

基于 HRAI-InVEST 的 NbS 水文 适配协同效益评估

——以洞庭湖生态经济区为例

赵思危¹, 鞠茂森¹, 张文慧², 吴宸晖³, 陈荣荣⁴

(1.河海大学 商学院, 江苏 南京 211100; 2.河海大学
水利水电学院, 江苏 南京 210024; 3.南京市秦淮河河道管理处,
江苏 南京 210012; 4.江苏省盐城市射阳县农业农村局 农业科学研究所, 江苏 盐城 224300)

摘要: [目的] 研究构建适用于洞庭湖生态经济区的 NbS 协同效益评估框架, 寻求提升区域水文节律适配度的差异化 NbS 实施方案, 为生态敏感区的水文动态管理提供可操作的优化路径。[方法] 以洞庭湖生态经济区为对象, 构建融合水文节律适配度指数(HRAI)与 InVEST 模型的 NbS 协同效益评估框架, 综合分析 NbS 对洪水调蓄、生态补水和流量稳定性的影响。[结果] ①2022—2024 年区域 HRAI 年均值由 0.317 提升至 0.327, NbS 措施可有效提升洪水调蓄与生态水文稳定性; ②丘陵湿地和林地可协同提升节律适配性与产水、土壤保持等生态服务供给能力, 湖滨平原与建设用地集聚区提升有限。[结论] 在丘陵湿地可优先布局生态沟渠与植被恢复工程, 平原地区推进生态缓释与分时调蓄系统建设, 建设区推广雨水花园与透水铺装等海绵措施, 能够提升可利用含水量、延长生态补水天数并优化洪水脉冲阈值, 实现 HRAI 的稳定提升。

关键词: 自然解决方案; 水文节律适配度; 生态系统服务; InVEST 模型; 洞庭湖生态经济区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)06-0202-11

中图分类号: X171

文献参数: 赵思危, 鞠茂森, 张文慧, 等. 基于 HRAI-InVEST 的 NbS 水文适配协同效益评估[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 202-212. Zhao Siwei, Ju Maosen, Zhang Wenhui, et al. Evaluation of hydrological adaptation and synergistic benefits of nature-based solutions using HRAI-InVEST [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 202-212.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.024

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.024

Evaluation of hydrological adaptation and synergistic benefits of nature-based solutions using HRAI-InVEST —A case study of Dongting Lake ecological economic zone

Zhao Siwei¹, Ju Maosen¹, Zhang Wenhui², Wu Chenhui³, Chen Rongrong⁴

(1.Business School, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu

210024, China; 3.Nanjing Qinhuai River Management Office, Nanjing, Jiangsu 210012, China; 4.Institute of

Agricultural Sciences, Sheyang County Agriculture and Rural Affairs Bureau, Yancheng, Jiangsu 224300, China)

Abstract: [Objective] A nature-based solutions (NbS) synergistic benefit assessment framework applicable to the Dongting Lake ecological economic zone was constructed, in order to seek differentiated NbS implementation schemes to enhance regional hydrological rhythm adaptation index, and to provide operable optimization pathways for the hydrological dynamic management in ecologically sensitive areas. [Methods] Taking the Dongting Lake ecological economic zone as the study area, this study constructed an NbS synergistic benefit assessment framework integrating the hydrological rhythm adaptation index (HRAI) and the InVEST model,

收稿日期: 2025-07-14

修回日期: 2025-08-11

采用日期: 2025-08-12

资助项目: 江苏省水利科技项目“农村河道智能化清淤及淤泥资源化利用技术示范”(2024046)

第一作者: 赵思危(2001—), 女(汉族), 江苏省淮安市人, 硕士研究生, 研究方向为流域生态数字建模。Email: 241320010043@hhu.edu.cn。

通信作者: 鞠茂森(1967—), 男(汉族), 江苏省如皋市人, 博士, 教授, 主要从事河长制与水资源管理研究。Email: maosenju@hhu.edu.cn。

comprehensively analyzing the effects of NbS on flood regulation, ecological water supplementation, and flow stability. [Results] ① The regional annual average HRAI increased from 0.317 in 2022 to 0.327 in 2024, indicating that NbS measures effectively improved flood regulation and eco-hydrological stability. ② Hilly wetlands and forests could synergistically enhance rhythm adaptation index and the supply capacity of ecosystem services such as water yield and soil conservation, while improvements in lakeside plains and built-up areas were limited. [Conclusion] It is recommended to prioritize the implementation of ecological ditches and vegetation restoration projects in hilly wetlands, promote the construction of ecological slow-release and time-based regulation systems in plain areas, and promote sponge measures such as rain gardens and permeable pavements in built-up areas. This will increase available water content, extend ecological water supplementation days, and optimize flood pulse thresholds, thereby achieving a steady improvement in the HRAI.

Keywords: nature-based solutions; hydrological rhythm adaptation index; ecosystem services; InVEST model; Dongting Lake ecological economic zone

洞庭湖生态经济区受季节性水位涨落驱动,形成“湿地—农田—建设用地”交错格局,生态系统对水文频次与时序变化高度敏感。当前区域面临洪水频发、生境破碎等问题,需要具备节律调控能力的生态适应机制,以增强生态服务功能与系统韧性。随着《长江保护法》实施与“长江经济带高质量发展”战略推进,洞庭湖区水文调蓄与生态服务功能愈发关键,探索水文节律适应路径已成为区域治理中亟待解决的问题。在此背景下,基于自然的解决方案(nature-based solutions, NbS)因其强调利用自然过程与恢复生态系统服务以应对多重环境挑战,逐渐成为国际生态治理的核心路径。NbS不仅关注生态功能恢复,还兼顾社会福祉与经济可行性,强调多目标协同与系统韧性构建。近年来,欧盟“地平线2020”计划、国际自然保护联盟对于NbS全球标准的推出以及联合国“生态系统恢复十年”倡议的实施,标志着NbS正加速从理论框架走向实践部署,成为全球环境治理共识^[1]。

