

2004–2024 年渭河流域水生态健康演变规律与展望*

田雨露^{1,2}, 周胜胜¹, 卢奥然¹, 金小伟³, 贾世琪³, 宋进喜^{1,2**}

(1: 西北大学, 城市与环境学院/西安市黄河流域环境模拟及生态健康重点实验室, 西安 710127)

(2: 西北大学, 城市与环境学院/陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

(3: 中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要: 流域可持续发展依赖于流域水生态系统服务供给, 因此河流水生态健康是重要保障。本文以渭河流域为研究区, 通过文献计量梳理了 2004–2024 年国内外相关数据和研究成果, 深入探讨了渭河流域水质、水生境、生物多样性及水生态健康的动态变化。归纳了渭河流域水生态健康评估指标体系的构建特征, 明确了不同水生态健康评价方法的优缺点和适用范围。在此基础上, 揭示了渭河流域水生态健康演变规律。整体而言, 渭河水质得到改善, 浮游生物和着生藻类多样性在一定时期内呈下降趋势, 但近年来呈现回升趋势。水污染、栖息地破坏是威胁渭河流域水生态健康的主要因素, 尤其是中下游仍然存在严重的污染问题。在此基础上, 结合渭河流域生态保护政策法规评估水生态环境管理对水生态健康的重要性。最后, 结合“引汉济渭”调水工程, 展望渭河流域水资源增加对水生态健康的影响。

关键词: 渭河; 水污染; 水资源; 水生生物; 水生态健康

Evolution and prospects of water ecological health during 2004-2024 in the Weihe River Basin, northern China*

Tian Yulu^{1,2}, Zhou Shengsheng¹, Lu Aoran¹, Jin Xiaowei³, Jia Shiqi³, Song Jinxi^{1,2**}

(1: Xi'an Key Laboratory of Environmental Simulation and Ecological Health in the Yellow River Basin, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, P.R.China)

(2: Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, P.R.China)

(3: China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, P.R.China)

Abstract: The sustainable development of a river basin relies on the supply of ecosystem services from its aquatic ecosystems, making the health of riverine water ecosystems a critical safeguard. Taking the Weihe River Basin as the study area, this paper employs bibliometric analysis to review relevant domestic and international data and research findings from 2004 to 2024, and conducts an in-depth exploration of the water quality, habitat quality, biodiversity, and aquatic ecological health

* 2025-02-07 收稿; 2025-11-10 收修改稿。

国家自然科学基金项目(42230513, 32571846, 42201109)、黄河流域生态保护和高质量发展联合研究一期项目(2022-YRUC-01-0101)和陕西省重点研发计划项目(2024GH-YBXM-14)联合资助。

** 通信作者; Email: jinxisong@nwu.edu.cn

status in the basin. It summarizes the selection of indicators for aquatic ecological health assessment in the Weihe River Basin and clarifies the strengths, limitations, and applicable scopes of different assessment methods. On this basis, the study synthesizes the evolutionary trends of aquatic ecological health in the Weihe River Basin from 2004 to 2024. Overall, water quality in the Weihe River has improved. The diversity of plankton and periphytic algae declined during a certain period but has shown signs of recovery in recent years. Water pollution and habitat degradation remain the primary factors threatening the aquatic ecological health of the basin, with the middle and lower reaches still facing severe pollution issues. Furthermore, by integrating ecological protection policies and regulations of the Weihe River Basin, this study evaluates the importance of aquatic ecological environment management for maintaining ecological health. Finally, in light of the "Hanjiang-to-Weihe Water Transfer Project", the potential impacts of increased water resources on the aquatic ecological health of the Weihe River Basin are discussed.

Keywords: Weihe River; Water Pollution; Water Resources; Aquatic Organisms; Water Ecological Health

维护河流水生态健康、保障流域水生态安全，关系国计民生大计。健康的河流生态系统可提供丰富的服务功能，对人类生存和社会可持续发展至关重要^[1-2]。改革开放以来，我国社会经济发展迅速，人类活动加剧，对河流水生态健康影响显著，造成河流生态系统服务功能降低或丧失^[3-5]。河流生态系统是人类社会系统的支撑，因此健康的河流生态系统已成为区域高质量发展和流域管理的重要保障^[6-8]。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）》中，水体污染控制与治理科技重大专项是设立的十六个重大科技专项之一，是一个以水质、水生态改善为目标导向的国家科技重大工程。黄河流域生态保护和高质量发展已成为我国重要战略目标。渭河是黄河的第一大支流，干流流经陕西、甘肃两省。近几十年来，在国家西部大开发号召下，大力发展工业和城镇化建设，使得渭河流域水生态健康受到严重威胁（如水资源短缺、水质恶化、水生境破坏、水生生物多样性降低）^[9-11]。基于此，科学评估并改善河流水生态健康尤为关键，我们亟需明确：1）河流水生态健康的内涵；2）河流水生态健康评估指标体系和评价方法；3）河流水生态健康演变规律及其对人类活动的响应。此外，水资源短缺一直是制约渭河流域生态保护和可持续发展的重要问题^[12]，如今在“引汉济渭”调水工程下，预测渭河流域水资源增加对水生态健康的影响效应，以期为流域生态恢复、水资源管理和可持续发展提供科学依据。与长江^[13]、珠江^[14]等大江大河相比，渭河作为典型的北方水资源短缺型河流，其水生态健康研究长期面临系统性评估不足、多类群生物响应机制不清以及重大调水工程生态效应预测缺乏等问题。本文的突破在于：综合了文献计量与多年实地调查数据，构建了涵盖水环境、水资源、水生生物及生境质量的评估框架，探索了多类群水生生物完整性指数（m-IBI）在渭河的应用潜力，克服了单一生物类群评估的局限性。同时，紧密结合国家重大战略工程——“引汉济渭”调水工程，探讨了水资源调度对受水区水生态健康的潜在影响路径与调控策略，为同类缺水型流域在水资源调配背景下的生态健康管理提供了新的分析视角与方法借鉴。

1 河流水生态健康基本研究内容和评估方法

河流水生态健康的提出源自对健康水生态系统的认识。河流水生态健康可以理解为河流生态系统的功能完整性、生物多样性、水质状况以及生态过程的正常运行^[9,15]。河流水生态健康的研究内容主要围绕其系统结构与功能展开，涵盖以下核心要素：1）水质理化状况。研究水体物理与化学指标的浓度、时空变化及其生态效应。2）水文与地貌特征。关注水流情势（如流量、生态流量）、水沙关系及河道、

河岸带等物理生境的结构与质量。3) 水生生物群落。调查浮游植物、浮游动物、着生藻类、底栖动物和鱼类等关键类群的群落结构、多样性及完整性，它们是生态系统健康的直接指示器。4) 生态系统服务功能。评估河流在供水、净化、生境提供、文化休闲等方面对社会系统的支撑能力。健康的河流水生生态系统是河流自身的自然功能以及所处的社会功能，能够相互促进使其作用最大化，并且河流具有良好的水沙通道、水质状况和水生态系统等^[9,16]。基于 WOS 数据库和 CNKI 数据库检索发现水生态健康相关研究关注的要素越来越多，尤其是对水生生物群落的重视（图 1）。

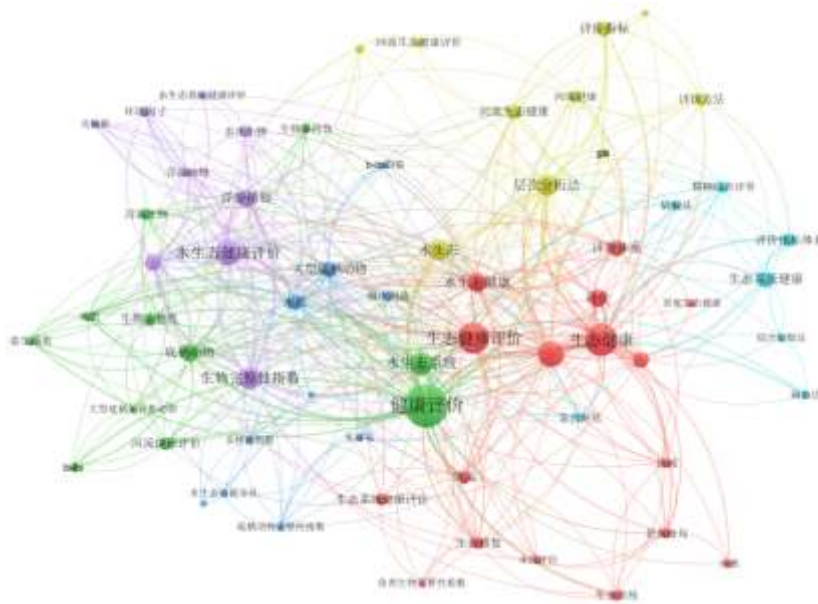


图 1 基于水生态健康研究关键词共现图谱

Fig.1 The co-occurrence map based on the keyword for aquatic ecological health

干旱区或半干旱区人水关系复杂，生活、生产用水与生态用水矛盾突出，河流基本生态用水严重不足，进而引发诸多水生态环境问题。保障维持水生生态系统结构和功能所需水资源才能阻止水生态环境继续恶化^[11]。因此，该区域内生态流量在水生态健康评估中作用显著。由此可见，针对不同区域水生态环境面临的实际问题，水资源、水环境、水生生物等要素在水生态健康评估中会有所侧重。整体而言，河流水生态健康是良好的自然生态状况与可持续的社会服务属性的有机统一。

