,4省区内的流域总面积为 $9.875 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占珠江流域总面积的95.76%;整体地势西北高、东南低;水热资源丰富,多年平均降水量1464 mm;经济发展的区位优势明显,拥有粤、桂的出海通道和滇、黔的出境通道,同时肩负我国“两屏三带”生态安全战略格局中一屏(黄土高原-川滇生态屏障)一带(南方丘陵山地带)的责任。

珠江干流4省区受地理位置、历史、政治、社会文化等影响,区域内经济发展极不平衡,贫富差距悬殊,2019年,粤、桂、黔、滇地区生产总值比为64:13:10:14,这些差距引发4省区发展方式与诉求的差别,进一步导致流域生态环境与经济协调发展问题。同时,新时代赋予了各省区不同的主体功能定位和发展战略,其中滇、黔、桂主要为生态保护屏障区,广东是我国率先进行改革开放和制度创新的实验区,这些安排将进一步导致各地发展方式的差异,加剧4省区的社会经济发展差距。为避免这些差距的增加,实现区域间优势互补、协调发展,推进生态保护和高质量发展,珠江干流4省区应通过生态补偿,兼顾上下游地区的发展诉求。

## 1.2 数据与方法

### 1.2.1 数据来源

参考文献[32-34],结合研究区实际,本文研究数据主要包括生物资源消费数据(粮食和经济作物产量、禽畜产品、水产品和木材等农林牧渔业产品)、能源资源消费数据(煤炭、燃料油、天然气、电力等)、生产资料数据(化学肥料、农药、水泥、钢等)、社会经济数据(人口、GDP、城乡居民可支配收入、商品进出口金额、实际利用外资等)。其中,生物资源消费数据来源于2010-2019年《中国统计年鉴》<sup>[35]</sup>、《云南统计年鉴》<sup>[36]</sup>、《贵州统计年鉴》<sup>[37]</sup>、《广西统计年鉴》<sup>[38]</sup>、《广东统计年鉴》<sup>[39]</sup>;能源资源消费数据、生产资料数据、社会经济数据主要来源于国家统计局网站<sup>[40]</sup>;降水量及水资源量数据来源于各省研究期间的水资源公报。

### 1.2.2 能值生态足迹指标评价体系

生态足迹意为人类对资源的占用程度,即满足一个区域内全部人口的资源消费需求和接纳由这些人口产生的所有废弃物的生态生产性土地面积<sup>[41]</sup>。本文参考文献[28,42],结合研究区实际,构建了珠江干流 4 省区能值生态足迹指标体系(表 1)。

表 1 珠江干流 4 省区能值生态足迹指标体系

Table 1 Emergy ecological footprint index system in four provinces of the Pearl River mainstream

土地利用类型 Type of land-use	序号 Serial code	指标 Index	能值转换率/ (sej/J) Emergy conversion rate/(sej/J)
Crop land	1	Oil-bearing plant	6.90E+05
	2	Wheat	6.80E+04
	3	Cassava	8.30E+04
	4	Bean	8.30E+04
	5	Vegetable	2.70E+04
	6	Tea	3.19E+05
	7	Flue-cured tobacco	2.00E+05
	8	Tuber	8.30E+04
	9	Sugarcane	8.40E+04
	10	Fibre crop	2.70E+04
	11	Fruit	5.30E+04
	12	Rice	3.59E+04
	13	Corn	5.81E+04
Grass land	14	Meat	1.70E+06
	15	Egg	2.00E+06
	16	Milk	1.71E+06
Water	17	Aquatic product	2.00E+06
Forest	18	Honey	8.40E+04
	19	Walnut	6.90E+05

续表

Continued table

土地利用类型 Type of land-use	序号 Serial code	指标 Index	能值转换率/ (sej/J) Emergy conversion rate/(sej/J)
Fossil fuel land	20	Timber	3.49E+04
	21	Rubber	1.60E+05
	22	Rosin	1.60E+05
	23	Tung-oil seed	6.90E+05
	24	Tea-oil seed	6.90E+05
	25	Fuel oil	6.60E+04
	26	Coke	3.98E+04
	27	Coal	3.98E+04
	28	Natural gas	4.80E+04
	29	Kerosene	6.60E+04
	30	Diesel oil	6.60E+04
	31	Gasoline	6.60E+04
32	Liquefied gas	6.60E+04	
Construction land	33	Electricity	1.59E+05

Note: walnut yield in Guangdong Province, rubber yield and cassava yield in Guizhou Province, cassava yield in Yunnan Province is very little or no output, so it is neglected.

### 1.2.3 能值-三维生态足迹模型

三维生态足迹模型引入足迹广度和足迹深度,分别表示区域自然资源流量资本和存量资本的利用情况<sup>[27,43]</sup>。本文将三维生态足迹模型中的生态足迹与生态承载力替换为能值生态足迹与能值生态承载力,进而得到能值-三维生态足迹模型,计算方法<sup>[44]</sup>如下:

$$EF_{3D} = EF_{size} \times EF_{depth}, \quad (1)$$

$$ED = EC - EF, \quad (2)$$

$$EF_{size} = EC, ED < 0, \quad (3)$$

$$EF_{depth} = 1 + \frac{ED}{EC} = 1 + \frac{EF - EC}{EC'}, EF_{depth} \geq 1, \quad (4)$$

$$EF_{size} = EF, ED \geq 0; EF_{depth} = 1, \quad (5)$$

式中,  $EF_{3D}$  表示三维人均能值生态足迹值,  $EF_{size}$  为人均能值生态足迹广度,  $EF_{depth}$  为能值生态足迹深度。EC 和 EF 分别为能值生态承载力和能值生态足迹<sup>[45]</sup>, ED 为生态赤字或盈余, 当  $ED \geq 0$  时, 其值称作生态盈余, 反之为生态赤字<sup>[46]</sup>。  $EC'$  为考虑到生物多样性, 扣除 12% 的生物多样性保护面积后所得到的生态承载力。当  $EF_{depth} > 1$  时, 表示区域生态承载力已无法满足区域人口需求, 需消耗自然资源存量资本; 当  $EF_{depth} = 1$  时, 表示自然资源流量资本处于恰

