基于熵权的黄河湿地自然保护区生态环境演变特征研究

赵亮[1],李仟[2],靳文超[3],张超[2],轩晓博[2]

(1.河南省水利第一工程局集团有限公司,郑州 450000;2.黄河勘测规划设计研究院有限公司 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹),郑州 450003;3.河南省西霞院水利枢纽输水及灌区工程建设管理局,郑州 450008)

摘　要:研究聚焦河南黄河湿地国家级自然保护区生态环境演变特征,采用熵权法分析生态系统发展质量和稳定性,计算得到自然保护区生态发展指数(ecology development index,*EDI*),定量研究了自然保护区生态环境演变特征.结果表明,各项指标的熵权和单一年度的指标权重结构均随时间呈现动态变化,系统中各项指标的重要性并非恒定不变.2006 至 2023 年研究区内生态发展指数 *EDI* 范围为 26.92～46.49,2012 年之前整体偏低,2013 至 2020 年之间整体呈现稳中有升的趋势,2021 年之后略有下降,总体呈现"稳定—增长"的变化趋势,表明近年来保护区内生态环境整体向好.

关键词:熵权;黄河;自然保护区;演变特征;指标体系

中图分类号:X171　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1000-2367(2026)01-0047-07

黄河流域是我国重要的生态功能区,同时也是生态环境最为脆弱的地区之一[1].黄河在穿过豫西峡谷之后进入黄淮海平原,河道比降趋缓,游荡性河势发育,形成了面积广大的河流及滩区湿地.这些湿地作为黄河流域生态系统的重要组成部分,在涵养水源、净化水质、调节气候、保护生物多样性和维护生态稳定等方面发挥了重要作用[2-3].近几十年来,由于受到不断加剧的人类活动及气候变化影响,黄河下游湿地生态系统出现了不同程度的退化,对流域生态安全及沿黄城市发展造成了不利影响.因此,面向黄河下游生态保护需要,开展湿地生态环境演变特征与影响因素研究,有助于深化对黄河下游湿地生态退化机制的理解,为湿地保护修复与可持续管理提供重要科学依据.

目前,在流域尺度上基于熵权法解析生态环境时空演变机制已成为研究热点之一[4-5].该方法通过客观赋权有效识别关键影响因子,为生态过程的定量表征与驱动力分析提供了重要工具.靳峰等[6]运用熵权模型对黄河流域甘肃段水土保持治理效益进行了时空量化评估,指出产水模数、地表径流深和植物固碳量是制约综合效益提升的主要障碍因子;张帆等[7]则结合熵权法与 TOPSIS 模型,对同一区域水资源承载力进行评价,发现人均水资源量、产水模数和生态环境用水率等指标权重显著,凸显出水资源配置在生态保护中的核心地位.在更局地的湿地生态系统层面,众多学者聚焦于其演变过程及驱动机制.孙湘儒等[8]揭示了辽河保护区湿地近 40 年来生态环境演变中气候因子的基础作用,以及农业开发、城镇化和水利工程等人类活动的主导影响;QIN 等[9]通过构建综合人为干扰指数,指出城市化、工业开发与围海养殖是导致胶州湾湿地萎缩与破碎化的关键压力;徐振田等[10]基于遥感手段发现黄河三角洲自然湿地在 1986 至 2016 年间显著退化;

收稿日期:2025-07-30;**修回日期:**2025-09-17.

基金项目:河南省水利科技攻关项目(GG202165);国家重点研发计划(2023YFC3208604).

作者简介:赵亮(1972－),男,河南郑州人,河南省水利第一工程局集团有限公司正高级工程师,研究方向为水利水电工程施工管理,E-mail:527608071@qq.com.

通信作者:轩晓博(1980－),男,陕西兴平人,黄河勘测规划设计研究院有限公司正高级工程师,研究方向为水土资源保护与利用,E-mail:xbxuan@126.com.

引用本文:赵亮,李仟,靳文超,等.基于熵权的黄河湿地自然保护区生态环境演变特征研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(1):47-53.(Zhao Liang,Li Qian,Jin Wenchao,et al.The change characteristics of eco-environment in the Yellow River wetland nature reserve based on entropy weights[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2026,54(1):47-53.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.07.30.0002.)

孙楠等[11]指出长江河口湿地呈现出“自然湿地→人工湿地→非湿地”的转变趋势;张朋兴等[12]则强调生态功能指数和人口密度是滇中高原湖泊流域生态环境演变的主要驱动因素.这些研究一致表明,湿地生态演变受自然因素与人类活动的共同驱动,且人类干扰往往起着决定性作用.近年来,张金良等[5]基于系统论与信息熵理论,对黄河流域近 40 年生态环境指标进行熵权分析,结果表明流域生态环境质量整体呈改善趋势,反映出生态保护与治理措施的积极成效.然而,现有研究多集中于流域宏观尺度或河口、湖泊类湿地,针对黄河下游典型河流湿地,尤其是生态功能重要的湿地自然保护区生态环境演变机制的系统性研究仍然缺乏,其时空变化特征及主导驱动因子尚不明确.为掌握黄河下游湿地生态环境演变特征,本研究以河南黄河湿地国家级自然保护区为研究对象,选取保护区孟津段—西霞院水库及下游范围为研究区域,统计了保护区 2006 至 2023 年主要生态环境数据,通过熵权分析计算得到自然保护区生态发展指数,探究了黄河湿地自然保护区的生态环境特征演变及其驱动因素.

