

DOI: 10.20103/j.stxb.202308041667

刘畅,渠鸿娇,郭砾.山水林田湖草沙生命共同体理念下社会-生态系统时空耦合及模拟预测.生态学报,2024,44(7):2745-2760.

You C., Qu H J., Guo L. Spatio-temporal coupling and prediction of social-ecological systems under the “concept of life community of mountains, water, forests, fields, lakes, grasses, and sands”. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(7): 2745-2760.

山水林田湖草沙生命共同体理念下社会-生态系统时空耦合及模拟预测

油 畅¹, 渠鸿娇¹, 郭 砾^{2,*}

1 中央民族大学民族学与社会学学院, 北京 100081

2 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081

摘要: 社会-生态系统 (SES) 耦合关系的研究可以更全面地理解人类活动对生态系统的影响, 从而制定更合理的环境保护政策。将“山水林田湖草沙生命共同体理念”融入这一关系中, 探究社会-生态系统间的时空耦合, 可以促进社会-生态系统各要素的可持续利用和管理, 并填补现有研究的空缺。赣州市拥有丰富的自然资源属于中国南方丘陵山地典型的生态区域, 包涵山水林田湖草沙的各要素。以赣州市为例, 分析 2005—2020 年社会-生态系统综合评估指标的演变规律, 旨在深入了解社会-生态系统的复杂性, 为其管理和保护提供科学依据。结果表明: (1) 社会-生态系统框架中存在着系统间的耦合逻辑。主要体现在社会系统与资源系统的耦合、资源系统与生态系统的耦合、社会系统与生态系统的耦合三个方面。(2) 2005—2020 年, 社会-生态系统综合评估指标在赣州市的中西部和东北部较高, 在南部较低。中西部区域社会-生态系统呈现中、高耦合的格局, 西部表现为失调。东南部多呈现低耦合格局。(3) 2005—2030 年基于 SES 框架的山、田、湖、治理、社会系统综合评估指数均呈现增长的变化趋势。水、林、草、行动者系统综合评估指数呈下降的变化趋势。基于社会-生态系统框架研究各系统间的耦合格局及其评估指数的模拟预测, 对于深入理解社会-生态系统的内在机理、制定相关政策和管理措施、预防和应对生态灾害及推动可持续发展具有重要意义。

关键词: 社会-生态系统; 时空耦合; GM 预测

Spatio-temporal coupling and prediction of social-ecological systems under the “concept of life community of mountains, water, forests, fields, lakes, grasses, and sands”

YOU Chang¹, QU Hongjiao¹, GUO Luo^{2,*}

1 School of Ethnology and sociology, Minzu University of China, Beijing 100081, China

2 College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China

Abstract: The study of coupled social-ecological system (SES) relationship can lead to a more comprehensive understanding of the impacts of human activities on ecosystems, and thus to the formulation more rational environmental protection policies. Incorporating the “community of life in mountains, water, forests, fields, lakes, grasses, and sands” into this relationship and exploring the spatial and temporal coupling between SES can promote the sustainable use and management of SES elements and fill the gaps in existing research. Ganzhou City is rich in natural resources belonging to the most typical ecological region of southern China’s hilly and mountainous areas, encompassing all system elements of mountains, water, forests, fields, lakes, grasses, and sands. Taking Ganzhou as an example, this paper analysed the

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2022YFF1303001); 中央民族大学研究生科研实践项目资助

收稿日期: 2023-08-04; **网络出版日期:** 2024-01-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoluo@muc.edu.cn

evolution patterns of social-ecological system assessment indicators from 2005 to 2020, aiming to gain an in-depth understanding of the complexity of social-ecological systems and provide a scientific basis for their management and protection. The results show that (1) there is an inter-system coupling logic in the social-ecological framework. It is mainly reflected in three aspects: the coupling between social system and resource system, the coupling between resource system and ecosystem, and the coupling between social system and ecosystem. (2) From 2005 to 2020, the social-ecological system assessment indicators were higher in the central-western and northeastern Ganzhou, and lower in the southern Ganzhou. The social-ecological systems in the mid-western region showed a pattern of medium and high coupling, with the west showing inter-system dissonance. The southeastern part mostly showed a low inter-system coupling pattern. (3) The integrated assessment indices of mountain, field, lake, governance, and social systems based on the SES framework showed an increasing evolutionary trend from 2005 to 2030. The integrated assessment indices of water, forest, grass, and actor systems showed a decreasing evolutionary trend. The study of the coupling pattern among the systems and the simulation prediction of their assessment indices based on the SES framework is of great significance for the in-depth understanding of the intrinsic mechanism of social-ecological systems, the formulation of relevant policies and management measures, the prevention of and response to ecological disasters and the promotion of sustainable development.

Key Words: social-ecological system; spatio-temporal coupling; GM Prediction

在面对日益严峻的生态环境问题时,必须认识到生态系统管理的重要性。而传统的管理方式往往更重视经济效益而忽视了生态系统的平衡和可持续发展^[1-3]。因此,需要探索出一种基于社会-生态系统理论的管理方式。Ostrom 创立的社会-生态系统(Social-Ecological System, SES)理论分析框架为解决生态系统管理问题提出了理论指导^[4-6]。该理论框架包括资源系统、资源单位、管理系统、用户等核心子系统,具有很强的解释、诊断与解决问题功能,已成为生态环境问题治理的强有力工具^[7-8]。

社会-生态系统理论框架在很多研究领域受到广泛关注^[9-10]。Rosenschold 等应用 SES 框架评价了美国科罗拉多州河流流域不同治理策略对水资源和生态系统服务的影响,并为未来的管理和规划提供了指导^[11]。Taghilou 等使用 SES 框架在中国小流域开展调研,研究不同管理措施对水资源和生态系统服务的影响,并分析了决策制定者、社区和专业管理者之间的权力关系^[12]。Fernandes 等基于 SES 框架,探讨了城市公园管理对生态系统服务供给的影响,并提出了政策建议,以促进城市公园的可持续发展和生态系统服务的提供^[13]。

社会-生态系统(SES)框架是一种分析和理解社会-生态系统相互作用关系的工具。框架指出人类社会与周围的自然环境之间存在着复杂的相互依赖和相互作用。在 SES 框架中,社会系统和生态系统被视为相互联系的整体。社会系统由人类社会、机构和决策者组成,生态系统则由物理环境和生态过程组成。这两个系统之间存在着相互作用和反馈关系,社会行为和决策会对生态系统产生影响,同时生态系统的变化也会反过来影响社会行为和决策。SES 框架强调了人类社会对于生态系统的影响和依赖,并呼吁通过合作、共享责任和适应性管理来保护生态系统的可持续性^[14-18]。本文将“山水林田湖草沙生命共同体理念”融入 SES 研究框架展开耦合关系的研究。在生态学领域,耦合主要用于描述生态系统内部不同组分之间的相互作用与联系^[19]。耦合关系代表了生态系统中各个组分之间的相互依赖程度^[20]。关于生态系统中的耦合学者们针对不同问题做出了总结。有学者指出耦合是生态系统稳定性和可持续性的关键因素^[21]。并进一步探讨了耦合性、复杂性和不确定性在生态系统管理中的作用,并提出耦合管理的原则^[22]。有学者探讨了人口和土地利用变化之间的耦合动态对生物多样性热点的影响^[23]。学者们也尝试在机理层面对生态系统的耦合关系进行探讨。例如研究物质元素在生态系统中的循环和相关耦合^[24];探究生态系统各个组分之间的动态变化调节机制,包括生态系统的正向和负向反馈机制,以及这些反馈对生态系统稳定性和转变过程的影响^[25]。

山、水、林、田、湖、草、沙是生态系统的核心要素,它们相互关联、相互依存,构成了复杂的生态系统^[26-28]。这些要素不仅提供了物质上的服务(如水资源、食品等),也提供了非物质上的服务(如文化遗产、美景欣赏等)。把山、水、林、田、湖、草、沙单独提出来,是为了从整体上思考和推动生态文明建设^[29-31]。这七大元素

是生态系统中的关键要素,也是生态系统健康与平衡的基础^[32]。其中水是生态系统中的基本要素,它是生物生存和繁衍的基础。而湖作为水体的一种形态,具有独特的特点和功能,有自己的生态系统和生物多样性。将水和湖单独提出来,可以有侧重地保护和管理水资源,推动不同类型水资源的有效治理。生态系统要素是生态系统中至关重要的组成部分,它们不仅为人类提供自然资源和环境服务,同时也是维持地球生命支撑系统的重要因素^[33]。因此,对这些要素的研究一直是生态学、环境科学和社会科学等领域的热点问题。针对山、水、林、田、湖、草、沙等系统的特征和功能,各种研究方法被广泛应用。常见的研究方法包括生态系统价值评估、生态系统服务可视化、生态系统服务分类和定量评估等。然而,现有方法对于复杂生态系统的预测和模拟能力相对较弱。引入新的方法和技术以弥补现有方法的不足变得非常必要。灰色预测(GM)模型可以有效地解决社会生态系统评估指标模拟预测的问题。GM模型可以获得更准确和可靠的预测结果,同时具有数据驱动性和可扩展性^[34]。GM模型可以分析历史数据来预测未来的生态系统服务价值,进而提供管理决策支持。Wang等利用GM模型对北方邦地区的洪水风险进行了预测,并根据模型结果提出了相应的防灾建议^[35]。Li等利用GM模型对水文数据进行了预测,并提出了相应的水资源管理建议^[36]。

