

基于 HF-WFPPSIM 法的山水林田湖生命 共同体耦合协调度评价研究

——以滇池流域为例

王铁旦^{1,2}, 李艳^{1,2}, 彭定洪^{1,2}

(1.昆明理工大学 管理与经济学院, 云南 昆明
650504; 2.昆明理工大学 质量发展研究院, 云南 昆明 650504)

摘要: [目的] 运用 HF-WFPPSIM 方法(犹豫模糊加权全排列多边形图示法)测算 2016—2024 年云南省滇池流域山水林田湖(MRFFL)综合评价指数,并结合适配的耦合协调度(CCD)模型,系统量化子系统间及系统整体的耦合协调关系,为生态保护修复、国土空间优化及可持续发展政策制定提供科学参考。[方法] 以犹豫模糊集表征专家意见,借鉴 FPPSIM 面式聚合揭示系统功能倍增效应,提出犹豫模糊加权全排列多边形图示法(HF-WFPPSIM)并运用于量化 2016—2024 年滇池流域山水林田湖生命共同体耦合协调度。[结果] 流域生命共同体耦合协调度从 0.482 提升至 0.688,实现濒临失调型—初级协调型跃迁,表明多要素协同治理有效,其中“山—水—林”三元耦合最优。[结论] HF-WFPPSIM 法有效可靠,可有效体现生态要素交互作用对系统整体功能的非线性影响,创新性地对要素间相互作用赋权,刻画山水林田湖间的非对称耦合效应。田—湖耦合为系统协调的短板,未来治理中需进一步加强二者的协同。

关键词: 山水林田湖; 耦合协调度; 非对称耦合; HF-WFPPSIM; 滇池流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2026)01-0294-12

中图分类号: X826, X171.1

文献参数: 王铁旦, 李艳, 彭定洪. 基于 HF-WFPPSIM 法的山水林田湖生命共同体耦合协调度评价研究 [J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 294-305. Wang Tiedan, Li Yan, Peng Dinghong. Evaluation of coupling coordination degree of mountain-river-forest-farmland-lake life community based on HF-WFPPSIM method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 294-305.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.032

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.032

Evaluation of coupling coordination degree of mountain-river-forest-farmland-lake life community based on HF-WFPPSIM method

—A case study of Dianchi Lake basin

Wang Tiedan^{1,2}, Li Yan^{1,2}, Peng Dinghong^{1,2}

(1.Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650504, China; 2.Institute of Quality Development, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650504, China)

Abstract: [Objective] The comprehensive evaluation index were calculated by the the HF-WFPPSIM (hesitant fuzzy weighted full permutation polygon synthetic indicator method) for the mountain-river-forest-farmland-lake (MRFFL) system in the Dianchi Lake basin, Yunnan Province, from 2016 to 2024. The coupling coordination relationships among subsystems and the overall system were systematically quantified by integrating an adapted coupling coordination degree (CCD) model, in order to provide scientific references for ecological conservation and restoration, land use optimization, and sustainable development policy formulation. [Methods] Expert opinions were represented using hesitant fuzzy sets. Drawing on the full permutation polygon synthetic indicator

收稿日期: 2025-07-15

修回日期: 2025-10-21

采用日期: 2025-10-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“面向小微企业行为质量评价的复合因果链式指标框架和优劣价值测度方法”(72261020); 昆明理工大学创新团队项目(CXTD2024006)

第一作者: 王铁旦(1971—), 男(汉族), 河南省焦作市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事模糊决策及耦合协调度模型方面的研究。Email: 2323764783@qq.com。

通信作者: 彭定洪(1982—), 男(汉族), 云南省曲靖市人, 博士, 教授, 主要从事系统工程与模糊决策分析方面的研究。Email: pengdinghong2006@163.com。

method (FPPSIM) surface aggregation method to reveal system functional multiplication effects, the HF-WFPPSIM method was proposed and applied to quantify the coupling coordination degree of the mountain-river-forest-farmland-lake life community in the Dianchi Lake Basin from 2016 to 2024. [Results] The coupling coordination degree of the life community in the basin increased from 0.482 to 0.688, achieving a transition from near-disharmony to primary coordination. This indicated effective multi-factor collaborative governance, with the “mountain-river-forest” triadic coupling demonstrating optimal performance. [Conclusion] The HF-WFPPSIM method is effective and reliable, accurately reflecting the nonlinear impact of interactions among ecological elements on overall system functionality. The method innovatively assigns weights to interactions among elements, capturing asymmetric coupling effects among mountains, rivers, forests, farmlands, and lakes. The farmland-lake coupling represents a weak link in system coordination, necessitating enhanced synergy between these two elements in future governance efforts.

Keywords: mountain-river-forest-farmland-lake (MRFFL); coupling coordination degree; asymmetric coupling; HF-WFPPSIM; Dianchi Lake basin

山水林田湖 (mountain-river-forest-farmland-lake, MRFFL) 通过物质、能量与信息流形成紧密关联、协同演化的生命共同体,是维系生物多样性、保障生态安全与促进人与自然和谐共生的基础^[1]。然而,高强度人类活动引发生态系统耦合链断裂与功能协调性失衡,导致生态系统服务退化与系统韧性下降等问题^[2]。传统单要素、单过程的末端治理模式忽视系统内在耦合机制,虽局部见效,但易陷入“局部修复,整体退化”的治理困境^[3-4]。其根源在于对 MRFFL 系统性认知不足,误将多要素简单叠加视作综合治理,未能充分考虑要素间非对称耦合所产生的协同或拮抗效应^[5]。事实上,MRFFL 耦合状态直接影响生态系统服务功能的涌现阈值与系统稳定性,其协调水平是评估生态系统健康的关键指标^[6]。因此,生态治理需从单要素管控转向系统耦合调控,科学评估 MRFFL 的耦合协调状态成为识别生态脆弱节点、优化治理策略的重要前提。本文聚焦 MRFFL 耦合评价的科学性提升,构建适配多要素非对称耦合特征的评价方法,为解析生态系统协调规律提供支撑。

当前,MRFFL 生命共同体研究已形成多维探索格局。理论上,学者系统探讨其本质属性,明确“人”在生命共同体中的主导地位,深化了对其内涵特征^[7-8]与自然要素间生态关联机制^[9]的认识。实践上,研究呈现从模式创新到方法构建的纵深发展。一方面,突破传统单要素治理局限,构建跨要素、跨尺度的一体化保护修复模式^[10]并融合社会-经济-自然复合系统理论,形成多学科交叉的分析框架^[11-12],推动生态保护与区域发展协同;另一方面,MRFFL 保护修复成效评估^[13]、健康评价等^[14-15]体系不断完善,耦合研究逐渐成为重点。学者通过跨尺度耦合

框架整合微观生态交互与宏观人地互馈,为解析多维复杂耦合关系提供新范式^[16];另有研究^[17-18]基于耦合机理构建山水林田湖指标体系,采用线性加权法评价其耦合协调度。方法应用上,统计学模型用以量化区域尺度复合生态系统的耦合效应,代表性的有耦合协调度 (coupling coordination degree, CCD) 模型^[18]、动态耦合模型^[19]、灰色关联分析^[20], CCD 模型因兼具要素关联强度测度与系统整体协同评估双重功能应用广泛^[21];全排列多边形图示法^[22] (full permutation polygon synthetic indicator method, FPPSIM) 在反映系统发展水平的同时兼顾协同程度,与 CCD 模型结合可有效量化 MRFFL 耦合水平。上述进展共同阐明系统协同—制约关系对生态系统服务供给与风险管控的阈值效应及调控路径^[23]。