NbS的核心在于以生态系统服务为纽带,协同自然过程、人类需求与环境治理,其评估常依赖模型工具,如InVEST, ARIES, SWAT等,模拟碳固存、水源调节、生境质量等关键服务的时空格局^[2]。其中,InVEST模型凭借其模块化、数据适中和适配性强,被广泛应用于城市绿地规划、流域生态补偿、水资源管理等生态调控场景。尽管常用模型具备服务供给评估能力,但多聚焦于静态总量,难以反映季节变化与水文节律动态对生态系统的影响,尤其在节律敏感区模拟精度有限。如SWAT在北海道春融期与洪峰阶段预测偏差显著,月度NSE由0.62降至0.38^[3]; InVEST在Meta流域的水产量模拟年均NSE仅0.07,部分子流域低于-1.0^[4]。这种局限推动模型从服务量评估转向机制耦合探索。

NbS应用过程中面临的核心挑战是多维生态系统服务间的协同与权衡关系,实施过程中常伴随不

同服务目标间的空间冲突与资源重分配。科学评估服务目标间的互促或抑制关系,对政策效果与项目优先级排序至关重要。当前研究采用地理探测器、互信息、多目标优化等方法,从空间统计与系统模拟角度解析这种复杂耦合关系。特别是在洪水与干旱频繁交替的区域,服务之间的协同表现出显著的时空异质性^[5],对NbS实施方案的因地制宜性提出更高要求。洞庭湖等水文节律敏感区的生态系统服务高度依赖水位波动驱动,呈现调控与抑制交替的动态响应,构成NbS机制研究的重要样本。中国NbS研究起步虽晚,但在“山水林田湖草沙”系统治理理念及《长江保护法》推动下,正在向城市、流域、农田、湿地等生态空间拓展。在洞庭湖、汉江、赤水河等典型区域,相关研究已初步形成包括空间识别、服务评估与调控机制的集成路径^[6]。洞庭湖区生态服务功能受多重扰动影响,需要具备动态适配能力的NbS调控机制。NbS效益实现依赖其与水文节律、土地利用与生态脆弱性的耦合程度。然而,当前我国NbS评估仍面临数据整合薄弱、节律机制缺失及模型单一等问题,难以支撑复杂生态系统的动态评估^[7]。因此,应推动NbS实践由单一指标优化向系统协同调控,由静态评估向节律适应转型。

在量化水文变化对生态影响方面的研究中, indicators of hydrologic alteration (IHA)是常用工具,它通过67项生态关联水文统计量(如流量极值、频率、时机)评估人类活动对河流系统的影响^[8],同时,强调时间节律特征(如环境基流、洪水频率、序列连通性)对生态响应的重要性。基于上述研究,为了解决现有方法对动态评估的局限性,本研究提出“水文节律适配度指数”(hydrological rhythm adaptation index, HRAI)。HRAI旨在定量评估NbS工程区流域水文过程对生态功能的“节律同步性”支持能力,聚焦于三大维度:洪水激活频率(反映生态系统对短

时高流量事件的响应需求)、补水天数(衡量枯水期维持生态基流的能力)、水文波动性(体现水文过程的整体平稳性及其对生境连续性的支撑)。这3项指标的选取,延续了IHA强调的水文节律特征与生态过程的关联性,但在构建上将关注点由静态统计拓展为动态过程,突出生态功能对水文节律变化的适应性需求。三者分别对应生态系统调蓄能力、供水保障与生境稳定的核心环节,构成节律适配能力的结构化指标体系。已有研究亦从不同生态功能角度支持该三维构成逻辑,例如洪水扰动与生态调蓄能力的响应关系^[9],生态水位波动对植被连通性的影响^[10],以及生态补水在干旱恢复中的关键调节作用^[11]。相较于IHA强调单点水文统计特征、InVEST侧重服务空间供给能力,HRAI-InVEST框架进一步引入节律驱动—生态响应的耦合逻辑,以过程机制为中介,将水文变化与生态服务时序波动之间的因果路径显性化表达。同时,HRAI提供了可在时序尺度上调控与优化的评估结构,解决传统评估中“量变推估、机制缺位”的不足,从而实现对NbS实施效益的动态适应性度量,增强评估模型的可解释性与应用推广价值。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

洞庭湖生态经济区位于湖南省东北部,与湖北省南部交界,总面积约 $6.05 \times 10^4 \text{ km}^2$,是长江中游的重要水量调节区与生态屏障(图1)。区内南纳湘、资、沅、澧四水,北受长江顶托,季节性涨落显著。汛期,长江回水与入湖洪峰叠加,导致水位剧烈波动;枯水期,来水锐减,湖体迅速萎缩,直接扰动区域水文节律基础。以城陵矶枢纽为代表的水利工程通过控制出湖水位与进湖流量,重塑洪枯节律的时间结构与振幅。叠加洲滩形态复杂及东、西、南洞庭三大自然保护区分布,区域对水文变动高度敏感,生态服务与生境连续性易受冲击。整体而言,该区节律特征受上游来水、长江回顶与工程调蓄共同驱动,呈现汛枯分明、波动剧烈的复合型结构,为节律驱动下NbS动态评估提供了典型研究基础。

1.2 数据来源与处理方法

本研究基于2022—2024年遥感与水文数据开展分析,该时期涵盖了典型的节律扰动与生态响应过程,具备一定代表性。2022—2023年,洞庭湖区经历持续干旱,出湖流量显著减少,枯水期提前,丰水期缩短;2024年则呈现洪水恢复趋势,已有研究指出该过程显著增强了滩涂植被的生态响应,反映了“节律

扰动—生态修复”的典型动态序列,适用于建模与验证^[12]。选取研究区内8个典型站点,覆盖不同地貌与土地利用类型,用于开展HRAI、产水量和土壤保持等生态系统服务指标的时空模拟分析。

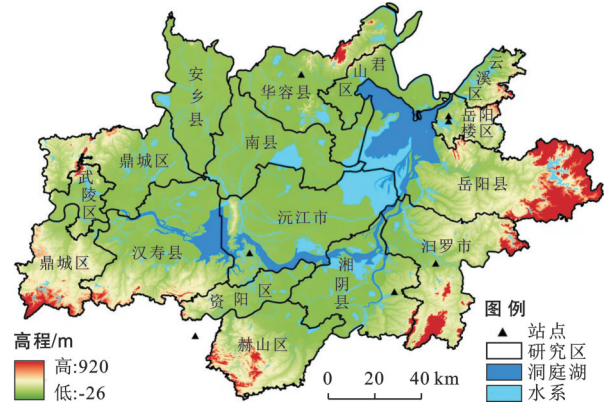


图1 洞庭湖生态经济区地形及水系分布

Fig.1 Topography and water system distribution of Dongting Lake ecological economic zone