基于此,本文以南方丘陵山区典型区域-赣州市为例,对社会-生态系统进行评价与耦合关系的研究,在分析社会-生态系统评估指标演变规律的基础上,运用GM模型对社会-生态系统评估指标的演变趋势进行预测。旨在为类似区域的生态环境保护和可持续发展提供科学决策支持,为中国生态建设和可持续发展提供有益探索。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

赣州市位于江西省中部,地理坐标为 $115^{\circ}25'58''$ — $117^{\circ}20'47''$ 东经和 $24^{\circ}26'27''$ — $28^{\circ}56'04''$ 北纬。赣州市地形起伏,多山地、丘陵、平原和河谷等多种地貌类型,是中国南方著名的“五岭之一、四水环绕”的地区(图1)。赣州市属于亚热带季风气候,年平均气温为 16 — 19°C ,年降雨量在 1300 — 1900 mm 之间。赣州市拥

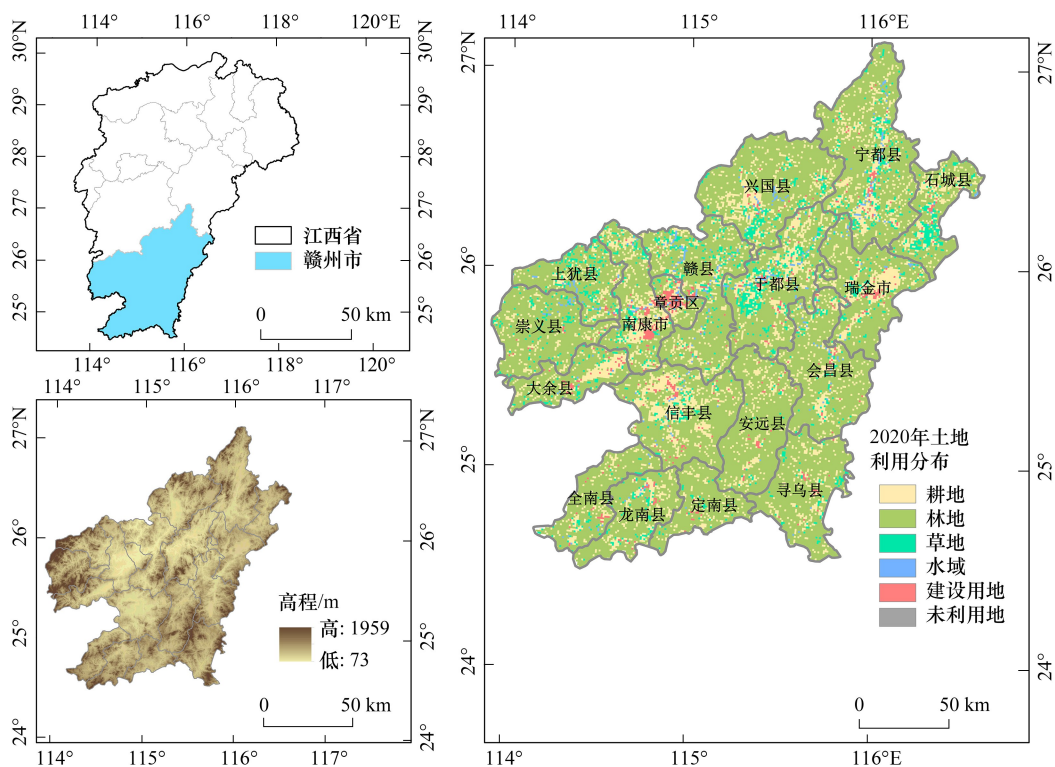


图1 研究区域概况

Fig.1 Overview of study area

有得天独厚的自然资源和生态优势,其中包括森林资源、水资源、土壤资源、动植物资源等^[37]。同时,赣州市也是一个历史文化名城,具有深厚的历史底蕴和文化遗产。社会经济发展迅速,已逐渐成为南方丘陵山区的重要城市^[38]。赣州市的独特地理位置、自然资源和社会经济条件,以及生态系统要素-山水林田湖草沙的丰富性,使其成为理想的研究区域^[39]。研究赣州市社会生态系统之间的耦合关系和其评估指标的模拟预测,对于深入了解南方丘陵山区的生态环境状况,积极推进生态文明建设和可持续发展具有重要意义。

1.2 数据来源与处理

本研究需要的数据包括:(1)SES 框架的各要素评价指标主要来源于《中国县域统计年鉴》,缺失数据由相应年份的《江西统计年鉴》、《赣州统计年鉴》补充。(2)气象数据来自于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)。DEM 数据主要来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。土壤质地数据源自寒旱区科学大数据中心(<http://bdc.casnw.net/index.shtml>)。潜在蒸散量数据源自《全球干旱指数和潜在蒸散(ET₀)气候数据库 v2》(<https://figshare.com/>)。(3)土地利用数据、NDVI、NPP、人口密度栅格数据、GDP 栅格数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。上述栅格数据集的空间分辨率均统一为 100m。

1.3 研究方法

1.3.1 基于“山水林田湖草沙生命共同体理念”的 SES 分析框架

SES 框架已成为目前研究社会-生态系统关系应用最广泛的概念框架^[40]。共包含四个核心系统:资源系统(RS)、资源单位(RU)、治理系统(GS)和行动者(A)。在治理系统的约束下,行动者会展开一系列互动过程(I)并产生一系列结果,从而对系统产生反馈。此外,该框架还包括社会、经济、政治背景(S)和生态系统(ECO)两个宏观背景变量^[41-44]。

将“山水林田湖草沙生命共同体”融入社会-生态系统分析框架。水和林是地球上最重要的生态系统之一,水资源支撑着农业、工业和城市的发展,是许多生物群落赖以生存的最基本要素之一。森林不仅拥有庞大的生物量,且提供了许多重要的生态系统服务,如氧气产生、水资源调节、土壤保持和碳储存等。生态系统中的水和林是资源单位赖以生存的基础。例如农民需要水来灌溉农田,牧民需要森林提供草和饲料。湖、草、沙作为资源单位,不仅受生态系统的影响,同时对资源系统的供应和可持续利用也起到了重要作用。湖泊负担了许多生态功能,例如调节水文循环、提供洪水容量、维护水质等,这些功能对山地的水源管理和田地的灌溉至关重要。草地具有保持山地土壤结构稳定、防止水土流失和保护水源的关键作用。沙地则在农田中起到了保持土壤肥力、改善排水和调节气候的作用。基于“山水林田湖草沙生命共同体”的 SES 框架如下。

1.3.2 社会-生态系统及子系统评估指数的计算

在 SES 多要素耦合评价指标体系中(图 3),生态系统和社会系统做为宏观的核心系统相互作用、影响,为资源系统和治理系统提供能量和信息基础。资源系统

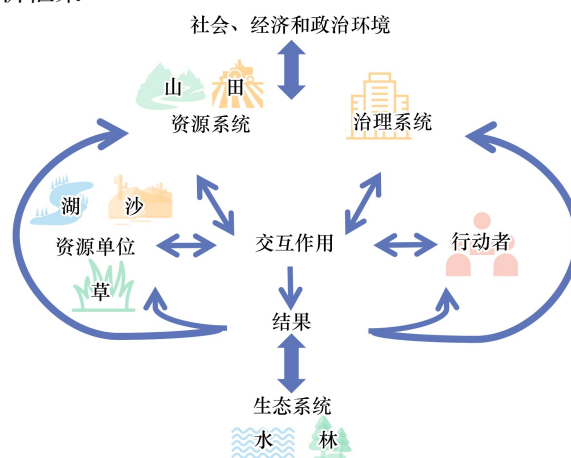


图2 SES 互动分析框架^[45]

Fig.2 Framework for analyzing the principles of SES interaction

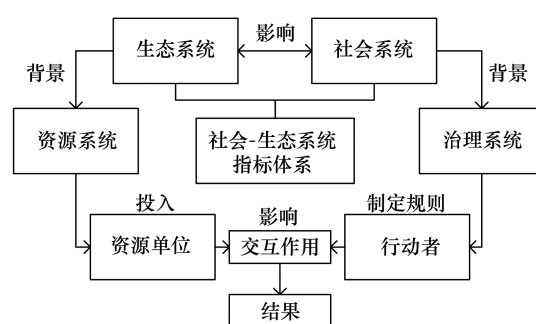


图3 基于SES框架的评价指标体系

Fig.3 Evaluation index system based on SES framework

进一步为资源单位提供物质输入,治理系统制定规则,规范行动者的行为。资源单位和行动者两个系统交互作用,对社会生态系统格局产生影响^[46]。将水、林、山、田、湖、草、沙分别做为 SES 子系统。各个子系统均包含在复杂 SES 系统之中,其评估指标的选取应该遵循全面性,综合性,典型性的原则。