MRFFL-CCD 评价是一项系统性工程,涵盖评价信息表达、权重确定及方法选择等环节。方法的科学性与适配性直接影响结果可靠性。从系统运行机制看,MRFFL 要素间的耦合具有显著非对称性,表现为作用强度与方向不均等,既可产生协同增效作用,也可因传导失衡引发级联风险^[15]。该非对称效应通过级联效应驱动系统功能演变,进而形成多层级嵌套、作用强度不均的复杂网络^[6,24],凸显生命共同体结构的敏感性与整体性。因此,MRFFL 耦合评价需重视以下方面:①要素间耦合作为系统功能耦合的微观基础,应在评估框架中予以重视;②需关注非对称耦合的结构敏感性,要素种类、系统结构及其交互通过非对称传导影响系统整体效能;③评价中常面临数据缺失及数值模糊等问题,需依赖专家组经验补充,其意见的一致性与信息完备性直接左右评价准确性^[25]。然而,现有 CCD 评价方法尚未有

效应对上述问题,亟待在方法层面有所突破。

针对上述问题及现有研究常以线性加权法构建综合指数^[17-18,26],难以刻画生态要素非对称耦合与倍增效应。雷达图法、面积灰关联法及FPPSIM等面式方法在反映系统结构对整体功能影响方面具有优势^[27]。尤其FPPSIM可一定程度表征系统倍增效应和要素间非线性协同关系,并通过全排列面积反映结构对功能的影响^[27],但其默认各指标贡献均等,忽视指标重要性差异,难以契合生态系统中普遍存在的非线性协调机制。鉴于MRFFL-CCD评价核心在于测度子系统间相互作用与协调演化关系,而非仅关注其绝对发展水平,本文改进FPPSIM基本逻辑,将权重赋予要素间的交互作用,提出带有加权交互作用的FPPSIM;为应对评价信息的模糊性与不确定性,以犹豫模糊集(hesitant fuzzy sets, HFS)表征评价信息,构建MRFFL生命共同体CCD评价的犹豫模糊加权全排列多边形图示法(hesitant fuzzy weighted full permutation polygon synthetic indicator method, HF-WFPPSIM)。最后,本文采用HF-WFPPSIM测算2016—2024年滇池流域MRFFL综合评价指数,并结合适配的CCD模型,系统量化子系统间及系统整体的耦合协调关系,以期为生态保护修复、国土空间优化及可持续发展政策制定提供科学参考。

1 耦合协调机理

科学评价MRFFL生命共同体CCD的关键在于系统解析其内在耦合机理。研究^[15]表明,物质—能量—信息流是其耦合的物理化学基础,水文过程作为关键空间纽带之一驱动跨要素物质能量输移,生态功能体现系统对外部环境的整体响应,而人类认知与行为则能重塑耦合关系。然而,从基础传递过程、空间连接、功能响应至人为调控,不同层级过程如何通过耦合及非对称关系形成具有自我维持与调节功能的复杂系统,其机理仍需系统解析^[1,9,16]。基于系统科学视角,本文从以下维度阐述其耦合协调机理(图1)。^①物质循环、能量流动与信息传递通过非对称交互与动态反馈,共建MRFFL耦合网络,维系系统结构与功能的可持续。物质循环作为结构性基础,依托水文与生物地球化学过程形成“上游驱动下游”的传输体系;推动生命元素、水体及沉积物等自山至湖迁移,维持系统物质平衡^[15];能量流动以太阳能为起点,沿食物链实现跨单元传递与层级转化,其单向递减特性形成系统能量梯度,驱动物质迁移并影响信息响应;信息传递构成系统隐性调控网络,

通过生物理化信号反馈资源状况与环境胁迫,触发蒸腾调节、物候响应与行为适应等反馈机制^[28],以非线性交互作用于物质能量流动,驱动各要素根据系统整体状态进行动态功能调节。三者形成有机协调体系:物质承载能量,能量驱动物质迁移,信息提升二者协同效率;水作为核心介质贯穿其过程,共同推动MRFFL由独立单元向功能耦合体演进,保障生态服务稳定^[16]。^②水文过程作为系统“血脉”,是耦合实现的关键纽带之一^[28]。地形地貌与植被调控产流机制与水源涵养能力,森林通过林冠截留与土壤入渗削减洪峰,增加基流,是天然水调节器;农田高度依赖水源但其排水直接影响下游水质;湖泊通过库容调节水循环,其蒸发作用影响局地气候,而调蓄能力受制于上游来水,由此形成“山地涵养—森林调节—农田利用—湖泊调蓄”的水文联动链条^[26]。^③各子系统通过功能互补与空间适配实现协同增效。山依托生境异质性维持生物多样性并影响局地气候;森林在气候调节与灾害防护等方面具有多重服务功能^[26],其功能损失影响远超同等面积农田;农田在保障粮食安全同时,可通过生态农业实践减轻水土流失,调节微气候^[18];湖泊提供栖息地与气候调节等服务,其健康状况依赖上游水质水量输入。各系统协同产生超越单一功能加和的整体效益。^④人类活动作为关键外部驱动,通过资源开发与空间改造等介入自然系统,形成具双向性与阈值特征^[16]的“扰动—响应—适应”非对称耦合机制^[8]。过度开垦等行为易打破系统平衡,引发水土流失与湖泊退化,形成负向耦合;科学修复则能强化功能协同,重塑正向耦合,但成效常滞后且易反弹。其核心矛盾在于短期经济需求与长期生态稳定间的权衡,协调关键在于认知并把控生态阈值,一旦人类干扰超出系统自我调节能力,要素耦合将从协同转向拮抗。因此,科学干预需基于耦合阈值的精准识别,引导系统向可持续协调状态演进^[4]。

2 研究方法

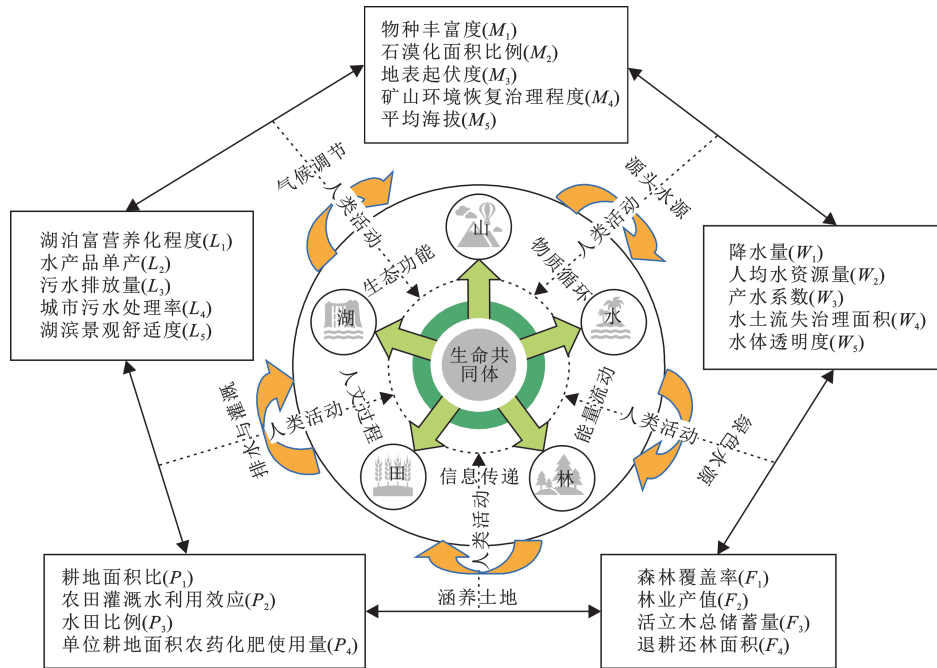
2.1 犹豫模糊集

MRFFL-CCD评价涉及多生态要素及其交互关系,评价过程中常面临数据缺失以及专家意见分歧等,会直接影响评价结果的可靠性。因此,如何科学整合不同领域的专家评价信息,成为提升评价可信度的关键。由Torra^[29]提出的HFS是一种扩展模糊集理论,其核心优势在于允许元素对集合的隶属度存在多个可能值,为解决上述问题提供了一种有效

