

邓梦华, 何泽恩, 程思聪, 等. 基于改进 SobolSSA-ANP 的生态补偿效果评估: 以太湖流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 148-159. DENG M H, HE Z E, CHENG S C, et al. Evaluation effect of watershed ecological compensation based on improved SobolSSA-ANP in the Taihu basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 148-159. (in Chinese)

基于改进 SobolSSA-ANP 的生态补偿效果评估

——以太湖流域为例

邓梦华^{1,3}, 何泽恩¹, 程思聪², 郑鸿斌¹

(1. 河海大学商学院, 南京 210098; 2. 河海大学物联网工程学院, 南京 210098;
3. 河海大学江苏长江保护与高质量发展研究基地, 南京 210098)

摘要: 对流域生态补偿现状进行分析研究, 从生态效果、经济水平、社会公平及政策投入 4 个方面构建流域生态补偿效果评估指标体系; 在此基础上, 针对评估指标较多和专家评判时容易出现一致性差等问题, 提出一种改进 SobolSSA-ANP (sobol sparrow search algorithm-analytic network process) 方法, 并基于该方法对太湖流域的生态补偿效果进行评估。结果表明: 太湖流域生态补偿实施效果介于一般和较好之间, 且倾向于较好; 从 2010 年到 2020 年, 通过实施生态补偿政策, 太湖流域生态补偿效果呈逐渐上升趋势; 为进一步提升生态补偿效果, 太湖流域需加大资金投入和提升政策满意度。为此, 流域可推动多主体参与的横向生态补偿政策以拓宽资金渠道, 实现生态资源到生态资本的转化。研究结果可以为流域生态补偿效果的评估和生态补偿政策的制定提供借鉴与参考, 对提升流域治理能力现代化水平具有重要的现实意义。

关键词: 流域生态补偿; 效果评估; Sobol-SSA; 模糊综合评价; 网络分析法; 太湖流域

中图分类号: TV212.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0016

近年来, 由于流域资源的过度开发, 流域水生态、水污染和水环境问题突出^[1]。为有效改善流域生态环境, 国内外专家开展了系列研究。其中, 流域生态服务付费(payment for watershed ecosystem services, PWES)作为一种能将外在环境价值转化为提供生态服务经济激励的手段而得到广泛应用。例如: 美国地方政府通过森林流域保护计划向下游受益人收取流域服务费用^[2]; 英国利用生态服务付费计划改善农业集中用水区的水质^[3]。结合 PWES 和政府管控, 中国在太湖^[4]、新安江^[5]和黄河^[6]等流域开展了生态补偿(ecological compensation, EC)试点, 有效改善了这些流域的生态环境, 促进了社会经济的可持续发展^[7-8]。与此同时, 专家对流域生态补偿概念、补偿标准、补偿机制和补偿效果等进行了研究。在流域生态补偿概念研究方面: 陈进^[9]认为生态补偿是对生态环境负面的外部影响给予的补偿活动; 门宝辉等^[10]认为生态补偿是调节利益相关者关系, 推

动绿色可持续发展的一项政策制度。在流域生态补偿标准研究方面, 专家大多采用量化方法从社会经济和生态自然两大视角开展评估。社会经济方面: 刘玉龙等^[11]通过支付意愿法对流域生态建设的总成本进行汇总, 引入水量分摊系数、水质修正系数和效益修正系数计算生态补偿量作为补偿标准; 袁瑞娟等^[12]从社会效益的视角, 以居民对水质改善的支付意愿金额作为补偿标准。生态自然方面: Yang 等^[13]通过测量不同区域生态足迹, 计算人均生态足迹分量以确定生态补偿量化标准; 王新年等^[14]运用鲁宾斯坦恩-斯塔尔讨价还价模型, 构建了有限期博弈和无限期博弈的跨省水源地保护生态补偿标准讨价还价博弈模型; 许凤冉等^[15]提出生态补偿标准应综合考虑水源保护成本、发展机会成本和水资源生态服务价值, 且要逐步与社会经济发展状况相适应。在流域生态补偿机制研究方面: 张捷等^[16]通过生态元量化各类生态系统, 构建不同层面的生

收稿日期: 2022-05-23 修回日期: 2022-11-30 网络出版时间: 2022-12-30

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221229.1408.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001250); 中央高校基本科研业务费项目(B200201032); 常州市领军型创新人才引进培育项目(CQ20210095)

作者简介: 邓梦华(1985—), 女, 江西鹰潭人, 讲师, 博士, 主要从事生态补偿、风险评估、水资源管理等研究。E-mail: dengmenghua@hhu.edu.cn

态元缓解银行机制,实现长江干流省份市场化、多元化的综合横向生态补偿机制;范晓芬等^[17]通过分析实际消减量和理论上最优消减量间的关系确定生态补偿的方向和金额。在流域生态补偿效果评价方面,主要采用定性分析、定量分析两类方法对生态补偿绩效开展分析。定性分析方面,于鲁冀等^[18]采用对比分析法和实地调研法对河南省水环境生态补偿政策的实施成效进行了分析和评价。定量分析方面:岳思羽^[19]从社会发展、水资源节约、环境治理及环境监管4方面构建了生态补偿评价体系,并基于层次分析法对汉江流域生态补偿效益进行评价;徐大伟等^[20]将经济发展情况和生态环境保护作为生态补偿绩效的分项指标,利用倾向值匹配法对区域生态补偿绩效进行评估。生态补偿效果评估指标体系的构建过程:唐萍萍等^[21]提出生态补偿政策的实施效果不仅仅包括水生态环境的改善,还包括居民社会福利水平的提升;陆巧玲等^[22]提出从生态效益、经济效益和社会公平等方面构建生态补偿效果评估指标体系。社会公平的研究涉及城乡收入差距和居民健康体验等社会福祉的研究。耿翔燕等^[23]从生态效益、经济效益及社会效益等方面构建了指标体系对生态补偿效果进行评估。从现有文献来看,生态补偿效果评估正逐步从定性的描述生态补偿过程存在的问题,到构建指标体系对补偿效果进行定量评估发展。在生态补偿效果评估中,不仅仅涉及生态环境相关的指标,还涉及社会、经济和政府的政策等各方面的指标,且各指标间存在复杂的相互作用关系。网络分析法(analytic network process, ANP)能较好地描述复杂系统中各元素之间的相关关系,可以更为科学准确地处理这类问题^[24]。李治军等^[25]对芜湖市水资源承载力进行评估,研究表明 ANP 方法可以科学合理地确定各个指标的权重。为此,本文采用 ANP 方法对指标间的相互关系进行分析。然而当评估指标过多时,ANP 方法容易出现一致性差等问题。麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)是通过模拟麻雀的觅食和反捕食行为提出的一种启发式群优化算法,具有稳定性好和求解效率高等优点^[26]。该算法在网络入侵检测^[27]和径流量预测^[28]等领域得到广泛的使用,研究表明采用 SSA 优化 ANP 可以有效地提高模型的预测精度。在 SSA 收敛过程中,段玉先等^[29]通过在种群初始化阶段引入类随机采样方法中的 Sobol 序列,有效提高了算法的收敛效率。为避免陷入局部最优,提升其收敛速度和求解精度,