好用尽或存余状态, 足迹深度为原长度 1。

#### 1.2.4 生态补偿模型

进一步应用重心模型<sup>[47]</sup>、重心距离模型<sup>[48]</sup>表征珠江干流人口、经济、能值生态足迹的空间聚焦特征, 揭示资源要素与经济区域发展的区域差异性。同时, 以促进流域生态可持续发展, 推动流域生态环境共建、共治、共享为导向, 依据能值-三维生态足迹模型中能值生态足迹赤字指标的核算结果, 通过能值货币比率和社会支付水平指标, 确定区域生态补偿金额。

①生态补偿应付金额。生态补偿应付金额表示用于奖励生态环境保护行为或抑制生态资源过度消费行为的费用。若生态补偿应付金额的计算结果为正值, 则表示区域为保护生态资源而牺牲经济利益后所应得到的补偿款; 若计算结果为负值, 则表示区域在过度消费生态资源后所应缴纳的用于生态保护或修复的费用, 公式<sup>[49]</sup>如下:

$$X = N \times ED \times p_1 \times Vi, \quad (6)$$

$$Vi = E / \text{GDP}, \quad (7)$$

式中,  $X$  为生态补偿应付款,  $N$  为区域人口数量,  $p_1$  为区域能值密度<sup>[50]</sup>,  $Vi$  为第  $i$  年的能值货币比率 (Em \$),  $E$  为单位时间内投入到区域生态经济系统内的可更新环境资源、不可更新资源产品、不可更新环境资源和货币流的总能值之和 (表 2),  $\text{GDP}$  表示国内生产总值 (美元)。

表 2 珠江干流 4 省区能值生态经济系统评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of emergy eco-economic system in four provinces of the Pearl River mainstream

能值类别 Emergy category	序号 Serial code	指标 Index	能值 单位 Emergy unit	能值转换率/ (sej/单位) Emergy conversion rate/(sej/unit)
Updatable resource	1	Solar radiant energy	J	1
	2	Rain water chemical energy	J	1.54E+04
	3	Earth's rota- tional energy	J	2.90E+04
	4	Wind energy	J	6.63E+02
	5	Tidal energy	J	2.36E+04
Non - updat- able resource	6	Rain potential energy	J	8.89E+03
	7	Top soil loss energy	J	7.40E+04
	8	Fuel oil	J	6.60E+04
	9	Coke	J	3.98E+04
	10	Natural gas	J	4.80E+04

续表

Continued table

能值类别 Emergy category	序号 Serial code	指标 Index	能值 单位 Emergy unit	能值转换率/ (sej/单位) Emergy conversion rate/(sej/unit)
Currency flow	11	Gasoline	J	6.60E+04
	12	Steel	t	1.98E+15
	13	Cement	t	1.98E+15
	14	Potash fertilizer	t	2.96E+15
	15	Compound fer- tilizer	t	4.60E+15
	16	Coal	J	3.98E+04
	17	Electricity	J	1.59+05
	18	Kerosene	J	6.60E+04
	19	Diesel oil	J	6.60E+04
	20	Liquefied gas	J	6.60E+04
	21	Nitrogenous fertilizer	t	4.62E+15
	22	Phosphate fer- tilizer	t	6.88E+15
	23	Pesticide	J	1.97E+06
	24	Import trade	\$	2.50E+12
	25	Export trade	\$	1.46E+12
	26	Foreign actual direct invest- ment	\$	2.50E+12
	27	Foreign ex- change earnings from tourism	\$	2.50E+12
	28	Import of serv- ices	\$	8.67E+12

②生态补偿实付金额。生态补偿实付金额是考虑到各省区处于不同的社会发展阶段, 支付生态补偿费用的能力存在差异, 在生态补偿应付金额的基础上结合社会支付水平指标, 测算实际应付 (应得) 的生态补偿金额。计算公式为

$$W_R = \frac{P_R \times l_R}{P}, \quad (8)$$

$$l_R = \frac{1}{1 + e^{-t}}, t = \frac{\ln R}{\ln}, \quad (9)$$

$$\ln R = \frac{A \times m + B \times n}{m + n}, \quad (10)$$

$$M_R = X_R \times W_R, \quad (11)$$

式中,  $W_R$  为社会支付水平指标<sup>[28]</sup>,  $W_R$  为  $R$  省的社会支付水平指标;  $P_R$  为  $R$  省的人均 GDP,  $l_R$  为  $R$  省的发展阶段系数,  $P$  为研究区的人均 GDP;  $e^{-t}$  和  $t$  分别表示区域社会发展阶段和人民生活水平,  $\ln R$  为  $R$  省的人均收入,  $\ln$  为研究区的人均收入;  $A$  为  $R$  省城



镇人均可支配收入;  $m$  为城镇人口;  $B$  为  $R$  省农村人均纯收入;  $n$  为  $R$  省农村人口。  $X_R$  和  $M_R$  分别表示  $R$  省的生态补偿应付金额和考虑到各省的实际情况后仍需支付的生态补偿金额。