的解决途径。HFS 定义如下。

定义 1^[29]。设 X 为论域, HFS 是将 X 的每个元素映射到区间 $[0, 1]$ 的子集的函数, 其数学表达式: $H_M = \{ \langle x, h_M(x) \rangle | x \in X \}$ 。其中 $h_M(x) = \{ \gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_i \}$ 是

$[0, 1]$ 中一些数值的集合, $\gamma_i (i = 1, 2 \dots i)$ 表示元素 x 关于集合 H_M 的一系列可能的隶属值。这些隶属度值反映决策者在评估时的犹豫和不确定性, 称 $h = h_M(x)$ 为犹豫模糊元。



注:图中核心圆框代表“生命共同体”,周围5个圆框分别代表耦合关系的核心载体(山水林田湖);外围虚线圈及虚线标识耦合协调的6大维度,构成要素间交互的宏观框架;子系统间的右弧形箭头表示系统单向作用关系,最外围5个标注框对应山水林田湖生命共同体的内部要素,连接方框的线性双箭头反映相邻两个系统间存在相互作用。

图 1 山水林田湖 (MRFFL) 耦合协调关系

Fig.1 Coupling coordination relationship of mountian-river-forest-farmland-lake (MRFFL)

定义 2^[29]。设 h, h_1 和 h_2 为 3 个犹豫模糊元, 且 φ 为一个常数, 则规定下列运算规则:

- (1) $\varphi h = \bigcup_{\gamma \in h} \{ 1 - (1 - \gamma)^\varphi \}$ ($\varphi > 0$)
- (2) $h^\varphi = \bigcup_{\gamma \in h} \{ 1 - \gamma \}$ ($\varphi > 0$)
- (3) $h_1 \oplus h_2 = \bigcup_{\gamma_1 \in h_1, \gamma_2 \in h_2} \{ \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_1 \gamma_2 \}$

2.2 加权 FPPSIM

FPPSIM 综合评价方法的核心优势在于能从多角度、多层次综合考虑对象的特征, 通过融合多个指标, 全面刻画系统状态或过程。FPPSIM 的基本原理: 假设有 n 个指标, 首先以标准化后指标值的上限值为半径, 形成一个中心 n 边形, 中心点值为 -1 ; 每个指标值的连接线形成一个不规则的中心 n 边形, 该不规则中心 n 边形的顶点就是 n 个指标的全排列。FPPSIM 的综合指数定义为所有这些不规则 n 多边形面积的均值与中心多边形面积的比值^[22]。

目前关于 FPPSIM 指标权重和指标相关性的研究主要有两种方式。

(1) 利用三角形夹角不同刻画权重(思路 1^[30])。FPPSIM 最终结果是面积的比, 即实际方案与理想方案的比。利用不规则 n 多边形中三角形夹角的不同来刻画指标的重要性差异。根据指标 i 权重 (w_i) 计算第 k 个评价单元相邻两边 (i, j) 的夹角 θ_{ij} :

$$\theta_{ki} = 2\pi w_{ki}, \theta_{kij} = \frac{1}{2} (\theta_{ki} + \theta_{kj}) = \pi (w_{ki} + w_{kj})$$

$$S_k = \frac{1}{2} \sin(\theta_{kij}) \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n (S_{ki} + 1)(S_{kj} + 1) \times \frac{2}{n(n-1)} \times \frac{n!}{2}$$

$$S = \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) \times 4n \times \frac{(n-1)!}{2} \tag{1}$$

式中: S_k 为实际方案值; S 为理想方案值。

(2) 直接赋权放缩指标值(思路 2)。通过对每个指标赋权, 即对不规则 n 多边形中三角形的两条边直接加权, 计算公式为

$$S = \frac{1}{2n(n-1)} \left(\sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n w_i \times (S_i + 1) \cdot w_j \times (S_j + 1) \right) \tag{2}$$

式中: w_i, w_j 分别为研究单元中第 i, j 个指标的权重,

$$w_i \geq 0, \sum_{i=1}^n w_i = 1.$$

需要注意的是,思路一利用 θ_{ij} 刻画权重会导致夹角 $\sin(\theta_{kij})$ 与 $\sin(\frac{2\pi}{n})$ 在计算时无法直接约解,加大了计算复杂度。思路2存在不规范化且缺乏还原性的问题,且直接加权通常仅考虑单个指标的影响,忽略指标之间潜在的交互作用,导致交互作用的影响难以充分体现。在思路2中可以看到权重是对称的,即第 i 个属性对第 j 个属性的影响强度与第 j 个属性对第 i 个属性的影响强度相同。但研究表明,要素间的相互作用往往呈现非对称耦合特征。例如,评估干旱对农业生态的影响时,山地植被覆盖率会显著调节下游径流量,但下游农田灌溉需求却很少能反向影响山地植被的分布。此外,生命共同体 CCD 评价的核心是测度子系统间相互依赖、协调演化的关系质量,而非单纯衡量其发展水平。因此,作者认为应对属性间的相互作用加权而不是属性本身,据此提出加权 FPPSIM。

定义3:设 $(w_{i,j})_{i,j=1 \dots n}$ 是一个权重的集合,其中, $w_{i,j} = w_i \cdot w_j, w_{i,j} \geq 0 (i, j = 1 \dots n), w_{i,i} = 0 (i = 1, 2 \dots n)$, 并且 $w_{i,j}$ 中至少有一个大于0。则 WFPPSIM 为

$$W_s = \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i,j=1}^n w_{i,j} \times (S_i + 1) \times (S_j + 1)}{\sum_{i,j=1}^n w_{i,j}} \right) \quad (3)$$

式中: W_s 为系统综合评价价值; S_i, S_j 为评价对象的第 i, j 个属性标准化后的值。

根据定义,权重 $w_{i,j}$ 是对属性 i 和 j 之间的积极相互作用的定量评价,决定了第 i 个属性对第 j 个属性的依赖程度,具有不对称性 $w_{i,j} \neq w_{j,i}$ 。该权重通过德尔菲法群体确定。需注意的是,当所有权重为0时,不存在与聚合相关的相互作用,因此无需进行聚合。属性之间的依赖结构如图2所示。 $i \rightarrow j$, 表示第 i 个属性依赖于第 j 个属性,权重为 $w_{i,j}$ 。

为展示 WFPPSIM 的计算过程及非对称交互作用的刻画能力,本文提供一个简化示例。假设有指标集 (A_1, A_2, A_3) , 其标准化后的值为 $(s_1, s_2, s_3) = (1.0, 0.1, 0.3)$ 。 $w_{i,j}$ 表示指标 i 对 j 的依赖程度($v_{i,j}$ 同理),其设定基于专家判断,反映系统要素间相互作用的非对称性。在该示例中,模拟两种不同的依赖结构(详见表1—2)。

假设指标间相互作用相对均等且对称。例如, w_{12} 表示 A_1 对 A_2 的影响强度为 0.009, w_{21} 表示 A_2 对 A_1 的影响强度也为 0.009, 体现双向对称影响,

数值大小表示相互作用强度。假设属性间存在显著的非对称依赖。例如, v_{13} 表示 A_1 对 A_3 的影响强度为 0.09, v_{31} 表示 A_3 对 A_1 的影响强度为 0.06, 而 $v_{12}, v_{21}, v_{23}, v_{32}$ 为 0 表示 A_2 与 A_1, A_3 无相互作用,这种结构体现了 A_1 和 A_3 的强耦合,而 A_2 相对独立。