引入抖动机制增加个体初始化位置的随机性,进一步对 Sobol 麻雀搜索算法(sobol sparrow search algorithm, SobolSSA)进行优化。最后,根据评估结果提出对策建议,完善生态补偿政策,实现生态补偿效益的最大化。

太湖位于太湖流域中心,是我国第三大淡水湖^[30],其水环境和水生态直接关系到流域内的社会经济发展和居民健康。为保护流域生态环境,江苏省政府自 2008 年开始在太湖流域开展生态补偿工作。截至目前,太湖流域生态补偿已经实施了十多年,迫切需要一种科学、合理的方法界定和评估生态补偿政策给流域内的社会、经济和生态环境带来的影响。为此,本研究在综合上述研究的基础上,结合太湖流域生态补偿的实际状况,从社会、经济、生态环境和政策4个方面构建太湖流域生态补偿效果评估指标体系,并基于抖动机制改进的 SobolSSA 和 ANP 模型构建改进的 SobolSSA-ANP 算法对生态补偿效果进行评估,可为后续生态补偿政策制定和决策提供参考。

1 研究区域

太湖北邻无锡,南靠湖州,西依常州和宜兴,东接苏州,是中国第三大淡水湖。流域以平原为主,地势周边高、中间低,地形呈碟状。依托优越的自然条件和地理位置,太湖流域一直以来都是我国经济较为发达的地区之一。但由于社会经济的粗放式发展,流域水生态和水环境一度遭到严重破坏。2007 年,太湖流域蓝藻爆发,湖内水质严重恶化,无法达到日常用水的标准,直接导致流域下游城市供水短缺。为改善流域生态环境,2007 年 11 月国家及各级政府部门制定了流域生态补偿政策,并于 2008 年起在太湖流域开展试点。截至 2021 年,太湖流域生态补偿政策已经实施了十多年,急需对其补偿效果进行评估,以为后续政策的制定提供参考。

研究数据主要来源于水利部太湖流域管理局历年在其官网发布的《太湖健康报告》和《太湖流域及东南诸河水资源公报》,住房和城乡建设部历年发布的《城市建设统计年鉴》,生态环境部历年发布的《生态环境统计年报》,太湖流域相关城市统计局历年发布的《统计年鉴》,以及江苏省财政厅依申请公开的相关文件。其中,“居民人均可支配收入”“第三产业占比”和“每万人拥有病床数”等社会经济数据来源于流域各城市历年统计年鉴,“单位 GDP

污染物排放量”来源于历年的《生态环境统计年报》,“蓝藻密度”“富营养化指数”“人均水资源量”和“供水总量”等来源于《太湖健康报告》和《太湖流域及东南诸河水资源公报》。太湖流域生态补偿资金投入金额主要来源于江苏省财政厅相关文件。部分年份的数据或特定指标在收集过程中无法直接获取,则通过流域内数据求和、比值等方法转化计算得到。

2 模型概述

2.1 改进 SobolSSA-ANP 模型

2.1.1 改进 SobolSSA 模型

SSA 是 2020 年提出的一种新型的群智能优化算法^[26],与遗传算法(genetic algorithm, GA)^[31]、模拟退火算法(simulated annealing, SA)^[32]和粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)^[33]同属元启发式算法。SSA 算法所需的参数较少,与 GA 和 PSO 算法相比,SSA 的优化效果更稳定且收敛速度更快^[26]。SSA 根据麻雀的种群习性,将麻雀群体分为发现者、跟随者和预警者 3 类。发现者是麻雀种群中搜索和发现食物的子群,其搜索的范围广且适应度高,在全体麻雀群中是发现“食物”(最优解)的主要力量。发现者并不只有特定一群,其可能有多个发现者子群分散在不同的觅食处。低适应度的跟随者会刷新位置,尝试在新区域搜索“食物”,在发现“食物”的情况下,该部分跟随者会转变为发现者,并吸引周围的跟随者觅食。发现者和跟随者基于以上逻辑动态变化,但发现者占群体总比例不变。预警者位于群体边缘,其在发现捕食者(预警值高于阈值)时会向群体中心收拢,提醒其他个体在安全区域觅食。

SSA 在初始化种群时需要创建 n 只麻雀构成的大群体,每只麻雀在 m 维空间内觅食,其位置用 m 维坐标表示。 P_n 表示第 n 只麻雀个体:

$$P_n = [x_{n,1}, \dots, x_{n,m}] \quad (1)$$

n 只麻雀构成的大群体 P_g

$$P_g = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,m} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n,1} & \cdots & x_{n,m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设适应度函数 $F = fit(x_1, \dots, x_m)$, 则种群中个体的适应度为

$$F_g = \begin{bmatrix} F(x_{1,1}, \dots, x_{1,m}) \\ \vdots \\ F(x_{n,1}, \dots, x_{n,m}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

每一只麻雀个体在 m 维空间内随机游走,发现

者按照公式(4)更新位置:

$$x_{ij,t+1} = \begin{cases} x_{ij,t} \cdot \exp\left(-\frac{i}{a \cdot t_r}\right), R < S_T \\ x_{ij,t} + Q \cdot L, R \geq S_T \end{cases} \quad (4)$$

式中: t_r 为算法总迭代次数; t 表示当前迭代的次数; $x_{ij,t}$ 表示第 t 次迭代矩阵 P_g 中第 i 行 j 列的元素; $x_{ij,t+1}$ 表示第 $t+1$ 次迭代矩阵 P_g 中第 i 行 j 列的元素; R 为随机生成的风险系数; α 为随机系数,其影响麻雀的搜索范围; S_T 表示模型安全阈值参数。当 $R < S_T$ 时,说明风险较低,当前麻雀的搜索范围增大,当 $R \geq S_T$ 时,说明风险较高;使用 $Q \cdot L$ 更新矩阵,其中 Q 为 $(0, 1)$ 的随机数, L 为全 1 矩阵,其实际意义为麻雀种群更新到新的安全位置觅食。