基于 SES 框架与前人的研究^[47-49]。在指标层(表 1)共选取 25 个指标来分别表征子系统层的水、林、山、田、湖、草、沙以及系统层的社会、治理和行动者。在子系统层,水土流失面积是反映土地资源管理的重要指标。污水处理率可以衡量社会对水质保护的努力和成效。而年产水量可以反映社会对水资源的利用情况和需求水平。森林覆盖率是评估林地资源的重要指标之一。退耕还林面积可以表示地区对森林资源保护和生态修复的重视程度。而林业产值可以体现林业活动所创造的经济价值。山地面积的大小直接反映了山地在整个地区的分布和占比情况。地形起伏度决定了山地相关自然资源的分布和利用条件。通过沟壑密度可以了解山地的地表侵蚀严重程度。较高的农作物与经济作物面积比值通常意味着农田的经济效益较高,农业产业结构合理。耕地面积的大小直接决定了农作物的种植规模和农业产出。河湖面积的大小反映了水生态系统的规模和水文循环的强弱。河流径流量的大小直接反映了水资源的充足程度。归一化植被指数(NDVI)反映了植物生长的繁盛程度。植被净初级生产力(NPP)是评估草地生态系统功能和生产能力的指标。草地面积通常能反映人类对草地资源的需求。氮磷总含量能反映土壤中氮、磷元素的丰富程度。土壤平均 pH 值对土壤养分的有效性、微生物活性都有直接影响。土壤沙化面积能直接反映土壤中的沙粒含量。

表 1 社会-生态系统的评估指标体系
Table 1 SES assessment indicator system

目标层 Target layer	系统层 System layer	子系统层 Subsystem layer	指标层 Indicator layer
SES 多要素耦合评价指标体系 social-ecological system multi-factor coupled evaluation index system	生态系统	水	水土流失面积/km ²
			污水处理率/%
			年产水量/万 t
	资源系统	林	森林覆盖率/%
			退耕还林面积/hm ²
			林业产值/万元
		山	山地面积/km ²
			平均地形起伏度/m
	资源单位	田	沟壑密度/(km/km ²)
			农作物与经济作物面积比值
			耕地面积/hm ²
		湖	河湖面积/km ²
			河流总径流量/亿 m ³
		草	草地总面积/km ²
			归一化植被指数 NDVI
			植被净初级生产力 NPP/(g m ⁻² a ⁻¹)
		沙	土壤沙化面积/km ²
			土壤平均 pH 值
			氮磷总含量/(mg/kg)
	社会系统		GDP 总量/万元
	治理系统		人口密度人/km ²
			年均财政支出/万元
	行动者		全社会固定资产投资/万元
			废气中烟尘排放量/(t/a)
			全社会用电量/万 kWh

在系统层选择 GDP 总量和人口密度作为社会系统的代表指标有助于分析和比较不同地区之间的经济发展水平、社会资源利用情况和人口情况。这些指标对于制定经济政策、资源规划和社会发展具有重要意义。年均财政支出可以反映政府在一年内用于开展各项工作的资金投入。进而判断政府对人民生活水平提高和社会发展的支持程度。全社会固定资产投资可以反映经济体系中企业和政府对物质和技术基础设施的建设投资。废气中烟尘排放量是衡量行动者对环境的污染程度的重要指标。全社会用电量可以反映行动者在生产和生活过程中对能源的消耗程度。

运用极值法对指标层的数据进行标准化处理,熵权法计算指标权重,将标准化后的指标层数据与对应的指标权重系数相乘并加总,得到子系统层,即水、林、山、田、湖、草、沙,与系统层社会、治理和行动者的综合指数^[50]。

社会-生态系统及子系统综合评估指数的计算公式如下^[51]:

$$P_{ij} = (X_{ij} - \min(X_{ij})) / (\max(X_i) - \min(X_i)) \quad (1)$$

$$P_{ij} = (\max(X_{ij}) - X_{ij}) / (\max(X_i) - \min(X_i)) \quad (2)$$

$$e_i = -k \sum_{j=1}^n Z_{ij} \ln Z_{ij}, k = 1/\ln 16, Z_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sum_{i=1}^n P_{ij}} \quad (3)$$

$$h_i = 1 - e_i, W_i = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, 0 < W_i < 1, \sum W_i = 1 \quad (4)$$

$$H_j = \sum W_i P_{ij} \quad (5)$$

公式(1)、(2)分别为正向和负向指标的标准化公式, i 和 j 分别为指标行列次序, $\min(X_i)$ 和 $\max(X_i)$ 分别为指标的最小值和最大值, P_{ij} 为标准化后的数值。公式(3)中, e_i 为熵权法计算出的熵值。公式(4)中 W_i 为指标权重系数。公式(5)中 H_j 为社会-生态系统及子系统的综合评估指数。

1.3.3 社会-生态系统的综合评价

利用熵权法计算各个指标权重^[52],根据公式(5)计算出的山、水、林、田、湖、草、沙子系统层与社会、治理、行动者系统层的评估指数,用 TOPSIS 模型进一步计算,得到社会-生态系统的综合评价指数^[53]。计算公式如下:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}w_1 & Z_{12}w_1 & \cdots & Z_{1n}w_1 \\ Z_{21}w_2 & Z_{22}w_2 & \cdots & Z_{2n}w_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{m1}w_m & Z_{m2}w_m & \cdots & Z_{mn}w_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Z^+ = \left\{ \begin{matrix} \max z_{ij} \\ 1 \leq j \leq m \end{matrix} \mid j = 1, 2, \cdots, m \right\} = \{z_1^+, z_2^+, \cdots, z_m^+\} \quad (7)$$

$$Z^- = \left\{ \begin{matrix} \min z_{ij} \\ 1 \leq j \leq m \end{matrix} \mid j = 1, 2, \cdots, m \right\} = \{z_1^-, z_2^-, \cdots, z_m^-\} \quad (8)$$

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad (9)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (10)$$

$$C_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (11)$$

式(6)中, Z 为加权决策矩阵, Z_{mn} 为标准化后第 m 行第 n 列数值。 w_m 为熵权法计算出的指标权重。其中 $i = 1, 2, \cdots, n$; $j = 1, 2, \cdots, m$ 。式(7)和式(8)中, Z^+ :指标最优值, Z^- :指标最劣值。 D_j^+ :每个年份的指标向量

到最好值的差距, D_j^- : 到最差值的差距。 C_j 为社会-生态系统综合评价得分。

1.3.4 耦合协调度模型

基于公式(5)计算得到的山、水、林、田、湖、草、沙子系统层和社会、治理、行动者系统层的评估指数, 运用耦合协调度模型计算系统间的耦合协调度, 将计算结果运用自然断点法划分为四个等级, 分别为失调(0.0—0.3)、低耦合(0.3—0.4)、中耦合(0.4—0.5)、高耦合(0.5—1.0)^[54—56]。耦合协调度模型的计算公式如下:

$$C_n = \{U_1 U_2 \cdots U_n / \sum_{i=1}^n U_i\}^{1/n} \quad (12)$$

$$T_c = \partial U_h + \beta U_p + \delta U_a + \varepsilon U_m, D_c = \sqrt{C_c T_c} \quad (13)$$

C_n 表示多个系统间的耦合度, U_i 代表各系统和子系统的综合发展水平。 T_c 为各系统和子系统的评估指数。 D_c 为系统间的耦合协调度, 取值范围为[0, 1], 本研究中 $\partial = \beta = 0.5$ 。

系统动力学将系统视为一个整体, 并通过建立因果回路图、设计仿真模型和构建变量间的数学方程来模拟复杂系统的动态变化过程^[57—58]。本研究初步构建了基于“山水林田湖草沙生命共同体理念”的社会-生态系统动力学因果回路图, 用于模拟社会-生态系统内部各系统之间的复杂耦合关系。

1.3.5 社会-生态系统及子系统评估指数的 GM 动态预测

GM 预测的基本逻辑是通过对原始数据进行累加生成新的数据序列, 拟合得到一个一阶线性常微分方程, 最后利用该方程进行预测。将 2005—2020 年山、水、林、田、湖、草、沙子系统和社会、治理、行动者系统的综合评估指数作为原始序列输入模型, 输出 2030 年山、水、林、田、湖、草、沙子系统和社会、治理、行动者系统的综合评估指数。模型精度检验见表 2, 计算公式如下^[59]:

$$(1) \text{ 假设非负原始序列为: } X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \cdots, x^{(0)}(n)\} \quad (14)$$

$$(2) \text{ 对 } X^{(0)} \text{ 做一次累加, 生成数列: } X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \cdots, x^{(1)}(n)\} \quad (15)$$

$$(3) x^{(0)}(k) \text{ 的 GM}(1,1) \text{ 微分方程为: } \frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u, \text{ 其中 } a, u \text{ 为待定参数。} \quad (16)$$

$$(4) \text{ 将(3)离散化, 简化为: } Y = B\delta, \text{ 其中 } \delta = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{u} \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (17)$$

(5) 把(4)求取的参数带入(3), 得到灰色预测计算公式:

$$(6) \hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) = (1 - e^{\hat{a}}) \left[x^{(1)}(1) - \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \right] e^{-\hat{a}k} \quad (18)$$

表 2 GM 模型精度检验参照表

Table 2 GM model accuracy test reference table

模型精度等级 Model accuracy class	均方差比值 C Mean Square Ratio C	小概率误差 P Small probability error P
优秀 Excellence	$C \leq 0.35$	$0.95 \leq P$
合格 Eligible	$0.35 < C \leq 0.65$	$0.70 \leq P < 0.95$
不合格 Unqualified	$0.65 < C$	$P < 0.70$

2 研究结果

2.1 社会-生态系统及子系统评估指数的时空变化

基于 SES 框架, 运用综合评价模型计算, 得出赣州市社会-生态系统及子系统评估指标的综合指数变化见图 4。2005—2020 年, 子系统山的评估指数在赣州市东北部的宁都县和瑞金市始终最高, 在西部的南康区始终最低, 西南部的崇义县、龙南县、安远县有微增的趋势, 信丰县呈现先增, 后减再增加的趋势, 其它区域无明显变化。2005—2020 年, 子系统水的评估指数在赣州市西南部的南康区、章贡区、赣县均呈现由低值到高值逐年增加的趋势, 在东部的宁都县、会昌县和安远县以及南部的定南县也呈现由低值到中值微增的趋势, 在东