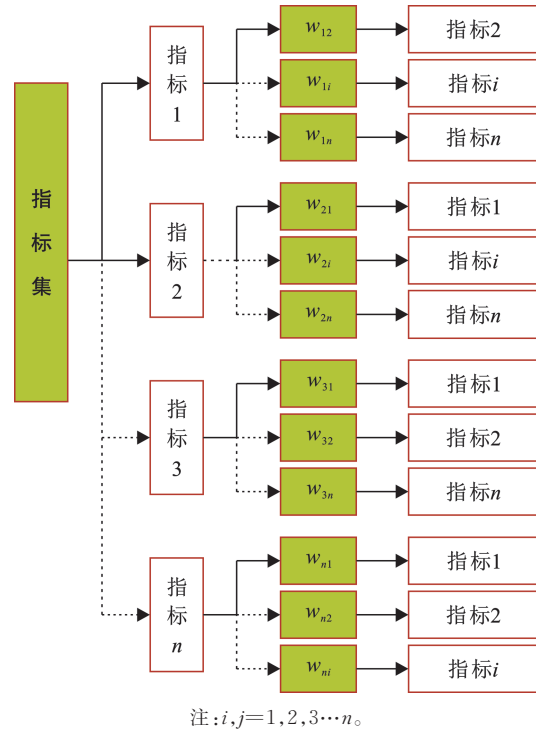


图2 生态系统评价指标间相互作用权重 $(w_{i,j})$ 的非对称依赖结构

Fig.2 Asymmetric dependency structure of interaction weigh $(w_{i,j})$ among ecosystem evaluation indicators

表1 指标集 (w_1, w_2, w_3) 的对称依赖结构

Table 1 Symmetric dependency structure of indicator set (w_1, w_2, w_3)

项目	指标权重 $(w_{i,j})$		
	w_1	w_2	w_3
w_1	0	0.009 0	0.081 0
w_2	0.009 0	0	0.000 9
w_3	0.081 0	0.000 9	0

注:①表中数值表示指标间的相互作用强度,0值表示无相互作用。② $i, j = 1, 2, 3$ 。表2同。

表2 指标集 (v_1, v_2, v_3) 的非对称依赖结构

Table 2 Asymmetric dependency structure of indicator set (v_1, v_2, v_3)

项目	指标权重 $(v_{i,j})$		
	v_1	v_2	v_3
v_1	0	0	0.09
v_2	0	0	0
v_3	0.06	0	0

由于 (w_1, w_2, w_3) 的权重是对称的, 由 WFPPSIM 得到: $W_{S_1} = 1.28$

对 (v_1, v_2, v_3) , 同理可得: $W_{S_2} = 1.3$

在这两种情况下, 均可观察到主导权重为 w_{13} 和 w_{31} 。因此, 结果应接近 W_{S_3} 。

为验证改进后 WFPPSIM 的有效性, 本研究将其应用于滇池流域 MRFFL 综合评价指数的测算, 为后续生命共同体 CCD 评价提供科学基准。本文基于 FPPSIM 分类标准与生态系统健康评价的国际分级惯例, 采用等间隔法将综合评价指数划分为 5 级(表 3)。

表 3 山水林田湖生命共同体综合评价指数等级划分标准
Table 3 Classification criteria for comprehensive evaluation index of life community of mountain-river-forest-farmland-lake

协调发展指数	低水平	较低水平	中等水平	较高水平	高水平
取值范围	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1.0]

2.3 体现系统倍增效应与属性非对称交互的 CCD 模型

MRFFL 生命共同体的协调演化具有显著的系统倍增效应与非对称交互特征, 为精准刻画这一复杂系统行为, 本文提出了基于 HF-WFPPSIM 的体现系统倍增效应与属性非对称交互的 CCD 模型, 所提模型的具体步骤如下。

(1) 建立初始决策矩阵 H' 。首先, 收集专家组意见, 基于系统的实际情况与统计结果, 得到生命共同体待评价年份 $A_i = (A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{in})$ 在评价属性 $C_j = (C_{j1}, C_{j2}, \dots, C_{jn})$ 下的所有评价值, 形成 $HFEh'_{ij} = \bigcup_{\gamma_j \in h'_j} \{\gamma'_{ij}\}$ 。由此构建的初始决策矩阵记为 H' :

$$H' = \bigcup_{\substack{i=1,2,\dots,m \\ j=1,2,\dots,n}} \{h'_i\} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & \begin{pmatrix} h'_{11} & h'_{12} & \dots & h'_{1n} \end{pmatrix} \\ A_2 & \begin{pmatrix} h'_{21} & h'_{22} & \dots & h'_{2n} \end{pmatrix} \\ \vdots & \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \\ A_m & \begin{pmatrix} h'_{m1} & h'_{m2} & \dots & h'_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

(2) 标准化初始决策矩阵。为消除多指标量纲差异并保障评价可比性, 采用临界点驱动型标准化策略以契合 MRFFL 存在非线性交互特征。由于 FPPSIM 标准化函数值域为 $[-1, 1]$, 与 HFS 隶属度取值位于 $[0, 1]$ 区间要求不符。为实现决策矩阵中的统一计算, 需将 MRFFL 的值域整体向正值方向平移一个单位至 $[0, 2]$, 再通过乘以 $1/2$ 将值域调整至 $[0, 1]$ 。具体计算公式参考文献[31]。

(3) 计算综合评价指数。借鉴 FPPSIM 的思路,

将综合评价指数 WS_{HF} 定义为实际解与理想解的比值。 WS_{HF} 不仅考虑了指标非对称交互的影响, 还涵盖了所有可能的排列组合情况。系统综合指数的计算公式为

$$WS_{HF} = \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{w_{i,j}}{\sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n w_{ij}} \left[(h_i \oplus h^{full}) \otimes (h_j \oplus h^{full}) \right] = \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{w_{i,j}}{\sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n w_{ij}} \left[\frac{1}{\#h_i \#h_j} \sum_{\gamma_i \in h_i} \sum_{\gamma_j \in h_j} (\gamma_i + 1)(\gamma_j + 1) \right] \quad (5)$$

式中: h^{full} 为犹豫模糊全集; $\frac{1}{\#h_i}, \frac{1}{\#h_j}$ 分别为 h_i, h_j 的犹豫度, 其中 $\#h$ 表示 h 所包含的数值的个数。

(4) 计算耦合协调度。CCD 模型^[32]与 FPPSIM 在复杂系统研究中展现出方法论的一致性。FPPSIM 的本质是通过所有可能成对指标组合的相互作用, 反映整体综合状态。CCD 模型则基于“两两要素乘积之和”的数学逻辑, 通过系统两两要素的协同作用聚合为系统整体耦合度, 结合协调度表征系统协同水平。基于方法的一致性, 以该模型来测度生命共同体的 CCD, 计算公式为

$$C_t = \frac{\frac{2 \sum_{i \neq j} U_{it} \cdot U_{jt}}{n(n-1)}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n U_{it}}{n} \right)^2} = \frac{\left[\frac{2 \sum_{i \neq j} U_{it} \cdot U_{jt}}{n(n-1)} \right]^k}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n U_{it}}{n} \right)^{2k}} \quad (6)$$

$(t = 1, 2, \dots, T)$

$$T_t = \sum_{i=1}^n \omega_i U_{it} \quad \left(\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \right) \quad (7)$$

$$D_t = \sqrt{C_{it} \cdot T_{it}} \quad (8)$$

式中: n 为系统总数; k 为调节系数, $k \geq 2$ 。 C_t 为 t 年生命共同体耦合度, C_t 值越接近 1, 表示系统间越趋于良性共振耦合状态, 耦合效果越好。 T_t 为 t 年生命共同体协调度, ω_i 为系统权重, 用以衡量子系统对生命共同体的贡献程度, 因 MRFFL 各子系统同等重要, $\omega_i = 1/5$ 。 D_t 表示生命共同体的耦合协调度, 其取值范围为 $[0, 1]$, D_t 越大, 表示 MRFFL 耦合协调状态越好。

本文在已有研究基础上, 采用均匀分布函数将 MRFFL 生命共同体 CCD 的取值范围和等级评判标准进行划分(详见表 4)。

表 4 耦合协调度等级类型划分标准
Table 4 Classification criteria for coupling coordination degree types