本研究所用基础数据来源于中国气象局、湖南省水利厅、长江水利委员会、资源与环境科学数据中心(Resource and Environment Science and Data Center, RESDC)和Google Earth Engine(GEE)等权威平台,涵盖气象、水文、地形、土壤、土地利用与植被等生态环境因子。包括逐日降水量、温度、蒸发量等气象数据,2022—2023年城陵矶站年总出湖流量与生态补水时序数据,30 m分辨率的DEM, RESDC发布的2022年土地利用数据,以及MODIS MCD43 A4季度合成的NDVI最大值。为构建2022—2024年完整的评估序列,本文基于2022—2023年实测数据,采用普通最小二乘法(ordinary least squares, OLS)方法对生态补水量与NDVI等变量进行趋势外推。相关变量呈显著线性变化趋势($R^2 > 0.7$),以城陵矶站为例,OLS预测生态补水相对误差为6.3%,处于 $\pm 10\%$ 可接受范围,说明该方法适用于中短期生态变量估算。同时,模型输出经多源验证,产水模块年均值与湖南省水资源公报径流深基本吻合;土壤保持模块借助长江中游与洞庭湖流域实测资料进行精度验证。

1.2.1 环境驱动数据

(1) 气象数据。包括降水、气温、相对湿度、风速与日照时数,体现区域水热条件。数据取自周边8个气象站,采用ANUSPLIN(Australian National University SPLINE)薄板样条函数方法进行空间插值^[13]。参考现有研究,在相似区域交叉验证结果,降水与气温的插值精度(RMSE)分别控制在13.4 mm/月与 $0.9 \text{ }^\circ\text{C}$,具有可靠性^[14]。插值模型如下:

$$Z(s) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \phi(|s - s_i|) + \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y \quad (1)$$

式中: $Z(s)$ 为预测点 s 处的气象要素值; α_i 为条系数; $\phi(r) = r^2 \ln r (r > 0)$ 为基函数; (x, y) 为空间坐标; β_j 为多项式系数。

(2) 参考蒸散量(ET_0)。反映标准地表的水分蒸发能力。本研究采用Modified-Hargreaves模型计算 ET_0 ,具有参数少、适配性强的优势。计算公式如下:

$$ET_0 = 0.001 \times 3 \times 0.408 \times R_A \times (T_{avg} + 17) \times (T_D - 0.0123P)^{0.76} \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考蒸散量(mm/d); R_A 为大气顶层太阳辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); T_{avg} 为月平均温度($^{\circ}C$); T_D 为月平均日温差($^{\circ}C$),即 $T_{max} - T_{min}$; P 为月均降水量(mm/month)。

(3) 降雨侵蚀力因子(R)。用于估算降水引发土壤侵蚀的强度,本研究依据年降水量经验转换公式进行估算^[15]。计算公式为

$$R = \sum_{i=1}^{12} [1.735 \times 10^{1.5 \log_{10} P_i - 0.8188}] \quad (3)$$

式中: P_i 第 i 月累积降水量(mm); R 为降雨侵蚀力,单位为 $MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h \cdot a)$ 。

(4) 数字高程模型(DEM)。用于提取坡度、坡向等水文地形因子,是反映地表起伏形态的基础数据。本研究利用现有研究团队在长江流域生态系统服务研究中验证的方法,基于RESDC发布的30 m分辨率DEM,计算地形坡度因子^[16]。具体算法如下:

$$S = \arctan \left[\sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \right] \times \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

式中: S 为坡度($^{\circ}$); $\partial z / \partial x$ 和 $\partial z / \partial y$ 分别为 X 方向(东西)和 Y 方向(南北)的高程变化率。

(5) 植物可利用含水量(PAWC)。基于HWSD v1.2的土壤质地与容重参数,将田间持水量 θ_{fc} 与永久萎蔫点 θ_{pwp} 的差值作为PAWC。在空间尺度方面,本研究将原始1 km分辨率的PAWC通过多数覆盖法重采样至30 m土地利用图层,确保生态系统类型与水文参数空间一致。PAWC计算公式为:

$$PAWC = \theta_{fc} - \theta_{pwp} \quad (5)$$

式中: θ_{fc} 为田间持水量(m^3/m^3); θ_{pwp} 为永久萎蔫点(m^3/m^3)。

(6) 土地利用数据。用于识别生态系统类型及其空间分异格局,是生态服务评估的基础。采用RESDC发布的2023年30 m LULC数据,参考现有研究制定的区域映射规则,将原始20类映射为耕地、林地、草地、湿地、水体、建设用地6大类^[17]。

(7) 其他数据。子流域边界由RESDC提供的30 m DEM经ArcSWAT划分获取;NDVI植被覆盖度采用MODIS MCD43A4V007产品(NASA LP DAAC, 2024),并结合现有研究建立的 C 因子表,完成植被管理因子的赋值^[18]。

1.2.2 生态服务参数

(1) 植被覆盖指数(NDVI)。用于反映区域植被分布与生长状况,直接用于 C 因子赋值。本研究基于MODIS MCD43 A4 V007月度500 m产品,采用季度最大值合成方法计算NDVI时序,剔除QC不良像元后,生成季度NDVI图层^[19]。

(2) 土壤可蚀性因子(K)。该参数衡量土壤抗蚀能力,反映粒径组成与有机质对侵蚀的抑制作用。采用在中游水稻土区优化使用的Williams公式进行估算,相关参数取自FAO HWSD v1.2数据库。计算公式为

$$K = \left[0.2 + 0.3e^{-0.0256 \times SAND \times (1 - \frac{SILT}{100})} \right] \times \left(\frac{SILT}{CLA + SILT} \right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25 \times ORGC}{ORGC + e^{3.72 - 2.95 \times ORGC}} \right] \quad (6)$$

式中:SAND, SILT, CLA分别表示土壤砂粒、粉粒、黏粒含量百分比;ORGC表示土壤有机碳含量百分比。

(3) 保护措施因子。该参数反映治理区防护工程的减蚀效应。依据洞庭湖退耕还湿、生态封禁等实践,参考现有研究成果,赋值标准为耕地0.5,林地0.4,草地0.6,湿地0.2,建设用地和水体均为1.0^[20]。