部的瑞金市呈现先增后减的趋势。子系统林的评估指数在赣州市的北部-中部-南部均有明显的高值区域,这表明赣州市的森林资源较为富集。2005—2020 年,林的评估指数在赣州市北部的宁都县呈现先增加后微减的趋势,在中部的章贡区和会昌县有逐年减少的趋势,在东南部的其它区域均呈现逐年增加的特征。子系统田的评估指数在赣州市整体呈现西南部高值聚集,东部和西部低值聚集的特征,南部和北部整体处在中高值的范围。2005—2020 年,子系统田的评估指数只在东南部的安远县呈现逐年微减的趋势,在其它区域无明显变化特征。子系统湖的评估指数在赣州市北部的宁都县和中西部的赣县最高,表明这些区域的湖泊资源丰富。在章贡区、东部的瑞金市和南部的安远县湖的评估指数最低,赣州市其它区域均处在中高值的范围。2005—2020 年,湖的评估指数无明显变化特征,表明湖泊资源较为稳定。

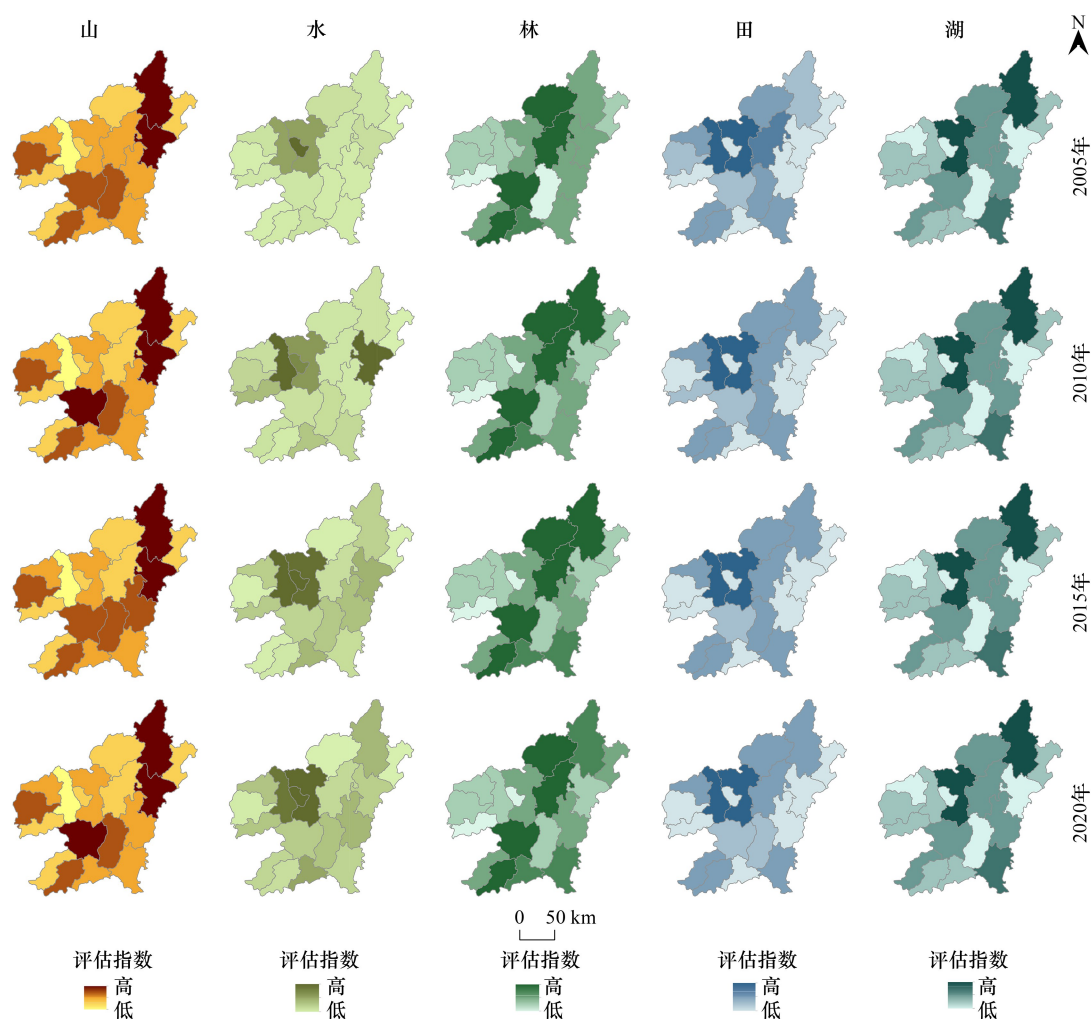


图 4 2005—2020 年山、水、林、田、湖子系统综合评估的空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution of the mountains, water, forests, fields and lakes subsystem, 2005—2020

赣州市 2005—2020 年草、沙子系统与治理、社会、行动者系统综合评估的空间分布特征见图 5。可以看出,研究区域子系统草的评估指数主要在中值到高值的范围,只在中部的章贡区、赣县和瑞金市最低。2005—2020 年,草的评估指数在西部的南康区呈现逐年减少的趋势,在东南部的寻乌县和北部的宁都县逐年增加。子系统沙的评估指数在赣州市整体偏低,只在东部的瑞金市偏高。2005—2020 年,除中西部的赣县呈现下降的特征,子系统沙的评估指数在赣州市的其它区域均呈现增加的特征,表明近年来赣州市的土壤环境较 10 年前有所下降。治理系统的评估指数在赣州市中部较高,在北部和南部较低。2005—2020 年,治理系统的评估指数在赣州市中部的于都县和兴国县均有增加,在瑞金市有下降的趋势。社会系统的评估指数在赣州市的中

部和北部均较高。2005—2020 年,社会系统的评估指数在赣州市中部的于都县、兴国县、信丰县均有下降,其它区域无明显变化。行动者系统的评估指数在赣州市西部和北部存在高值区的聚集,中西部有较多的中低值区。2005—2020 年,行动者系统的评估指数在赣州市西部的大余县有所下降,在东南部的寻乌县有微增,其它区域无明显变化特征。

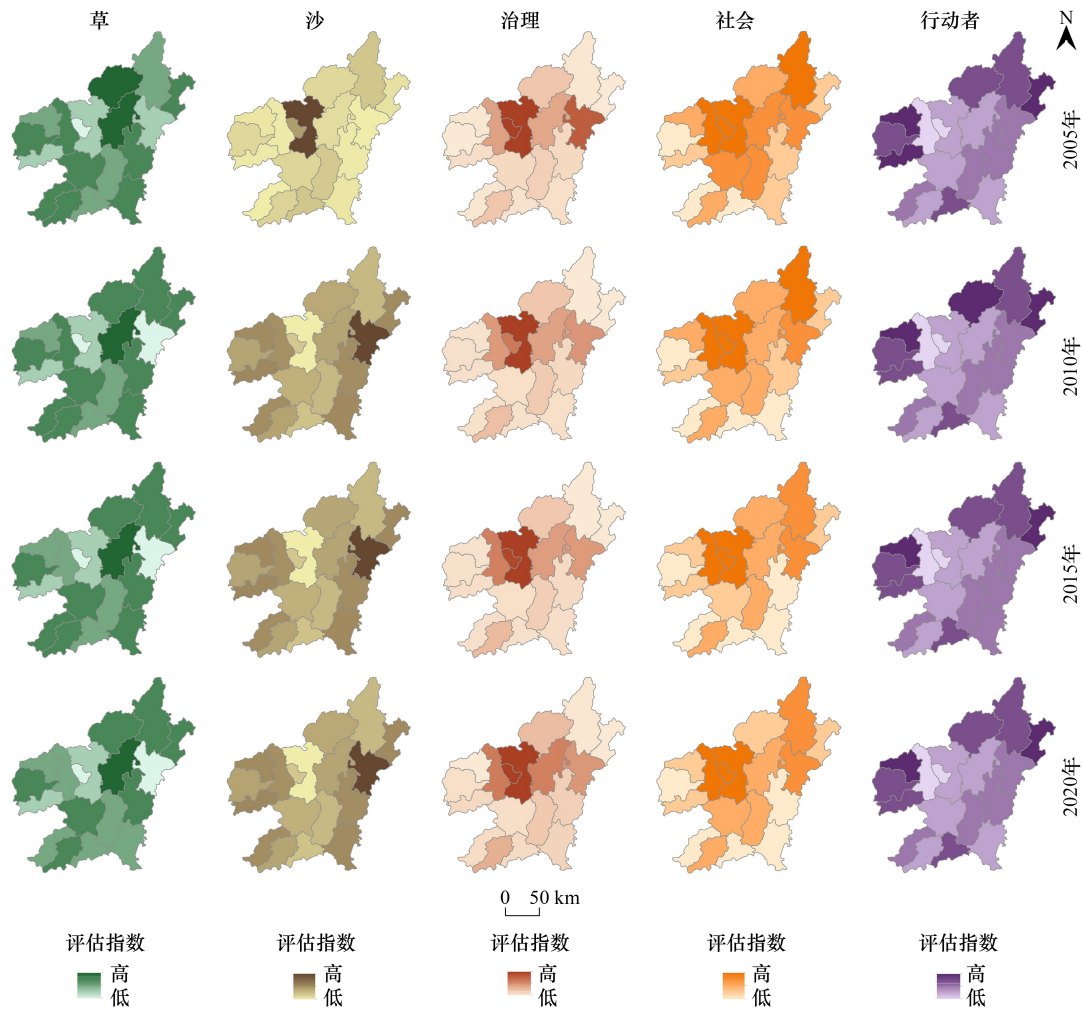


图5 2005—2020 年草、沙子系统与治理、社会、行动者系统的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of grass, sand subsystems and, governance, social, actor systems, 2005—2020