耦合协调区间	耦合协调类型	取值范围
高度协调	I 优质协调类型	(0.9, 1.0]
	II 良好协调型	(0.8, 0.9]
	III 中级协调型	(0.7, 0.8]
基本协调	IV 初级协调型	(0.6, 0.7]
	V 勉强协调型	(0.5, 0.6]
过度失调	VI 濒临失调型	(0.4, 0.5]
	VII 轻度失调型	(0.3, 0.4]
失调衰退	VIII 中度失调型	(0.2, 0.3]
	IX 严重失调型	(0.1, 0.2]
	X 极度失调型	(0.0, 0.1]

3 实例分析

3.1 实例背景

选取滇池流域作为 MRFFL 生命共同体 CCD 评价的研究区,流域作为具有完整物质能量循环特征的自然-社会复合单元,因其嵌套式生态层级结构,成为解析 MRFFL 耦合机制的理想研究尺度。该流域地处长江、珠江及红河水系分水岭的生态敏感带,地貌呈典型断陷盆地格局,形成面山—湖岸缓冲带—湖滨湿地—湖盆核心区的生态梯度结构;作为云南省城市化核心区,流域承载大量人口与经济活动,高强度人类活动与脆弱生态本底的叠加,使其成为经济发展与生态退化矛盾的典型区域。研究时段选取 2016 年(国家启动首批“山水工程”),2020 年(“十三五”规划)和 2024 年(“十四五”规划)3 个关键政策节点。基础数据源于《云南省生态环境状况公报》《昆明市统计年鉴》等官方出版物;缺失的数据或难以量化的指标由专家组打分给出,通过 HFS 完成定性—定量数据转换。

3.2 指标体系构建

近年来,MRFFL 耦合评价的理论框架已初步形成,指标体系构建呈现多视角探索格局。例如,张中秋等^[18]基于 PSR 模型,从山、水、林、田、湖 5 方面构建评价框架;黄思敏等^[17]进一步将“海”纳入系统,明确陆海统筹对生命共同体 CCD 评价的重要性。本文指标体系构建遵循以下逻辑:首先运用频度统计法,系统梳理相关研究^[14-18, 24, 26],筛选山、水、林、田、湖 5 维度高频指标;其次结合 MRFFL 耦合机理,将物种丰富度归属于山系统。因为生境异质性是物种丰富度的核心驱动因素,而山地的地表起伏度、海拔高差等地形特征是异质生境形成的基础,且其结构支撑作用优于林、田等其他要素;最后,基于系统结构与功

能稳定是生命共同体健康核心指征的认知^[1],从要素、结构与功能 3 方面筛选表征系统核心特征的指标,初步构建体系,并经相关领域专家咨询优化(科学性、代表性、可操作性),最终形成 MRFFL 生命共同体评价指标体系(详见表 5)。

3.3 评价实施

评价过程中常面临数据缺失及部分指标难以量化。为此,课题组邀请生态治理修复、环境经济和流域治理工程等领域的 5 名专家,根据相关研究与官方资料,确定滇池流域 MRFFL 各指标值,并映射到区间 $\{0, 0.1 \dots 0.9, 1\}$ 。为完整保留专家组的评价信息并简化一致性推导过程,本文将各评价值根据定义转换为 HFS,得到初始决策矩阵。为避免过多赘述,本文仅展示 2024 年滇池流域生命共同体湖系统综合评价求解过程,初始决策矩阵为

$$H'_{2024} = \begin{pmatrix} \{0.52\} & \{0.89\} & \{0.87, 0.95\} \\ \{0.97\} & \{0.62, 0.65, 0.78\} & \end{pmatrix}$$

其次,采用非线性标准化策略^[31]对初始决策矩阵进行标准化,通过阈值响应机制实现指标隶属度的非线性映射,最后得到标准化后的决策矩阵为

$$H_{2024} = \begin{pmatrix} \{0.0\} & \{1.0\} & \{0.529, 1.0\} \\ \{1.0\} & \{0.781, 0.866, 1.0\} & \end{pmatrix}$$

标准化后,根据德尔菲法赋权(表 6)与公式(5)迭代计算 2016—2024 年 MRFFL 各系统的综合评价指数(图 3)。

进一步根据综合评价值,利用公式(6)—(8),计算出 2016—2024 年 MRFFL 生命共同体的 CCD。其中子系统内部要素间的 CCD 计算步骤与生命共同体一致。

3.4 结果与分析

3.4.1 子系统内部要素 CCD 分析

本研究应用 CCD 模型,分析 2016—2024 年滇池流域湖系统中 L_1, L_2, L_3, L_4 与 L_5 核心指标的交互关系,揭示 5 指标组合的 CCD 演变规律(表 7)。由表 7 可知,2016—2024 年湖系统内部要素耦合协调总体呈波动上升趋势,系统整体 CCD 从 0.911 升至 0.967,达到优质协调等级。时变特征包括:两指标组合中, L_1-L_3 的 CCD 呈现负向演变(0.938→0.829, $p < 0.05$),揭示单纯控制点源污染的边际效应递减规律; L_3-L_4 组合在 2020 年出现 CCD 峰值 0.996,与《滇池流域水污染防治规划(2016—2020 年)》的工程措施集中见效期吻合,但 2024 年回落至 0.786,反映污水处理设施扩容滞后于排放量 26% 的年均增速; L_3-L_4 的 CCD 提升幅度最大,增幅 0.241,其演化拐点

2017 年与环湖截污工程完工节点一致,证实水质改善对渔业经济的正向溢出效应。多指标协同分析显示,3 指标组合协调度普遍提升,其中 $L_1-L_2-L_4$ 组合增幅达 28.8%,形成环境—经济协同优化范式。这种治污增效—水质改善—生产提质的正反馈机制,与滇池流域推行的生态养殖认证制度及 47 个原位生态修复工程实施直接相关。但需注意的是,全系统

CCD 仍低于理论最优值,主要受污水排放量指标变异系数过高的制约。总体而言,2016—2024 年滇池流域湖系统的耦合状态得到改善,尤其是在水产品单产与污水处理率的协调性方面取得了显著进展。尽管大部分组合的协调性提升,但污水排放量与其他指标的 CCD 下降,提示需要进一步加强污水管理,确保污水排放与处理之间的协调。

表 5 山水林田湖生命共同体评价指标体系

Table 5 Evaluation indicator system for life community of mountain-river-forest-farmland-lake

目标层	系统层	指标层	指标解释	方向
山水林田湖生命共同体评价指标体系	山(M)	物种丰富度(M_1)	山体所支撑的生物多样性水平	+
		石漠化面积比例(M_2)	山体受侵蚀退化程度	-
		地表起伏度(M_3)	山体地貌起伏形态	+
		矿山环境恢复治理程度(M_4)	山体的治理情况	+
		平均海拔(M_5)	地表起伏状况	+
	水(R)	降水量(R_1)	水资源丰度和赋存程度	+
		人均水资源量(R_2)	人均水资源占有量	+
		产水系数(R_3)	水资源开发潜力及承载力	+
		水土流失治理面积(R_4)	水土流失治理重视程度	+
		水体透明度(R_5)	水体观赏性与污染情况	+
	林(F)	森林覆盖率(F_1)	水土保持、水源涵养能力	+
		林业产值(F_2)	林木经济效益	+
		活立木总蓄积量(F_3)	活立木蓄积量	+
		退耕还林面积(F_4)	林地重视程度	+
		田(P)	粮食单产(P_1)	田产能高低与耕地质量
	耕地面积比(P_2)		粮食安全	+
	农田灌溉水利用效率(P_3)		农田水资源利用率	+
	水田比例(P_4)		田的质量	+
	单位耕地面积农药和化肥使用量(P_5)		对田的污染	-
	湖(L)	湖泊富营养化程度(L_1)	湖污染程度	-
水产品单产(L_2)		湖的生态状况	+	
污水排放量(L_3)		对湖的污染	-	
城市污水处理率(L_4)		对湖的治理情况	+	
湖滨景观舒适度(L_5)		湖滨自然人文景观质量	+	