麻雀种群中的跟随者,其存在两种更新逻辑。当发现者发现食物后,跟随者与发现者争夺食物,若争夺成功则获得该发现者的食物,否则继续更新位置。当跟随者适应度低于阈值时,代表该跟随者无能力与发现者争夺食物,需要更换位置重新觅食。其更新逻辑用公式(5)表示:

$$x_{ij,t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{x_{\text{worst}} - x_{ij,t}}{i^2}\right), i > \frac{n}{2} \\ x_{p,t+1} + |x_{ij,t+1} - x_{p,t+1}| \cdot A^+ \cdot L, i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_p^{t+1} 表示当前正在计算的群体(即 $t+1$ 代)发现者中适应度最高的个体; x_{worst} 表示当前代中适应度最低的个体; A 为一个 $1 \times n$ 的矩阵,其随机被 1 或 -1 填充,且 $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。

预警者是意识到捕食者危险的个体,其更新规则为

$$x_{ij,t+1} = \begin{cases} x_{\text{best},t} + \beta \cdot |x_{ij,t} - x_{\text{best},t}|, f_i > f_{\text{global}} \\ x_{ij,t} + k \cdot \left(\frac{|x_{ij,t} - x_{\text{worst},t}|}{f_i - f_{\text{worst},t} + \varepsilon}\right), f_i = f_{\text{global}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x_{\text{best},t}$ 为父代(即在上一轮中已经计算完成的第 t 代)的群体中最优的个体, f_i 表示第 i 只麻雀的适应度; f_{global} 表示全局最优佳的适应度; f_{worst} 表示种群全局最差的适应度; ε 为避免分母为 0 而设定的常数项; β 为控制移动步长的正态分布随机数; $k \in [-1, 1]$ 。当 $f_i \neq f_g$ 时,预警者在种群周围,其以随机速度向种群靠拢以获得更高的适应度;当 $f_i = f_g$ 时,当前个体位于群体中心但意识到了危险,需要向群体中的其他个体靠近以解除风险。随机数 k 的正负用于控制个体的移动方向,绝对值大小控制移动步长。

抖动机制改进的 SobolSSA 算法。传统的麻雀搜索算法具有一定缺陷。初始位置对于元启发式算法的最终结果影响较大^[34],使用正态分布随机数

不能很好地在高维空间均匀初始化麻雀个体的初始位置,致使初始位置对最终结果的影响较大,易陷入局部最优。针对以上问题,段玉先等^[29]提出了基于 Sobol 序列的麻雀搜索算法,在一定程度上解决了使用传统随机数初始化种群导致的分布不均的问题,也解决了使用混沌算法可能导致的陷入不稳定点问题。但由于 Sobol 序列使用拟蒙特卡罗方法生成,本质上其在高维空间的分布是可确定的,即每次初始化麻雀种群时初始个体均在确定的位置上。为增加麻雀个体初始化位置的随机性,引入了抖动 Sobol 序列初始化麻雀个体,其规则为

$$P_g = \frac{(\varphi T + M) + \varphi}{1 + 2\varphi} \quad (7)$$

式中: T 为一个 $m \times n$ 且满足 $E = 0, \sigma = 1$ 的正态分布随机数; $\varphi \in (0, 1)$ 用于控制抖动程度; M 表示一个 $m \times n$ 的 Sobol 矩阵。变换后 P_g 中所有元素的取值为 $[-\varphi, 1 + \varphi]$, 且在高维空间内均匀抖动。经过最大—最小标准化处理, P_g 中各元素取值范围为 $[0, 1]$ 。

针对实际问题中各维度解存在区间约束,需要对种群结果进行映射。设最大最小值矩阵为

$$x_{\max} = [x_{1,\max}, \dots, x_{n,\max}] \quad (8)$$

$$x_{\min} = [x_{1,\min}, \dots, x_{n,\min}]$$

则最终种群初始位置可表示为

$$P_g = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) \cdot P_g \quad (9)$$

改进 SSA 边界控制。在迭代计算过程中,步长系数是生成的正态分布随机数,其生成值过大或过小可能导致麻雀个体位置溢出。传统的 SSA 模型在处理溢出边界值时使用边界值替换法,即用距离最近的上限或下限值替代随机迭代过程中的溢出值。然而,由于 ANP 一致性计算具有多解性(即在确定大部分标度后通过调整少量的标度情况下仍能算出一致性较高的解),过早地使用边界值替换法容易导致矩阵结果在边界附近快速收敛,很难进一步找到全局最优解。因此,传统的 SSA 边界控制并不适合用于优化 ANP 两两比较矩阵。为解决该问题,本文提出用 $(0, 1)$ 的正态分布随机数替代越界量,即迭代前重新生成个体位置:

$$P_{\text{new}} = [x_{1,\text{new}}, x_{2,\text{new}}, \dots, x_{m,\text{new}}] \quad (10)$$

对于步长迭代后越出边界的个体位置 $x_{n,0}$, 使用公式(11)替换,以降低麻雀个体在边界局部收敛的程度:

$$x_{n,0} = x_{n,\max} + (x_{n,\max} - x_{n,\min}) \cdot x_{n,\text{new}} \quad (11)$$

2.1.2 ANP 网络分析

ANP 是在 AHP 基础上针对内部具有依存、外

部具有反馈关系的评估指标提出的决策方法^[24]。该方法克服了传统 AHP 方法要求各指标相互独立带来的分析不足,能够有效地对大型复杂系统多指标相互影响的问题进行评估。ANP 模型由控制层和网络层组成,控制层包括了待求解问题的目标和决策准则,网络层由所有受到控制层支配的相互依存和相互影响的元素组构成,见图 1。

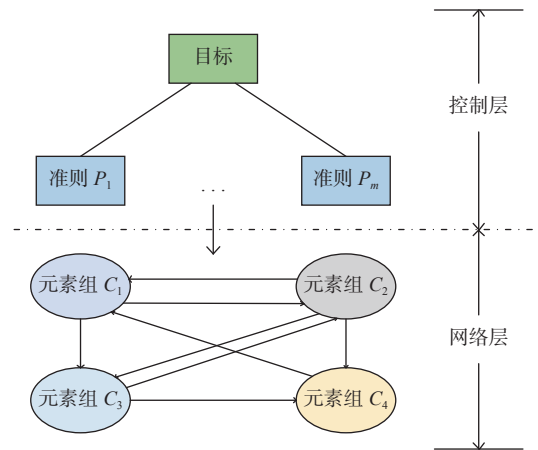


图 1 ANP 网络结构示意图

Fig. 1 Schematic model of ANP

采用 ANP 方法确定指标权重的过程为:首先,基于生态补偿效果评估各指标间的依赖和反馈关系构建 ANP 网络结构模型;其次,根据 1~9 评估尺度,对每个指标的重要性进行判别并构建判断矩阵,计算未加权的超矩阵;然后,对未加权的超矩阵进行归一化加权处理后得到加权超矩阵;最后,对加权超矩阵进行稳定处理,求得极限超矩阵,从而得到每一个指标的权重。