2.2 社会-生态系统的综合评价

社会-生态各系统及子系统的权重占比见图6,利用熵权法计算出的权重高低能够反映不同年份下,各系统及子系统对社会生态系统总体的影响。2005—2020 年,对社会-生态系统影响最大的依次是社会(31.36%—44.4%)、水(27.12%—31.97%)、湖(10.66%—13.48%)和治理(10.90%—12.09%)。研究区社会-生态系统综合评价的时空变化特征见图7。可以看出,赣州市中西部和东北部存在社会-生态系统综合指数的高值(0.50—0.93)聚集,西南部和东南部存在少量低值(0.00—0.25)聚集,其它区域均处于中值区间(0.25—0.50)。2005—2020 年,社会-生态系统综合指数在赣州市北部的宁都县、石城县以及西部的大余县、信丰县、安远县均呈现先增后减的变化趋势。在赣州西部的崇义县,西南部的龙南县呈现增加的趋势。在赣州东南部的瑞金市呈现下降的趋势。

2.3 社会-生态系统间的耦合分析

社会-生态系统间良好的耦合协调关系是生态系统可持续发展的基本前提。本研究计算了社会-生态系

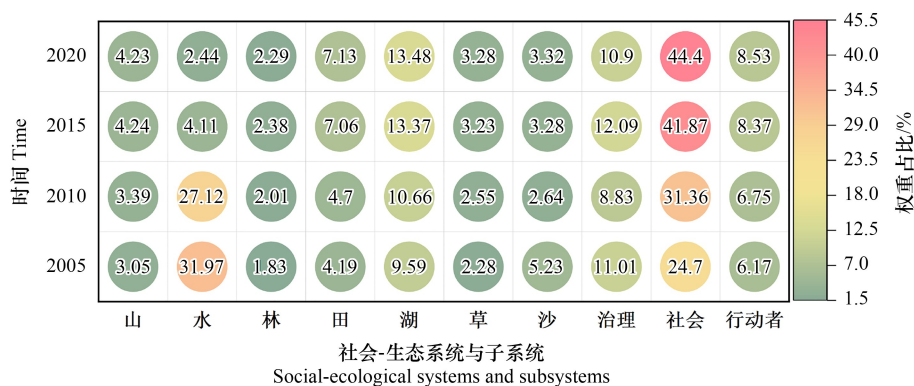


图6 社会-生态各系统及子系统权重占比

Fig.6 Share of weight of each system and subsystem of social ecology

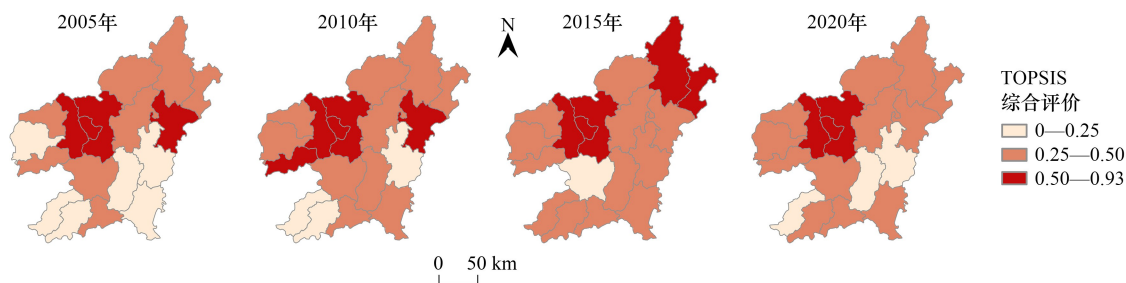


图7 社会-生态系统 TOPSIS 综合评价的时空变化特征

Fig.7 Socio-ecological system TOPSIS synthesis evaluation

统间的耦合协调度(图8)。结果表明,在赣州市中部以北,社会-生态系统间的耦合协调情况较好,聚集着一些中、高度耦合的区域。在赣州市西部聚集着一些社会-生态系统间失调的区域。赣州市东部以南存在大量低度耦合的区域。2005—2020年,赣州市中部以北的兴国县、宁都县、于都县均呈现从低耦合向中、高耦合过渡的变化趋势。赣州市西部的上犹县、南康区,西南部的全南县呈现由失调区向低耦合区过渡的趋势。赣州市东南部的瑞金市、会昌县、安远县和寻乌县均呈现由失调区向低耦合区过渡的发展趋势,这表明近年来赣州市社会-生态系统间耦合的发展趋势向好。

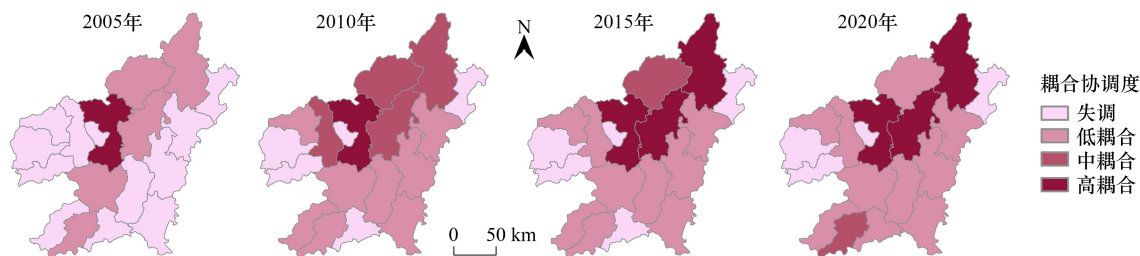


图8 2005—2020年社会-生态系统耦合空间分布

Fig.8 Spatial distribution of SES coupling, 2005—2020

本研究基于系统动力学模型,构建因果回路图来模拟复杂系统的动态变化过程。并进一步基于“山水林田湖草沙生命共同体理念”初步构建起社会-生态系统动力学因果回路图,用于模拟社会-生态系统内部各系统之间的复杂耦合关系,与系统间反馈的动态过程,为决策者提供科学依据,以实现社会经济的可持续发展和生态环境的保护。

因果回路图展现了社会-生态系统内部的主要三个耦合逻辑(图9)。图9中各系统对应的系数表示由熵权法计算的2005、2010、2015、2020年系统权重的均值。在社会系统与资源系统之间存在负反馈回路。当资源系统的过度开发导致资源减少时,这种变化进一步加剧了社会系统对资源的需求和开发行为,形成一个相互促进的循环。在资源系统和生态系统之间存在正反馈回路。合理的资源利用与保护措施有助于维持生态系统的健康稳定。在社会系统与生态系统之间存在负反馈回路。当生态系统健康且稳定时,能向社会系统提供背景环境和资源支持,促进社会经济的发展。反之,会对社会系统产生限制和影响。如资源枯竭和环境恶化可能引发社会冲突和经济下滑。

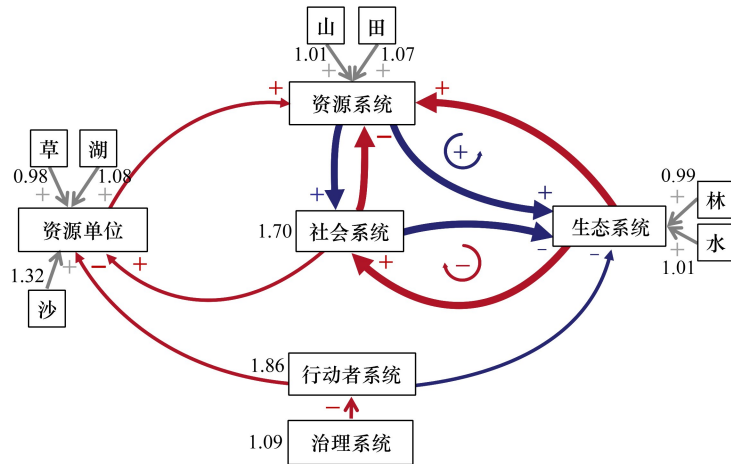


图9 赣州市社会-生态系统因果回路图

Fig.9 Causal loop diagram of social-ecological system in Ganzhou City

2.4 基于GM模型的社会-生态系统及子系统评估指数变化的预测

为了更好地了解社会-生态系统评估指数的动态演化规律,本研究基于GM模型对赣州市社会生态系统的评估指数进行了预测(图10),所有评估指数预测的相对误差绝对值均在0—0.1之间,后验差比C值在0—