当前水生态健康评估以水质理化指标为主，以国家地表水环境质量标准（GB 3838-2002）为参考来确定水体污染状况。此类方法评估结果倾向于水质状况最差的水质指标或管理者最为在意的水质指标，往往忽略了其它水质指标^[17-18]。水环境综合指数，如水体营养状况指标（综合氮、磷营养盐浓度）^[19]；水质质量指标，对获取的各个水质指标（物理、化学和生物指标等）进行综合，代表水质的整体状况^[20]。近年来，在水质评价和管理中，水质综合指标应用广泛，被认为是向公众和决策者传达水质趋势信息最有效且最易懂的方法之一，可消除单一水质指标评价带来的差异^[21]。然而，基于水环境的评估不能确定水生生物群落受损程度。水生态健康评估中多以水生生物状况响应为基础，这方面研究较早关注水生生物中耐受或者敏感物种，如蓝藻在营养物浓度高的水体中会大量聚集成为优势种，金藻多存在于清洁水体中^[22]。随着研究的深入，更加关注水生生物群落整体状况，如多样性指数高代表水体状况好，生物完

整性指数高代表受到外界干扰小。近年来,随着对水生态健康的进一步认识,综合物理生境指标、水环境、水资源、水生生物群落指标的多要素评价体系已成为此类研究的趋势,并应用于水生态健康保护和管理^[23]。在此基础上,综合水生态环境监测大数据,人类活动和自然因素等压力源,利用机器学习建立模型,精准评估并反演预测流域水生态健康演变状况。

表 1 河流生态健康评估常用方法

Tab.1 Common methods for assessing the aquatic ecological health of river

评估方法	原理	优缺点	代表性案例
单指标	基于毒理学实验或水生生物与环境	优点: 直观, 简便	水质国标等级 ^[24] ; 耐受或敏感
	因子关系	缺点: 片面、遗漏	物种 ^[25] ; 生物量 ^[26]
综合指数	对照点与受损点对比; 多要素融合	优点: 全面、综合	水质质量指数 ^[27] ; 水质污染指
		缺点: 数据获取、计算过程复杂	数 ^[28] ; 多样性指数 ^[29] ; 生物完整性指数 ^[30]
模型模拟	通过典型河段或流域水生态健康与	优点: 不同情景建模、评估、	机器学习 ^[31] 、压力-状态-响应
	环境要素、生物要素、水文要素、生	预测	(PSR) 模型 ^[32]
	境要素等关系, 基于数学模型反演	缺点: 建模的数学方法和参	
	更大尺度或未来不同情景水生态健	数率定要求高	
	康状况		

2 渭河流域水生态健康研究进展

渭河是黄河流域最大的支流,发源于甘肃省渭源县的鸟鼠山,地处我国西北地区,其地跨陕西、甘肃和宁夏三省(区),干流全长约 850 km,流域总面积约 13.4×10⁴ km²,渭河在黄河流域生态保护和高质量发展中具有重要地位^[33]。然而,随着现代工业化和城市化的快速发展,人类活动对河流生态系统影响巨大,渭河流域也面临着诸多生态环境问题和挑战。水资源过度开发、水质污染、水生境破坏、生物多样性降低(生物群落结构复杂、不同生物群落之间差异显著)、生态系统恶化等问题日益凸显,打破了河流自然生态过程和动态平衡,使得流域水生态系统服务功能遭到严重破坏甚至丧失,给人类的生存与区域可持续发展造成严重影响^[34-35]。

总的来说,渭河流域的水生态健康呈现出以下四个鲜明特点: 1) 水文-生态耦合系统敏感且脆弱。渭河流域地处干旱地区与湿润地区过渡地带,属大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,降水稀少;夏季炎热多雨。根据气象资料,渭河流域多年平均气温为 8.7℃,降水量仅略高于蒸发量。流域年降水量、咸阳及华县站年径流量均呈总体下降趋势^[36-37]。2) “水沙矛盾”向“水污矛盾”的尖锐转变。泾河是渭河最大支流,泾河流域位于黄土高原,是世界上水土流失最严重的地区之一,泾河流域 80%以上的面积面临着水土流失,年平均土壤流失量为 5845 t/km²,其在土壤流失量、输沙负荷方面问题明显,核心矛盾是水土流失严重和水沙关系失衡。通过大规模实施退耕还林(草)、修建梯田等水土保持措施,渭河流域的输沙量得到了有效控制。当前,渭河两岸关中城市群迅速发展,正面临工业化与城镇化进程带来的新兴水污染问题。主要支流泾河、北洛河流域作为能源工业基地,长期遭受资源开采导致的水、土、气立体污染,属于积累已久的“结构性矛盾”^[38-39]。3) 人类活动在影响水生态健康中的主导作用。同为黄河支流的洮河流域(尤其是高梯度区域)开发程度相对低、人类活动影响有限,水生态健康状况自

然地形与气候条件支配较多^[40]，而渭河流经西北地区人口最密集、经济最活跃的区域之一——关中-天水经济区，相比于气候和地形，人类活动是影响水生态健康的主要因素。4) 水生生物群落响应模式的独特性。与水生生物多样性丰富的南方河流相比，渭河水生生物群落结构相对简单，稳定性较差，对环境压力更为敏感。而南方河流（如珠江），先天具备了山、水、林、田、草、河口湾、洲岛等多样生态系统。这种复杂的生境结构为鱼、虾、蟹等水生生物提供了育幼场、产卵场、洄游通道等重要功能，从而支撑了多营养级水生生物之间的交互作用，对环境压力的抵抗性更高^[41]。

当前，河流水生态健康评价愈加受到关注。我国河流水生态健康评估指标体系也从单一指标逐步转向综合水环境、水资源、水生境、水生生物的评价体系。基于不同流域自身特点，相关部门也制定了针对性的评估指标体系。长江水利委员会从社会服务和生态功能的角度出发，提出了由目标层、系统层、状态层和指标层构建的长江健康评估指标体系。珠江水利委员会提出了由社会指标属性和自然指标属性构建的珠江健康评估指标体系。黄河水利委员会针对水沙关系明确黄河生态系统保护的目标和规模，旨在完善现阶段黄河健康评价指标体系，要求在 2024 年底重点高质量完成渭河、泾河、沁河、洛河、红碱淖等 5 个河湖的健康评价工作。孙然好等（2020）检索“河流健康”发现相关文献数量也较少，每年中英文文献数量最多为 60 余篇，且主要为中国学者关注^[42]。基于 WOS 数据库和 CNKI 数据库文献检索近 20 年（2004-2024）“水生态”和“渭河水生态”显示，虽然渭河河流生态相关研究的整体数量呈现增长趋势，但在全国范围内渭河受到的关注较少，中文文献仅占 1.2%，英文文献仅占 0.2%（图 2）。

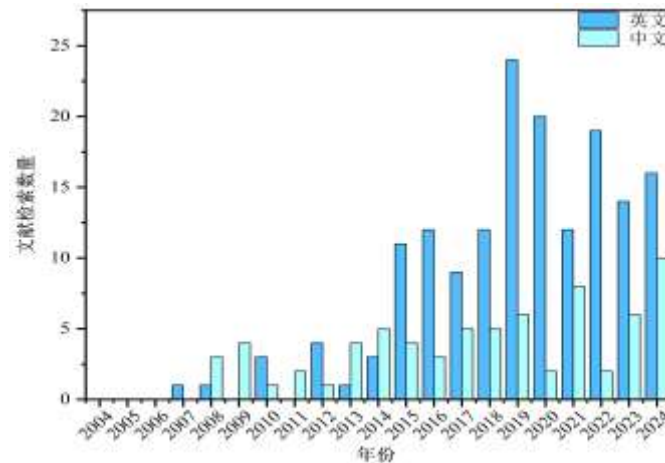


图 2 “渭河水生态”相关研究文献数量

Fig.2 The number of research papers related to “The water ecology of the Wei River”