2.2 改进 SobolSSA-ANP 决策步骤

2.2.1 指标体系构建

流域生态补偿不仅可以降低流域生态环境受污染程度、改善生态环境质量,还可以带动社会经济发展、提高当地群众生活质量、有效调节相关者利益关系,实现生态补偿与社会经济发展相协调。因此,在构建生态补偿效果评估体系时,不仅需考量环境质量方面的改善,还需考虑政策资金投入力度及经济效益的外部性内部化具体成效。基于此,本文从生态效果、经济发展、社会公平及政策投入 4 大方面构建生态补偿效果评估指标体系。

参考流域生态补偿政策评价体系领域现有研究成果,结合我国生态补偿政策实施情况及太湖流域生态补偿具体成效,依照科学性原则、综合性原则、合理性原则、可操作性原则及实用性原则,采用目

标层—准则层—二级指标层设计方案构建流域生态补偿效果评估指标体系。准则层充分考虑流域生态补偿政策实施影响范围及多元化成效,包括生态效果、经济水平、社会公平和政策投入。为保证流域生态补偿效果评估指标体系的科学性和准确性,生态效果准则层主要考察太湖流域水资源生态环境情况,包含水文水资源和水生生态 2 个具体指标层。经济水平准则层主要考察太湖流域生态补

偿后的产生的经济效益,包含水资源与经济和生产经济 2 个具体指标层。社会公平准则层主要考察补偿政策对社会发展的促进作用,包含收入分配和卫生保障两个具体指标层。政策投入准则层主要考察生态补偿投入力度,包含资金投入 1 个具体指标层。基于以上分析,构建包括生态人均水资源量、单位 GDP 污染物排放量、总供水量等 10 个二级指标的太湖流域生态补偿效果评估指标体系,见表 1。

表 1 太湖流域生态补偿效果评估指标体系
Tab. 1 The indicator system of ecological compensation effect evaluation in Taihu basin

目标层	准则层	一级指标	二级指标
生态 补偿 评价	生态效果 B	水文水资源	人均水资源量 B_1
		水生生态	富营养指数 B_2
			蓝藻密度 B_3
	经济水平 E	水资源与经济	总供水量 E_1
		生产经济	居民人均可支配收入 E_2
			单位 GDP 污染物排放量 E_3
			第三产业比重 E_4
	社会公平 S	收入分配	城乡可支配收入比 S_1
		卫生保障	每万人拥有病床数 S_2
	政策投入 P	资金投入	生态资金投入 P_1

2.2.2 权重优化

由于专家可能存在认知偏差,对两两比较矩阵打分时可能存在一致性较差的问题。同时,较复杂的比较矩阵较难给定精确系数。为此,提出通过 SobolSSA 进行网格搜索和一致性优化的方法,从专家评价模型产出指标范围中搜索一致性检验最优的解。此外,该方法在 SobolSSA 的基础上引入了抖动机制和随机边界控制,在一定程度上避免了模型网格搜索陷入局部最优值,易于得到一致性高的最优解。

2.2.3 效果评估

基于上述步骤,最终确定一致性检验最优的判断矩阵。将此矩阵输入至 ANP 模型中,计算各指标权重,最终将权重与标准化后的数据运算进行评分。

3 案例分析

生态补偿综合评价是一个涉及生态效果、经济水平、社会公平和政策投入的复杂耦合系统,其内部存在复杂的相互作用。例如,生态资金投入和第三产业比重会影响生态效果,同时富营养程度和蓝藻密度等也会影响人均水资源量。为利用 ANP 法构建太湖流域的生态补偿综合评价模型,首

先需要采用解释结构模型(interpretative structural model, ISM)分析和表达指标间的相互作用关系。根据表 1 构建的生态补偿效果评估指标体系,基于专家评价法和 ISM 构建生态补偿综合评价影响关系矩阵,见表 2。

表 2 指标体系 ISM 矩阵
Tab. 2 ISM matrix for indicators system

指标	B_1	B_2	B_3	E_1	E_2	E_3	E_4	P_1	S_1	S_2
B_1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
B_2	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
B_3	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
E_1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
E_2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
E_3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
E_4	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
P_1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1
S_1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
S_2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0