## 2 结果与分析

### 2.1 珠江干流 4 省区能值-三维生态足迹的时空分布特征

珠江干流 4 省区能值生态足迹在空间上呈现粤>桂>黔>滇的分布格局, 其中粤的年均能值生态足迹值( $7.04 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ) 远高于后三者, 大于三者之和( $4.46 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ); 人均能值生态足迹在 2018-2019 年呈现粤>桂>黔>滇的分布格局, 与能值生态足迹一致, 但在 2010-2017 年, 粤、滇人均能值生态足迹分别为研究区的最高值( $5.97 \text{ hm}^2/\text{人}$ )、最低值( $1.80 \text{ hm}^2/\text{人}$ ), 桂、黔人均能值生态足迹值较为接近, 此起彼伏。时间方面, 4 省区在研究期间的能值生态足迹、人均能值生态足迹变化趋势相似, 粤、桂、滇呈波动上涨, 黔为波动平衡的趋势, 其中, 粤的能值生态足迹增值最大, 为  $2.74 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 桂的能值生态足迹、人均能值生态足迹增幅均为最大, 分别为 6.8%、5.6%(图 1)。

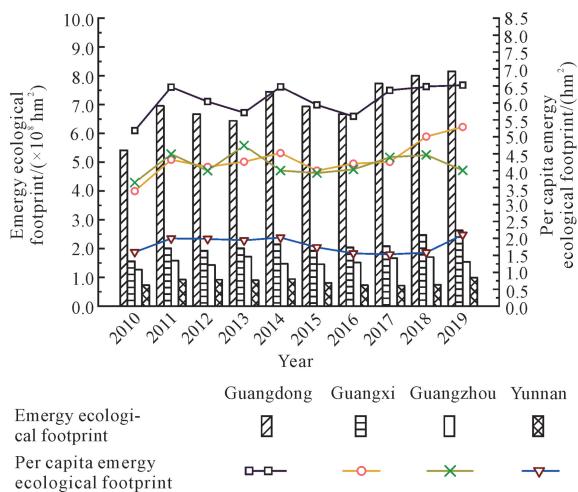


图 1 珠江干流 4 省区能值生态足迹与人均能值生态足迹

Fig. 1 Energy ecological footprint and per capita ecological footprint in four provinces of the Pearl River mainstream

研究区能值生态承载力、人均能值生态承载力时空变化趋势一致, 在空间上均表现为滇>黔>桂>粤, 时间上, 滇为波动下降趋势, 2010-2019 年, 共下降  $3.23 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 、 $0.82 \text{ hm}^2/\text{人}$ , 黔、桂、粤 3 省区为波动平衡状态, 变化幅度分别为 9.12%、0.72%、

1.51% 和 1.35%、6.80%、15.14%(图 2)。

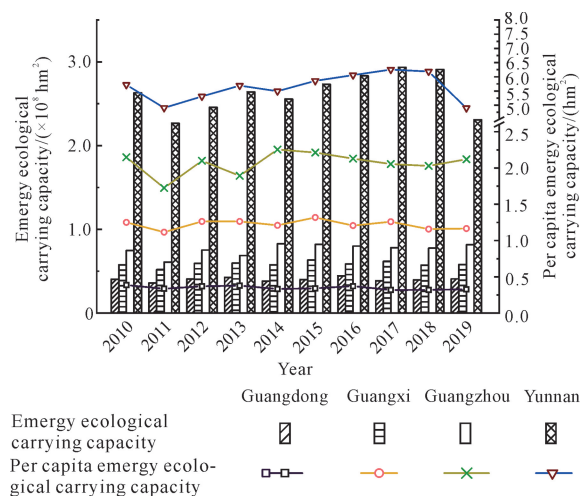


图 2 珠江干流 4 省区能值生态承载力与人均能值生态承载力

Fig. 2 Energy ecological carrying capacity and per capita energy ecological carrying capacity of four provinces in the mainstream of Pearl River

珠江干流 4 省区中, 黔、桂、粤 3 省区在研究期间均为生态赤字状态, 其能值生态足迹广度值等于能值生态承载力值; 滇的能值生态承载力大于能值生态足迹, 处于生态盈余状态, 其广度值为各年份的足迹值, 可以看出, 其值处于波动上升趋势, 表明云南消耗自然资源资本量正逐渐增加。4 省区人均能值生态足迹广度差异明显, 整体呈黔>滇>桂>粤的格局; 时间变化方面, 黔年均值( $2.07 \text{ hm}^2/\text{人}$ ) 最高, 并处于动态稳定中, 滇上升趋势明显, 增幅达 32%, 粤、桂的波动较小(图 3)。

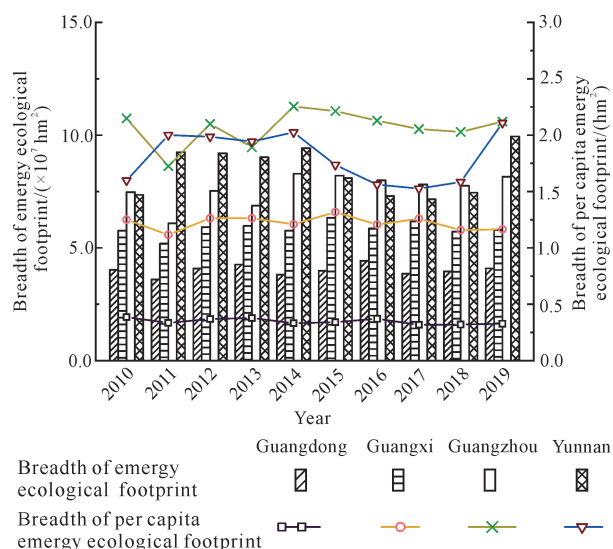


图 3 珠江干流 4 省区能值生态足迹广度与人均能值生态足迹广度

Fig. 3 Breadth of the energy ecological footprint and per capita energy ecological footprint in four provinces of the Pearl River mainstream

生态足迹深度指标能够客观真实地反映人类活动对生态资源存量资本的占用程度,为解决自然资源消耗“历史欠账”未还又添“新账”的生态问题提供了科学依据<sup>[30]</sup>。珠江干流4省区能值生态足迹深度值大小依次为粤、桂、黔、滇(图4),粤能值生态足迹深度高于其他3省区,处于严重赤字状态;滇尚处生态盈余,其值保持为自然深度1。时间上,2010-2019年,粤、桂呈波动增长趋势,增幅分别为48.33%、67.07%,黔则处于波动稳定的趋势。