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

河南黄河湿地国家级自然保护区位于河南省西北部黄河中下游段,是“内陆湿地生态系统类型自然保护区”.保护区东西呈带状分布,西起陕西与河南交界处,东至洛阳市与郑州市交界,总面积 680 km^2.整个保护区范围包括三门峡水库、小浪底水库、西霞院反调节水库以及西霞院库区以下至洛阳市孟津区与巩义市交界处河南省境内的黄河.本文研究区位于湿地保护区内西霞院库区及以下至郑洛黄河大桥之间(附录图 S1),其中库区长约 10 km,保护区面积约为 31.33 km^2,库区以下河段长约 39 km,保护区面积约 213.67 km^2.研究区内分布有湿地保护区核心区、缓冲区和试验区,其中核心区面积为 85.53 km^2.研究区内包含天然湿地、人工湿地、农田、鱼塘、水利水电工程等多种土地利用类型.三门峡、小浪底水库对黄河上游来水的综合调控,使得下游许多滩区年过水量、过水次数、水湿天数逐步减少.一些河段主河槽明显变窄,漫滩流量逐渐增大,更多滩地被开发,引发河流廊道环境结构变化、湿地面积萎缩、生态多样性衰减、土地盐碱化、植被逆向演替等生态环境风险.研究区处于复杂的生态水文情势与剧烈的人类活动干扰之中,其演变特征与驱动机制的研究对开展黄河下游湿地保护、建设黄河下游绿色生态走廊具有重要意义.

1.2 *EDI* 评价指标体系

自然保护区生态发展指数(ecology development index,*EDI*)是基于熵值和耗散结构的综合评价指标,表征了自然保护区生态发展的有序性和系统的稳定性.*EDI* 指标值可用来衡量研究区生态发展质量,*EDI* 数值越大,表示发展质量越高,越趋于良性循环;数值越小,表示发展质量越低,所处状态存在一定的问题.从自然保护区生态发展目标出发,综合考虑湿地保护区特点以及数据的可获取性,结合目前已有的研究成果[3,5,8,12],从水沙条件、生态环境质量等层面,选取了能够充分反映区域生态环境特征且可获取的 11 项指标.通过熵权法计算 *EDI*,相关指标如附录表 S1 所示.数据研究的时间为 2006 至 2023 年.生境质量指数、中等及以上植被覆盖度、聚合度指数、香浓多样性指数等指标通过遥感影像解译及地类统计后计算得到.遥感影像数据来源于 Landsat(2005 至 2018 年,分辨率 30 m)、Sentinel-2(2019 至 2023 年,分辨率 10 m),选择植被生长茂盛、植被覆盖度高的 8 至 10 月间且云量低于 5%的影像.

黄河的水量和沙量是黄河河道湿地形成的重要影响因子,对湿地景观的演变具有重要意义,因此选取年径流量、非汛期及汛期的平均流量等指标反映来水条件,平均含沙量则用来分析黄河泥沙对湿地格局塑造的影响,生长季降雨总量来研究降水对湿地生态系统的影响,生长季潜在蒸散发则直接影响湿地内植物的生长情况.生境质量指数用来评价自然保护区主要保护对象生境质量的适宜性,是衡量区域生态健康及可持续状态的重要指标.中等及以上植被覆盖度,表示区域植被覆盖的程度,用来评估生态环境动态变化.黄河下游河道湿地形态变化与景观格局的演变密切相关,选取的聚合度指数、香农多样性指数等景观格局指数,能定量反映景观格局的结构组成和空间配置特性以及演变情况.湿地土壤是湿地化学物质转化的介质和植物营养物质的储存库,土壤湿度直接影响植物和微生物的生长活动,因此用表层土壤含水率指标来表示土壤湿度.

$$HQ = A_{\mathrm{blo}} \times (0.35 \times \text{林地面积} + 0.21 \times \text{草地面积} + 0.28 \times \text{水域湿地面积} + 0.11 \times \text{耕地面积} +$$

0.04 × 建设用地面积 + 0.01 × 未利用地面积)/ 区域面积，

式中，A_{bio} 为生境质量指数的归一化系数，参考值为 511.264[13].其中各个地类面积通过遥感影像解译得到.