根据表 2 中各个指标间相互影响关系,建立以“生态补偿评价”为目标层、“生态效果”“社会公平”“经济水平”和“政策投入”为网络层的 ANP 结构,见图 2。

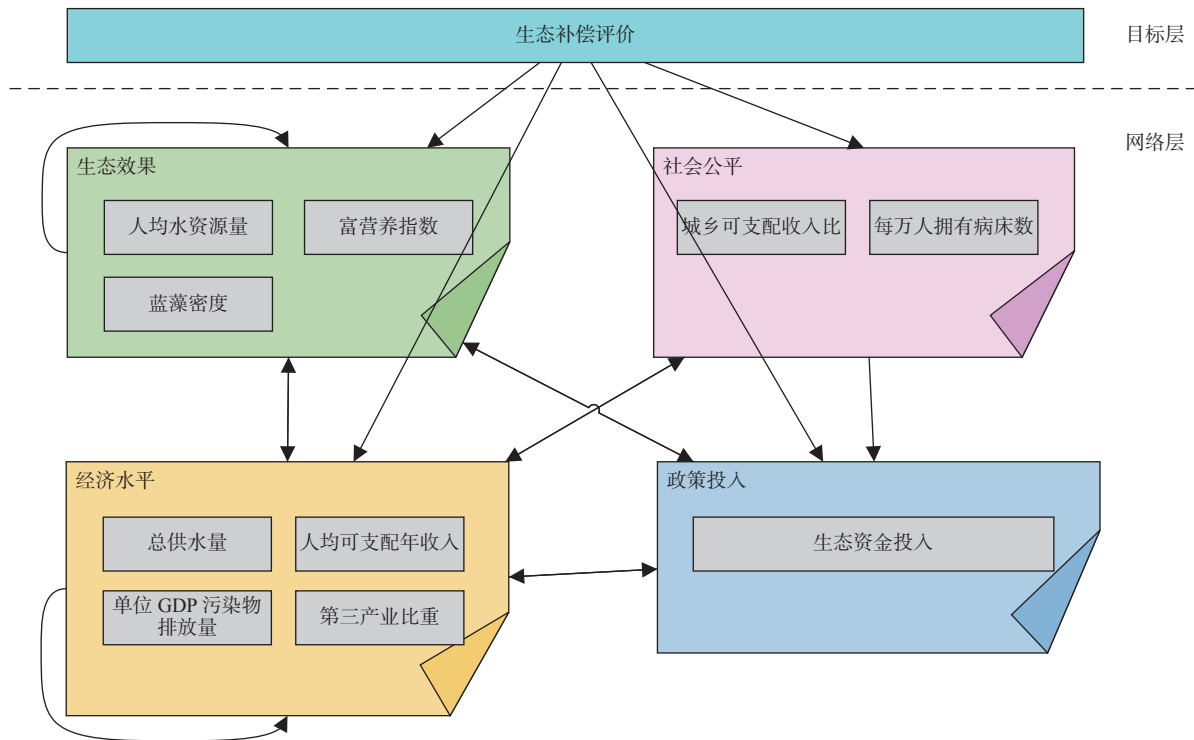


图2 生态补偿效果评价 ANP 网络结构

Fig. 2 ANP structure for ecological compensation effect evaluation

由生态补偿效果评价 ANP 网络结构可知生态效果和经济水平、政策投入与经济水平、政策投入与生态效果、经济水平与社会公平存在相互作用和相互影响,同时,社会公平受政策投入影响。

基于以上网络模型,存在相互作用的集群将会生成若干个 $x \times x$ 的两两比较矩阵,其中 x 表示在当前决策目标下存在相互作用的指标节点数量。对于两两比较矩阵,设各元素为 e ,则存在两两比较矩阵

$$C_m = \begin{bmatrix} 1 & e_{1,2} & \cdots & e_{1,(x-1)} \\ 1/e_{1,2} & 1 & \cdots & e_{2,(x-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/e_{1,(x-1)} & 1/e_{2,(x-1)} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

实践中,传统的 ANP 法所生成的两两比较矩阵往往由专家打分直接给出。但与 AHP 法类似,比较矩阵的合理性直接决定了模型的优劣。因素间的重要程度关系很难被若干个专家给出精确值,且当矩阵较复杂时,即使经过多轮修正,一致性程度也很难达到理想水平。为使比较矩阵构建过程更合理,提出“专家给定范围+算法优化”的比较矩阵生成方法。对于 $x \times x$ 的两两比较矩阵,由于矩阵关于主对角线互为倒数,故需要专家打分的元素数量为

$$m = \frac{x^2 - x}{2} \quad (13)$$

对待确定权重的 m 个元素,有范围向量

$$\begin{aligned} E_{\min} &= [l_1, l_2, \dots, l_m] \\ E_{\max} &= [u_1, u_2, \dots, u_m] \end{aligned} \quad (14)$$

且各元素 $e_m \in [l_m, u_m]$,其中 l_m 与 u_m 以 1~9 标度法给出,实际操作中由于存在倒数关系,故取值范围为 $[1/9, 9]$ 。优化的目标为

$$\text{fit} = \min(C_R) \quad (15)$$

其中, $C_R = \frac{C_1}{R_1}$, C_1 (consistency index)为 ANP 法中的一致性指标,其计算公式为^[35-36]

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (16)$$

式中: λ_{\max} 为矩阵的最大特征根; R_1 为 Satty 模拟 1 000 次得到的平均随机一次性指标,通过查表取值; C_R 值表示 ANP 法中两两比较矩阵的一致性程度,一般要求 $C_R < 0.1$,越接近 0 一致性程度越高。

将适应度函数设为优化目标,令 $x_{\max} = E_{\max}$, $x_{\min} = E_{\min}$,输入改进 Sobol-SSA,随机抽取 2×2 及以上的两两比较矩阵进行穷举测试。穷举结果表明,当抖动系数 $\varphi = 0.2$,初始麻雀数量 $n = 100$,迭代次数 $t_{\max} = 1\ 500$ 时优化效果较优。基于以上参数对 4 个矩阵各重复优化 10 次,实验结果表明,40 次实验输出均满足 $C_R < 0.1$,最大降幅为 0.203 1。部分大于 0.02 但小于 0.12 的比较矩阵经过该方法优化后降至 10^{-6} 以下,优化效果较明显。迭代计算后产生的

最优个体即为所求 $E = [e_1, e_2, \dots, e_m]$, 将 E 输入 ANP 行计算, 得到未加权超矩阵见表 3、加权超矩阵见表 4、网络中并采用 Super Decisions 软件对该指标体系进行指标权重见表 5 和生态补偿加权评分结果见表 6。

表 3 未加权超矩阵
Tab. 3 Unweighted super-matrix

指标	B_1	B_2	B_3	E_1	E_2	E_3	E_4	P_1	S_1	S_2	T
B_1	0	0	0	0	0	0	0	0.168	0	0	0.197
B_2	0.333	0	1.000	0.333	0	0	0	0.334	0	0	0.445
B_3	0.667	1.000	0	0.667	0	0	0	0.499	0	0	0.358
E_1	0.750	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.169
E_2	0	0	0	0	0	0	1.000	0	0.377	0	0.174
E_3	0.250	0.750	0.667	1.000	0	0	0	0.333	0.174	0	0.451
E_4	0	0.250	0.333	0	1.000	1.000	0	0.667	0.449	1.000	0.205
P_1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0	1.000	0	1.000
S_1	0	0	0	0	1.000	0	0.750	0	0	0	0.667
S_2	0	0	0	0	0	0	0.250	0	0	0	0.333
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4 加权超矩阵
Tab. 4 Weighted super-matrix

指标	B_1	B_2	B_3	E_1	E_2	E_3	E_4	P_1	S_1	S_2	T
B_1	0	0	0	0	0	0	0	0.112	0	0	0.086
B_2	0.209	0	0.627	0.086	0	0	0	0.223	0	0	0.194
B_3	0.418	0.627	0	0.173	0	0	0	0.332	0	0	0.156
E_1	0.098	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.043
E_2	0	0	0	0	0	0	0.502	0	0.188	0	0.044
E_3	0.033	0.098	0.087	0.557	0	0	0	0.111	0.087	0	0.113
E_4	0	0.033	0.043	0	0.502	0.751	0	0.222	0.225	1.000	0.052
P_1	0.243	0.243	0.243	0.184	0.166	0.249	0.166	0	0.500	0	0.133
S_1	0	0	0	0	0.332	0	0.249	0	0	0	0.120
S_2	0	0	0	0	0	0	0.083	0	0	0	0.060
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5 指标权重
Tab. 5 Indicator weights