在 2005 年渭河治理行动开始后至 2020 年间，西安市的氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）、化学需氧量（COD）总入河量呈显著下降趋势；2011-2020 年间，宝鸡市、咸阳市和渭南市的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 总入河量均呈下降趋势^[43-45]。在各污染源中，对渭河干流陕西段污染贡献率最多的是城镇生活源，其次是农业面源和农村生活源；贡献率最少的是工业源。不管是治理前还是治理后，渭河干流都表现出丰水年污染物浓度相对较低、枯水年污染物浓度相对高的特征；对于污染物总量来说，在治理前（1991-2003 年），渭河干流表现出丰水年污染物总量相对较高，枯水年污染物总量相对较低；而在治理后（2004-2020 年），在政府治理政策和治理力度的影响下，丰水年和枯水年的河内 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 总量多年均值并不存在明显差异^[46-47]。整体而言，相关水质污染治理政策的颁布（表 2）对渭河水质的改善具有明显的作用。

表 2 渭河流域生态环境保护相关政策文件

Tab.2 Policy documents related to eco-environmental protection in the Wei River Basin

年份	部门	文件名称	目标
2004	陕西省人民政府	渭河流域水污染防治实施方案	污水处理率、废水排放达标、污染排放总量消减
2005	国务院	渭河流域重点治理规划	防洪减淤、水资源开发利用、水资源保护、水土保持生态建设
2006	陕西省人民政府	沿渭（河）主要城市地下水超采区划定及保护方案	压缩地下水开采量、缓解地质灾害和地下水污染
2009	陕西省人民政府	陕西省渭河流域水污染补偿实施方案（试行）	改善渭河流域水环境质量
2012	陕西省人民政府	渭河流域水污染防治三年行动计划	渭河三年变清
2015	陕西省人民政府	渭河流域水污染防治巩固提高三年行动方案	全面消除污染严重水域，河流生态系统功能稳步恢复，西安、咸阳段水质明显好转。流经城区河段建成堤固、岸绿、水清、景美的城中河，流经乡村河段建成堤净、水清、有鱼虾的生态河。
2016	陕西省人民政府	陕西省水污染防治工作方案	渭河、延河、无定河等黄河流域地表水水质优良比例达到 37.5%以上，劣Ⅴ类断面比例小于 9.38%。
2017	陕西省人民政府	陕西省水污染防治工作方案	渭河、延河、无定河等黄河流域地表水水质优良比例达到 40.6%以上，劣Ⅴ类断面比例小于 9.38%。
2018	陕西省人民政府	陕西省水污染防治工作方案	渭河、延河、无定河等黄河流域地表水水质优良比例达到 50%以上，劣Ⅴ类断面比例小于 9.4%。
2023	陕西省人民政府	陕西省渭河保护条例	加强渭河流域生态保护和治理，防治水灾害和水污染，推进水资源节约集约利用，改善水环境，保障水安全，推动高质量发展，保护传承弘扬渭河流域文化。
2024	陕西省水利厅	陕西省渭河河道采砂管理办法	规范渭河河道采砂活动，强化河道采砂监督管理，维护河势稳定，保障防洪安全、工程安全、生态安全。

为了增强对渭河流域水生态健康维护的科学认识和理论指导，系统揭示渭河流域水生态健康变化特征与趋势，本研究收集了 2004-2024 年相关数据和研究成果，并且结合本研究团队于 2018 年和 2023 年渭河流域水生态健康实地调查数据（图 3），形成更加完整的数据集和科学的评估结果。

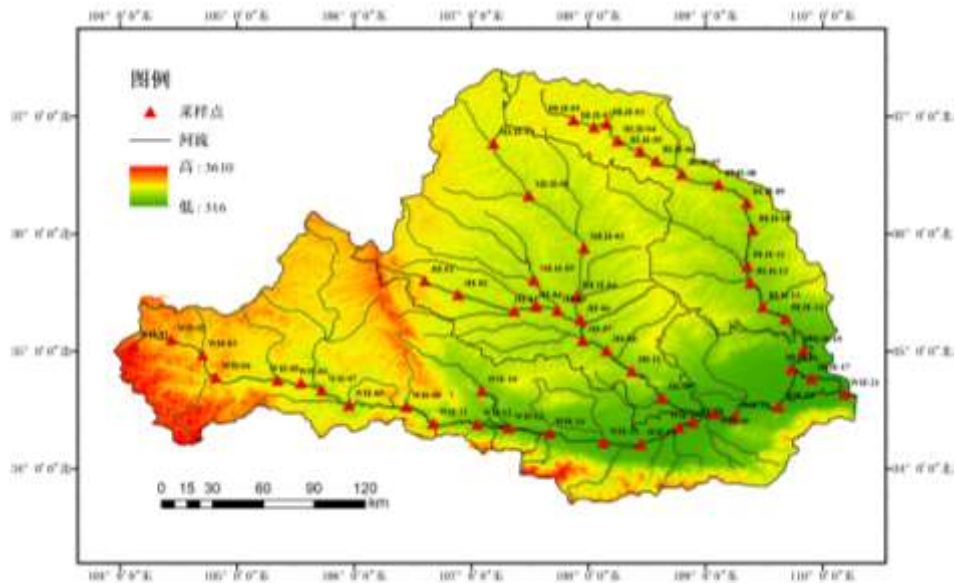


图3 渭河流域水生态健康野外采样点

Fig.3 Field sampling site for aquatic ecological health in the Weihe River Basin

鉴于渭河水质及水生态状况恶化的现状，陕西省委省政府在 2011 年启动了渭河陕西段的综合整治工程，并陆续发布了一系列政策文件，包括《陕西省水污染防治工作方案》《渭河流域水污染防治三年行动方案（2012-2014）》以及《渭河生态区建设总体规划》等。此外，还实施了一系列综合治理工程，有效遏制了渭河水质恶化的趋势。从陕西省发布的《2014 年陕西省环境状况公告》得知，渭河干流化学需氧量和氨氮平均浓度分别较 2011 年下降了 35%和 45%。2010 年至 2016 年间，渭河干流陕西段的水质综合污染指数值总体呈下降趋势。然而，渭河陕西段的水质仍处于中等污染水平。此外，渭河流域的水文情势也发生了显著变化，特别是年径流量呈显著减少趋势。刘广玉（2023）发现在 2011-2020 年间，宝鸡市、咸阳市和渭南市的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 总入河量均呈下降趋势^[50]。整体而言，渭河流域的水质在近年来虽有改善，但仍然面临挑战。为了进一步摸清渭河流域的水环境变化情况，本研究于 2018 年和 2023 年对渭河流域进行了实地调查，本研究采用水质质量指数法，选取了溶解氧、总氮、总磷、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 共 5 个指标，对 2018 年和 2023 年渭河流域的水质状况进行了综合评估，水环境质量指数

（WQI）计算公式为： $WQI = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$ （ C_i ：水环境指标 i 的标准化因子得分； P_i ：表示水环境指标 i 的相对权重），最终得分范围为 0~100，划分为优秀（90~100）、良好（70~90）、中等（50~70）、差（25~50）、劣（0~25）5 个等级，其值越高，代表水环境质量越好。结果显示 2018 年渭河流域的水质质量指数平均为 67.45，2023 年该指数平均值上升至 72.37（图 4）。由此可见，5 年期间渭河流域的水质状况有了一定的提升，但不显著，未来在水质改善方面仍需要加强。在渭河流域整体水质状况中，渭河水系中上游、泾河水系上下游及北洛河水系中下游地区水质状况较好，而渭河水系下游、泾河水系中游以及北洛河水系上游地区水质状况相对较差。工业废水、农业面源污染和城市生活污水排放成为主要的水质污染源^[51]。

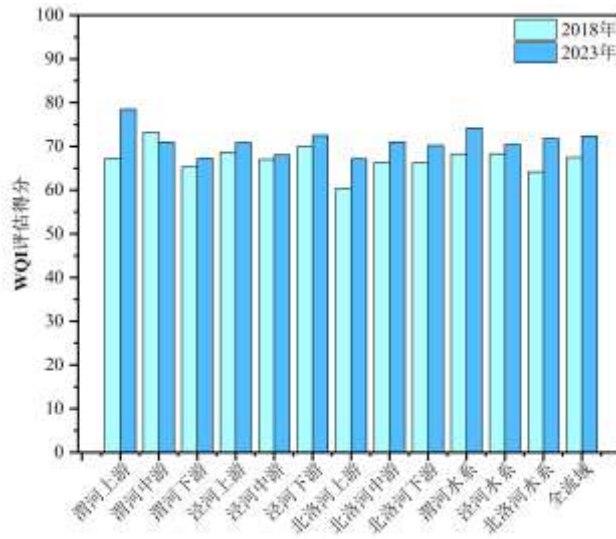


图 4 2018-2023 年渭河流域水质质量指数对比

Fig.4 Comparison of Water Quality Index in the Weihe River Basin from 2018 to 2023