1.3　熵权法计算 EDI

熵权法是一种基于信息论中信息熵的概念来评估和确定多指标决策问题中各指标重要性的方法.其核心在于通过计算信息熵来衡量指标的离散程度，进而确定其权重.熵权法的主要优点是操作简单、易于上手，并且能够减少主观因素的影响[14-15]，通过数据处理直接得到权重，避免了主观赋权的随意性.在使用熵权法之前，需要对指标进行进一步识别和筛选，以确保结果的准确性和合理性.熵权法的基本步骤包括：数据归一化，为了消除不同指标之间量纲的影响，确保所有指标都在同一量级上；计算信息熵，通过计算每个指标的信息熵，可以衡量该指标的离散程度；计算权重，根据信息熵的值，可以计算出每个指标的权重[16].

1.3.1　计算可能度函数

利用指数型白化函数，针对指标数值越大越劣或越大越优的情况，分别建立指标对应的各标准类的白化权函数.本次研究中，将指标划分为“优、良、中、差”4 个标准，基于指标具体取值范围，可以求出白化函数的值，从而得到指标熵值.

1.3.2　计算指标熵值

指标体系各指标熵通过下式计算：$p_{ij}=\dfrac{f_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} f_{ij}}$，$S_i=-\dfrac{1}{\ln n}\sum_{j=1}^{n}(p_{ij}\ln p_{ij})$，其中，$f_{ij}$ 为 i 指标 j 标准的白化函数值，p_{ij} 为各标准白化函数值在所有值中的比重，n 为指标标准区间的个数，S_i 为 i 指标的熵值.

1.3.3　计算熵权

指标体系各指标熵权通过公式计算：$\omega_i=\dfrac{1-S_i}{N-\sum_{i=1}^{n} S_i}$，其中，$\omega_i$ 为 i 指标的熵权，N 为指标个数.

1.3.4　计算生态发展指数(EDI)

根据耗散结构原理，利用前述公式计算指标的熵值 ω_i 和熵权 S_i，经过加权求和，计算得出每个时间段内生态系统的总熵 S，计算公式如下：$S=\sum_{i=1}^{n}\omega_i S_i$，$(i=1,2,\cdots,N)$，其中，$\omega_i$ 为 i 指标的熵权，S_i 为 i 指标的熵值，N 为指标个数.

考虑分析需要，本研究采用百分比为生态发展指数(EDI)赋分，计算得分时，将耗散结构指标取值范围线性转换至[0，100]区间，得出 EDI 数值的转换公式：$EDI=100\times(1-S)$.

2　结果分析与讨论

2.1　熵权分析

2006 至 2023 年指标体系对 EDI 影响权重变化情况如图 1和图 2 所示，每年的各项指标权重值和为 1.与传统专家打分等权重指标体系方法不同，本文计算的各指标的权重存在随时间序列的动态变化，说明不同指标对生态系统状态的影响程度在不同时间存在差异.生长季(4 至 10 月)潜在蒸散发的权重均值为 9.10%，其随时间变化整体呈现波动变化趋势，2014 年之前权重值相对较大，之后权重值整体下降，最大权重值为 2010 年的 15.42%.年径流量的权重均值为 8.86%，其随时间变化整体呈现波动变化趋势，最大权重值为 2016 年的 17.84%，在此之前权重值相对较小，2016 年之后权重值整体增大.非汛期平均流量的权重均值为 7.92%，该指标权重相对于其他指标较小，其随时间变化整体较为稳定，历年的变化幅度不大，最大权重值为 2021 年的 13.01%.汛期(7 至 10 月)平均流量的权重均值为 8.04%，权重值相对于其他指标较小，其随时间变化整体呈现波动变化趋势，但历年的变化幅度不太大，最大权重值为 2020 年的 13.16%.平均含沙量的权重均值为11.78%，该指标权重相对于其他指标较大，且逐年波动幅度较大，最大权重值为 2017 年的 19.57%，2018 至 2023 年的权重值下降明显.生长季(4 至 10 月)降雨总量的权重均值为 7.35%，在所有指标中权重值最低，且历年变化幅度相对较小，最大权重值为 2021 年的 13.01%.生境质量指数的权重均值为 9.64%，且历年变化幅度相对较小，最大权重值为 2010 年的 17.52%.中等及以上植被覆盖度的权重均值为

9.01%,最大权重值为 2010 年的 17.52%,2019 至 2023 年的平均权重值为 7.31%,明显低于 2006 至 2010 年的 12.62%.聚合度指数的权重均值为10.09%,最大权重值为 2018 年的 18.01%,近 5 年的权重值较之前有明显增加趋势.香农多样性指数的权重均值为 9.54%,最大权重值为 2018 年的 14.43%,且近年来的权重值较之前有增加趋势.表层土壤含水量的权重均值为 8.67%,最大权重值为 2013 年的 22.57%,除个别年份外,权重值整体变化的幅度不大.