表 6 山水林田湖相互作用权重

Table 6 Interaction weights of mountain-river-forest-farmland-lake

系统	山	水	林	田	湖
山	0	0.32	0.30	0.20	0.22
水	0.30	0	0.40	0.26	0.28
林	0.30	0.36	0	0.22	0.25
田	0.18	0.21	0.16	0	0.35
湖	0.19	0.25	0.24	0.33	0

3.4.2 MRFFL 的 CCD 分析

根据 CCD 模型对 MRFFL 5 个子系统的 CCD 进行计算(表 8),并对 25 种组合进行分析。分析结果表明,研究期内 MRFFL-CCD 由 0.482 上升至 0.688,年

均增长 2.5%,系统协同演进依次经历“濒临失调—勉强协调—初级协调”3 阶段跃迁,反映出滇池流域生态保护修复工程的积极成效。2020 年是系统协调状态的关键转折点,协调水平进入勉强协调阶段,主要得益于水资源管理与林业生态的改善,但也凸显出农业与生态间的结构性矛盾及湖泊修复滞后问题。至 2024 年,系统耦合协调类型提升至初级协调,但农田与湖泊子系统仍是整体协调水平的主要制约。随着子系统数量增加,CCD 总体呈上升趋势,全系统 CCD 较四元组合均值提升 12.6%,表明多要素协同有助于增强生态服务功能与系统稳定性。然而,当前 CCD 整体仍未达优质,反映出跨部门协同机制不

足,水资源调度、农业管控与污染治理尚未形成一体化决策体系。

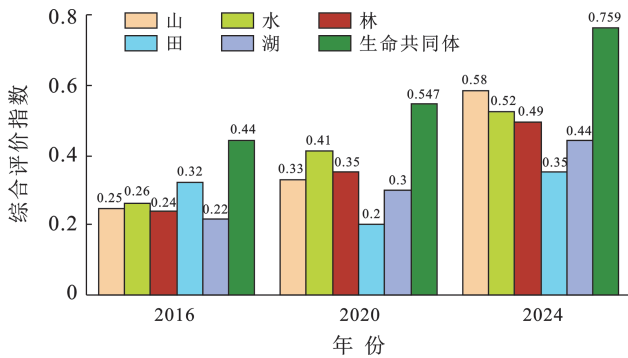


图3 滇池流域山水林田湖生命共同体综合评价指数
Fig.3 Comprehensive evaluation index of life community of mountain-river-forest-farmland-lake in Dianchi Lake basin

表7 2016—2024年滇池流域湖子系统内部要素耦合协调度
Table 7 Coupling and coordination degree of internal factors of lake subsystem in Dianchi Lake basin from 2016 to 2024

要素	2016年	2020年	2024年
L ₁ —L ₂	0.619	0.663	0.875
L ₁ —L ₃	0.938	0.917	0.829
L ₁ —L ₄	0.612	0.650	0.865
L ₁ —L ₅	0.589	0.622	0.697
L ₂ —L ₃	0.923	0.984	0.795
L ₂ —L ₄	0.582	0.742	0.823
L ₂ —L ₅	0.634	0.783	0.847
L ₃ —L ₄	0.919	0.996	0.786
L ₃ —L ₅	0.502	0.736	0.809
L ₁ —L ₂ —L ₃	0.913	0.962	0.925
L ₁ —L ₂ —L ₄	0.740	0.843	0.953
L ₁ —L ₂ —L ₅	0.754	0.823	0.919
L ₁ —L ₃ —L ₅	0.806	0.899	0.924
L ₁ —L ₄ —L ₅	0.823	0.898	0.921
L ₂ —L ₃ —L ₄	0.912	0.934	0.891
L ₂ —L ₃ —L ₅	0.763	0.855	0.916
L ₃ —L ₄ —L ₅	0.779	0.861	0.922
L ₁ —L ₂ —L ₃ —L ₄	0.889	0.915	0.917
L ₁ —L ₂ —L ₄ —L ₅	0.816	0.892	0.926
L ₁ —L ₃ —L ₄ —L ₅	0.823	0.898	0.937
L ₂ —L ₃ —L ₄ —L ₅	0.883	0.922	0.945
L ₁ —L ₂ —L ₃ —L ₄ —L ₅	0.911	0.939	0.967

注:表中L₁—L₅的含义见图1。

从研究期 CCD 均值来看,二元系统中“水—林”组合的 CCD 最高,与昆明持续推进海绵城市建设密切相关,其项目覆盖率提升有效增强了水林系统间的生态连接。相比之下,“山—田”与“湖—田”受农业面源污染影响表现最弱:山地地形复杂叠加农业粗放经营,导致水土流失严重;滇池东南部晋宁区、嵩明县蔬菜花卉种植区化肥施用量居高不下,面源

污染贡献入湖总氮半数以上,而湖泊治理侧重于环湖截污,未能与农田养分管控形成闭环,造成“农业经济利益—湖泊生态安全”的割裂局面。在三元组合中,“山—水—林”CCD 持续领先,2024 年达 0.720,较 2016 年提升约 30%,主要归因于地形与生态功能的不可替代性以及政策协同的放大效应。山地形成水源涵养基底,森林调节水文过程,二者协同削减入湖泥沙与污染物,而稳定水资源供给又反哺山林生态健康,构建“地形—植被—水文”良性循环。《滇池流域山水林田湖草生态保护修复工程试点》将资金重点投入矿山修复、河道治理与森林抚育,精准契合三要素耦合需求,进一步强化协同效应。相反,“水—田—湖”组合因农业耗水与污染压力并存,且缺乏跨要素协同治理机制,CCD 长期处于低位,成为系统整体协调的薄弱环节。综上所述,滇池流域生命共同体治理成效与挑战并存,系统协调水平的提升验证了多要素协同治理路径的有效性,而“田—湖”耦合薄弱与跨部门协同不足则揭示“分而治之”治理模式的局限,其本质是自然资源管理与自然资本运营之间的协调失衡。

表8 滇池流域 2016—2024 年山水林田湖耦合协调度
Table 8 Coupling and coordination degree of mountain-river-forest-farmland-lake in Dianchi Lake basin from 2016 to 2024

要素	2016年	2020年	2024年
山—水	0.348	0.427	0.521
山—林	0.351	0.471	0.579
山—田	0.323	0.299	0.336
山—湖	0.251	0.323	0.419
水—林	0.381	0.634	0.681
水—田	0.333	0.345	0.341
水—湖	0.258	0.376	0.457
林—田	0.334	0.412	0.471
林—湖	0.257	0.387	0.447
田—湖	0.219	0.277	0.251
山—水—林	0.425	0.615	0.720
山—水—田	0.519	0.510	0.559
山—水—湖	0.337	0.435	0.542
山—林—田	0.405	0.432	0.472
山—林—湖	0.353	0.482	0.561
山—田—湖	0.325	0.329	0.340
水—林—田	0.411	0.516	0.494
水—林—湖	0.370	0.570	0.635
水—田—湖	0.322	0.341	0.327
林—田—湖	0.328	0.370	0.351
山—水—林—田	0.468	0.573	0.622
山—水—林—湖	0.439	0.613	0.687
山—林—田—湖	0.409	0.473	0.538
水—林—田—湖	0.417	0.523	0.545
山—水—林—田—湖	0.482	0.603	0.688

3.4.3 方法优势与对比分析

山水林田湖生命共同体体现了人与自然和谐共生的核心要义,其CCD的科学测度是优化生态治理决策的关键。但当前对其耦合互动的理论认知仍滞后于实践探索——生态治理已从单一工程修复迈向系统协同,对“要素互动—功能涌现—治理响应”的内在逻辑解析仍显不足。本文提出的HF-WFPPSIM采用面式聚合替代算术平均,以面积量化系统整体功能,将权重赋予要素间的相互作用,更贴合MRFFL“上游驱动下游”“功能反馈滞后”等非对称耦合特征;以HFS处理不确定性,保留评价过程中的意见分歧,提升结果稳健性,在方法层面实现结构—功能—权重的深度耦合表达。其以要素交互—功