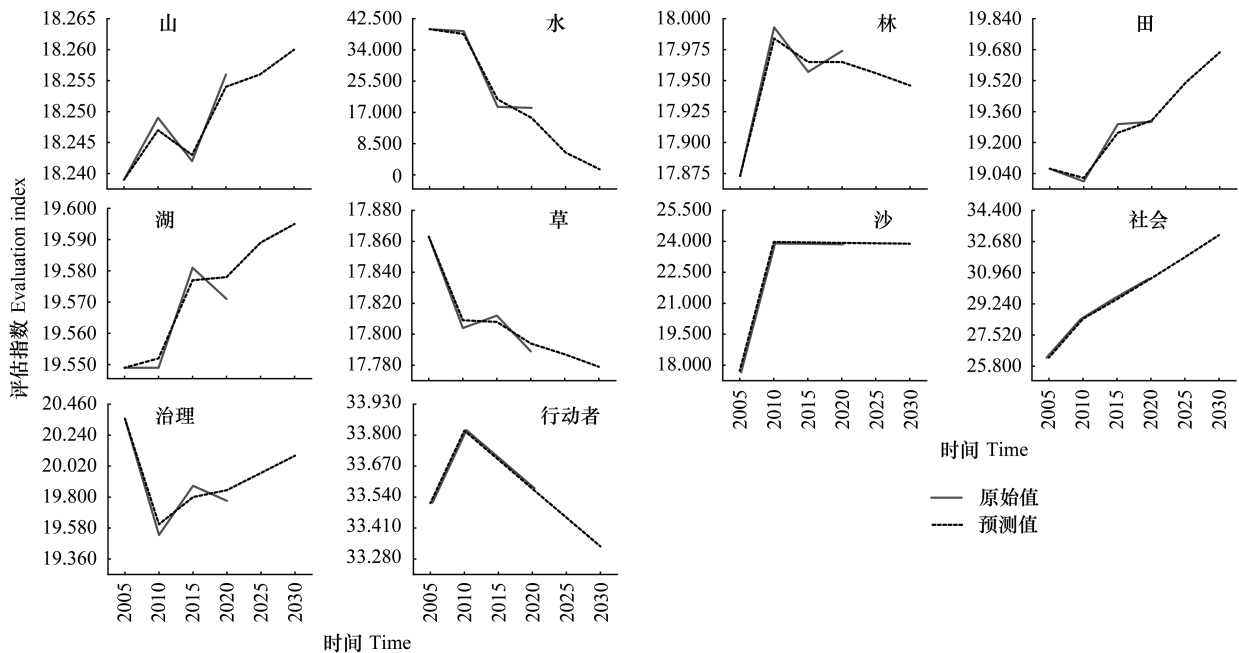


图10 赣州市社会-生态各系统及子系统评估指数的预测

Fig.10 Prediction of assessment indices of socio-ecological systems and subsystems in Ganzhou City

0.06 之间,小误差概率 P 值在 0.95—1.00 之间,表明模型预测精度较高。山的评估指数在 2005—2020 年间有小幅波动,但整体呈现出上升的趋势,2020—2030 年该指数将持续小幅上升。水的评估指数在 2005—2030 年呈现持续下降趋势,这一变化趋势与 2010—2020 年总产水量的下降有关。林的评估指数在 2005—2010 年增长较快,在 2010—2030 年整体呈现微降的预测趋势。田的评估指数在 2010—2030 年整体呈现增长的预测趋势,这与 2010 年以后赣州市进一步严格落实耕地保护有关。湖的评估指数在 2005—2030 年呈现持续增加的预测趋势,这与赣州市 2010 年以后的湿地生态修复和生态补水的实施有关。草的评估指数在 2005—2030 年呈现持续下降的预测趋势。这与赣州市在 2005 年以后农村草地被开垦为农田或养殖场以及草地的过度利用有关。沙的评估指数在 2005—2010 年增加,2010—2030 年基本保持不变,这表明 2010 年以后赣州市对土壤荒漠化程度控制的较好。治理的评估指数在 2005—2010 年下降,在 2010—2030 年持续增加。社会的评估指数在 2005—2030 年持续增加。行动者的评估指数在 2005—2010 年增加,在 2010—2030 年持续下降。

3 讨论

3.1 社会-生态系统 (SES) 框架的应用

SES 理论框架模型能提供对生态、社会相关领域中各类型变量的全面考察,并对其包含的抽象变量进行分析。前者的分析能够考察社会-生态系统中大量潜在变量与复杂系统之间的相互作用关系,对于实现社会-生态系统的综合分析至关重要。本研究充分考虑到了人与自然之间关系的复杂性,通过 SES 模型所包含的资源系统、资源单位、治理系统、行动者、生态系统、社会系统主要六大系统来全面分析赣州市社会-生态系统的要素耦合状况^[60]。并基于“山水林田湖草沙生命共同体理念”构建指标体系来量化 SES 框架,虽然指标的选取涵盖了多个层面,能够较全面地反映系统整体情况。但为了更深入地反映系统的可持续性、生态系统的多样性和稳定性,更好地评估人类活动对系统的影响,在今后指标的选取中,可以引入可持续发展指数、生物多样性指数等综合性指标,以及能源消耗、碳排放量等与人类活动强相关的指标。对于抽象变量,例如行动者努力程度、企业家精神、社会-生态系统的精神模式、明晰的资源边界等指标变量文章还未涉及,该类型变量不易量化,但抽象变量的分析能够对整个社会-生态系统进行查漏补缺,在今后的研究中争取加入这方面的分析^[61]。

本研究将“山水林田湖草沙生命共同体理念”融入了社会-生态系统中进行系统动力学模拟的量化分析。这种量化分析有助于更好地理解 SES 框架中各系统之间的耦合关系和因果逻辑。在 SES 框架中,首先存在社会系统与资源单位和资源系统的耦合。社会系统通过管理资源单位(如湖、草、沙)来对资源系统(山、田)进行利用与开发。社会系统的决策和行为会对资源系统的利用和保护产生影响,同时社会系统也会受到资源系统的限制和影响。其次存在资源系统与生态系统的耦合。生态系统(水、林)提供了资源系统(山、田)所需的背景环境和支持,生态系统的健康与稳定是资源系统可持续利用发展的前提。资源系统的开发和利用也会对生态系统的结构和功能产生影响。例如,过度利用资源可能导致生态系统的退化和生物多样性的丧失。最后是生态系统与社会系统的耦合。生态系统的运行和演化对社会系统产生影响,并在社会系统中产生反馈效应。例如,资源的枯竭和环境的恶化可能引发社会冲突和经济下滑。社会系统的决策和行为可以促进或阻碍生态系统的恢复和适应能力。关注社会系统的合作机制和治理设计对保护和恢复生态系统具有重要意义。

现如今出现了众多研究人员将 SES 框架应用于跨学科领域,从不同的角度收集数据进行多学科研究^[62]。SES 框架能够提供一个公共结构,通过跨学科如自然科学与社会科学之间的交流,实现对模型测算结果的比较分析,最终实现不同学科领域的协同发展。本研究主要采用定量分析的方法,通过指标量化,分析了社会-生态系统评估指数的时空分布,但对于联动机制的分析涉及较少,在今后的研究中需要将定量分析与定性分析相结合^[63]。此外 Ostrom 认为有必要将 SES 框架从区县尺度扩大到全国乃至全球范围,Ostrom 的理论引导我们更深刻地理解人类与自然的本质联系,有助于人类更有效地实现生态环境保护的目标^[64—65]。

3.2 基于 SES 框架的社会-生态系统耦合及演变规律

社会-生态系统不是孤立的,是由多个子系统共同作用而产生的。运用 SES 框架将自然与社会相融合,能

够更加真实、准确、全面地评估社会-生态系统耦合情况。2005—2020 年,基于 SES 框架的社会-生态系统的子系统展现出了时空分布差异。赣州南部以丘陵山地为主要地貌特征,且为热带季风气候,有利于山、林、草富集,东北部也分布着大面积的森林、湖泊、草原,为自然资源的增长提供了基础条件^[66]。2005—2020 年,赣州南部与其他发达地区相比,人类活动和经济发展水平更低,减少了对生态系统的影响^[67]。一些自然保护区和森林公园的建设也进一步保护了自然环境,导致山、林评估指数上升。随着时间推移,对草原保护的减少导致了草评估指数的下降。而湖泊资源由于水文地理原因相对稳定,因此湖评估指数未呈现明显的时空变化。

水、田、沙、治理评估指数值在赣州市中部以西较高。赣州中部以西属于内陆山区,地形起伏度大,河流水资源储量丰富,气候条件适宜农作物生长,但由于重复耕作、土地过度开垦、水蚀和风蚀,也会导致土地沙化面积增加^[68]。2005—2020 年赣州市中西部水资源充沛,降水丰富,但过去的几年进行了大规模的土地开发和建设,导致水和沙评估指数增加,而农业发展与政府治理在研究期内较为稳定,使得田、治理评估指数变化趋势不明显。随着人们环保意识增强,赣州逐渐强化了生态保护、修复的措施,维持了生态系统的稳定,提高了社会生态系统综合指数,促进了各子系统间的耦合发展。较高的水、田、沙、治理评估指数意味着赣州市中部以西的水资源管理与沙漠化的治理能力较强、农田质量较高。这为地方政府和相关部门提供了重要的参考信息,可以优先保护和管理这些区域的生态系统,进一步采取措施提高水资源的利用效率、保护水源地和水生态系统,确保水资源的可持续供应。加强农田管理,保护土壤资源、改善农田环境,提升农业生产效益和农民的收入水平^[69—70]。加强沙漠化防治工作,实施退耕还林还草、植被恢复、水土保持等措施,继续推动沙漠化治理,保护地区生态环境稳定^[71—72]。这些成果可以为相关部门的决策制定和实践操作提供科学参考,促进可持续发展和生态环境保护。