通过研究调查我们可以发现近年来渭河流域的整体水质状况有了明显的提升，这种提升可能源于多方面因素的综合作用。首先，政府高度重视水污染治理工作，陆续制定了一系列水污染防治政策，并采取了加强城市管网建设、污水处理、关闭高排放重污染企业等措施，这些举措取得了明显成效，有效改善了水质状况。此外，针对农业面源污染，采取了一系列农业生产结构调整和农药、化肥使用管理措施，有力地遏制了农业污染的扩散^[52]。整体而言，渭河流域综合治理工程的实施获得了良好的生态保护成效，经济效益、生态效益及社会效益显著，基本实现“河清、水畅、岸绿、景美”的治理目标。

未来，随着关中城市群的进一步发展，生活污水问题也是面临的一大挑战。渭河流域氮污染负荷严重，因此需要进一步集中处理生活污水（包括加强污水防治、污水处理专业化、市场化、社会化路子，最终实现污水资源化），尤其是减少氨氮含量。最后，公众环保意识的提高和法律法规的健全执行也为水环境改善提供了坚实的基础。

2.2 水沙关系变化

渭河作为黄河的最大支流，其水资源及含沙状况对整个黄河流域乃至中国北方地区的生态和社会经济发展具有重要意义。近年来，随着全球气候变化影响和人类活动强度持续增加，渭河流域的水资源及泥沙含量经历了显著的变化，这些变化不仅影响了当地的水文循环模式，也对区域内的生态环境和社会经济带来了深远的影响。通过对近 50 年来渭河流域各子流域的研究发现，气候变化和人类活动对径流产生了显著影响，除泾河杨家坪流域径流在 1985 年开始下降外，几乎所有流域在 20 世纪 90 年代初都呈现出明显的径流下降趋势^[53]。渭河两岸关中地区的干旱情况从 1969-1990 年的 8.38% 增加到 1991-2018 年的 14.18%，水资源供需矛盾日益加剧^[54]。研究发现气候变化导致渭河流域极端干旱事件的频率、持续时间和强度显著增加。降水变化的方向和强度是导致干旱特征变化的主要因素，未来降水的不确定性可能使渭河流域面临更严峻的干旱挑战^[55]。此外，未来气候变化情景下，渭河流域的径流可能呈现枯季流量更低、洪峰流量更高的趋势^[56]。人类活动（如灌溉、水库建设和水土保持措施）对径流的贡献从 1972-1994 年的 84.15% 下降到 1995-2010 年的 57.16%，是渭河流域降水和径流关系变化的主要驱动力之一^[57]。与此同时，气候变化导致 1973-1996 年和 1996-2012 年两个时期的输沙量显著降低^[58]。研究表

明渭河流域水沙情势的变化受极端降雨的影响显著^[59]。整体而言,渭河流域输沙量减少主要是由于人类活动,而非降雨侵蚀力的变化,且人类活动的影响愈加显著^[60-61]。值得注意的是,人类活动中水土保持措施通过增加植被覆盖、修建梯田和拦沙坝等手段,有效减少了土壤侵蚀,显著降低了流域的输沙量。渭河流域 68.2%的区域,NDVI 显著增加,其中黄土地区植被恢复最快,对输沙量减少的影响较大^[62],梯田建设占据泥沙变化的 19.7%^[63],淤地坝年均减沙量占水土保持措施年均减沙总量的 27.6%^[64]。

这些措施不仅改善了当地生态环境,还通过减少泥沙进入河流,保障了水资源的质量和可持续利用。综合来看,水土保持措施在应对气候变化和人类活动带来的挑战中发挥了关键作用,为实现渭河流域的生态保护和可持续发展提供了坚实基础。

2.3 水生生物多样性变化

水生生物多样性是评估和了解水生态状况的重要指标之一。水生生物多样性不仅反映了水体生态系统的复杂性和稳定性,也是水生态系统功能和服务的重要组成部分^[29,65]。通过研究水生生物多样性,我们能够深入了解水体的自然状态和生态平衡,从而为有效保护和可持续管理水资源提供科学依据^[66-67]。由于水生生物群落结构特征在不同季节和区域存在显著的差异性,因此在比较不同年度生物多样性时需注意采样的季节性、干支流、上中下游特征。近年来,渭河流域的水环境质量显著改善,生态治理取得了明显成效。然而,生物栖息地破坏、生态功能受损、水生态系统退化等多重挑战仍然存在,保护生物多样性的任务十分艰巨。

2.3.1 浮游生物多样性变化 浮游生物多样性对河流生态健康有着重要的影响。首先,浮游生物是河流生态系统中的基础环节,它们是食物链的重要组成部分,影响着其他生物的生存和繁衍^[68-69]。其次,浮游生物通过调节水体中的营养物质和有机物含量,维持着河流水质的稳定性,对水体的净化和氧化有着重要作用^[70-72]。白海锋等(2014)于 2012 年在渭河流域共采集到浮游动物 76 种,本研究于 2018 年在和 2023 年在渭河流域分别共采集到浮游动物 40 种和 67 种。从全流域尺度来看,2012 年、2018 年、2023 年的浮游动物物种多样性指数平均值分别为 2.64、1.1 和 1.3^[73]。闵文武等(2015)于 2013 年在渭河流域共采集到浮游植物 175 种。本研究于 2018 年在和 2023 年在渭河流域分别共采集到浮游植物 116 种和 177 种。从全流域尺度来看,2012 年、2018 年、2023 年的浮游植物的香农-维纳指数平均值分别为 2.74, 1.65 和 2.93^[74]。

2.3.2 着生藻类多样性变化 着生藻类对河流生态系统有着重要的影响。它们是河流生态系统中的初级生产者,通过光合作用吸收二氧化碳并释放氧气,为水体中的其他生物提供养分^[75]。此外,着生藻类也是河流食物链的重要组成部分,为许多底栖生物和浮游动物提供食物来源^[76]。因此,着生藻类群落的物种多样性在某种程度上影响着整个河流生态系统的生物群落结构及环境因子特征^[77]。殷旭旺等(2013)于 2011 年在渭河流域共计采集着生藻类 133 种^[25],本研究于 2018 年在和 2023 年在渭河流域分别共采集到附着藻类 97 种和 195 种。从全流域尺度来看,2012 年、2018 年、2023 年着生藻类的香农-维纳指数平均值分别为 2.8、1.76 和 3.00。

2.3.3 底栖动物多样性变化 底栖动物在河流生态系统中扮演着重要角色。底栖动物通过分解有机物质、维持底泥氧化和土壤通气,促进河流生态系统的营养循环和能量流动^[18]。此外,底栖动物的丰富多样性可以反映河流生态系统的健康状况,稳定的底栖生物群落有助于维持水体的生态平衡和功能。因此,保护和维持底栖动物多样性对于维护河流生态健康至关重要。殷旭旺等(2013)于 2012 年在渭河流域共采集到大型底栖动物 116 种^[25],本研究于 2018 年在和 2023 年在渭河流域分别共采集底栖大型无脊椎动物 100 种和 46 种。从全流域尺度来看,2012 年、2018 年、2023 年的底栖动物的香农-威纳指数

平均值分别为 2.11、1.35 和 0.38。对比三次调查结果可以看出，渭河流域近年来的底栖动物物种数和香农-威纳指数均呈现急剧下降趋势。

底栖动物群落多样性的急剧下降，是物理性栖息地破坏^[22]、底栖环境污染与水文情势改变等多重压力综合的结果。具体来说，一是物理生境的直接损坏与均质化。渭河中下游河段长期的采矿与挖沙活动，直接改变了河床原有的异质性底质结构（如砾石、卵石），并引发大量泥沙淤积，覆盖了原有的自然底质。这导致依赖石砾表面和缝隙生存的敏感底栖动物类群因避难所丧失和底部缺氧而难以生存。二是底泥污染物的长期毒害效应。尽管上覆水体水质有所改善，但来自工业废水、城市生活污水和农业面源的重金属、持久性有机物等污染物长期富集于底泥中，影响水生生物群落（包括底栖动物）生长发育，对生物的内分泌系统产生干扰，甚至产生致畸作用，危害水生生态系统 and 环境安全^[78]。三是水文情势改变的间接影响。流域内水利工程的调控及年径流量的显著减少，削弱了水流的自然冲刷能力，不仅加剧了河床淤积，也减少了为底栖动物群落更新和再造生境的洪水脉冲信号。