能涌现为核心逻辑,具备良好的方法普适性,可拓展至“山水林田湖草沙”“人—地—生态”等复合系统。为进一步验证本研究提出的HF-WFPPSIM方法的合理性,利用原始数据,将其与HF-FPPSIM和线性加权平均为代表的HF-TOPSIS进行对比,结果详见表9。结果表明,HF-FPPSIM的评价结果与HF-WFPPSIM完全一致,验证了HF-WFPPSIM在体现系统倍增效应上具有一定的有效性,而与HF-TOPSIS的评价结果存在差异,主要缘于其采用线性加权聚合法,难以充分体现生命共同体的系统性与要素间的非线性耦合关系。相比之下,HF-WFPPSIM通过融入系统特性与内在机理,使评价结果更符合实际。

表9 评价方法对比与排序结果

Table 9 Evaluation method comparison and ranking results

评价方法	年份	综合评价指数					排序结果
		山	水	林	田	湖	
HF-FPPSIM	2016	0.59	0.51	0.45	0.39	0.44	水>林>山>湖>田
	2020	0.64	0.63	0.60	0.44	0.59	
	2024	0.68	0.74	0.79	0.57	0.82	
HF-TOPSIS	2016	0.40	0.47	0.27	0.31	0.22	水>山>林>湖>田
	2020	0.65	0.66	0.68	0.50	0.61	
	2024	0.79	0.74	0.83	0.62	0.82	
HF-WFPPSIM	2016	0.25	0.26	0.24	0.32	0.21	水>林>山>湖>田
	2020	0.33	0.41	0.35	0.20	0.30	
	2024	0.58	0.52	0.49	0.35	0.44	

4 结论

(1) 构建MRFFL生命共同体耦合协调理论框架。基于系统科学与生态耦合机理,从物质—能量—信息流、水文过程、功能互补和人类活动方面,揭示MRFFL生命共同体内在耦合机制,明确非对称耦合对系统整体功能的影响,为生态协同治理提供理论参考。

(2) 提出MRFFL多要素非对称耦合评价的HF-WFPPSIM方法。该方法以HFS表征评价信息的不一致性;采用面式聚合捕捉要素协同产生的系统倍增效应,利用权重刻画系统间非对称耦合关系。经与HF-TOPSIS, HF-FPPSIM对比,其面式聚合与非对称权重特性使其评价结果更贴合生态系统实际。

(3) 实证分析滇池流域MRFFL生命共同体耦

合协调状态。2016—2024年其综合评价指数从0.440提升至0.759,具体表现为:水>林>山>湖>田;CCD从0.482提升至0.688,实现“濒临失调型—勉强协调型—初级协调型”的三阶段跃迁。其中,“山—水—林”三元耦合表现最优,而“田—湖”耦合仍为系统协调的短板,反映未来治理需进一步加强农业面源污染控制与湖泊生态修复的协同。

根据研究结论,提出流域生态治理修复建议如下:①健全生态监测与资产化体系。构建天空地一体化生态监测网络,实时获取关键生态参数,推进MRFFL等自然资源的统一确权登记,将生态修复成效转化为可量化、可交易的自然资源。②强化国土空间生态功能协同。面山区域推广乡土树种造林,增强水源涵养;在农田与湖泊间1 km缓冲带构建以本土植被为主的复合植被带,有效削减氮磷入湖负荷;湖滨区严格管控开发强度,逐步恢复湿地面。③创

新跨越协同与生态价值实现机制。设立具有综合职能的流域管理机构,推动形成“政务共同体”;实施生态补贴与绿色农产品溢价反哺机制,探索建立“滇池生态银行”,整合碳汇、净化等生态服务功能,通过绿色金融工具实现生态价值转化。

本文提出的 MRFFL 生命共同体 CCD 评价 HF-WFPPSIM 方法具有一定的方法超前性,未来可通过降维算法降低因 FPPSIM 指标全排列形成的多边形面积计算复杂度随指标数量增加呈指数增长的问题以及可引入动态权重机制,通过面板数据捕捉耦合关系的时序变化,使动态信息得到充分利用。

参考文献 (References)

- [1] 张杨,杨洋,江平,等.山水林田湖草生命共同体的科学认知、路径及制度体系保障[J].自然资源学报,2022,37(11):3005-3018.
- Zhang Yang, Yang Yang, Jiang Ping, et al. Scientific cognition, path and governance system guarantee of the life community of mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasses [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(11):3005-3018.
- [2] 周妍,陈妍,应凌霄,等.山水林田湖草生态保护修复技术框架研究[J].地学前缘,2021,28(4):14-24.
- Zhou Yan, Chen Yan, Ying Lingxiao, et al. A technical framework for ecosystem conservation and restoration [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4):14-24.
- [3] 王夏晖,何军,饶胜,等.山水林田湖草生态保护修复思路与实践[J].环境保护,2018,46(S1):17-20.
- Wang Xiahui, He Jun, Rao Sheng, et al. Design of implementation path of ecological engineering for ecological protection and restoration of multi ecological elements [J]. Environmental Protection, 2018, 46(S1):17-20.
- [4] Liu Hanchu, Fan Jie, Liu Baoyin, et al. Practical exploration of ecological restoration and management of the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands system in the Irtysh River basin in Altay, Xinjiang [J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(6):766-776.
- [5] 彭建,吕丹娜,张甜,等.山水林田湖草生态保护修复的系统性认知[J].生态学报,2019,39(23):8755-8762.
- Peng Jian, Lü Danna, Zhang Tian, et al. Systematic cognition of ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23):8755-8762.
- [6] Li Yi, Liu Yujie, Zhang Qiang, et al. Research on ecological protection and restoration measures in Altay Region based on the coupling perspective of the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands system [J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(6):791-800.
- [7] 成金华,尤喆.“山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径[J].中国人口·资源与环境,2019,29(2):1-6.
- Cheng Jinhua, You Zhe. Scientific connotation and practical paths about the principle of ‘taking mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands as a life community’ [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(2):1-6.
- [8] 李达净,张时煌,刘兵,等.“山水林田湖草一人”生命共同体的内涵、问题与创新[J].中国农业资源与区划,2018,39(11):1-5.
- Li Dajing, Zhang Shihuang, Liu Bing, et al. The connotation, problems and innovation of life community of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, grasslands and human [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(11):1-5.
- [9] 于恩逸,齐麟,代力民,等.“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[J].生态学报,2019,39(23):8837-8845.
- Yu Enyi, Qi Lin, Dai Limin, et al. Correlation analysis of elements in the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands life community: Using Changbai Mountains as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23):8837-8845.
- [10] 周妍,王金满,陈妍,等.基于自然的山水林田湖草沙一体化保护和修复技术路径探索[J].中国土地科学,2024,38(6):40-49.
- Zhou Yan, Wang Jinman, Chen Yan, et al. Technological path exploration for application of nature-based solutions to integrated ecological conservation and restoration project of mountains, rivers, forests, farmland, lakes, grassland and deserts [J]. China Land Science, 2024, 38(6):40-49.
- [11] Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems [J]. Ecosystems, 2001, 4(5):390-405.
- [12] Costanza R, d’Arge R, de Groot R, et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics, 1998, 25(1):3-15.
- [13] 程艳,崔瑶,林涛,等.额尔齐斯河流域山水林田湖草工程生态保护修复成效评价[J].自然资源学报,2024,39(12):2798-2818.
- Cheng Yan, Cui Yao, Lin Tao, et al. Ecological protection and restoration performance evaluation of the Mountains-waters-forests-fields-lakes-grasslands project in the Irtysh River basin [J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(12):2798-2818.
- [14] 吕思思,苏维词,赵卫权,等.山水林田湖生命共同体健