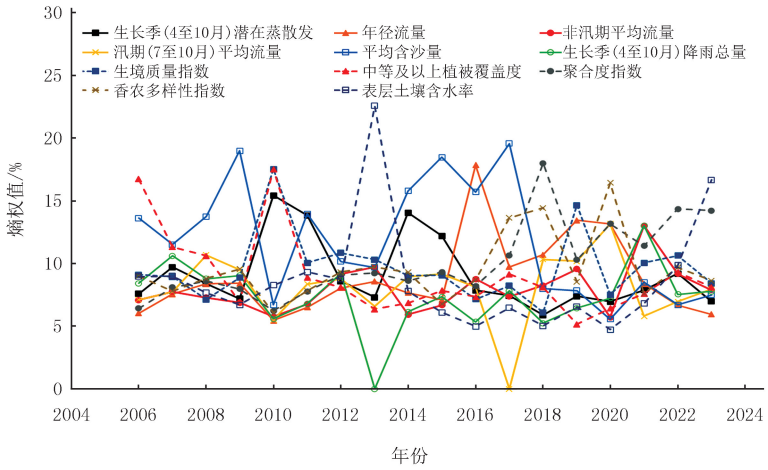
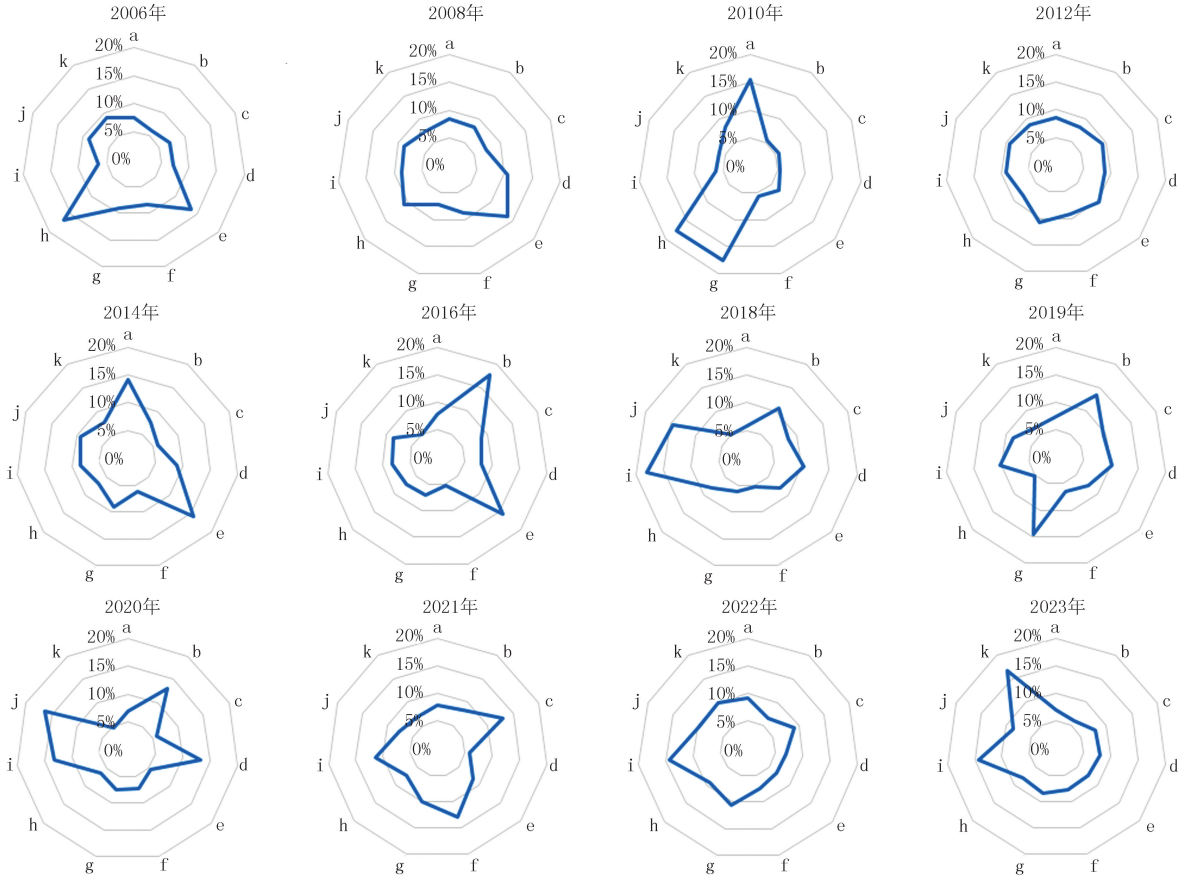


图1 2006至2023年*EDI*评价指标熵权变化

Fig.1 Entropy weight of *EDI* evaluation indicator from 2006 to 2023



a.生长季(4至10月)潜在蒸散发;b.年径流量;c.非汛期平均流量;d.汛期(7至10月)平均流量;e.平均含沙量;f.生长季(4至10月)降雨总量;g.生境质量指数;h.中等及以上植被覆盖度;i.聚合度指数;j.香农多样性指数;k.表层土壤含水率.