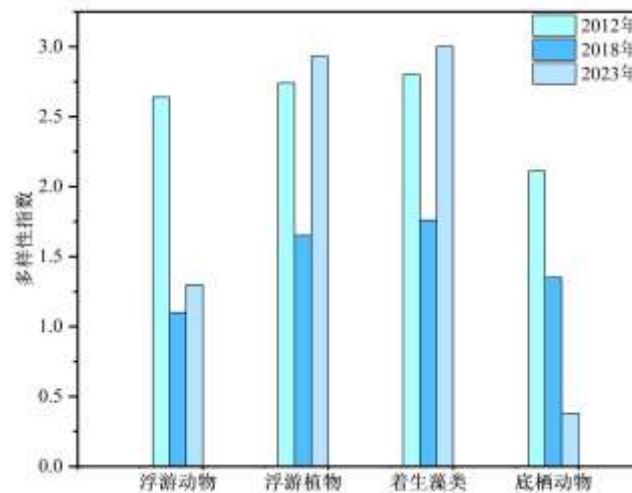


图 5 2012-2023 渭河流域水生生物多样性变化对比

Fig.5 Comparison of aquatic biodiversity in the Weihe River Basin from 2012 to 2023

过去 10 年内，除了底栖生物多样性呈现出直线下降趋势，浮游生物和着生藻类的多样性均呈现先下降后上升趋势。底栖动物多样性持续下降的原因可能是由于栖息地破坏和改变。底栖动物生活在河流的底部和底泥中，栖息地的破坏和改变会直接影响它们的生存^[22]。近年相关配套法规也开始关注河流生境的保护和治理，如 2023 年《陕西省渭河保护条例》和 2024 年《陕西省渭河河道采砂管理办法》的颁布。明确指出：“近年来，随着经济社会发展，砂石需求明显增多，渭河非法开采、滥采滥挖等情况时有发生”。此外，渭河生态集团自 2019 年组建以来，已设立了 6 处采砂区并全面投产。由于渭河河道的长期采矿、挖沙会使得长期累积在泥沙中污染物的释放，导致底栖动物赖以生存的生境恶化，使得一些物种无法适应或无法生存，导致渭河流域的底栖生物多样性呈现出直线下降趋势。渭河中浮游生物和着生藻类多样性呈现先下降后上升的趋势可能是因为过去十年内，针对渭河实施了一系列的生态修复和保护措施，如减少污染物排放、改善水质等，这些措施有助于提高水体质量^[79]，从而促进浮游生物和着生藻类多样性的恢复和增加。此外气候变化可能对渭河生态系统产生了影响，一些温度、降水等因素的变化可能导致浮游生物和着生藻类多样性的上升^[67]。总之，水生生物多样性的下降，不能简单地归咎于某个单一因素在短期内的恶化。它更像是污染毒性、物理生境破坏以及水文情势改变等多重压

力长期累积导致。渭河流域的水生态健康状况整体较差，受人类活动影响明显。从上游到下游，健康状况逐渐恶化。尽管如此，通过采用多类群生物完整性指数（m-IBI）等方法，可以更准确地评估渭河流域水生态健康状况。

2.4 水生态健康变化 渭河水生态健康是保障关中城市群可持续发展的关键。因此，需要了解和掌握渭河流域水生态健康状况，对较差水系及河道进行合理整治、环境改善和生态修复，为人类提供一个较好的水生态健康环境。徐宗学等于 2011-2013 年在渭河流域进行了 4 次野外采样调查，并应用鱼类、底栖动物、着生藻类生物完整性指数对渭河流域水生态系统健康状况进行评价。评价结果显示渭河干流上游和右岸支流、泾河源头以及北洛河中游支流健康状况较好，而渭河中游和下游地区、泾河大部分区域以及北洛河上游健康状况较差^[4]。白海锋于 2018-2019 年在渭河流域进行了 4 次野外采样调查，并应用鱼类、底栖动物、着生藻类、浮游生物生物完整性指数对渭河流域水生态系统健康状况进行评价。评价结果显示，渭河流域的水生态健康较之前有了明显的提升^[79]。

但是此类基于水生生物群落特征的水生态健康评估只是依据某一类水生生物，不同类型水生生物对环境变量的响应具有差异性，因此评估结果也会受到质疑。近年来，相关学者尝试基于多类群水生生物群落完整性指数评估水生态健康状况。与传统的单一生物类群完整性指数相比，多类群生物完整性指数能够提供更全面的生态系统健康评估，这种综合指数能够综合反映不同生物类群对环境变化的敏感性和响应，从而提供一个更全面的生态系统健康评估。有研究表明，在城市河道生态系统中，多类群生物完整性指数能够有效反映水体受干扰的程度，并与水质状况基本吻合^[80-81]。

从近年来针对渭河的研究结果发现，相较于 10 年前渭河流域的水生态环境有了较为明显的改善，但是仍然面临着一些挑战和问题。首先，渭河流域水资源短缺是当前的主要问题之一。随着工业和城市化的快速发展，水资源供需矛盾日益突出。农业、工业和城市用水的增加导致渭河水量减少，流域部分地区甚至出现了水资源枯竭现象，对当地农业生产和生态环境造成了不利影响^[48]。其次，水环境污染是渭河流域水生态环境的另一个突出问题。虽然随着一系列政府政策的实施，渭河流域的水环境相较于 10 年前已经有了较大的提升，但是仍有部分河段的水质不达标。大量污水和工业废水直接或间接排放到渭河及其支流中，导致水体富营养化、重金属超标等严重问题，对河流生态系统产生了严重破坏作用^[10]。同时，水生态系统遭受到了严重破坏。渭河流域原本丰富多样的水生生物逐渐减少，底栖生物的物种多样性急剧下降^[8,82]。水生态系统的恢复能力受到了限制，生态平衡受到了严重威胁，这对当地生态环境和生物多样性构成了严重威胁。

本研究综合考虑了渭河流域的水环境、水资源、水生生物以及生境质量，对渭河流域 2018 年和 2023 年的水生态状况进行了整体评估。依据国家标准《水生态健康评价技术指南》（GB/T 43467-2023），水生态健康指数计算公式为： $S = \sum_{i=1}^n X_i Y_i$ （ S ：水生态健康评价得分； X_i ：指标层中指标 i 的评价得分； Y_i ：指标层中指标 i 的最终权重），根据得分可分为优秀（75~100）、良好（50~75）、中等（25~50）、差（0~25）4 个等级，得分越高，代表水生态健康程度越高。评价结果显示(图 6)，相较于 2018 年，渭河流域整体的水生态状况有了很大的提升，整体的水生态状况处于良好等级，但是分值较低，仍然有很大的提升空间。其中渭河水系和泾河水系呈现出从上游到下游依次变差的趋势，而北洛河水系则是上游地区较差，中下游地区相对较好。

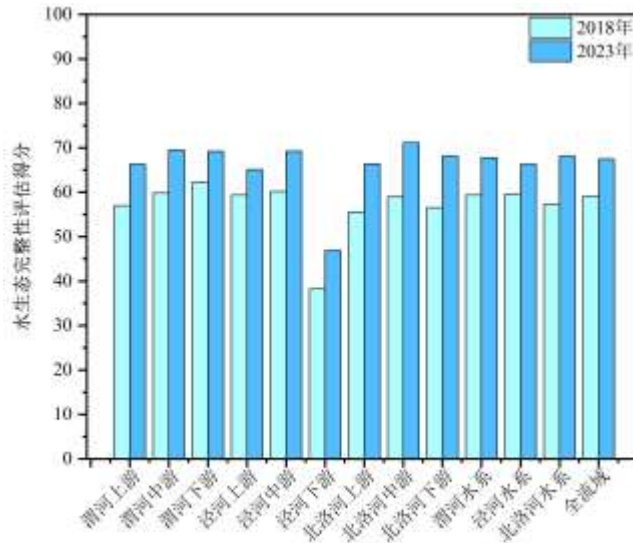


图 6 2018-2023 年渭河流域水生态完整性指数对比

Fig.6 Comparison of aquatic ecological integrity Index in the Weihe River Basin from 2018 to 2023

3 渭河流域水生态健康影响因素

渭河流域的水生态健康变化受到多种因素的影响，这些因素包括自然因素和人类活动，它们共同作用导致了渭河流域水生态系统的动态变化^[48]。降水量、气温和季节性变化直接影响着渭河水量和水质。长期气候变化可能导致干旱或洪涝等极端气候事件，对水资源分配和生态平衡造成影响^[34]。这种影响并非均质，而是呈现出明显的时空异质性。例如，流域上游山区对降水变化更为敏感，径流响应迅速；而中下游平原区，由于人类用水干预强烈，气候信号往往被掩盖或扭曲，表现为生态基流保障不足与洪水风险并存的双重压力。此外，渭河流域地形地貌复杂，山地、丘陵、平原交错分布，地表水径流和地下水补给不均匀，地形起伏导致了水流湍急，易发生洪涝灾害，这些因素都对水生态系统产生一定影响^[5]。更重要的是，地形通过制约人类活动的空间分布，间接放大了对水生态的影响。关中平原等地势平坦、易于开发的区域，恰恰是城镇、农田和工业的聚集区，承受着最集中的人口与污染压力，使得自然地形本底上的生态脆弱性与高强度的人类干扰在此区域叠加影响。随着城市化和工业化进程加快，工业和城市的水需求增加，对渭河水资源的利用和污染增加^[32]。大量工业废水和城市生活污水排放对渭河水质产生直接影响。值得注意的是，点源污染在持续治理下有所控制，但复杂的面源污染，尤其是来自农田的氮磷营养盐，因其分散性、滞后性和随机性，已成为当前水质改善和富营养化控制的难点。农业用水是渭河流域的主要用水领域之一，农药、化肥的大量使用会导致水质恶化，农田排水也可能带走土壤中的养分，造成水体富营养化。不合理的水资源开发利用和管理也是导致渭河水生态变化的重要因素。流域内“工程性”水资源调配与河流自然水文节律的冲突。密集的水库闸坝在保障供水的同时中断了水沙连通性，导致河道萎缩、水生生物栖息地碎片化，削弱了河流生态系统的自我修复能力。水库拦河、引水和排水等工程对河流生态系统造成干扰，影响水体流动和生态平衡^[35]。