根据 2030 年 GM 模型的预测结果,山、田、湖子系统与社会、治理系统的评估指数将会增加,而水、林、草子系统与行动者系统的评估指数将会下降,沙子系统评估指数保持不变。这表明在赣州市政府的实践过程中,可以加大资金投入力度,建设更多的生态环境保护区,提高山、田、湖子系统的质量和数量。同时,加强社会与治理体系建设,提高社会文明程度和治理效能,为经济社会发展提供良好的支撑。同时重视水、林、草子系统的保护和恢复。保护水源地,提高水利设施建设水平;加强林草覆盖工作,推进森林防火和植树造林;同时,提高人们的环保意识,引导市民积极参与环境保护行动。加强沙漠化监测和预警体系建设,制定有效的沙漠化防治措施,加强土地治理和植被恢复工作,防止沙漠扩展对经济社会发展的影响^[73]。

当前的研究往往假设耦合关系是线性的,即系统之间的相互作用是稳定且可预测的。然而,在实际情况下,社会-生态系统的耦合关系可能存在非线性效应,如阈值效应、正反馈等。同时耦合关系的研究需要跨越时间和空间尺度进行观察和分析,以充分考虑系统的动态性和复杂性。然而,目前仍缺乏长期的观察数据和跨尺度的研究,尤其是在不同地区和生境条件下的比较研究。因此,未来的研究可以进一步探索非线性效应对耦合关系的影响,并开发相应的分析工具和模型,并加强对多样性场景的考察,以深入理解耦合关系的普适性和可行性。也可以开展跨尺度的比较研究,分析不同地区和生境条件下的社会-生态系统耦合关系的差异和共性,以提供区域性和全球性的参考和借鉴。总之,未来的研究需要更加全面、深入地探索社会-生态系统的耦合关系,并将相关研究成果应用于实践中,为可持续发展提供科学支撑。

4 研究结论

本研究探索了融入“山水林田湖草沙生命共同体理念”后的社会-生态系统时空耦合情况,预测了 2030 年社会-生态系统及子系统的演变趋势。2005—2020 年,山的评估指数在赣州西南部微增。水的评估指数在赣州西南部逐年增加,在东部的瑞金市先增后减。林的评估指数在赣州北部先增后减,在中部逐年减少,在东南部逐年增加。田的评估指数在东南部的安远县逐年微减。湖的评估指数无明显变化趋势。草的评估指数在西部的南康区逐年减少,在东南部逐年增加。沙的评估指数在中西部的赣县呈下降趋势。治理与社会的评估指数在赣州中部均有增加。行动者评估指数在赣州西部下降,在东南部的寻乌县微增。赣州中部以北,社会-

生态系统之间主要为中、高度耦合。西部存在社会-生态系统间的失调。东南部有较多的低耦合区。在 2020—2030 年,子系统山、田、湖、治理、社会的评估指数均呈现增长的演变趋势。水、林、草、行动者的评估指数呈下降的演变趋势。沙的评估指数保持不变。

参考文献 (References):

- [1] Man Y, Liu K, Xie T, Zhou F W, Shi W, Liu Z Z, Wang Q, Cui B S. A multilevel social-ecological network approach for reconciling coastal saltmarsh conservation and development. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118647.
- [2] Ofori S A, Asante F, Boatemaa Boateng T A, Dahdouh-Guebas F. The composition, distribution, and socio-economic dimensions of Ghana's mangrove ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118622.
- [3] Mikkelsen N, Planque B, Arneberg P, Skern-Mauritzen M, Hansen C, Fauchald P, Holsman K K, Haynie A C, Ottersen G. Multiple stakeholders' perspectives of marine social ecological systems, a case study on the Barents Sea. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 242: 106724.
- [4] Yin J B, Wang D Y, Li H. Spatial optimization of rural settlements in ecologically fragile regions: insights from a social-ecological system. *Habitat International*, 2023, 138: 102854.
- [5] Weng C Y, Bai Y P, Chen B H, Hu Y C, Shu J Y, Chen Q, Wang P. Assessing the vulnerability to climate change of a semi-arid pastoral social-ecological system: a case study in Hulunbuir, China. *Ecological Informatics*, 2023, 76: 102139.
- [6] Partelow S. Coevolving Ostrom's social-ecological systems (SES) framework and sustainability science: four key co-benefits. *Sustainability Science*, 2016, 11(3): 399-410.
- [7] Jahel C, Bourgeois R, Bourgoin J, Daré W, De Lattre-Gasquet M, Delay E, Dumas P, Le Page C, Piraux M, Prudhomme R. The future of social-ecological systems at the crossroads of quantitative and qualitative methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, 193: 122624.
- [8] Chu V H Y, Lam W F, Williams J M. Building robustness for rural revitalization: a social-ecological system perspective. *Journal of Rural Studies*, 2023, 101: 103042.
- [9] 黄冲, 罗攀柱. 社会生态系统分析框架在世界森林治理研究中的应用及启示. *世界林业研究*, 2022, 35(1): 1-7.
- [10] 赵金羽, 萨娜, 付晓, 郑拴宁, 吴钢, 何霄嘉, 陆兆华, 桑卫国. 以疏勒河流域为例的“山水林田湖草”生态修复多尺度耦合框架及方法. *生态学报*, 2023, 43(10): 3841-3854.
- [11] Munck af Rosenschöld J, Vihma P. Achieving social-ecological fit in projectified environmental governance: exploring vertical and horizontal dimensions. *Environmental Science & Policy*, 2022, 136: 127-135.
- [12] Taghilou A A. A framework resilient social-ecological system (SES) for groundwater governance and public and private rights. *Groundwater for Sustainable Development*, 2022, 18: 100788.
- [13] da Luz Fernandes M, Sanz Larruga F J, Alves F L. Spatial characterization of marine socio-ecological systems: a Portuguese case study. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363: 132381.
- [14] Huggins X, Gleeson T, Kumm M, Zipper S C, Wada Y, Troy T J, Famiglietti J S. Hotspots for social and ecological impacts from freshwater stress and storage loss. *Nature Communications*, 2022, 13: 439.
- [15] Kantartzis A, Arabatzis G, Christopoulou O, Sfougaris A, Sakellariou S, Malesios C, Tsiaras E, Samara F, Th Tampekis S. Forest Roads planning and management in terms of Social-Ecological Systems (SES) framework. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 899(1): 012052.
- [16] 郑子潇, 胡保安, 韩海荣, 康峰峰, 程小琴. 基于 SD 模型的晋北退耕还林工程与社会经济互馈关系研究. *生态学报*, 2023, 43(10): 3984-3994.
- [17] 李佳雨, 钱雨果, 周伟奇, 郑重, 靖传宝, 易绍庭, 叶匡旻. 社会-生态综合视角下海岸带生态监管框架与应用——以深圳为例. *生态学报*, 2023, 43(10): 4212-4225.
- [18] 罗丹, 周忠发, 陈全, 张露, 吴岚, 伍堂银. 喀斯特地区碳储量对土地利用模式的响应——以南北盘江流域为例. *生态学报*, 2023, 43(9): 3500-3516.
- [19] 孔凡斌, 杨文才, 徐彩瑶. 环杭州湾城市群生态环境与社会经济耦合协调关系及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(6): 2287-2297.
- [20] 赵金羽, 萨娜, 付晓, 郑拴宁, 吴钢, 何霄嘉, 陆兆华, 桑卫国. 以疏勒河流域为例的“山水林田湖草”生态修复多尺度耦合框架及方法. *生态学报*, 2023, 43(10): 3841-3854.
- [21] Guan Y N, Bai J H, Tian X, Zhi L H, Yu Z B. Integrating ecological and socio-economic systems by carbon metabolism in a typical wetland city of China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123342.
- [22] Bai Y Y, Zhang T Z, Zhai Y J, Shen X X, Ma X T, Zhang R R, Ji C X, Hong J L. Water footprint coupled economic impact assessment for maize production in China. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141963.