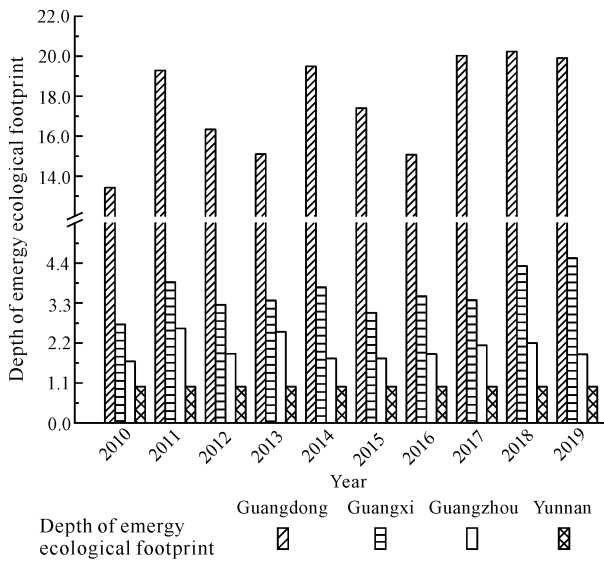


图4 珠江干流4省区能值生态足迹深度

Fig. 4 Depth of the ecological footprint in four provinces of the Pearl River mainstream

## 2.2 能值生态足迹公平性分析

分别选用绿色贡献系数<sup>[51]</sup>(Green Contribution Coefficient, GCC)、基尼系数<sup>[28,47]</sup>表征珠江干流4省区资源分配的外部公平性和内部公平性。

2010-2019年,4省区绿色贡献系数整体呈滇>粤>桂>黔的趋势,其中滇、粤绿色贡献系数年均值分别为1.81和1.07,表明其经济贡献率高于自然资源消耗量,属于绿色发展模式;桂、黔的绿色贡献系数值始终小于1,其经济贡献率小于自然资源消耗量,是引起区域资源分配不公平的主要区域,因此,需加快产业结构调整,提高资源利用效率,减少资源浪费(图5)。

2010-2019年,研究区GDP、人口、水资源量、综合基尼系数年均值分别为0.82、0.88、0.76、0.55,超越“警戒线”(0.4),处于“高度偏集”程度,且时间上相对稳定(图6)。其中,GDP基尼系数表明,研究期间珠江干流4省区的经济发展与自然资源消耗之间的发展关系不协调,部分地区的GDP增加需要消耗大量

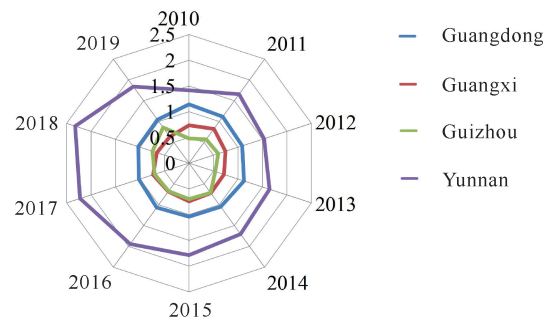
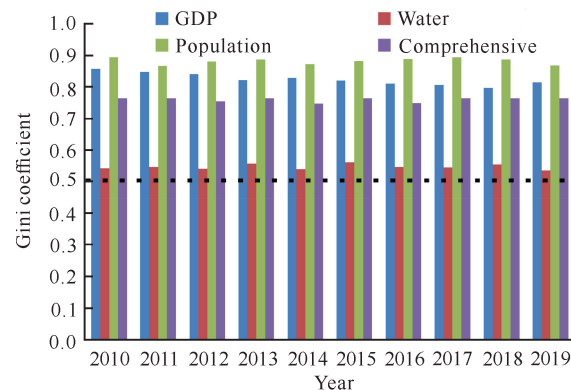


图5 珠江干流4省区2010-2019年绿色贡献系数

Fig. 5 The green contribution coefficient in four provinces of the Pearl River mainstream from 2010 to 2019

的自然资源;人口和水资源量基尼系数表明,4省区的自然资源消耗与人口、水资源量之间的发展关系不对应,说明人口和水资源的空间分布并不是引起自然资源消耗不公平的主导因素;综合基尼系数表明,4省区的人口、经济、水资源量与自然资源消耗量的空间分布不平衡,自然资源分配不合理。因此,需加强省际间经济合作,统筹流域内各要素,推进流域整体发展。



The dashed line indicates that the Gini coefficient is equal to 0.5. The regional difference is large, when the Gini coefficient is over 0.5.

图6 珠江干流4省区2010-2019年基尼系数动态变化

Fig. 6 Changes of the Gini coefficient in four provinces of the Pearl River mainstream from 2010 to 2019

## 2.3 能值生态足迹与经济发展要素空间耦合性分析

应用重心模型、重心距离模型表征珠江干流人口、经济、能值生态足迹的空间聚焦特征,揭示资源要素与经济要素的区域差异性。

以经济、人口为经济发展典型要素,分析其与能值生态足迹的空间耦合关系,结果表明三者重心均处于研究区地理几何中心的东南部,靠近广东;随着时间推进,人口重心有更加偏向广东的趋势,而能值生态足迹重心和经济重心则朝向几何中心偏移(图7)。