图2 指标体系对*EDI*影响权重变化图

Fig.2 Impact weight changes of the indicator system on *EDI*

以 2006 至 2023 年的平均值来看,整体的指标权重排名为:平均含沙量(11.78%)、聚合度指数(10.09%)、生境质量指数(9.64%)、香农多样性指数(9.54%)、生长季(4 至 10 月)潜在蒸散发(9.10%)、中等及以上植被覆盖度(9.01%)、年径流量(8.86%)、表层土壤含水率(8.67%)、汛期(7 至 10 月)平均流量

(8.04%)、非汛期平均流量(7.92%)、生长季(4 至 10 月)降雨总量(7.35%).

2.2　*EDI* 分析

2006 至 2023 年生态发展指数 *EDI* 变化如图 3 所示.根据 *EDI* 演变曲线分析，2006 至 2023 年 *EDI* 所反映的生态系统发展质量呈现波动变化的规律，*EDI* 范围为 26.92～46.49.其中，2012 年之前整体偏低，平均值为 30.98；2013 至 2020 年之间整体呈现稳中有升的趋势，平均值为 38.70；2021 年之后有所下降，平均值为 36.10.2013 至 2020 年之间最大值为 2010 年的 46.49，其次为 2020 年的 45.71，最小值为 2012 年的 27.66.总体呈现“稳定—增长”的变化趋势，表明近年来保护区内生态环境整体向好.

2.3　主要特征指标分析

(1)水沙条件.保护区内生态环境特征及演变趋势与黄河的水沙条件变化密切相关，小浪底水库调水调沙实施后，改善了水资源分配，提升了汛期径流量，汛期流量虽波动变化，但整体呈现高流量状态，年径流量呈波动上升的规律，尤其是 2018 至 2021 年，整体处于高位状态.2021 年之后的年径流量、汛期和非汛期流量均出现不同程度的减少，是造成 *EDI* 值下降的重要因素.输沙量波动较大，但与小浪底调水调沙实施前相比，输沙量显著减少，总体处于较低水平，小浪底水库的泥沙拦截、水流调节及沉积作用，减少了汛期下游输沙量，显著降低了黄河下游的泥沙输送[17].

(2)土地利用.2005 至 2023 年间，河南黄河湿地国家级自然保护区的土地利用格局呈现出显著的人为驱动特征.耕地作为主导地类持续缩减，面积从 101.40 km^2 减少至 74.52 km^2，这主要归因于黄河下游滩区退耕还湿政策的系统性实施，反映了在生态保护优先导向下农业空间的主动让渡.湿地内部结构发生显著转变：库塘面积经历阶段性扩张后于 2020 年达到峰值 36.28 km^2，随后因保护区水产养殖清退政策的推进而逐步缩减；草地与林地面积自 2018 年后显著增长(增幅分别为 520%和 802%)，其增加面积部分由清退的库塘经自然恢复转变而来，标志着区域生态修复工程的成效.然而，自然湿地组分持续衰减，河流与滩地面积分别较 2005 年减少 53.7%和 56.9%.该趋势与西霞院水利枢纽建成后的下游水文过程改变密切相关：河道冲淤关系逆转、河床粗化与冲刷下切加剧，共同导致漫滩频率减少，深层改变了自然湿地的演替格局.建设用地在波动中增长，其 2020 年后的扩张趋缓受控于保护地刚性管控措施.

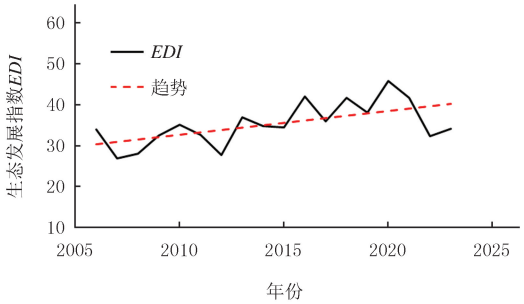


图3　2006至2023年*EDI*变化

Fig.3　*EDI* changes from 2006 to 2023

本研究区的地类演变清晰体现了“政策调控-工程扰动-生态响应”的耦合机制.一方面，耕地管理、养殖清退与建设管控等政策性人类活动对生态保护起到了直接驱动作用，这在黄河湿地郑州段的研究中已得到验证[18]；另一方面，上游水利枢纽的运行则通过改变自然水文情势，间接而深刻地影响了湿地的分布与演化.未来需重点关注自然水文过程与人工干预措施之间的平衡，以保障湿地生态系统的可持续性.