1.2.3 水文节律适配性指数数据

(1) 洪水脉冲频率(F)。洪水脉冲事件体现流域在高流量条件下激活湿地生态系统的功能。本文基于城陵矶水文站2022—2024年逐日流量序列,采用7日滑动平均法平滑流量曲线,并结合最小持续时间法识别洪水事件。判定规则为若流量连续3 d超过阈值($10\,000\,m^3/s$),则认定为一次生态激活型洪水事件。该阈值参考《长江泥沙公报(2023)》设定。每年识别出的洪水脉冲频次取年均,作为频率指标(F)的原始值。

(2) 生态补水满足天数(D)。用于表征NbS区域对湿地水文连通与维持能力的支撑。该指标并非反映常态灌溉,而是在典型干旱或节律异常年份,通过生态调蓄工程(渠道连通、生态闸门调控等)维持湿地连通的次数。基于现有的研究,洞庭湖区在2022—2023年经历显著枯水事件,生态补水措施已在枯水季实施(如段调节、渠道输水)。参考《长江治理与保护报告》(2023, 2024)中各分区生态补水情况,提取2022—2023年数据,并结合前期趋势,使用OLS预测方法,估算2024年补水天数。以45 d/a作

为自然基准阈值,对各年生态补水(Δt_e)进行对比评价,形成指标(D)的时间序列。

(3)年内日径流变异系数(C_V)。用于反映流域水文过程的年内波动程度。基于2022—2024年逐日流量序列,分别计算每年的流量均值(μ_Q)与标准差(σ_Q),进而求得 C_V 值,计算公式为

$$C_V = \frac{\sigma_Q}{\mu_Q} \quad (7)$$

式中: μ_Q, σ_Q 分别为当年逐日径流均值与标准差。各年 C_V 值取年均,作为水文过程稳定性特征的指标。

1.3 研究方法

本研究综合考虑水文节律动态适配与生态系统服务空间协同关系,构建“水文节律适配度指数-InVEST生态系统服务模型-权衡协同度量”三维评估框架,包括HRAI指标体系构建与趋势识别、InVEST模块模型运行与产出解析以及生态系统服务协同关系定量测度。

1.3.1 水文节律适配度指数(HRAI)构建

水文节律适配度指数(HRAI)用于定量评估NbS工程区流域水文过程在洪水激活(频率)、枯水调控(补水天数)和水文稳定性(波动性)三维生态支持功能上的“节律同步性”,由洪水脉冲频率(F)、生态补水满足天数(D)和日径流变异系数(C_V)三项指标构成,分别反映生态激活、调水保障和系统稳定性。为实现量纲统一与综合分析,指标先进行最小—最大归一化处理。洪水脉冲频率(F)与生态补水天数(D)为正向指标,归一化公式为

$$X_i' = \frac{\max(x_i) - x_i}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (8)$$

径流变异系数(C_V)为负向指标,归一化公式为

$$X_i' = \frac{\max(x_i) - x_i}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (9)$$

式中: X_i 为第 i 项水文指标原始值; $\min(X_i), \max(X_i)$ 为其最小与最大观测值; X_i' 为标准化后的值。

上述归一化方法可确保所有指标的归一化值均满足“越大表示适配度越强”的计算逻辑,此方法已广泛应用于生态系统服务评价与可持续土地利用研究中,具备良好的可比性与计算稳定性。

(1)权重计算。采用熵权法计算各指标权重。熵权法通过衡量各水文指标信息的不确定性,计算每个指标的权重,计算公式为

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_j x_{ij}}, W_i = \frac{1 - \sum_j p_{ij} \ln p_{ij}}{\sum_k (1 - \sum_j p_{kj} \ln p_{kj})} \quad (10)$$

式中: X_{ij} 表示第 i 个指标在第 j 个样本格网的标准化

值; p_{ij} 为第 i 个指标在第 j 个样本格网的比重; m 为指标总数; n 为样本格网总数; w_i 为第 i 个指标的熵权值。

为检验权重稳定性,采用交叉验证方法^[21]对8个典型站点样本进行10次分层随机重算熵权。结果显示,三项核心指标(F, D, C_V)权重波动范围在 ± 0.04 内,标准差约为0.03,证明本研究中熵权设计具备良好的稳定性与一致性,符合环境—水文多指标评价规范。

(2)综合适配度指数(HRAI)计算。计算公式为

$$HRAI = \sum_{i=1}^3 w_i X_i' \quad (11)$$

式中: w_i 为第 i 个指标的熵权值; X_i' 为第 i 个指标的标准化值。

1.3.2 InVEST模型模块构建与计算

(1)水资源供给模块。根据土地利用类型、年降水量与参考蒸散量计算年产量,计算公式为

$$Y_{xj} = P_x - AET_{xj} \quad (12)$$

式中: Y_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的年产量(mm); P_x 为年降水量(mm); AET_{xj} 为实际蒸散量(mm)。输入参数包括降水图层,PAWC, Z 值,根系深度等,设置方法参考现有研究,确保了模型的空间分辨率和时间精度^[22]。

(2)土壤保持模块。土壤保持量是体现植被与地形结构对侵蚀控制能力的指标,采用USLE公式计算潜在与实际侵蚀量,计算公式为

$$RKLS_n = R_n \cdot K_n \cdot L_n \cdot S_n \quad (13)$$

$$USLE_n = R_n \cdot K_n \cdot L_n \cdot S_n \cdot C_n \cdot P_n \quad (14)$$

$$SK_n = RKLS_n - USLE_n \quad (15)$$

式中: $RKLS_n$ 和 $USLE_n$ 分别表示潜在与实际土壤流失量(t); SK_n 为土壤保持量(t)。各因子的定义和计算方法详见前文土壤数据部分。输入图层包括坡度、土地利用、 C 因子(植被覆盖因子)和 P 因子(保水能力因子)。

1.3.3 协同关系度量方法

基于信息论中的互信息(mutual information, MI)理论衡量水资源供给与土壤保持服务间的耦合程度。互信息本质上反映变量间的信息共享强度,适用于生态系统服务这类具非线性和多维特征的变量对,克服了线性分析对分布假设的限制。具体做法为:在统一空间尺度下,将服务栅格层归一化,并通过栅格计数法构建联合概率分布与边缘分布,计算互信息值 $I(X, Y)$,其计算公式为

$$I(X; Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} P(x, y) \ln \left[\frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \right] \quad (16)$$