研究表明，相比于气候因子和地形要素这些大尺度条件，人类活动是影响水生态健康的主要因素^[34,63]。土地利用是人类活动的主要表现形式，土地利用的变化影响着土壤质地、河流水文过程、污染强度等，这种影响通过“结构性”与“功能性”两条路径深度交织。在结构上，城镇用地的扩张直接侵占

并割裂了河岸缓冲带，使河流失去了天然的过滤屏障和栖息地廊道；在功能上，大面积的农田替代自然植被，则从根本上改变了区域的水文循环模式与养分（如氮、磷）的生物地球化学循环路径，进而严重威胁河流生态系统的生态完整性、栖息地状况、水质、生物状况等^[48,72]。土地利用变化主要体现在农业用地的过度开发利用、自然植被向经济林或草地的转变、快速的城镇化发展，这些变化影响污染物进入水环境的输入量，改变河流水环境因子，进而影响水生生物群落结构特征^[2,16]。城镇化区域高比例的不透水地表导致降雨径流系数增大，使得初期雨水携带大量地表污染物脉冲式涌入河道，对水生生物造成急性冲击。而农业区的面源污染则表现为一种慢性、持续的胁迫，导致水体富营养化，并筛选出耐污的物种，最终引发生物均质化，这正是渭河流域底栖动物群落多样性锐减的主要诱因之一。土地利用变化也可通过直接影响地表径流过程和污染物迁移转化过程，改变生物地球化学循环，是生态系统功能退化和生物多样性减少的主要驱动力^[66]。

4 展望

渭河流域的水文情势变化显著。目前渭河主干及子流域北洛河流域年径流量呈显著减少趋势。这种变化对河流生态系统的完整性和稳定性具有重要影响。此外，渭河流域内各站点的生态水文联系变异情况不同，将渭河流域划分为强烈变异区、中度变异区与轻度变异区 3 个变异区。这种分区有助于更好地理解渭河流域不同区域河流生态水文联系的变化情况。人类活动是影响渭河流域水生态演变的主要因素之一。例如，水利工程和水土保持措施是导致川河水文情势变化的主要原因。为了保障渭河流域的水生态环境，控制水利工程的过量开发利用，合理调控闸坝的蓄放水过程和地下水开采；在河道沿岸建设污水处理厂，对排河污水进行拦截和处理；控制渭河流域内的工业开发强度，恢复河岸带及边坡生境。

其次，引汉济渭调水工程及其他重大水利工程和节水工程建设取得了一定成效，合理调配了水资源，解决了渭河流域生态水资源短缺的问题，增加了渭河生态流量，有助于污染物稀释和河流自净能力的增强。此外，生活生产用水的增多将会为关中城市群的发展奠定基础，渭河水质改善的问题依旧严峻。因此，需要进一步科学落实污水处理技术的应用、生活污水的集中处理、综合治理工程的实施以及流域综合管理规划等。在污水处理方面应加强污水防治、污水处理专业化、市场化、社会化路子，最终实现污水资源化。

总体而言，渭河流域水生态治理是一个复杂而系统的工程，涉及水资源管理、生态保护、环境治理等多个方面。水资源管理管理方面需要进一步通过水土保持措施来减少水土流失，提高土壤水分保持能力。此外，需要进行水资源科学合理配置，制定科学的水资源配置方案，确保农业、工业和居民用水的有效供给的同时要保障河流生态用水。在水生态恢复方面应加强对渭河沿线湿地水生植被的保护和恢复，改善水土保持和生物多样性，提升生态系统的自我调节能力。在污染支流方面要注重污水处理设施建设，加大对污水处理厂的投资，提高污水处理能力，减少工业和生活污水对渭河的污染。进一步推广生态农业和有机农业，减少化肥和农药的使用，控制农业面源污染。河道治理方面。定期对河道进行疏浚，清理淤泥和垃圾，改善水流通畅度，防止洪涝灾害。在重要河段建设堤坝、闸门等防洪设施，增强防洪能力。政策与法规支持方面，进一步完善渭河流域的保护和治理法律法规，为治理工作提供法律支持。建立跨省市的合作机制，协调各地的治理措施。科学研究与技术支持方面，建立水质监测和生态评估体系，及时掌握流域的生态环境变化。

综上所述，渭河流域未来的水环境与水生态发展，需致力于从单一的水质达标管理，向以“水生态健康”为核心的综合性管理转变。未来的工作可以聚焦到具体的问题河流（如作为城市纳污河的沣河、

历史排污渠皂河等），实施“一河一策”的精准治理。1）对问题支流进行精准溯源与生态修复，严控农业面源污染；2）强化流域协同管理以保障生态流量；3）通过恢复河岸带与湿地等措施，系统提升生态系统完整性与稳定性；4）在监测与评价体系中引入生物完整性等生态指标，实现智慧监管；5）创新开发使用 EOD 等治理模式，推动生态产品价值转化。

5 结语

在本文中，我们深入探讨了 2004-2024 年渭河流域的水生态状况及演变规律。近 20 年来，渭河流域的水生态状况呈现出向好的趋势，水质逐步改善，浮游生物和着生藻类的多样性也有所回升，这得益于近年来针对水域的生态保护和修复措施的实施。然而，仍然存在一些问题，例如特定区域水环境污染、河流生境栖息地破坏等，仍在一定程度上影响着河流生态系统健康。此外，引汉济渭调水工程对受水区水生态健康的影响效应？新形势下水生态健康评估指标体系和评估方法如何调整？因此，为了实现渭河流域水生态环境的持续改善与保护，需要政府、企业、科研机构和公众等多方合作，制定科学的政策、加强监管执法、提高环保意识，并在可持续发展的理念下，促进经济社会发展与生态环境保护的平衡与协调。唯有如此，渭河流域的水生态环境才能迎来更加清洁、健康和可持续的未来。

6 参考文献

- [1] Wang P, Xu M. Dynamics and interactions of water-related ecosystem services in the Yellow River Basin, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, **33**: 1681-1701. DOI: 10.1007/s11442-023-2148-0.
- [2] Luo J, Xia J, Hao FH, *et al.* Theoretical thinking and practical development on coordination and high-quality governance of human activity space in river basins in China. *Journal of Natural Resources*, 2024, **39**(11): 2505-2524. DOI: 10.31497/zrzyxb.20241101. [罗静, 夏军, 郝芳华等. 中国流域人类活动空间协同与高水平治理的理论思考与实践发展. 自然资源学报, 2024, **39**(11): 2505-2524.]
- [3] Zhao YW, Yang ZF. River health: concept, assessment method and direction. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(01): 119-124. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2005.01.019. [赵彦伟, 杨志峰. 河流健康: 概念、评价方法与方向. 地理科学, 2005, **25**(01): 119-124.]
- [4] Xu ZX, Gu XY, Liu LF. Investigation and assessment on river health of Weihe River Basin. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(01): 1-7. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2018.01.01. [徐宗学, 顾晓昀, 刘麟菲. 渭河流域河流健康调查与评价. 水资源保护, 2018, **34**(01): 1-7.]
- [5] Wei W, Liu C, Ma L, *et al.* Optimization strategies of ecological security patterns through importance of ecosystem services and ecological sensitivity-A case study in the Yellow River Basin. *Land Degradation and Development*, 2024, **35**(3): 985-1001. DOI: 10.1002/ldr.4965.
- [6] Zuo QT. Research framework for ecological protection and high-quality development in the yellow river basin. *Yellow River*, 2019, **41**(11): 1-6+16. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.11.001. [左其亭. 黄河流域生态保护和高质量发展研究框架. 人民黄河, 2019, **41**(11): 1-6+16.]
- [7] Xia J, Xue Y, Luo W, *et al.* Research of river ethics and it's application in integrated river basin management. *China Water Resources*, 2024, **12**: 1-6. [夏军, 薛颖, 骆文等. 河流伦理研究及其在流域综合管理中的应用. 中国水利, 2024, **12**: 1-6.]
- [8] Cheng DD, Song JX, Zhang YX, *et al.* Effect of the spatial distribution of macroinvertebrates in the benthic and hyporheic zones on the vertical hydraulic conductivity of the streambed. *Journal of Hydrology*, 2024, **638**: 131503. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131503.