- 康评价:以红枫湖区域为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(8):1987-1997.
- Lv Sisi, Su Weici, Zhao Weiquan, et al. Life community health evaluation of mountains, rivers, forests, farmland and lakes: Taking Hongfeng Lake as an example [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(8):1987-1997.
- [15] 张中秋,张裕凤,胡宝清.山水林田湖草健康发展时空异质性及其驱动力:以广西北部湾经济区为例[J].生态学报,2024,44(12):5140-5158.
- Zhang Zhongqiu, Zhang Yufeng, Hu Baoqing. Spatio-temporal heterogeneity and its driving force for the healthy development of mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands(seas): A case study of Guangxi Beibu Gulf economic zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(12):5140-5158.
- [16] 萨娜,赵金羽,寇旭阳,等.“山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架、模型与展望[J].生态学报,2023,43(11):4333-4343.
- Sa Na, Zhao Jinyu, Kou Xuyang, et al. Coupling mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sand-lands life community: Framework, models and prospect [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(11):4333-4343.
- [17] 黄思敏,胡宝清,张中秋,等.山水林田湖海多维测度环境影响与时空分异:以广西北部湾为例[J].水土保持通报,2022,42(6):369-377.
- Huang Simin, Hu Baoqing, Zhang Zhongqiu, et al. Multi-dimensional measurement of landscapes, forests, fields, lakes and seas, and spatiotemporal differentiation: A case study for the Beibu Gulf of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):369-377.
- [18] 张中秋,劳燕玲,王莉莉,等.广西山水林田湖生命共同体的耦合协调性评价[J].水土保持通报,2021,41(3):320-332.
- Zhang Zhongqiu, Lao Yanling, Wang Lili, et al. Evaluation on coupling and coordination status of mountain, water, forest, field, and lake life community in Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):320-332.
- [19] 乔标,方创琳.城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用[J].生态学报,2005,25(11):3003-3009.
- Qiao Biao, Fang Chuanglin. The dynamic coupling model of the harmonious development between urbanization and eco-environment and its application in arid area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(11):3003-3009.
- [20] 陈静,杨凯,张勇,等.灰色协调度模型在产业用水系统分析中的应用[J].长江流域资源与环境,2008,17(5):688-692.
- Chen Jing, Yang Kai, Zhang Yong, et al. Application of grey synergistic model in the appraisal of regional water use for industry [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008,17(5):688-692.
- [21] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793-810.
- Wang Shujia, Kong Wei, Ren Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(3):793-810.
- [22] 吴琼,王如松,李宏卿,等.生态城市指标体系与评价方法[J].生态学报,2005,25(8):2090-2095.
- Wu Qiong, Wang Rusong, Li Hongqing, et al. The indices and the evaluation method of eco-city [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(8):2090-2095.
- [23] 吕思思,李威,苏维词,等.基于山水林田湖草协同/权衡的生态管控分区研究[J].灌溉排水学报,2024,43(9):88-94.
- Lyu Sisi, Li Wei, Su Weici, et al. Ecological space zoning based on synergies and trade-offs of mountain, water, forest, farmland, lake and grassland [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024,43(9):88-94.
- [24] 赵金羽,萨娜,付晓,等.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[J].生态学报,2023,43(10):3841-3854.
- Zhao Jinyu, Sa Na, Fu Xiao, et al. Multi-scale coupling framework and method for mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands ecological restoration projects: A case study of Shule River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(10):3841-3854.
- [25] 苏加福,徐保健,刘红雨,等.混合犹豫模糊集下基于改进 CRITIC-ORESTE 的多准则群决策方法[J].计算机集成制造系统,2025,31(3):1048-1058.
- Su Jiafu, Xu Baojian, Liu Hongyu, et al. Multi-criteria group decision-making method based on improved CRITIC-ORESTE in context of hybrid hesitant fuzzy sets [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2025,31(3):1048-1058.
- [26] 刘畅,渠鸿娇,郭涿.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[J].生态学报,2024,44(7):2745-2760.
- You Chang, Qu Hongjiao, Guo Luo. Spatio-temporal coupling and prediction of social-ecological systems under the “concept of life community of mountains, water, forests, fields, lakes, grasses, and sands” [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(7):2745-2760.

- Yu Xinxiao, Zhou Bin, Lü Xizhi, et al. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST model [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(10):1-5.
- [25] Shen Liqiang, Li Zexian, Hao Jiaxin, et al. Evaluating the dynamic response of cultivated land expansion and fallow urgency in arid regions using remote sensing and multi-source data fusion methods [J]. *Agriculture*, 2025, 15(8):27.
- [26] Wang Xiao, Che Lei, Zhou Liang, et al. Spatio-temporal dynamic simulation of land use and ecological risk in the Yangtze River delta urban agglomeration, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2021, 31(5):829-847.
- [27] Chen Guo, Zuo Depeng, Xu Zongxue, et al. Changes in water conservation and possible causes in the Yellow River basin of China during the recent four decades [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 637:131314.
- [28] 周亚鹏, 刘欣, 刘琳, 等. 2000—2020 年京津冀地区国土空间多功能权衡强度时空演变及影响机制[J]. *生态学报*, 2024, 44(3):977-991.
- Zhou Yapeng, Liu Xin, Liu Lin, et al. Spatio-temporal dynamics and influencing factors of trade-off intensity among territorial space functions in the Beijing-Tianjin-Hebei region(2000—2020) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(3):977-991.
- [29] 张祯尧, 陈思瑾, 张振明, 等. 北京山区森林生态系统水源涵养功能沿海拔梯度的空间变异[J]. *生态学报*, 2025, 45(3):1239-1250.
- Zhang Zhenyao, Chen Sijin, Zhang Zhenming, et al. Spatial patterns of forest water conservation function along an elevation gradient in the Beijing mountain area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3):1239-1250.
- [30] Pei Xingfang, Yang Kun, Zhu Senlin, et al. Water conservation for plateau lakeside cities under the new development philosophy [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166:112560.
- [31] 王诗媛, 向洋, 魏唯一, 等. 黄河中游城市群水源涵养时空演变特征及影响机制分析[J]. *人民黄河*, 2025, 47(6):110-116.
- Wang Shiyuan, Xiang Yang, Wei Weiyi, et al. Analysis of the spatiotemporal evolution characteristics and impact mechanism of water conservation in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yellow River [J]. *Yellow River*, 2025, 47(6):110-116.

(上接第 305 页)

- [27] 王念胜, 杜碧辉, 彭维仕, 等. 基于改进雷达图法的侦察装备效能评估[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 22(6):103-109.
- Wang Niansheng, Du Bihui, Peng Weishi, et al. An effectiveness evaluation method of reconnaissance equipment based on improved radar chart [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2021, 22(6):103-109.
- [28] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(11):2105-2138.
- Li Zhongka, Li Xiaoyan, Zhou Sha, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2022, 52(11):2105-2138.
- [29] Torra V. Hesitant fuzzy sets [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2010, 25(6):529-539.
- [30] 周金明, 苏为华, 王玉颖. Radar 图综合评价方法的缺陷分析及其改进思路[J]. *统计与信息论坛*, 2017, 32(7):44-48.
- Zhou Jinming, Su Weihua, Wang Yuying. The defects of radar chart method and its improvement [J]. *Statistics & Information Forum*, 2017, 32(7):44-48.
- [31] 彭定洪, 李杰. 智慧旅游安全评价的犹豫模糊全排列多边形图示法[J]. *生态经济*, 2022, 38(9):137-144.
- Peng Dinghong, Li Jie. Hesitant fuzzy full permutation polygon synthetic indicator method for safety evaluation of smart tourism [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(9):137-144.
- [32] 汤铃, 李建平, 余乐安, 等. 基于距离协调度模型的系统协调发展定量评价方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(4):594-602.
- Tang Ling, Li Jianping, Yu Lean, et al. Quantitative evaluation methodology for system coordination development based on distance coordination degree model [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(4):594-602.