指标	准则内标准化	标准化权重	权重排序	准则层	权重排序
B_1	0.062 3	0.021 4	8	0.343 5	2
B_2	0.445 9	0.153 2	4		
B_3	0.491 8	0.168 9	3		
E_1	0.005 7	0.002 1	10	0.364 7	1
E_2	0.306 2	0.111 7	5		
E_3	0.164 7	0.060 1	7		
E_4	0.523 3	0.190 8	2		
P_1	1.000 0	0.191 4	1	0.191 4	3
S_1	0.842 3	0.084 6	6	0.100 4	4
S_2	0.157 7	0.015 8	9		

表 6 各年份生态补偿效果加权评分
Tab. 6 The weighted score of ecological compensation effect in each year

指标	2020年	2018年	2017年	2016年	2012年	2011年	2010年
B_1	0.667	0.261	0.083	1.953	0.334	0.305	0.226
B_2	5.696	5.205	3.929	3.241	4.518	4.714	3.707
B_3	7.240	5.692	0.943	6.209	14.967	16.797	15.627
E_1	0.061	0.095	0.086	0.069	0.119	0.136	0.173
E_2	10.383	8.740	7.721	6.786	3.650	2.738	0.248
E_3	5.154	5.547	5.754	4.920	3.070	2.814	0.542
E_4	15.938	14.793	14.801	14.619	9.724	8.670	7.583
S_1	7.095	6.211	6.089	6.002	4.922	4.043	1.869
S_2	1.405	1.264	1.131	0.917	0.849	0.606	0.112
P_1	10.618	16.832	17.039	12.651	1.192	1.192	1.146
加权总分	64.256	64.639	57.575	57.367	43.343	42.014	31.233

最后,对加权超矩阵进行收敛运算求得极限超矩阵并排序得到各个指标的权重(表 5)。其中:经济水平对目标层影响权重最大,系数为 0.364 6;生态效果次之,系数为 0.343 5;政策投入与社会公平系数分别为 0.191 4 和 0.100 4。经济水平在反映综合效益的同时也会影响生态资金投入和生态效果,其叠加在生态效益的作用较大;生态效果直接反映太湖流域执行生态补偿前后的环境变化。

为计算各年度的生态补偿综合效果分数,需要对获取到的原始数据进行标准化处理。为避免常规标准化方法出现数据为 0 的情况,标准化时设置上界与下界。对于正向指标采用如下方式标准化:

$$x_{std} = \frac{x - 0.95x_{min}}{1.05x_{max} - 0.95x_{min}} \quad (17)$$

对于负向指标,则使用

$$x_{std} = 1 - \frac{x - 0.95x_{min}}{1.05x_{max} - 0.95x_{min}} \quad (18)$$

对部分特定界限的指标(如第三产业比重、富营养指数等),为使分数具有合理性,采用固定上下界的方式对原始数据进行标准化。将标准化后的数据使用公式(19)求加权总分:

$$S = 100 \cdot \sum x_{std} \cdot \omega \quad (19)$$

式中: x_{std} 为标准化后的指标值; ω 为指标标准化权重; S 为各年份生态补偿效果的加权总分,见表 6。

自 2008 年实施生态补偿后,社会经济和生态综合效果不断提高,且 2017 年及以后的生态补偿综合

效果明显优于 2012 年及以前的生态补偿综合效果,主要体现在:富营养指数综合得分相较于 2010 年上升了 53%,表明富营养程度有一定改善;太湖流域人均居民可支配年收入明显上升,区域经济快速增长;单位 GDP 污染物排放量明显下降,加权分大幅上升,第三产业比重增长明显,可见区域经济从传统工业加快向低污染工业和服务业转型升级,走上了生态经济共建和可持续发展道路;社会公平方面,城乡可支配收入比持续下降,人均医疗资源持续增加,社会公平程度进一步提高。

参照各指标的分级标准,将标准按标准化方式转化为加权分,得到可供参考的分级标准,见表 7。

表 7 加权分分级标准
Tab. 7 The weighted grade standard

分级标准	良好	较好	一般	较差
加权分	≥ 98.26	$\geq 70.63 \sim < 98.26$	$\geq 30.83 \sim < 70.63$	< 30.83

将生态补偿评估结果分为 4 个等级:良好,较好,一般和较差。当各年份生态补偿效果加权总分在 98.26 以上的时候,说明各项指标都表现良好,生态补偿效果良好;当评估体系中各指标加权总分在 [70.63, 98.26),说明生态补偿效果较好;当评估体系中各指标加权总分在 [30.83, 70.63) 区间,说明生态补偿效果一般;当评估体系中各指标加权总分低于 30.83,说明生态补偿效果较差。根据各年份生态补

偿效果加权总分计算结果,各年份加权总分均处于 [30.83, 70.63), 说明太湖流域历年来生态补偿效果一般。但是从时间角度来看,2020 加权总分明显高于 2010 年加权总分,且加权总分呈不断增长的趋势,说明从 2010 年到 2020 年,太湖流域生态补偿效果有了明显的提升。流域在生态环境保护、社会经济发展、社会公平和生态补偿政策投入各方面都取得了较大的进步。

4 结论与建议

生态补偿政策实施稳步推进了太湖流域绿色发展转型,水环境污染得到有效控制。数据显示,太湖流域 2015 年以前产业结构较落后,单位 GDP 污染物排放量较高,致使生态环境在 2017 年前达到了较严重的恶化程度。自补偿政策实施后,产业结构进一步优化,生态资金投入明显增加。此外补偿机制有效权衡了流域相关利益者之间的义务和权利,培育了生态化、多元化的特色产业,进一步助推经济发展。通过实证分析,得出以下主要结论:

生态资金投入是影响生态补偿政策实施的首要因素。通过模型分析可以发现,生态资金投入在模型中权重为 0.191 421,相较其他因素而言最为重要。资金是推动项目顺利实施的重要助手:一方面需要采取横向生态补偿和市场化生态补偿制度,用市场活力优化配置;另一方面,必须合理规划项目资金管理,完善项目资金预算编制方式,促进项目管理、预算管理与绩效管理一体化,建立健全完善的执行管理机制确保预算顺利执行,最终发挥资金最大作用。