能值生态足迹重心、人口重心、经济重心存在空间错位,其中,人口重心与能值生态足迹重心之间的距离较大,年平均距离为 173.00 km,但有整体呈波动递

减的趋势;经济重心与能值生态足迹重心之间的距离较小,年平均距离为 27.60 km,处于稳定态势(图 8)。

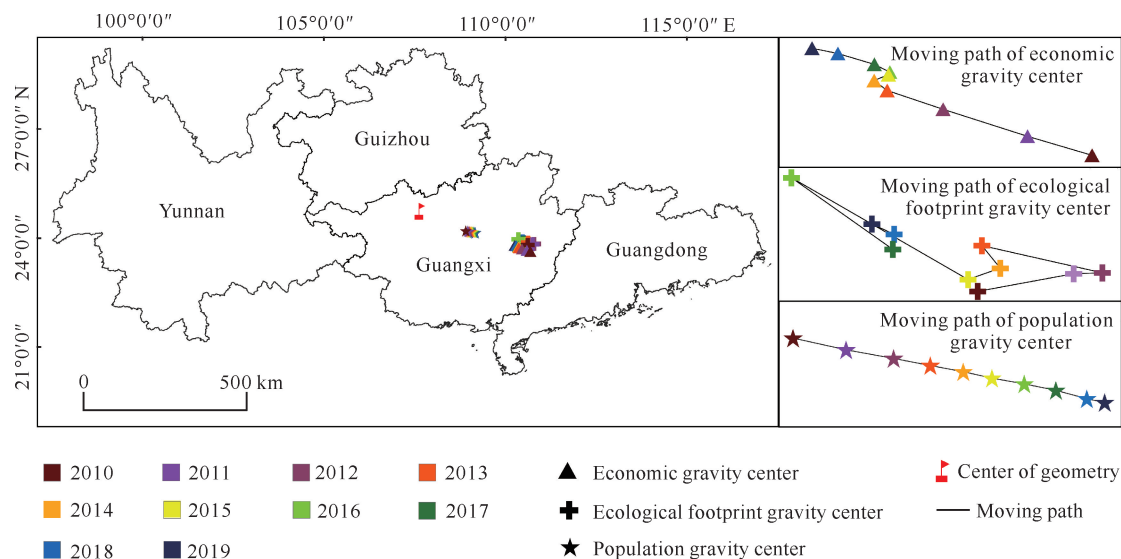


图 7 2010 - 2019 年珠江干流 4 省区人口-经济-资源消耗重心分布及变化

Fig. 7 Distribution and variation of population-economy-resource consumption gravity centers in four provinces of the Pearl River mainstream from 2010 to 2019

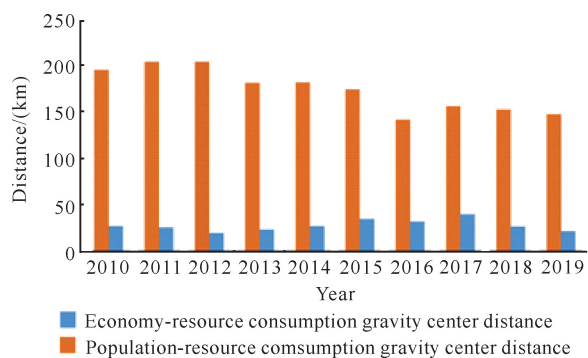


图 8 2010 - 2019 年珠江干流 4 省区人口-足迹及经济-足迹空间重心距离变化

Fig. 8 Variation of population-resource consumption and economy-resource consumption gravity center distance in four provinces in the Pearl River mainstream from 2010 to 2019

## 2.4 区域生态补偿分析

如图 9 所示,2014 - 2019 年,除滇为受偿区外,粤、桂、黔均为补偿区,各省区生态应付金额与社会应付金额均为粤>桂>黔,时间上整体呈增长的趋势,但社会应付金额普遍低于生态应付金额。其中,粤的生态应付金额与社会应付金额年均值分别为 383.32 亿、400.02 亿美元,桂为 88.56 亿、39.84 亿美元,黔为 41.07 亿、18.34 亿美元。滇生态应收金额年均值为 101.58 亿美元,社会应收金额年均值为 47.07 亿

美元。

## 3 讨论

珠江干流 4 省区能值生态承载力、能值生态足迹及其广度、深度时空差异明显,其中,能值生态承载力的空间分布特征为沿河流入海方向依次降低,即滇>黔>桂>粤,能值生态足迹反之,体现了上游生态承载条件优,而下游自然资源消耗大的格局,能值生态足迹广度与深度表明流域上游(滇)尚处于生态盈余,中下游(黔、桂、粤)历年的流量资本均已耗尽,处于生态赤字状态。Yang 等<sup>[52]</sup>的研究结果也表明广东在 2015 年处于生态资源消耗亚安全状态,广西、贵州、云南处于生态安全状态。本文利用能值生态足迹广度和能值生态足迹深度两项指标,更准确地评估了各省区的生态压力差异大小。

珠江干流 4 省区社会经济发展与自然资本占用公平性指标(GCC、基尼系数)也表明各省区社会经济发展与自然资源消耗存在明显差异;人口、经济、能值生态足迹的重心偏向广东且彼此不重叠,更加直观地呈现了 4 省区社会-经济-生态系统发展空间失衡,且区域差异显著。研究结果与珠江干流 4 省区的实际情况一致,4 省区的自然地理环境差异明显,加之受历史基础、社会文化、区域位置、政策等影响,社会经