- [9] Liu CM, Liu XY. Healthy river: essence and indicators. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(07): 683-692. DOI: 10.11821/xb200807002. [刘昌明, 刘晓燕. 河流健康理论初探. 地理学报, 2008, **63**(07): 683-692.]
- [10] Xu ZX, Liu LF. Assessment on the health of aquatic ecosystem in the Weihe river basin. *Yellow River*, 2021, **43**(10): 40-43+50. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.10.008. [徐宗学, 刘麟菲. 渭河流域水生生态系统健康评价. 人民黄河, 2021, **43**(10): 40-43+50.]
- [11] Wang YR, Li N, Song JX, *et al.* Solving the sustainable development dilemma in the Yellow River Basin of China: Water-energy-food linkages. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 490: 144797. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.144797.
- [12] Song JX, Wei KX, Shao C, *et al.* Study on index system and method of river sustainability evaluation. *Yangtze River*, 2023, **54**(05): 40-46. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.05.005. [宋进喜, 魏珂欣, 邵创等. 河流可持续性评价指标体系与方法研究. 人民长江, 2023, **54**(05): 40-46.]
- [13] Zhang Q, Qian L, Guo F. Research progress and prospect of water ecological health assessment in the Yangtze River Basin based on bibliometrics and visual analysis. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025. DOI: 10.11988/ckyyb.20250360. [张晴, 钱玲, 郭芬. 基于文献计量和可视化分析的长江流域水生生态健康评价研究进展与展望. 长江科学院院报, 2025.]
- [14] Du HW, Fang HY. Constructing the pearl river comprehensive conservation pattern to support highquality-development of the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area. *Environmental Protection*, 2023, **51**(5): 30-32. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2023.05.013. [杜宏伟, 房怀阳. 构建珠江大保护格局支撑粤港澳大湾区高质量发展. 环境保护, 2023, **51**(5): 30-32.]
- [15] Norris RH, Hawkins CP. Monitoring river health. *Hydrobiologia*, 2000, **435**: 5-17. DOI: 10.1023/A:1004176507184.
- [16] Gao XD, Liu YX, Tang CC, *et al.* Evaluating river health through respirogram metrics: Insights from the Weihe River basin, China. *Science of the Total Environment*, 2024, **919**: 170805. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170805.
- [17] Horton RK. An index number system for rating water quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1965, **37**(3): 300-306.
- [18] Pang HJ, Ben YW, Cao Y, *et al.* Time series-based machine learning for forecasting multivariate water quality in full-scale drinking water treatment with various reagent dosages. *Water Research*, 2025, **268**: 122777. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122777.
- [19] Wu ZS, Wang XL, Chen YW, *et al.* Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 914-922. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.293.
- [20] Sánchez E, Colmenarejo MF, Vicente J, *et al.* Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Ecological indicators*, 2007, **7**(2): 315-328. DOI: 10.1016/j.ecolind.2006.02.005.
- [21] Noori R, Berndtsson R, Hosseinzadeh M, *et al.* A critical review on the application of the National Sanitation Foundation Water Quality Index. *Environmental pollution*, 2019, **244**: 575-587. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.10.076.
- [22] Wu ZS, Kong M, Cai YJ, *et al.* Index of biotic integrity based on phytoplankton and water quality index: Do they have a similar pattern on water quality assessment? A study of rivers in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 395-404. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.216.
- [23] Jin XW, Zhao XF, Liang XD, *et al.* Research progress of aquatic ecological monitoring and assessment in watersheds and development recommendations in China. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(3): 755-765. DOI: 10.18307/2023.0300. [金小伟, 赵先富, 渠晓东等. 我国流域水生生态监测与评价体系研究进展及发展对策. 湖泊科学, 2023, **35**(3): 755-765.]
- [24] Zhang Y, Bi ZL, Zhang X, *et al.* Effects of land-use types on nitrate pollution of surface water in Guanzhong area in the Weihe

- River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(12): 4319-4327. DOI: 10.5846/stxb201810122220. [张妍, 毕直磊, 张鑫等. 土地利用类型对渭河流域关中段地表水硝酸盐污染的影响. *生态学报*, 2019, **39**(12): 4319-4327.]
- [25] Yin XW, Xu ZX, Yan N, *et al.* Community structure and biological integrity of periphyton in the Weihe River Basin, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(02): 518-527. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2013.02.002. [殷旭旺, 徐宗学, 鄢娜等. 渭河流域河流着生藻类的群落结构与生物完整性研究. *环境科学学报*, 2013, **33**(02): 518-527.]
- [26] Tian YL, Jiang Y, Liu Q, *et al.* The impacts of local and regional factors on the phytoplankton community dynamics in a temperate river, northern China. *Ecological Indicators*, 2021, **123**: 107352. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107352.
- [27] Tian Y, Jiang Y, Liu Q, *et al.* Using a water quality index to assess the water quality of the upper and middle streams of the Luanhe river, northern China. *Science of the Total Environment*, 2019, **667**: 142-151.
- [28] Liu Q, Tian YL, Liu Y, *et al.* Characteristics of two comprehensive assessment methods for water quality based on different evaluation criteria and their applications in aquatic environment management. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(20): 7538-7546. DOI: 10.5846/stxb201811182499. [刘琦, 田雨露, 刘洋等. 两类水质综合评价方法的特点及其在河流水环境管理中的作用. *生态学报*, 2019, **39**(20): 7538-7546.]
- [29] Cardinale BJ, Duffy JE, Gonzalez A, *et al.* Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, **489**: 59-67. DOI: 10.1038/nature11148.
- [30] Zhang HX, Niu QH, Su YP, *et al.* Constructing a new index of phytoplankton integrity for evaluating the health of reservoirs. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(06): 452-462. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2023.0455. [张慧欣, 聂玘豪, 苏玉萍等. 构建浮游植物生物完整性新指数评价水库健康研究. *环境科学学报*, 2024, **44**(06): 452-462.]
- [31] Yi YJ, Ding H, Ye JX. Review of water ecological health assessment based on ecological integrity. *Water Resources Protection*, 2024, **40**(05): 1-10. DOI:10.3880/j.issn.1004-933.2024.05.001 [易雨君, 丁航, 叶敬吁. 基于生态完整性的水生态健康评价研究综述. *水资源保护*, 2024, **40**(05): 1-10.]
- [32] Wei JC, Li ZH, Dong YY. Legalization of environmental safety assessment system in the Yellow River Basin based on pressure-state-response (PSR) model. *Environmental Monitoring in China*, 2023, **39**(1): 19-28. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2023.01.03. [魏竞超, 李自涵, 董媛媛. 基于压力-状态-响应(PSR)模型的黄河流域环境安全评价体系法治化研究. *中国环境监测*, 2023, **39**(1): 19-28.]
- [33] Zhang Y. Strategy and measures for ecological protection and high quality development in Shaanxi Wei River Basin. *China Water Resources*, 2020, **13**: 58-59+64. [张勇. 陕西渭河流域生态保护和高质量发展的思路 and 对策. *中国水利*, 2020, **13**: 58-59+64.]
- [34] Bao ZX, Zhang JY, Wang GQ, *et al.* The impact of climate variability and land use/cover change on the water balance in the Middle Yellow River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2019, **577**: 123942-123942. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123942.
- [35] Zhang C, Li J, Zhou ZX. Water resources security pattern of the Weihe River Basin based on spatial flow model of water supply service. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, **41**(02): 350-359. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.02.018. [张城, 李晶, 周自翔. 基于水供给服务空间流动模型的渭河流域水资源安全格局. *地理科学*, 2021, **41**(02): 350-359.]
- [36] Ren LL, Shen HR, Yuan F., *et al.* Hydrological drought characteristics in the Weihe catchment in a changing environment. *Advances Water Science*, 2016, **27**(04): 492-500. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.04.002. [任立良, 沈鸿仁, 袁飞等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析. *水科学进展*, 2016, **27**(04): 492-500.]
- [37] Hu YX, Yu XX, Liao W, *et al.* Spatio-temporal patterns of water yield and its influencing factors in the Han River basin. *Resources and Environment in the Yangtza Basin*, 2022, **31**(01): 73-82. [胡砚霞, 于兴修, 廖雯等. 汉江流域产水量时空格局及影响因素研究. *长江流域资源与环境*, 2022, **31**(01): 73-82.]