式中: $p(x, y)$ 为 $X=x$ 与 $Y=y$ 同时出现的联合分布概率; $p(x), p(y)$ 为边缘概率分布; X, Y 为两类生态系统服务变量。在具体应用中,为提高估算稳定性,采用等频离散法将每类服务变量划分为5级(“极低”—“极高”)。为检验等级划分对结果的敏感性,本文尝试了4—7级设置,互信息变动不超过0.05 bit,表明MI方法在揭示多维生态系统服务交互关系方面具有较强的生态解释力与通用性。

2 结果与分析

2.1 模型校准与模拟精度

首先,选取8个典型站点分析2022—2024年HRAI、产水量和土壤保持等生态系统服务指标的年际动态。其次,选取桃源、岳阳与城陵矶3个站点,开展InVEST模型的模拟误差验证。在水产水量模块中,模拟年产水量与实测出湖流量(2024年为预测数据),折算径流深并进行回归拟合,结果 R^2 为0.88, NSE为0.82, RMSE控制在15 mm以内,表明模型在年际尺度上具有良好的趋势再现能力。进一步对3个站模拟的3 a平均产水量进行空间比对,桃源、岳阳与城陵矶分别为468.1, 452.4与439.1 mm,整体符合由上游向下游逐渐递减的空间变化规律。在土壤保持模块中,3个站点年均模拟值分别为208.2, 214.6与222.2 t/hm²,误差在±6%以内,趋势与区域实测结果较为一致。进一步对研究区内3个典型子流域进行文献对照分析,误差在±10%以内,表明该模块在不同地貌单元下具备较强的空间适配性和参数稳定性。基于上述误差区间,本研究进一步开展了±5%和±10%两级扰动的敏感性分析,结果显示,HRAI年均值波动范围为3.5%~4.2%,产水量与土壤保持指标的年均值变化均在3%以内,空间分布格局保持稳定。由此表明,预测数据的误差波动对生态系统服务指标的年际趋势和空间分布影响有限,未改变结果的稳健性和科学有效性,因此,产水量与土壤保持两个模块通过了趋势判断与误差校准的双重验证。

2.2 HRAI年际演变与空间格局

基于2022—2023年实测资料与2024年趋势预测结果,构建了2022—2024年区域HRAI评价序列,用以反映水文节律的生态适配性变化。2022—2024年,研究区水文节律适配指数(HRAI)年均值呈现持续上升趋势,由2022年的0.317稳步升至2023年的0.324,2024年进一步增至0.327。3 a增幅3.15%,表明在NbS持续实施背景下,研究区水文过程对生态系统的节律支持能力稳步增强,生态适配性呈上升

态势,区域水文节律对生态系统的支撑能力在自然调控作用下不断增强,生态水文过程适配性稳步提升。为深入揭示HRAI的空间分布特征及演变规律,本研究依据参考生态系统服务量化评估中的典型阈值划分实践,结合区域2022—2024年HRAI数值分布特征(集中于0.317~0.327),其数值设定4级适配阈值(四级 ≥ 0.326 ,三级0.323~0.326,二级0.320~0.323,一级 < 0.320)进而开展HRAI指数变化的空间分布及演变路径分析^[23]。

图2表明,2022年HRAI高值区集中分布于南部丘陵与湿地交错区域(如资阳区、汉寿县与赫山区)。该类区域早期NbS项目实施较为集中,水文节律响应显著。而位于洞庭湖平原的沅江市、岳阳县等滨湖农业区则普遍处于低适配等级,整体节律支撑能力偏弱。至2023年,随着NbS措施的持续推进,生态补水与流域调控工程成效初步显现。由图3可知,南洞庭湖周边及中部丘陵区适配等级明显提升,部分地块由二级升为三级。HRAI高值范围呈现西南向东南扩展趋势,空间梯度结构逐步优化。

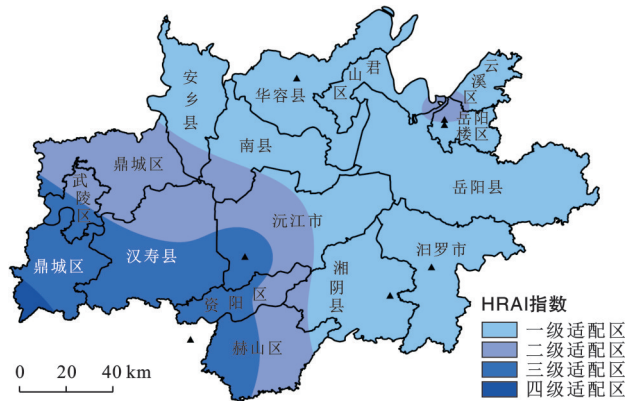


图2 2022年洞庭湖生态区HRAI指数的空间分布
Fig.2 Spatial distribution of HRAI in Dongting Lake ecological economic zone in 2022

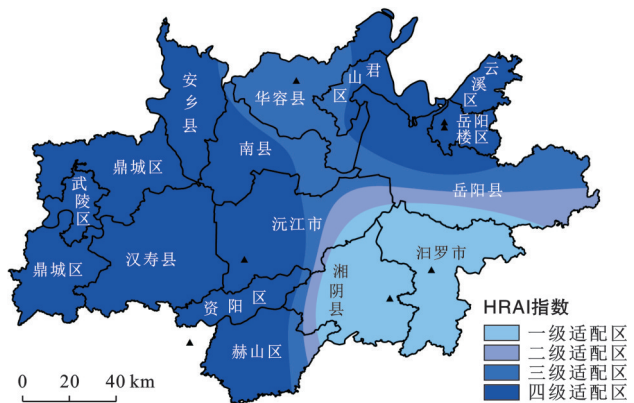


图3 2023年洞庭湖生态区HRAI指数的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of HRAI in Dongting Lake ecological economic zone in 2023

统服务存在显著的协同-权衡并存关系。从作用机来看,产水服务的增强多依赖于径流增加和表层水资源补给能力的提升,而这在一定程度上可能冲击原有的土壤结构稳定性,增加侵蚀风险。已有研究^[24]表明,尽管自然基础解决方案在缓解洪水和增强供水方面表现出显著优势,但若缺乏地形与土地利用匹配,其对土壤保持的正向效应可能被削弱。类似地,在对欧洲多个示范区域的NbS实施效果评估中,表现为水文调节类服务的提升往往在农业景观中造成营养物质流失与地表侵蚀加剧的现象,进一步干扰土壤保持功能^[25]。这表明在地形起伏大,植被覆盖不足的区域,NbS策略需要更加注重“服务协同与生态承载力”的动态平衡。因此,尽管产水服务与HRAI适配性的同步提升,在生态上具有显著协同效应,但若不考虑土壤保持服务的局部响应差异,NbS的综合生态效益将难以实现最优化。因此,必须充分考虑区域异质性,通过优化地貌利用,提升植被稳定性,引入缓坡构造等手段,主动规避服务冲突。