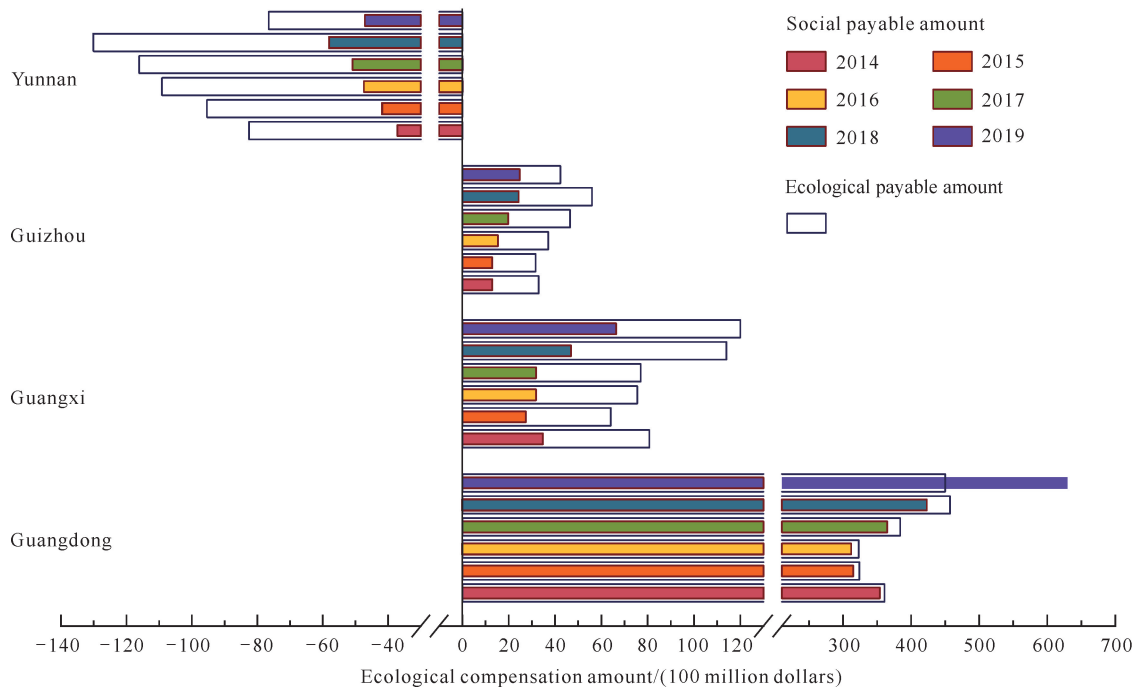


图9 2014-2019年珠江干流4省区生态补偿金额

Fig. 9 Ecological compensation amount in four provinces of the Pearl River mainstream from 2014 to 2019

济发展差异明显,对自然资源的消耗程度各异,滇、黔、桂已演变为粤的发展腹地,为粤的发展提供了资源、人口等经济发展关键要素,地域自然资源配置与消耗格局差异进一步突出<sup>[53]</sup>。

时间尺度上,研究区内地域自然资源配置与消耗空间失衡的状态整体处于波动稳定或加大的趋势,生态足迹深度的时间变化趋势显示,流域中下游地区对自然资源的需求持续强劲,生态保护与社会经济发展之间的矛盾日趋激化。在新时期我国主体功能区划、国土空间规划背景下,各地生态服务提供作用、发展模式不一<sup>[54,55]</sup>,有可能会加剧流域内部社会经济发展与自然资源消耗的空间失衡,不利于流域上下游的协调发展,引发诸多流域性问题<sup>[56]</sup>,而这与我国新时期区域发展战略不符,需要从流域全域发展角度,提高流域社会经济发展、自然资源利用及生态环境保护的协调性<sup>[16]</sup>。

流域生态补偿是解决流域内部生态系统服务供给与经济发展空间失衡的有利措施<sup>[57]</sup>。本文从能值生态经济系统的角度出发,核算了珠江干流4省区的生态应付金额,并结合社会支付意愿指标测得社会应付金额。结果显示,流域上游地区(滇)为生态受偿区,中下游地区为生态补偿区,补偿金额为粤>桂>黔;受偿区云南生态应收与社会应收金额差距较大,表明现实生态补偿的强度往往低于理论上的补偿金

额,不能完全达到流域生态服务供给与收入协调的程度,不利于实现受偿区与补偿区的协调发展<sup>[58,59]</sup>。同时,各省区生态应付金额与社会应付金额持续增加,也进一步表明流域自然资源消耗与社会经济发展空间失衡的加剧。补偿金额还表明黔、桂社会应付金额远小于生态应付金额,体现了其自然资源利用效益低下。本文直观地呈现了滇、黔、桂、粤社会-经济-生态系统发展的空间失衡,其结果与实际具有一致性,所提出的补偿方案及补偿金额考虑了各省区的实际情况,具有一定的现实意义,可为珠江流域的生态补偿、社会生态协调发展提供参考。

#### 4 结论

本文基于能值-三维生态足迹与生态补偿模型,结合绿色贡献系数、基尼系数和重心模型、重心距离模型,探讨珠江流域主要流经省区(滇、黔、粤、桂)自然资源利用情况及其时空差异,并评估流域生态补偿情况,主要结论如下:

① 2010-2019年,珠江干流4省区自然资源利用情况时空差异明显,能值生态足迹及其深度在空间上呈粤>桂>黔>滇的分布格局,表明各省区自然资源消耗为粤>桂>黔>滇,其中,粤、桂、黔能值生态足迹深度均大于1且具有逐渐增加的趋势,表明3省区已处于生态赤字且有加剧的趋势。绿色贡献系数



与基尼系数、重心模型及重心距离模型结果同样也印证了上述结果。

②珠江干流4省区中,除滇为受偿区外,其余3省区均为补偿区,其生态应付金额和社会应付金额的大小均为粤>桂>黔,且整体呈波动上涨的趋势。受经济发展水平影响,除粤能勉强承担其生态应付金额外,桂、黔均难以支付其生态应付金额。

综上,珠江干流4省区自然资源利用整体处于过度消耗状态,社会-经济-生态系统发展空间失衡,流域发展处于不协调状态,同时,生态补偿尚难完全实施,桂、黔无力支付其生态补偿应付金额。新时期,珠江干流4省区应充分发挥主体功能,完善流域生态补偿机制,抑制流域发展失调。