(3)景观格局.基于土地利用类型数据进行区域的景观格局分析，聚合度指数在整个期间内保持在较高水平，显示出景观的聚合度一直保持稳定.特别是在 2019 年之后，聚合度指数略微上升，2023 年达到 98.18，景观斑块的连接性和连续性有所提升.多样性指数整体呈现波动变化，2018 年达到峰值，之后有所回落，说明由于土地利用变化或物种多样性变化，使得景观的多样性产生了波动.总的来说，从 2006 年到 2023 年，景观的破碎化程度降低，聚合度和连接性增强，多样性指数经历了一些波动，而景观的均匀度则保持相对稳定，这与已有的黄河下游湿地景观格局演变特征的研究结论相吻合[17].湿地景观格局与水沙环境和调水调沙等措施密切相关，调水调沙通过调控径流量、输沙量和水位条件，可促进区域景观格局的动态演变.输沙量增加会促进湿地斑块的扩展，径流量主要通过边缘冲刷及水量输送影响湿地斑块形态.

3　结　论

本文以黄河湿地自然保护区生态环境演变特征为切入点，采用熵权法和耗散结构方法分析生态系统发

展质量和稳定性,计算得到自然保护区生态发展指数 *EDI*,定量研究了自然保护区近年来的生态环境演变特征.结果表明:

(1)各项指标的熵权和单一年度的指标权重结构均随时间呈现动态变化,系统中各项指标的重要性并非恒定不变.*EDI* 指标权重综合排序由高到低为:平均含沙量、聚合度指数、生境质量指数、香农多样性指数、生长季(4 至 10 月)潜在蒸散发、中等及以上植被覆盖度、年径流量、表层土壤含水率、汛期(7 至 10 月)平均流量、非汛期平均流量、生长季(4 至 10 月)降雨总量.

(2)计算了 2006 至 2023 年自然保护区生态发展指数 *EDI*,*EDI* 范围为 26.92～46.49.2012 年之前整体偏低,2013～2020 年之间整体呈现稳中有升的趋势,2021 年之后略有下降,总体呈现"稳定一增长"的变化趋势,表明近年来保护区内生态环境整体向好.

(3)区域内的景观破碎化程度降低,聚合度和连接性增强,多样性指数波动变化,而景观的均匀度则保持相对稳定.湿地景观格局与水沙环境和调水调沙等措施密切相关,调水调沙通过调控径流量、输沙量和水位条件,可促进区域景观格局的动态演变.输沙量增加会促进湿地斑块的扩展,径流量主要通过边缘冲刷及水量输送影响湿地斑块形态.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.07.30.0002).

参 考 文 献

[1] 刘子华,王海军,曹永强,等.基于可解释性分析的黄河流域生态系统 NPP 时空异质性研究[J].人民黄河,2025,47(6):103-109.
LIU Z H,WANG H J,CAO Y Q,et al.Exploring the spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of carbon sequestration in the Yellow River Basin based on explainability[J].Yellow River,2025,47(6):103-109.

[2] 邓蕾,王凯博,汪晓珍,等.黄河流域-黄土高原水土保持与高质量发展:成效、问题与对策[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(1):1-7.
DENG L,WANG K B,WANG X Z,et al.Soil and water conservation and high quality development of the Loess Plateau in the Yellow River Basin:effects,problems and countermeasures[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(1):1-7.

[3] 张会萍,肖曼,曾曼芸,等.河南段黄河湿地水文因子对植物多样性的影响[J].河南农业大学学报,2022,56(5):822-829.
ZHANG H P,XIAO M,ZENG M Y,et al.Effects of hydrological environment on plant diversity in the Yellow River Wetland of Henan Section[J].Journal of Henan Agricultural University,2022,56(5):822-829.

[4] 宋继鹏,龚磊强,王晓龙,等.三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势变化与生态环境演变特征:回顾与展望[J].湖泊科学,2025,37(3):716-733.
SONG J P,GONG L Q,WANG X L,et al.Changes in hydrological conditions and ecological environment in Lake Poyang before and after the construction and operation of the Three Gorges Project:Retrospect and prospect[J].Journal of Lake Sciences,2025,37(3):716-733.

[5] 张金良,陈凯,张超,等.基于熵权的黄河流域生态环境演变特征[J].中国环境科学,2021,41(8):3767-3774.
ZHANG J L,CHEN K,ZHANG C,et al.The change characteristics of eco-environment in the Yellow River Basin based on entropy weights[J].China Environmental Science,2021,41(8):3767-3774.

[6] 靳峰,周颖,郭璐,等.基于熵权 TOPSIS 模型的黄河流域甘肃段水土保持治理综合效益评价[J].中国农村水利水电,2024(12):80-89.
JIN F,ZHOU Y,GUO L,et al.Evaluation of comprehensive benefits of soil and water conservation management in the Gansu section of the Yellow River Basin based on entropy weighted TOPSIS model[J].China Rural Water and Hydropower,2024(12):80-89.

[7] 张帆,尹萌,张金霞.基于熵权 TOPSIS 的黄河流域甘肃段水资源承载力评价[J].人民黄河,2024,46(4):79-85.
ZHANG F,YIN M,ZHANG J X.Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Gansu section of the Yellow River Basin based on entropy-weight-TOPSIS model[J].Yellow River,2024,46(4):79-85.