2.4 驱动因素敏感性与动态评估框架

研究表明,可利用含水量提升10%,可使区域产水量增加8.5 mm(+1.9%),HRAI提升0.003 5,调蓄能力增强显著;洪水脉冲阈值提高5%,HRAI提升0.002~0.003,脉冲频率下降,节律波动减弱;生态补水天数增加5 d, HRAI平均提升0.0018,反映其在维持节律稳定性方面的直接贡献。

不同土地利用类型之间显著差异(图6),林地的产水量与土壤保持量均值较高,HRAI均值亦显著高于区域平均值;耕地产水量虽高,但HRAI偏低,土壤保持波动大;建设用地指标均值最低,NbS响应最弱。高NDVI区域HRAI平均提升0.004~0.006,验证了“植被覆盖—节律适配协同增强”的非线性机制。地貌异质性特征表明,丘陵湿地区在坡度与NDVI交互影响下具备良好NbS响应潜力,适于实现“节律稳定—服务协同”;而平原与建设用地集聚区受硬化地表与排水结构影响,HRAI较低,NbS效果差。

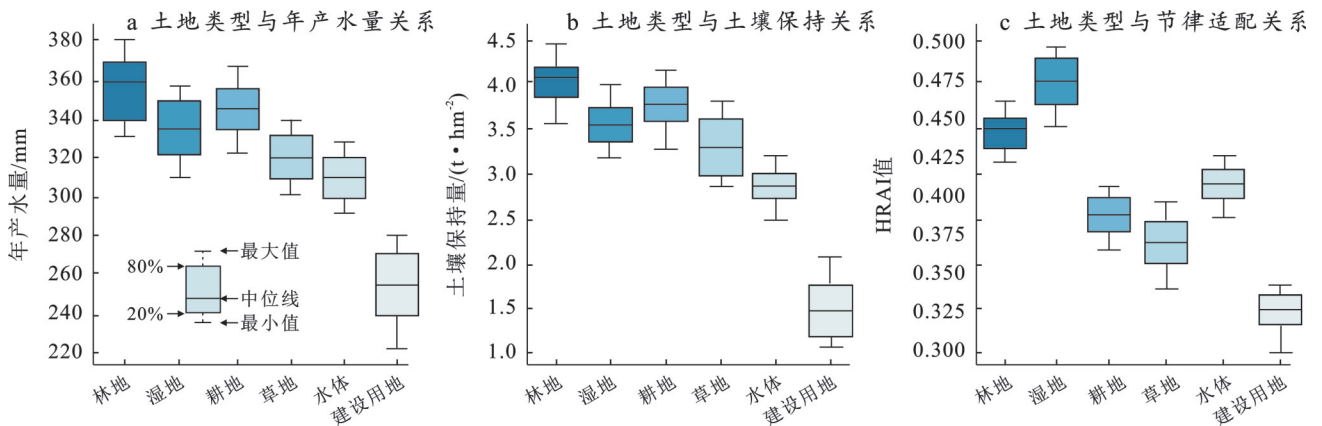


图6 HRAI构成指标在不同土地利用类型下的变化特征

Fig.6 Variation characteristics of HRAI component indicators across different land use types

综合以上分析,可利用含水量、洪水脉冲阈值与生态补水天数是影响HRAI变化最显著的变量,对节律适配性和生态系统服务具有直接调控作用。基于本研究区域的栅格模拟结果,提出“变量导向—区域匹配—策略响应”的调控机制:①在含水量变动较大的区域,产水量和HRAI对水分可利用性的响应最为灵敏,调蓄型NbS措施应优先布局于此类区域;②在生态补水天数与HRAI呈显著正相关的农田—湿地边缘地带,建议通过提升生态补水频次,稳定节律波动,这一思路与现有研究在不同水文背景下的模型结论基本一致^[26];③对于洪水脉冲阈值敏感区,应适当调整流域泄洪阈值,优化洪峰管理,减少高频洪水触发对HRAI节律的干扰,该策略已被其他研究人员在城市化背景下的气候适应研究中所支持^[27]。结合

上述变量响应机制及其空间差异特征,构建了集“水文节律适配度计算—生态系统服务评估—驱动因子敏感模拟—空间响应归因—区域策略制定”于一体的NbS动态评估流程。该框架强调以因子敏感性为主线、辅以地貌响应匹配,从而形成“适地适因”的优化路径。因此,在明确变量敏感度的基础上,高响应区应强化因子导向的调控响应,受限区则引入基于敏感因子的适应性约束机制。

3 讨论

本研究围绕NbS实施背景下洞庭湖区域水文节律适配性演变及生态系统服务动态响应关系,探讨了二者在时空维度上的耦合特征与潜在权衡,并识别了关键影响因子及空间差异性,为区域NbS精准

配置与管理提供科学依据。结果显示,NbS措施可有效提升区域水文节律适配性。3 a提升幅度超过3%,印证了其在优化生态水文过程,增强区域调蓄能力方面的应用潜力。同时,产水服务与HRAI呈稳定正相关,尤其在生态补水充足区域协同效应更为明显,而土壤保持服务与HRAI在部分区域表现出负相关特征,表明在NbS实施过程中可能存在节律适配提升与土壤保持受限的局部权衡关系。

有研究表明,受土地利用与气候驱动的水产量与土壤保持服务在不同子流域中存在明显协同—权衡特征,与本研究产水与土壤保持服务表达出的空间分布高度契合^[28];同时,相关研究应用InVEST模型揭示的调蓄区域与耕地区的协同—权衡结构,与本研究基于HRAI指标探究的结果一致^[29]。另外,基于IHA-RVA方法对东江源区生态水文情势变化的研究,量化了水利工程对水文节律的多指标影响^[30],其研究结果与本研究中对关键水文变量的敏感性识别存在一定对应关系。这些比对结果进一步佐证了本研究HRAI-InVEST框架成果的可信度和应用价值。