#### 参考文献

- [1] 陆大道,孙东琪.黄河流域的综合治理与可持续发展[J].地理学报,2019,74(12):2431-2436.
- [2] 朱靖,余玉冰,王淑.岷沱江流域水环境治理绩效综合评价方法研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(9):1995-2004.
- [3] 樊厚瑞.基于系统科学视角的长江流域复合生态系统管理[J].学习与实践,2021(10):97-107.
- [4] 牟雪洁,张箫,王夏晖,等.黄河流域生态系统变化评估与保护修复策略研究[J].中国工程科学,2022,24(1):113-121.
- [5] 徐祥民,孙喜雨.流域绿色高质量发展及其环境法保障:“黄河流域发展会议”引发的思考[J].河南大学学报(社会科学版),2022,62(1):35-41,153.
- [6] 段学军,邹辉,王磊.长江经济带建设与发展的体制机制探索[J].地理科学进展,2015,34(11):1377-1387.
- [7] 孙翔,王玢,董战峰.流域生态补偿:理论基础与模式创新[J].改革,2021(8):145-155.
- [8] 刘桂环,王夏晖,文一惠,等.以生态补偿助推新时期流域上下游高质量发展[J].环境保护,2019,47(21):11-15.
- [9] 任俊霖,匡洋.长江经济带流域横向生态补偿进展、困境与优化路径[J/OL].长江科学院院报,2022:1-8(2022-09-02)[2022-09-29].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20220901.1647.035.html>.
- [10] 肖池伟,刘影,李鹏.赣江流域生态经济价值与生态补偿研究[J].地域研究与开发,2016,35(3):133-138.
- [11] 谢慧明,俞梦绮,沈满洪.国内水生态补偿财政资金运作模式研究:资金流向与补偿要素视角[J].中国地质大学学报(社会科学版),2016,16(5):30-41.
- [12] 强安丰,汪妮,雒少江,等.基于成本视角的水质水量双向调节生态补偿量研究[J].水土保持通报,2022,42(2):144-149.
- [13] 景守武,张捷.新安江流域横向生态补偿降低水污染强度了吗?[J].中国人口·资源与环境,2018,28(10):152-159.
- [14] 郑云辰,葛颜祥,接玉梅,等.流域多元化生态补偿分析框架:补偿主体视角[J].中国人口·资源与环境,2019,29(7):131-139.
- [15] 钞小静,周文慧.黄河流域高质量发展的现代化治理体系构建[J].经济问题,2020(11):1-7.
- [16] 杜林远,许莹莹,高红贵.流域生态补偿综合效益评估:以湘江流域为例[J].统计与决策,2022,38(16):77-81.
- [17] LIU M C,BAI Y X,SU B R. Analysis of the hotspots of ecological compensation research in China in the past 20 years based on a bibliometric study [J]. Journal of Resources and Ecology,2022,13(1):80-92.
- [18] 秦艳红,康慕谊.基于机会成本的农户参与生态建设的补偿标准:以吴起县农户参与退耕还林为例[J].中国人口·资源与环境,2011,21(S2):65-68.
- [19] GAO X,SHEN J,HE W J,et al. Changes in ecosystem services value and establishment of watershed ecological compensation standards [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2019,16(16):2951.
- [20] FU Y C,CUI X Y,ZHAO J Y,et al. Estimation of ecological compensation standard based on ecological service value calculation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2021,647:012161.
- [21] LIU J M,CHEN H B,HOU X H,et al. Time to adopt a context-specific and market-based compensation scheme for a new round of the Grain for Green Program [J]. Land Use Policy,2021,108:105675.
- [22] 杨莉,乔光华.基于牧民受偿意愿的生态保护红线区草原生态补偿标准研究[J].干旱区资源与环境,2021,35(11):55-60.
- [23] REN Y S,LU L,ZHANG H M,et al. Residents' willingness to pay for ecosystem services and its influencing factors: a study of the Xin'an River basin [J]. Journal of Cleaner Production,2020,268:122301.
- [24] 王怀毅,李忠魁,俞燕琴.中国生态补偿:理论与研究述评[J].生态经济,2022,38(3):164-170.
- [25] 刘春腊,刘卫东.中国生态补偿的省域差异及影响因素分析[J].自然资源学报,2014,29(7):1091-1104.
- [26] 靳相木,柳乾坤.基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究:以温州市为例[J].生态学报,2017,37(9):2982-2993.
- [27] 方恺,REINOUT H.自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展[J].地理科学进展,2012,31(12):1700-