环境质量是考察生态补偿政策绩效的重要抓手。富营养指数和蓝藻密度主要反映太湖流域环境质量,在模型中权重分别为 0.153 161 和 0.168 937。环境质量是生态补偿绩效的最直观体现,太湖流域生态补偿政策实施的基本原则为生态优先和绿色发展,改善流域水环境为重点,因此保障环境质量是重中之重。

第三产业比重可以从侧面反映生态补偿政策绩效水平。第三产业比重的变化可以表征产业结构的优化程度,第三产业比重越高则代表社会进步发展越快。第三产业比重在模型中所占权重为 0.190 83,可见对生态补偿政策绩效影响较大。第三产业比重越高,由第一产业和第二产业带来的污染排放量将会显著降低,从侧面推动太湖流域生态环境质量改善。

基于上述结论,为提高太湖流域生态补偿效果,促进流域社会经济的可持续发展,从探索多元化生态补偿方式、推动生态补偿技术、制度创新和建立信息共享机制等方面提出如下建议:

探索太湖流域多元化补偿方式。目前,太湖流域生态补偿方式较为单一,以补偿资金发放为主要手段,技术支持、产业扶持等多元化补偿方式尚未得到有效推广。为提高流域生态补偿效率,生态补偿形式可以延伸为跨区域开展生态特色产业建设、环保技术人员培养、环境治理工程开展等方面,以调动群众参与生态补偿的积极性,实现生态补偿与产业发展相关联,推动太湖流域城市群经济社会发展,提高横向生态补偿机制实施效果。

推动太湖流域生态补偿技术和制度创新。在技术支持方面,应以解决生态补偿的关键问题为指引,包括太湖生态治理目标与环境成本、经济发展的响应关系,在可持续发展引导下追求水资源平衡,利用经济学等相关理论对未来太湖生态规划开展可行性分析。在制度创新方面,需进一步建立健全太湖流域生态补偿评估和监督机制,加强上海、江苏和浙江对太湖流域的一体化管理,对资金和项目等进行实时监督,同时对生态补偿方案效果进行量化评价,以提高流域生态资源的利用效率。

明确太湖流域生态补偿权责,完善信息共享机制。太湖流域覆盖范围较广,涉及江浙沪三大区域。为此,需明确各个省市的生态补偿责任、权利及义务,避免出现多方治水、管理不统一等问题。搭建区域合作平台,实现流域社会、经济和生态等信息的共享,将进一步提升太湖流域治理的科学化及精细化水平,实现流域生态补偿效益的最大化。

参考文献:

- [1] 吴浩云,陆志华.太湖流域治水实践回顾与思考[J].水利学报,2021,52(3):277-290. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200728.
- [2] WALLS M, KUWAYAMA Y. Evaluating payments for watershed services programs in the United States[J]. *Water Economics and Policy*, 2019, 5(4): 1950003. DOI: 10.1142/s2382624x19500036.
- [3] ROBERTS W M, COULDRICK L B, WILLIAMS G, et al. Mapping the potential for payments for ecosystem services schemes to improve water quality in agricultural catchments: A multi-criteria approach based

- on the supply and demand concept[J]. *Water Research*, 2021, 206: 117693. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117693.
- [4] 周宏伟, 彭焱梅. 太湖流域水流生态补偿机制研究[J]. *人民长江*, 2020, 51(4): 81-85. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.013.
- [5] DENG M H, CHEN J F. A market sharing mechanism for watershed ecological compensation[J]. *Water Supply*, 2022, 22(10): 7565-7575. DOI: 10.2166/ws.2022.314.
- [6] 贺辉. 论黄河流域高质量发展之生态补偿机制优化[J]. *人民黄河*, 2022, 44(8): 13-16. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.08.003.
- [7] 靳乐山, 甄鸣涛. 流域生态补偿的国际比较[J]. *农业现代化研究*, 2008(2): 185-188. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0275.2008.02.014.
- [8] WANG Y Z, YANG R J, LI X H, et al. Study on transboundary water quality and quantity ecological compensation standard: A case of the Bahao Bridge section in Yongding River, China[J]. *Water*, 2021, 13(11): 1488. DOI: 10.3390/W13111488.
- [9] 陈进. 流域横向生态补偿进展及发展趋势[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(2): 1-6. DOI: 10.11988/ckyyb.20211257.
- [10] 门宝辉, 刘菁苹. 基于最小数据法的黄河中游延安市生态补偿标准研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(5): 101-108. DOI: 10.19760/j.nwuu.zk.2022069.
- [11] 刘玉龙, 许凤冉, 张春玲, 等. 流域生态补偿标准计算模型研究[J]. *中国水利*, 2006(22): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2006.22.012.
- [12] 袁瑞娟, 李凯琳. 基于意愿调查评估法的东苕溪水质改善的社会效益评估[J]. *地理科学*, 2018, 38(7): 1183-1188. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.07.020.
- [13] YANG Y, YAO C X, XU D L. Ecological compensation standards of national scenic spots in western China: A case study of Taibai Mountain[J]. *Tourism Management*, 2020, 76: 103950. DOI: 10.1016/j.tourman.2019.103950.
- [14] 王新年, 沈大军. 基于讨价还价模型的跨省水源地保护生态补偿标准研究: 以于桥水库为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(6): 88-95. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.06.013.
- [15] 许凤冉, 阮本清, 张春玲, 等. 跨流域调水生态补偿研究进展与关键技术[J]. *水利经济*, 2022, 40(4): 34-40, 92-93. DOI: 10.3880/j.issn.1003-9511.2022.04.006.
- [16] 张捷, 谌莹, 石柳. 基于生态元核算的长江流域横向生态补偿机制及实施方案研究[J]. *中国环境管理*, 2020, 12(6): 110-119. DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.06.110.
- [17] 范晓芬, 姜宏, 石登荣, 等. 太湖流域跨界污染物消减量与生态补偿额关系[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(5): 995-999. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.05.036.
- [18] 于鲁冀, 葛丽燕, 梁亦欣. 河南省水环境生态补偿机制及实施效果评价[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(4): 87-90. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2011.04.021.
- [19] 岳思羽. 汉江流域生态补偿效益的评价研究[J]. *环境科学导刊*, 2012, 31(2): 42-45. DOI: 10.13623/j.cnki.hkdk.2012.02.017.
- [20] 徐大伟, 李斌. 基于倾向值匹配法的区域生态补偿绩效评估研究[J]. *中国人口资源与环境*, 2015, 25(3): 34-42. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2015.03.005.
- [21] 唐萍萍, 张欣乐, 胡仪元. 水源地生态补偿绩效评价指标体系构建与应用: 基于南水北调中线工程汉江水源地的实证分析[J]. *生态经济*, 2018, 34(2): 170-174.
- [22] 陆巧玲. 生态补偿政策绩效综合评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [23] 耿翔燕, 葛颜祥, 王爱敏. 水源地生态补偿综合效益评价研究: 以山东省云蒙湖为例[J]. *农业经济问题*, 2017, 38(4): 93-101.
- [24] 王先庆, 李博, 郑建. 基于灰色关联-网络层次分析模型的水资源安全综合评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 87-93. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0088.
- [25] 李治军, 王涛. 基于改进组合赋权法的区域水资源承载力评价[J]. *中国农村水利水电*, 2022(10): 112-118. DOI: 10.12396/znsd.212207.
- [26] JIANKAI X, BO S. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34. DOI: 10.1080/21642583.2019.1708830.
- [27] 高兵, 郑雅, 秦静, 等. 基于麻雀搜索算法和改进粒子群优化算法的网络入侵检测算法[J]. *计算机应用*, 2022, 42(4): 1201-1206. DOI: 10.11772/j.issn.