[8] 孙湘儒,陈佳勃,王艳杰.近 40 年辽河保护区湿地生态环境演变过程及驱动因子分析[J].人民珠江,2021,42(7):61-67.
SUN X R,CHEN J B,WANG Y J.Analysis of evolution of the wetland ecosystem of the Liaohe River nature reserve over the past 40 years and its driving factors[J].Pearl River,2021,42(7):61-67.

[9] QIN P,ZHANG Z H.Evolution of wetland landscape disturbance in Jiaozhou Gulf between 1973 and 2018 based on remote sensing[J].European Journal of Remote Sensing,2021,54(S2):145-154.

[10] 徐振田,SHAHZAD A,张莎,等.基于 Landsat 数据的黄河三角洲湿地提取及近 30 年动态研究[J].海洋湖沼通报,2020,42(3):70-79.
XU Z T,SHAHZAD A,ZHANG S,et al.Mapping the wetland in Yellow River Delta and its dynamics in recent 30 years based on Landsat data[J].Transactions of Oceanology and Limnology,2020,42(3):70-79.

[11] 孙楠,朱渭宁,程乾.基于多年遥感数据分析长江河口海岸带湿地变化及其驱动因子[J].环境科学学报,2017,37(11):4366-4373.

SUN N，ZHU W N，CHENG Q.Remote sensing time-series analysis of wetland variations and driving factors in estuarine and coastal regions of Yangtze River[J].Acta Scientiae Circumstantiae，2017，37(11)：4366-4373.

[12] 张朋兴，金笛，杨帆.滇中高原湖泊流域生态环境质量时空演变趋势及驱动因素[J].环境工程技术学报，2025，15(3)：860-871.
ZHANG P X，JIN D，YANG F.Spatiotemporal evolution trend and driving factors of eco-environmental quality in lake basins of the central Yunnan Plateau[J].Journal of Environmental Engineering Technology，2025，15(3)：860-871.

[13] 覃成林，李敏纳.区域经济空间分异机制研究：一个理论分析模型及其在黄河流域的应用[J].地理研究，2010，29(10)：1780-1792.
QIN C L，LI M N.The mechanism of the spatial dissimilarity of regional economy：a theoretical model and its application in the Yellow River Valley[J].Geographical Research，2010，29(10)：1780-1792.

[14] 李翠萍.基于熵权法的美丽福建综合评价体系构建和应用研究[J].环境生态学，2024，6(8)：138-143.
LI C P.Research on construction and application of comprehensive evaluation system of beautiful Fujian Province based on the entropy weight method[J].Environmental Ecology，2024，6(8)：138-143.

[15] 勾芒芒，冯雪瑶，李建茹，等.基于层次分析-熵权法的乌梁素海湖泊生态系统健康评价[J].灌溉排水学报，2025，44(2)：93-100.
GOU M M，FENG X Y，LI J R，et al.Assessing ecosystem health changes in UlanSuhai Lake using hierarchical analysis and entropy method[J].Journal of Irrigation and Drainage，2025，44(2)：93-100.

[16] 杜书栋，关亚楠，李欣，等.基于熵权法改进的综合污染指数的水质评价：以白云湖为例[J].环境科学学报，2022，42(1)：205-212.
DU S D，GUAN Y N，LI X，et al.Water quality evaluation with improved comprehensive pollution index based on entropy weight method：a case study of Baiyun Lake[J].Acta Scientiae Circumstantiae，2022，42(1)：205-212.

[17] 窦明，曹莹澍，米庆彬，等.花园口-夹河滩段湿地景观格局变化及水沙要素响应关系[J].郑州大学学报(工学版)，2025，46(6)：135-143.
DOU M，CAO Y S，MI Q B，et al.Changes in wetland landscape patterns and the relationship between water-sediment elements in Huayuankou-jiahetan section[J].Journal of Zhengzhou University(Engineering Science)，2025，46(6)：135-143.

[18] 万俊锋，宋一帆，郭林，等.人为干扰对黄河湿地植物群落的影响及其机制[J].郑州大学学报(工学版)，2024，45(4)：102-110.
WAN J F，SONG Y F，GUO L，et al.Effects of human disturbances on plant community of the Yellow River wetland and its mechanisms[J].Journal of Zhengzhou University(Engineering Science)，2024，45(4)：102-110.