- [23] Abubakar I R. Predictors of inequalities in land ownership among Nigerian households: implications for sustainable development. *Land Use Policy*, 2021, 101: 105194.
- [24] Martínez-Espinosa C, Sauvage S, Al Bitar A, Green P A, Vörösmarty C J, Sánchez-Pérez J M. Denitrification in wetlands: a review towards a quantification at global scale. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142398.
- [25] Du L T, Gong F, Zeng Y J, Ma L L, Qiao C L, Wu H Y. Carbon use efficiency of terrestrial ecosystems in desert/grassland biome transition zone: a case in Ningxia Province, northwest China. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106971.
- [26] 周妍, 苏香燕, 应凌霄, 周旭, 张成鹏, 康玉麟. “双碳”目标下山水林田湖草沙一体化保护和修复工程优先区与技术策略研究. *生态学报*, 2023, 43(9): 3371-3383.
- [27] 梁森, 张建军, 王柯, 刘时栋. 区域生态保护修复碳汇潜力评估方法与应用——基于第一批山水林田湖草生态保护修复工程的研究. *生态学报*, 2023, 43(9): 3517-3531.
- [28] 李晓文, 吕江涛, 智烈慧, 梁芳源, 裴元生, 李迎霞, 孟耀斌, 廖丹琦, 穆泳林. 基于“目标-成本-效益”协同优化的山水林田湖草沙一体化生态保护与修复格局. *生态学报*, 2023, 43(9): 3625-3635.
- [29] 沈钰仟, 杜傲, 林子雁, 欧阳志云, 肖隼. 赣州市山水林田湖草修复工程生态保护效益. *生态学报*, 2023, 43(2): 650-659.
- [30] 刘汉初, 樊杰, 刘宝印, 王丽, 乔琴. 新疆阿勒泰额尔齐斯河流域山水林田湖草生态保护修复与管理实践. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(6): 766-776.
- [31] 杨胜苏, 刘卫柏. 基于恢复生态学的洞庭湖区“山水林田湖草”生态修复研究. *生态学报*, 2021, 41(16): 6430-6439.
- [32] 李依, 刘煜杰, 张强, 朱粟锋, 刘浩, 刘淑芳. 基于山水林田湖草耦合视角的阿勒泰地区生态保护修复对策研究. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(6): 791-800.
- [33] 彭建, 吕丹娜, 张甜, 刘前媛, 林坚. 山水林田湖草生态保护修复的系统性认知. *生态学报*, 2019, 39(23): 8755-8762.
- [34] 于恩逸, 齐麟, 代力民, 于大炮, 赵福强, 周莉, 周旺明, 朱琪, 毛诚瑞, 吴钢. “山水林田湖草生命共同体”要素关联性分析——以长白山地区为例. *生态学报*, 2019, 39(23): 8837-8845.
- [35] 李坦, 王静, 张庆国, 崔玉环, 姚佐文. 合肥市生态足迹时空特征与脱钩效应变化及灰色预测分析. *生态学报*, 2019, 39(5): 1735-1747.
- [36] Wang R Y, Xu M Z, Hou B. Research on grain system evaluation based on fuzzy evaluation system and GM(1, 1) method. *Academic Journal of Computing & Information Science*, 2021, 4(4): 77-81.
- [37] Li, Liu, Wei. A dynamic decision making method based on GM(1, 1) model with Pythagorean fuzzy numbers for selecting waste disposal enterprises. *Sustainability*, 2019, 11(20): 5557.
- [38] 鲁燕飞, 彭芳, 万韵, 曾凡兴, 陈美球, 罗志军, 黄宏胜. 基于 GIS 和 RS 的赣江上游流域土地利用动态趋势分析. *生态学报*, 2014, 34(12): 3224-3233.
- [39] 郑博福, 谢泽阳, 陶林, 黄琼瑶, 艾彪, 朱元皓, 朱锦奇. 赣南地区农业生态经济系统耦合态势的时空演变. *生态学报*, 2021, 41(16): 6466-6475.
- [40] 郑博福, 黄琼瑶, 陶林, 谢泽阳, 艾彪, 朱元皓, 朱锦奇. 赣南地区景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2021, 41(15): 5940-5949.
- [41] de A Gomes Júnior A, Schramm V B, Schramm F. Problem structuring methods in social-ecological systems. *Systemic Practice and Action Research*, 2022, 36(3): 461-478.
- [42] Feng J, Zhao Z, Wen Y L, Hou Y L. Organically linking green development and ecological environment protection in Poyang Lake, China using a social-ecological system (SES) framework. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(5): 2572.
- [43] Ling G H T, Md Suhud N A B, Leng P C, Yeo L B, Cheng C T, Ahmad M H H, Ak Matusin A M R. Factors influencing asia-pacific countries' success level in curbing COVID-19: a review using a social-ecological system (SES) framework. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(4): 1704.
- [44] Albuquerque U P, Ludwig D, Feitosa I S, Moura J M B, Medeiros P M, Santos Gonçalves P H, Silva R H, Silva T C, Gonçalves-Souza T, Ferreira Júnior W S. Addressing social-ecological systems across temporal and spatial scales: a conceptual synthesis for ethnobiology. *Human Ecology*, 2020, 48(5): 557-571.
- [45] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [46] 李婷. 京津冀城市群生态环境可持续发展的政策评价——基于 DPSIR-TOPSIS 模型. *生态经济*, 2022, 38(5): 107-113.
- [47] 薛帆, 晁智龙, 何亮, 易海杰, 许小明, 邹亚东, 贺洁, 吕渡, 张晓萍. 近 70 年来不同地貌和植被类型区水沙特征演变及其对生态恢复的响应. *生态学报*, 2023, 43(8): 3247-3260.
- [48] 赵维军, 董奇群, 燕婷婷, 秦伟, 朱清科. 西南紫色土水蚀区坡谱信息熵与地形因子关系分析. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 160-167, 342.
- [49] 刘世梁, 孙永秀, 赵海迪, 刘轶轩, 李明琦. 基于多源数据的三江源区生态工程建设前后草地动态变化及驱动因素研究. *生态学报*,

- 2021, 41(10): 3865-3877.
- [50] 吴钰茹, 吴晶晶, 毕晓丽, 栗云召, 肖鲁湘. 综合模型法评估黄河三角洲湿地景观连通性. 生态学报, 2022, 42(4): 1315-1326.
- [51] 宋泽明, 宁凌. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的我国沿海省份海洋资源环境承载力评价及障碍因素研究. 生态经济, 2020, 36(8): 154-160, 212.
- [52] 冷仙, 曾源, 周键, 杨飞龄, 武瑞东. 基于熵权 TOPSIS 法的西南自然保护区景观保护成效评价. 生态学报, 2023, 43(3): 1040-1053.
- [53] 陈勤昌, 王兆峰. 武陵山片区国土开发强度与经济韧性时空耦合特征及互动效应. 经济地理, 2023, 43(4): 41-50.
- [54] 唐健飞, 刘剑玲. 省域农业可持续发展水平评价及其耦合协调分析——以长江经济带 11 省市为例. 经济地理, 2022, 42(12): 179-185.
- [55] 胡影, 冯晓明, 巩杰. 基于生态系统服务的宁夏回族自治区自然-社会经济协调性分析. 生态学报, 2022, 42(16): 6523-6533.
- [56] 薛立强, 曹丹丹. 基于灰色 GM(1, 1) 模型的超大城市建筑垃圾产量预测——以天津市为例. 城市, 2021(2): 71-79.
- [57] 王耕, 董瑞, 周腾禹, 徐惠民, 丁德文. 西沙珊瑚礁生态系统完整性评价与动态仿真模拟研究. 生态学报, 2021, 41(10): 4077-4089.
- [58] 翟晨阳, 王圣云. 基于系统动力学的鄱阳湖区多维福祉时空差异演变与情景模拟. 生态学报, 2021, 41(8): 2954-2967.
- [59] Daniel D, Satriani S, Zudi S L, Ekka A. To what extent does indigenous local knowledge support the social-ecological system? A case study of the ammatoa community, Indonesia. Resources, 2022, 11(12): 106.
- [60] Thorn J P R, Klein J A, Steger C, Hopping K A, Capitani C, Tucker C M, Nolin A W, Reid R S, Seidl R, Chitale V S, Marchant R. A systematic review of participatory scenario planning to envision mountain social-ecological systems futures. Ecology and Society, 2020, 25(3): 6.
- [61] Swingedouw D, Speranza C I, Bartsch A, Durand G, Jamet C, Beaugrand G, Conversi A. Early warning from space for a few key tipping points in physical, biological, and social-ecological systems. Surveys in Geophysics, 2020, 41(6): 1-48.
- [62] Dyckman C S, Conroy M M. Novel methods, novel metrics: using a meta-ethnography to create a plan quality framework for sustainable and resilient social-ecological systems. Journal of Planning Literature, 2020, 35(3): 281-297.
- [63] Buma B, Schultz C. Disturbances as opportunities: learning from disturbance-response parallels in social and ecological systems to better adapt to climate change. Journal of Applied Ecology, 2020, 57(6): 1113-1123.
- [64] Christou M, Sgardeli V, Tsikliras A C, Tserpes G, Stergiou K I. A probabilistic model that determines the social ecological system (SES) attributes that lead to successful discard management. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2020, 30(1): 109-119.
- [65] Dwyer J, Short C, Berriet-sollic M, Déprés C, Lataste F G, Hart K, Prazan J. Fostering resilient agro-food futures through a social-ecological systems framework: public-private partnerships for delivering ecosystem services in Europe. Ecosystem Services, 2020, 45: 101180.
- [66] 魏家星, 倪雨淳, 寿田园, 张昱镇. 基于水-陆耦合生态系统服务的生态安全格局构建研究——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例. 生态学报, 2023, 43(13): 5305-5319.
- [67] 李可昕, 胡宏, 赵慧敏. 基于适应性循环理论与压力-状态-响应框架的区域社会-生态系统演进研究. 生态学报, 2022, 42(24): 10164-10179.
- [68] 吴之见, 杜思敏, 黄云, 郑博福, 谢泽阳, 罗诚康, 万飞, 朱锦奇. 基于生态系统生产总值核算的生态保护成效评估——以赣南地区为例. 生态学报, 2022, 42(16): 6670-6683.
- [69] 张晓瑶, 虞虎, 张潇, 周侃. 基于多源数据的三江源国家公园土地生态安全综合评价. 生态学报, 2022, 42(14): 5665-5676.
- [70] 韩逸, 赵文武, 郑博福. 推进生态文明建设, 促进区域可持续发展——中国生态文明与可持续发展 2020 年学术论坛述评. 生态学报, 2021, 41(3): 1259-1265.
- [71] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复. 生态学报, 2019, 39(23): 8725-8732.
- [72] 史亚琪, 朱晓东, 孙翔, 李杨帆, 魏婷. 区域经济-环境复合生态系统协调发展动态评价——以连云港为例. 生态学报, 2010, 30(15): 4119-4128.
- [73] 萨娜, 赵金羽, 寇旭阳, 郑拴宁, 陆兆华, 付晓, 何霄嘉, 吴钢, 桑卫国. “山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架、模型与展望. 生态学报, 2023, 43(11): 4333-4343.