可利用含水量、生态补水天数及洪水脉冲阈值是影响HRAI变化及生态系统服务响应差异的重要变量。适度提升含水量和补水天数可有效增强节律稳定性,洪水脉冲阈值调控有助于降低极端流量事件频率,从而在保持生态流量安全前提下提高区域适配能力。需要指出的是,在极端水文事件频发背景下,HRAI作为基于生态水文驱动的评价指标,具备较强的事件响应能力与调控反馈指示性,尤其在洪水频次与干旱持续期显著异常的年份,其变化可反映NbS措施对于节律扰动的响应强度与修复能力,具有一定的适用性。但HRAI主要聚焦于地表径流过程的节律性变化,对地下水—地表水交互、水源补给滞后性等非显性过程的捕捉能力仍有限。在模拟方法方面,InVEST模型为生态系统服务空间评估提供了结构清晰、参数要求适中的计算平台,但其水资源模块未考虑地下水动态、人工调蓄调度与水体连通性变化等复杂过程,可能低估部分区域调蓄能力与生态补水能力的变化幅度,影响服务响应的模拟精度。后续研究可尝试将HRAI与更高分辨率的水文过程模型或地下水—地表水耦合模型联动整合,以增强对极端情境与过程不确定性的适应能力,推动NbS动态效益评估向多过程、多维度方向拓展。从方法论视角看,研究以水文节律适配性为核心指标,将NbS效益评估从单一生态系统服务量化延伸至上多服务协同与节律稳定性的综合评估,弥补了

NbS空间优化研究中在水文过程调控与生态效益协同关系识别方面的不足,拓展了NbS在区域洪水风险管理与生态系统服务提升领域的应用路径。本研究选取的时间段仅3 a(2022—2024年),虽覆盖典型干旱与修复过程,但仍存在长期趋势刻画能力不足的问题。未来研究可进一步拓展样本年限,纳入不同水文型年份与极端事件案例,以增强评估模型的适应性与稳健性。同时,考虑到研究区受东亚季风显著影响,不同季节生态系统需水结构可能存在差异,特别是在冬季生态活动减弱阶段,生态系统对水文过程的敏感性较低。当前HRAI指标构建基于全年尺度的节律窗口,不能反映季节性需水的动态特征。未来研究可进一步引入分季物候参数与生态响应函数,以提升节律适配性评价的时序分辨力与生态匹配精度。

4 结论

(1) NbS实施效果具有显著的空间异质性。在丘陵湿地与林区,产水服务与水文节律适配性对水分条件表现出高响应性(响应系数 >0.62),表明该区域是NbS措施实现生态水文协同增效的关键区域;在平原及建设用地集中区,二者敏感性较低(<0.35),揭示了NbS在该类区域发挥水文调节功能所面临的结构性约束。

(2) 2022—2024年区域HRAI年均值由0.317提升至0.327,NbS措施有效提升洪水调蓄与生态水文稳定性。洪水脉冲是影响HRAI稳定性的关键扰动因子,本底洪峰上浮20%可导致HRAI产生约 $\pm 15\%$ 的波动。

(3) 影响HRAI与生态系统服务协同关系的关键因子权重表现为可利用含水量(0.42) $>$ 生态补水天数(0.37) $>$ 洪水脉冲阈值(0.21)。该权重体系为区域NbS的多目标协同管理提供了明确的决策依据。

(4) 形成了一套整合“分区—因子—权重”的NbS效益评估路径。该路径综合了空间异质性规律、关键驱动机制与量化优先级,为在洪水风险管理与生态系统服务提升中实现NbS的精准配置和适应性管理提供了可操作的理论与方法支撑。

参考文献(References)

- [1] Seddon N, Smith A, Smith P, et al. Getting the message right on nature-based solutions to climate change [J]. *Global Change Biology*, 2021,27(8):1518-1546.
- [2] 马月伟,潘健峰,蔡思青,等.生态系统服务社会价值与生态价值的权衡与协同关系:以普达措国家公园为例[J]. *地理科学*, 2022,42(7):1283-1294.