- 1707.
- [28] 杨一畅, 卢宏伟, 梁东哲, 等. 基于三维生态足迹模型的长江中游城市群平衡性分析与生态补偿研究[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9011-9022.
- [29] 钱凤魁, 徐欢, 逢然然, 等. 基于三维生态足迹模型辽宁省耕地生态补偿额度估算分析[J/OL]. 中国农业资源与区划, 2022: 1-5 (2022-06-24) [2022-09-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20220623.1504.013.html>.
- [30] 国家发展和改革委员会. 全国及各地区主体功能区规划[M]. 北京: 人民出版社, 2015.
- [31] 国家林业和草原局. 中国·岩溶地区石漠化状况公报[N/OL]. 中国绿色时报, 2018-12-14 [2022-09-29]. <https://www.forestry.gov.cn/main/195/20181214/104340783851386.html>.
- [32] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [33] 孙东林, 刘圣, 姚成, 等. 用能值分析理论修改生物承载力的计算方法: 以苏北互花米草生态系统为例[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2007(5): 501-508.
- [34] 李双成, 傅小锋, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析[J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 297-304.
- [35] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2019.
- [36] 云南省统计局. 云南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2019.
- [37] 贵州省统计局, 国家统计局贵州调查总队. 贵州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2019.
- [38] 广西壮族自治区统计局. 广西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2019.
- [39] 广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2019.
- [40] 国家统计局. 国家统计数据[EB/OL]. [2022-09-29]. <http://www.stats.gov.cn/>.
- [41] 杨灿, 朱玉林. 基于能值生态足迹改进模型的湖南省生态赤字研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(7): 37-45.
- [42] 易其国, 陈慧婷. 基于能值生态足迹和生态效率的贵州省可持续发展评价[J]. 生态经济, 2021, 37(4): 170-176.
- [43] NICCOLUCCI V, BASTIANONI S, TIEZZI E, et al. How deep is the footprint? A 3D representation [J]. Ecological Modelling, 2009, 220: 2819-2823.
- [44] 方恺, 高凯, 李焕承. 基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较[J]. 地理研究, 2013, 32(9): 1657-1667.
- [45] ZHAO S, LI Z Z, LI W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application [J]. Ecological Modelling, 2005, 185: 65-75.
- [46] WACKERNAGEL M. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: a tool for planning toward sustainability [D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1994.
- [47] 王金南, 逯元堂, 周劲松, 等. 基于 GDP 的中国资源环境基尼系数分析[J]. 中国环境科学, 2006(1): 111-115.
- [48] 徐建华, 岳文泽. 近 20 年来中国人口重心与经济重心的演变及其对比分析[J]. 地理科学, 2001(5): 385-389.
- [49] LEI K, ZHOU S, WANG Z. Ecological emery accounting for a limited system: general principles and a case study of Macao [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [50] ODUM H T. Environmental accounting: emery and environmental decision making [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [51] 周美玲, 冯秀丽, 刘恺恺, 等. 绿色空间与经济发展典型要素时空匹配性研究: 以浙江省为例[J]. 中国土地科学, 2021, 35(3): 107-114.
- [52] YANG Q, LIU G Y, HAO Y, et al. Quantitative analysis of the dynamic changes of ecological security in the provinces of China through emery-ecological footprint hybrid indicators [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184: 678-695.
- [53] 陈品宇, 李鲁奇. 区域建构: 佛山融入粤港澳大湾区建设的政策和策略响应[J]. 热带地理, 2019, 39(5): 625-634.
- [54] 樊杰. 中国主体功能区划方案[J]. 地理学报, 2015, 70(2): 186-201.
- [55] 陈明星, 梁龙武, 王振波, 等. 美丽中国与国土空间规划关系的地理学思考[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2467-2481.
- [56] 章光新, 陈月庆, 吴燕锋. 基于生态水文调控的流域综合管理研究综述[J]. 地理科学, 2019, 39(7): 1191-1198.
- [57] 任以胜, 陆林, 虞虎, 等. 尺度政治视角下的新安江流域生态补偿政府主体博弈[J]. 地理学报, 2020, 75(8): 1667-1679.
- [58] 李国平, 郭江. 能源资源富集区生态环境治理问题研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(7): 42-48.
- [59] 杨兰, 胡淑恒. 基于动态测算模型的跨界生态补偿标准: 以新安江流域为例[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 5957-5967.

# Resource Utilization Analysis and Ecological Compensation Study of Four Provinces in the Mainstream of Pearl River Based on the Three-Dimensional Emergy Ecological Footprint Model

LIU Luyao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jianbing<sup>1,2,3\*\*</sup>, GONG Huiqin<sup>1,2,3</sup>, GUANG Jiakai<sup>1,2,3</sup>, HUANG Lipai<sup>1,2,3</sup>, HU Baoqing<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China; 3. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China)

**Abstract:** The research on the spatial and temporal pattern of resource utilization, the coordination between natural resource consumption and economic development, and ecological compensation in the Pearl River Basin was carried out, which was helpful to reveal the internal resource consumption pattern, ecological compensation area and compensation area in the Pearl River Basin, and promote the coordinated development of the whole basin and the unified protection and management of the ecological environment. Based on the emergy-three-dimensional ecological footprint model, this article calculated the emergy ecological footprint and emergy ecological carrying capacity of four provinces (Yunnan, Guizhou, Guangxi, Guangdong) in the Pearl River mainstream from 2010 to 2019. The coordination between natural resource consumption and economic development in four provinces was evaluated by combining green contribution coefficient, Gini coefficient and gravity center model. Combined with the ecological compensation model, the amount of ecological compensation payable and social compensation payable in each province is calculated. Results showed that: ① From 2010 to 2019, the emergy ecological carrying capacity of four provinces in the mainstream of Pearl River was Yunnan > Guizhou > Guangxi > Guangdong, but the degree of resource consumption (emergy ecological footprint) was the opposite. At the same time, the footprint depth of the downstream areas (Guizhou, Guangxi and Guangdong) was greater than 1, showing an ecological deficit and unsustainable state. ② The comprehensive Gini coefficient of emergy ecological footprint in the basin was more than 0.5, and the green contribution coefficient of Guangxi and Guizhou was less than 1. The economic, population, and energy ecological footprint gravity centers were all biased towards the downstream Guangdong, indicating that the resource utilization and social and economic development in the basin were spatially unbalanced and need to be adjusted through ecological compensation. ③ From 2014 to 2019, Guangdong, Guangxi, and Guizhou were the compensation areas except Yunnan, and the compensation amount was Guangdong > Guangxi > Guizhou, and the compensation and recompense amount showed an increasing trend year by year. Due to the limitation of the social payment ability, the social payables in the compensation areas of Guangxi and Guizhou were lower than the ecological payables. The Pearl River Basin should accelerate the improvement of resource utilization efficiency and form an ecological compensation mechanism to restrain the excessive utilization of resources, the ecological deficit and the further imbalance of social and economic development, so as to achieve the goal of coordinated development and ecological harmony in the new period.

**Key words:** three-dimensional emergy ecological footprint model; distribution of natural resources; resource use efficiency; spatiotemporal pattern; ecological compensation