The change characteristics of eco-environment in the Yellow River wetland nature reserve based on entropy weights

Zhao Liang[1]，Li Qian[2]，Jin Wenchao[3]，Zhang Chao[2]，Xuan Xiaobo[2]

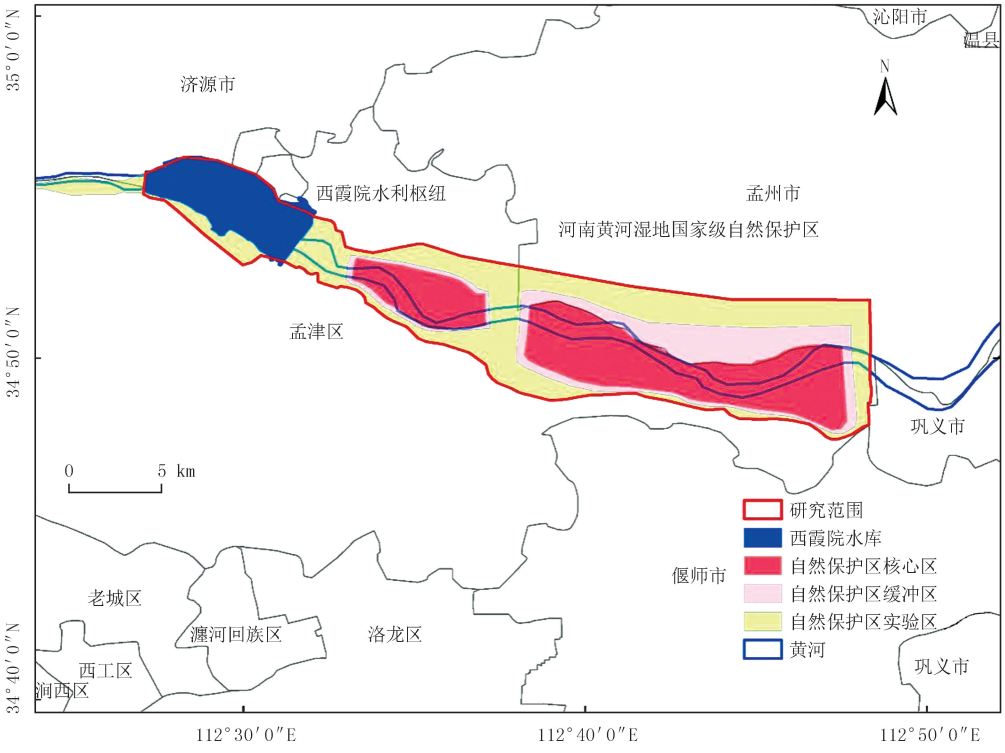
(1. Henan Water Conservancy Engineering First Group Co.，Ltd.，Zhengzhou 450000，China；2. Yellow River Engineering Consulting Co.，Ltd.，Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin，Ministry of Water Resources(under construction)，Zhengzhou 450003，China；3. Water Conservancy and Irrigation District Engineering Construction Administration of Xixiayuan Water Conservancy Project，Zhengzhou 450008，China)

Abstract：The evolutionary characteristics of the ecological environment in the Yellow River wetland nature reserve were focused on，the development quality and stability of the ecosystem were analyzed based on the entropy weight method，the ecological development index(*EDI*) was calculated，the ecological environmental evolution characteristics of the reserve in recent years were researched. The results showed that，the entropy weights of various indicators and the weight structure of indicators in any single year exhibited dynamic changes over time，the importance of individual indicators within the system was not constant. From 2006 to 2023，the *EDI* of the nature reserve ranged from 26.92 to 46.49. Values were generally low prior to 2012，showed a steady increase overall between 2013 and 2020，and experienced a slight decline after 2021. Overall，the index presents a "stable-growth" trend，signifying an overall improvement in the ecological environment within the reserve in recent years.

Keywords：entropy weights；Yellow River；nature reserve；change characteristic；indicator system

[责任编校　刘洋　赵晓华]

附　录



图S1　研究区域概况

Fig. S1　Overview of the study area

表 S1　*EDI* 评价指标体系

Tab. S1　*EDI* evaluation indicator system

序号	指标	单位	数据来源
1	生长季(4 至 10 月)潜在蒸散发	mm	选取植物生长季即 4 至 10 月的潜在蒸散发量
2	年径流量	亿 m^3	选取西霞院水文站实测年径流量数据
3	非汛期平均流量	m^3/s	选取西霞院水文站实测非汛期平均流量数据
4	汛期(7 至 10 月)平均流量	m^3/s	选取西霞院水文站实测汛期(7 至 10 月)平均流量数据
5	平均含沙量	kg/m^3	选取西霞院水文站实测平均含沙量数据
6	生长季(4 至 10 月)降雨总量	mm	选取植物生长季即 4 至 10 月的降雨总量
7	生境质量指数	/	见“注”
8	中等及以上植被覆盖度	/	评价区域植被覆盖的程度,通过遥感影像解译得到
9	聚合度指数	/	反映各个斑块类型间的聚集情况,通过遥感影像解译得到
10	香农多样性指数	/	反映景观异质性,通过遥感影像解译得到
11	表层土壤含水率	%	数据来源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心

注:生境质量指数(HQ)反映一定时间空间范围内生态系统提供给适宜个体与种群持续生存与发展条件的能力,是衡量区域生态健康及可持续状态的重要指标.