- 1001-9081.2021071276.
- [28] 徐冬梅, 王逸阳, 王文川. 基于贝叶斯优化算法的长短期记忆神经网络模型年径流预测[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(12): 42-46. DOI: [10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20220068](https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20220068).
- [29] 段玉先, 刘昌云. 基于Sobol序列和纵横交叉策略的麻雀搜索算法[J]. *计算机应用*, 2022, 42(1): 36-43. DOI: [10.11772/j.issn.1001-9081.2021010187](https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2021010187).
- [30] 陆昊, 杨柳燕, 杨明月, 等. 太湖流域上游降水量对入湖总氮和总磷的影响[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 174-181. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.02](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.02).
- [31] HOLLAND J H. Genetic algorithms[J]. *Scientific American*, 1992, 267(1): 66-73. DOI: [10.1038/scientificamerican0792-66](https://doi.org/10.1038/scientificamerican0792-66).
- [32] KIRKPATRICK S, GELATT JR C D, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, 220(4598): 671-680. DOI: [10.1126/science.220.4598.671](https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671).
- [33] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[A]// *IEEE International Conference on Neural Network*, Perth, 1995: 1942-1948. DOI: [10.1002/9780470612163.ch16](https://doi.org/10.1002/9780470612163.ch16).
- [34] DOKEROGLU T, SEVINC E, KUCUKYILMAZ T, et al. A survey on new generation metaheuristic algorithms[J]. *Computers & industrial engineering*, 2019, 137: 106040. DOI: [10.1016/j.cie.2019.106040](https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106040).
- [35] 王富强, 马尚钰, 赵衡, 等. 基于AHP和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 67-74. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0006](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0006).
- [36] 梁霄, 巨文慧, 孙博闻, 等. 基于AHP-熵权法的平原城市河网水系连通性评价: 以廊坊市为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 352-364. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0036](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0036).

Evaluation effect of watershed ecological compensation based on improved SobolSSA-ANP in the Taihu basin

DENG Menghua^{1,3}, HE Zeen¹, CHENG Sicong², ZHENG Hongbin¹

(1. Business School, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Research Base of Yangtze Institute for Conservation and High-Quality Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To improve the watershed ecological environment, and to realize the sustainable development of water resources, government and scholars have taken a series of investigations. Combined with the flexibility of payment for watershed ecosystem services and the efficient management of government, China proposed watershed ecological compensation and has piloted numerous ecological compensation programs in Xin'an Jiang, Taihu, and other watersheds. The implementation of ecological compensation has played an important role in the improvement of watershed ecology, and it has also impacted the economy, society, and other aspects of watersheds. Therefore, it is crucial to assess the impacts of ecological compensation on the ecology, economy, and society to further promote the implementation and improvement of ecological compensation policy.

The evaluation index system, which includes the ecology, economy, social equity, and government investment is established by taking Taihu basin as a case study area. The ecology subsystem includes the per capita water resource, eutrophication index, and cyanobacteria density. The economy subsystem includes the total water supply, per capita disposable income, pollutant emission per unit gross domestic product, and the proportion of tertiary industry. The social equity subsystem includes the disposable income ratio between urban and rural, the health security number of beds per 10 thousand people. The government investment includes the investment in ecological protection. Based on the Dithering Sobol Sequence improved Sparrow Search Algorithm (SobolSSA) and Analytic Network Process (ANP), the evaluation model SobolSSA-ANP is constructed. In the proposed model, the ANP is adopted to analyze the influence relationship among indexes and to determine the evaluation matrix. The SobolSSA model is adopted to optimize the coefficients in the matrix dynamically. Subsequently, the optimized coefficients are

input into the AHP model to reconstruct the evaluation matrix and to assess the eco-compensation effect.

The results show that: (1) The SobolSSA-ANP improves the consistency and stability of the AHP model, and the evaluation results are more accurate. The CR values decrease by 1~10 orders of magnitude in the multiple ranges given by the experts, and the convergence results are more stable than the AHP model. (2) The implementation of Eco-compensation in the Taihu basin was effective and has improved the ecological environment. Especially, the effect from 2017 is significantly better than that before 2012. (3) The eco-compensation fund is the most important factor that influences the eco-compensation effect. The weight of the eco-compensation fund is 0.191 421, which is higher than the other indexes. Thus, it is necessary to explore market-based and multi-agent eco-compensation mechanisms to broaden the source of eco-compensation funds. (4) The eutrophication index and cyanobacteria density are the second and third important factors, respectively. That is consistent with the actual problems in the Taihu basin. The improvement of the above two factors will improve the ecological environment in the Taihu basin greatly.

The implementation of eco-compensation in the Taihu basin has promoted the improvement of ecology, economy, and social equity. However, the eco-compensation funds, the design, and implementation of the eco-compensation mechanism required to be enhanced. It is suggested to promote innovation of eco-compensation mechanisms, explore the multi-agent and market-based eco-compensation, and establish a dynamic evaluation mechanism for the watershed. Meanwhile, establishing the ecological information-sharing mechanism, and transferring the ecological resource to ecological capital promotes the sustainable development of the watershed. The proposed model and results can provide a reference for the evaluation of the watershed eco-compensation effect, and are effective in improving the modernization of the governance capacity. In future research, the blockchain and marker-based eco-compensation mechanism can be coupled together to improve the trading mechanism of ecosystem services.

Key words: watershed ecological compensation; effect assessment; Sobol-SSA; fuzzy comprehensive evaluation; ANP; Taihu basin

完善科技创新体系
增强支撑引领能力