- Ma Yuewei, Pan Jianfeng, Cai Siqing, et al. Trade-offs and synergies between social value and ecological value of ecosystem services: A case study of the potatso National Park [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(7):1283-1294.
- [3] Zhao Yuzhe, Zou Yunjiao, Msakni M K, et al. Liner feeder service network design problem for joint operation: A case study from China [J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2025:1-39.
- [4] Valencia J B, Guryanov V V, Mesa-Diez J, et al. Assessing the effectiveness of the use of the InVEST annual water yield model for the rivers of Colombia: A case study of the meta river basin [J]. *Water*, 2023, 15(8):1617.
- [5] 孙宇豪,周洪美,张耀峰,等. 经济发展潜力的统计测度、空间分布及影响因素[J]. *统计与决策*, 2025, 41(7): 111-116.
- Sun Yuhao, Zhou Hongmei, Zhang Yaofeng, et al. Statistical measurement, spatial distribution and influencing factors of economic development potential [J]. *Statistics & Decision*, 2025, 41(7):111-116.
- [6] 杨君,唐兴隆,袁淑君,等. 湖南省多尺度生态系统服务供需关系及影响因素[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(6): 272-281.
- Yang Jun, Tang Xinglong, Yuan Shujun, et al. Supply and demand of multi-scale ecosystem services and their influencing factors in Hu'nan Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(6):272-281.
- [7] 李丽蓉,黄一民,张秋锦,等. 洞庭湖流域高温热浪持续天数预测[J]. *地理科学*, 2024, 44(12):2247-2257.
- Li Lirong, Huang Yimin, Zhang Qiujin, et al. Prediction of duration of high temperature heat wave in the Dongting Lake basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(12):2247-2257.
- [8] Daide F, Hasiotis T, Nabih S, et al. Assessing hydrological alterations and environmental flow components in the Beht River basin, Morocco, using integrated SWAT and IHA models [J]. *Hydrology*, 2025, 12(5):109.
- [9] 刘超,魏秘,李德旺,等. 长江中游松滋河鱼类早期资源与水文情势的相关性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2025, 34(5):993-1001.
- Liu Chao, Wei Mi, Li Dewang, et al. Correlation study on early stage fish resources and hydrological conditions of the Songzi River in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2025, 34(5):993-1001.
- [10] 王煜,郑小康,吕鸿,等. 极端枯水年黄河流域水资源系统韧性调控[J]. *水科学进展*, 2025, 36(3):359-371.
- Wang Yu, Zheng Xiaokang, Lv Hong, et al. Research on resilience regulation of water resource systems in the Yellow River basin under during extreme drought years [J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(3):359-371.
- [11] 孙美荣,孙鹏森,张明芳,等. 气候变化和人类活动对流域水文恢复力影响的研究进展[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2):13-24.
- Sun Meirong, Sun Pengsen, Zhang Mingfang, et al. Progress in the effects of climate change and human activities on watershed hydrological resilience [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2):13-24.
- [12] Wang Tao, Deng Zhengmiao, Zhang Chengyi, et al. Vegetation types and flood water level are dominant factors controlling the carbon sequestration potential in Dongting Lake floodplain, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 921:171146.
- [13] Li Hongjun, Hou Zhengjun, Qin Zhuangen. Spatiotemporal heterogeneity of precipitable water diurnal variation over the Tibetan Plateau based on a refined 2D water vapor reconstruction [J]. *Atmosphere*, 2025, 16(2):139.
- [14] Yuwen Peng, Huiyi Su, Min Sun, et al. Reconstructing historical forest fire risk in the non-satellite era using the improved forest fire danger index and long short-term memory deep learning—a case study in Sichuan Province, southwestern China [J]. *Forest Ecosystems*, 2024, 11100170.
- [15] 李嘉睿,李乐,郝泽周,等. 1982—2022年南方红壤区降雨侵蚀力时空格局演变及其归因分析[J]. *生态学报*, 2025, 45(9):4248-4262.
- Li Jiarui, Li Le, Hao Zezhou, et al. Spatial-temporal pattern evolution and attribution analysis of rainfall erosivity in the red soil region of southern China from 1982 to 2022 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(9):4248-4262.
- [16] 廖江博,毛德华,邓美容. 洞庭湖流域典型生态系统服务评估及权衡/协同关系研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(2):310-321.
- Liao Jiangbo, Mao Dehua, Deng Meirong. Evaluation of typical ecosystem services and trade-offs/synergies in Dongting Lake basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(2):310-321.
- [17] Guangxu Liu, Aicun Xiang, Zhiwei Wan, et al. Quantitative characterization, spatiotemporal evolution, and analysis of driving factors of daily dry-wet abrupt alternation: A case study of the Ganjiang River basin [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 56102030-102030.
- [18] Qiao Bin, Cao Xiaoyun, Yang Hao, et al. Nonlinear threshold effects of environmental drivers on vegetation

- cover in mountain ecosystems: From constraint mechanisms to adaptive management [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 173:113328.
- [19] Peng Kunyu, Liu Yameng, Zhang Keyu, et al. Regional NDVI reconstruction based on tree-ring width of *Pinus massoniana* Lamb. in the north-south transition zone of China [J]. *Dendrochronologia*, 2025, 92:126373.
- [20] Panagos P, Borrelli P, Poesen J, et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54:438-447.
- [21] Dahl J E, Mørch A. A theoretical and empirical analysis of tensions between learning objects and constructivism [J]. *Education and Information Technologies*, 2025: 13636.
- [22] Xiong Kai, Deng Bin, Liu Jiang, et al. Advanced classification of optical water types and ensemble learning models for Chl-a inversion in Dongting and Poyang Lakes using Sentinel-2 remote sensing: Assessing the impact of extreme drought events [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 177:113738.
- [23] Maes J, Egoh B, Willems L, et al. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union [J]. *Ecosystem Services*, 2012, 1 (1):31-39.
- [24] Lang Zhang, Haoran Yu, Qicheng Zhong, et al. Ecological flow-driven multifunctionality: A Nature-based Solutions framework for urban ecological corridor planning in high-density cities [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 179 114224-114224.
- [25] Grizzetti B, Liqueste C, Antunes P, et al. Ecosystem services for water policy: Insights across Europe [J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 66:179-190.
- [26] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, et al. Global flood risk under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9):816-821.
- [27] Xuwen Tian, Xin Yao, Zhenkai Zhou. Distribution patterns and risk assessment of potential ice avalanches and glacier lake outburst floods in southeastern Tibetan Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 179 114217-114217.
- [28] Le Chen, Wei Wei, Bing Tong, et al. Ecosystem services and their drivers under different watershed-management patterns in the Western Chinese Loess Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 172 113321-113321.
- [29] Rotimi O O, Appollonia A O, Olutoyin A F, et al. Assessing the status of ecosystem regulating services in the urbanising rainforest and Guinea savanna ecological regions of Nigeria using InVEST models [J]. *Urban Climate*, 2025, 61 102410-102410.
- [30] 曾金凤, 刘祖文, 刘友存, 等. 基于 IHA-RVA 法的东江源区生态水文情势变化分析 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6):157-164.
- Zeng Jinfeng, Liu Zuwen, Liu Youcun, et al. Ecohydrological regime of source area of Dongjiang River based on IHA-RVA [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6):157-164.

(上接第 201 页)

- [19] Zhao Fancheng, Miao Fasheng, Wu Yiping, et al. Refined landslide susceptibility mapping in township area using ensemble machine learning method under dataset replenishment strategy [J]. *Gondwana Research*, 2024, 131:20-37.
- [20] Gong Peng, Wang Jie, Huang Huabing. Stable classification with limited samples in global land cover mapping: Theory and experiments [J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(12):1862-1865.
- [21] Li Xiangqian, Peng Qiongyan, Shen Ruoque, et al. Long-term reconstructed vegetation index dataset in China from fused MODIS and Landsat data [J]. *Scientific Data*, 2025, 12:152.
- [22] Chen Yu. Spatial prediction and mapping of landslide susceptibility using machine learning models [J]. *Natural Hazards*, 2025, 121(7):8367-8385.
- [23] Ahmad G N, Fatima H, Ullah S, et al. Efficient medical diagnosis of human heart diseases using machine learning techniques with and without GridSearchCV [J]. *IEEE Access*, 2022, 10:80151-80173.
- [24] Lu Jiangang, He Yi, Zhang Lifeng, et al. Ensemble learning landslide susceptibility assessment with optimized non-landslide samples selection [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2024, 15:2378176.
- [25] Zhou Xinzhi, Wen Haijia, Li Ziwei, et al. An interpretable model for the susceptibility of rainfall-induced shallow landslides based on SHAP and XGBoost [J]. *Geocarto International*, 2022, 37(26):13419-13450.