- [38] 李子君. 变化环境下泾河流域水资源演变及地下水脆弱性评价[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [39] 王怡菲. 陕西省渭河流域生态修复绩效评价研究[学位论文]. 西安: 西北农林科技大学, 2019.
- [40] Xie BP, Wang YQ, Chen Y, *et al.* Topographic gradient characteristics and driving factors of ecosystem service value in Taohe River basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, **45**(05): 1-13. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.031. [谢保鹏, 王永强, 陈英等. 洮河流域生态系统服务价值的地形梯度特征及驱动因素. 水土保持通报, 2025, **45**(05): 1-13.]
- [41] Huang WJ, Wang JG, Chen WL, *et al.* Habitat evolution and biological trends in the Pearl River Estuary. *China Water Resources*, 2023, **22**: 16-21. [黄伟杰, 王建国, 陈文龙等. 珠江河口生境演变与生物变化趋势. 中国水利, 2023, **22**: 16-21.]
- [42] Sun RH, Wei LY, Zhang HP, *et al.* Research status and prospect of river ecosystem health-based on bibliometric research. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(10): 3526-3536. DOI: 10.5846/stxb201903250560. [孙然好, 魏琳沅, 张海萍等. 河流生态系统健康研究现状与展望-基于文献计量研究. 生态学报, 2020, **40**(10): 3526-3536.]
- [43] 姜倩利, 柯勇, 刘吉. 渭河渭南段水污染治理现状及水质变化分析. 化工管理, 2019, **28**: 45-46.
- [44] Dong W, Wang RC, Li HE, *et al.* Spatiotemporal characteristics analysis of water pollutants in Xixian New Area in Weihe River basin. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, **39**(11): 80-89. DOI: 10.11660/slfdx.20201109. [董雯, 王瑞琛, 李怀恩等. 渭河西咸段水质时空变异特征分析. 水力发电学报, 2020, **39**(11): 80-89.]
- [45] Liu H. Water quality evaluation and trend analysis of the Baoji Section of the Wei River from 2014 to 2020. *Ground Water*, 2021, **43**(06): 132-134. DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2021-06-039. [刘欢. 2014-2020年渭河宝鸡段水质评价及趋势分析. 地下水, 2021, **43**(06): 132-134.]
- [46] Hu DX, Li L, Zhang Y, *et al.* Water quality change before and after comprehensive treatment in Shaanxi section of Weihe main stream. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38**(05): 91-96. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.015. [胡德秀, 李立, 张艳等. 渭河干流陕西段综合治理前后的水质变化与趋势. 水土保持通报, 2018, **38**(05): 91-96.]
- [47] 毕直磊. 土地利用和社会经济因素对渭河关中段氨氮污染的影响[学位论文]. 西安: 西北大学, 2021.
- [48] Zhao AZ, Zhao YL, Liu XF, *et al.* Impact of human activities and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of Northwest China. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, **36**(04): 571-579. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.04.011. [赵安周, 赵玉玲, 刘宪锋等. 气候变化和人类活动对渭河流域蓝水绿水影响研究. 地理科学, 2016, **36**(04): 571-579.]
- [49] Wang Z, Song JX, Duan MC, *et al.* Characteristic analysis of COD and NH₃-N change of water quality in Shaanxi section of Weihe River. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2013, **24**(03): 64-68. 王珍, 宋进喜, 段孟辰等. 渭河陕西段河水水质 COD、NH₃-N 变化特征分析. 水资源与水工程学报, 2013, **24**(03): 64-68.
- [50] 刘广玉. 渭河干流陕西段水质变化特征及其治理政策实施效果评价[学位论文]. 西安建筑科技大学, 2023.
- [51] Zhang B. A brief analysis of ecological and environmental issues in the Wei River Basin and suggestions for governance measures. *Ground Water*, 2021, **43**(03): 301-303. DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2021-03-113. [张波. 渭河流域生态环境问题及治理措施建议浅析. 地下水, 2021, **43**(03): 301-303.]
- [52] Luo WG, Guo ZZ, Kou XM. Status Assessment and improvement measures study on ecological water volume in Wei river. *Northwest Water Power*, 2018, **6**: 99-103+108. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2018.06.027. [罗文刚, 郭正组, 寇晓梅. 渭河生态水量现状评价及改善措施探讨. 西北水电, 2018, **6**: 99-103+108.]
- [53] Zuo DP, Xu ZX, Wu W, *et al.* Identification of streamflow response to climate change and human activities in the Wei River Basin, China. *Water Resources Management*, 2014, **28**: 833-851. DOI: 10.1007/s11269-014-0519-0.
- [54] Wang XH, Liu XF, Sun GP. Increasing probability of concurrent drought between the water intake and receiving regions of

- the Hanjiang to Weihe River Water Diversion Project, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, **32**(10): 1998-2012. DOI: 10.1007/s11442-022-2033-2.
- [55] Yue SY, Li HE, Zhao L. Impact of climate and land use changes on water scarcity in the Wei River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(05): 95-101. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.05.011. [岳思羽, 李怀恩, 赵丽. 气候和土地利用变化对渭河流域水资源短缺的影响. 水土保持研究, 2021, **28**(05): 95-101.]
- [56] Zhang LM, Zhao GJ, Mu XM, *et al.* Attribution of runoff variation in the Wei River basin based on the Budyko hypothesis. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(21): 7607-7617. DOI: 10.5846/stxb201710121828. [张丽梅, 赵广举, 穆兴民等. 基于Budyko假设的渭河径流变化归因识别. 生态学报, 2018, **38**(21): 7607-7617.]
- [57] Guo AJ, Chang JX, Liu DF, *et al.* Variations in the precipitation-runoff relationship of the Weihe River Basin. *Hydrology Research*, 2017, **48**(1): 295-310. DOI: 10.2166/nh.2016.032.
- [58] Yang XN, Sun WY, Li PF, *et al.* Reduced sediment transport in the Chinese Loess Plateau due to climate change and human activities. *Science of The Total Environment*, 2018, **642**: 591-600. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.061.
- [59] Qiu DX, Mu XM, Zhao GJ, *et al.* Effects of precipitation extremes change on stream flow and sediment load in Weihe River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(06): 65-72. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20220919.002. [邱德勋, 穆兴民, 赵广举等. 渭河流域极端降雨变化趋势及其对水沙情势的影响. 水土保持研究, 2022, **29**(06): 65-72.]
- [60] Liu YL, Zhao GJ, Mu XM, *et al.* Impact of rainfall erosivity variations on sediment load in the Weihe River Basin in recent 55 years. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, **17**(03): 15-22. DOI: 10.16843/j.sswc.2019.03.003. [刘宇林, 赵广举, 穆兴民等. 近55年渭河流域降雨侵蚀力变化及对输沙量的影响. 中国水土保持科学, 2019, **17**(03): 15-22.]
- [61] Huang CL, Yang QK. Runoff and sediment variation rules and differences in Wei River and Jing River Basins. *Arid Land Geography*, **44**(02): 327-336. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2021.02.04. [黄晨璐, 杨勤科. 渭河与泾河流域水沙变化规律及其差异性分析. 干旱区地理, 2021, **44**(02): 327-336.]
- [62] Gao HD, Wu Z, Jia LL, *et al.* Vegetation change and its influence on runoff and sediment in different landform units, Wei River, China. *Ecological engineering*, 2019, **141**: 105609. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.105609.
- [63] Hu JF, Li PF, Zhao GJ, *et al.* Effects of climate variability and anthropogenic factors on sediment load reduction in the Weihe River basin, China. *Hydrological Processes*, 2022, **36**(4): 1-17. DOI: 10.1002/hyp.14562.
- [64] Ran DC, Luo QH, Liu B, *et al.* Effect of soil retaining dams on flood and sediment reduction in middle reaches of Yellow River. *Shuili Xuebao*, 2004, **35**(5): 7-13. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.2004.05.002. [冉大川, 罗全华, 刘斌等. 黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究. 水利学报, 2004, **35**(5): 7-13.]
- [65] Hooper DU, Chapin FS, Ewel JJ, *et al.* Effects of Biodiversity on Ecosystem Functioning: A Consensus of Current Knowledge. *Ecological Monographs*, 2005, **75**(1): 3-35. DOI: 10.1890/04-0922.
- [66] Pennekamp F, Pontarp M, Tabi A, *et al.* Biodiversity increases and decreases ecosystem stability. *Nature*, 2018, **563**: 109-112.. DOI: 10.1038/s41586-018-0627-8.
- [67] Woolway RI, Sharma S, Smol JP. Lakes in Hot Water: The Impacts of a Changing Climate on Aquatic Ecosystems. *BioScience*, 2022, **72**(11): 1050-1061. DOI: 10.1093/biosci/biac052.
- [68] Noac'h PL, Beisner BE. A database of nutritional strategies of nanoplankton genera present in North American lake surface waters. *Journal of Plankton Research*, 2025, **47**(1): 1-3. DOI: 10.1093/plankt/fbae035.
- [69] Tan K, Xu P, Huang LH, *et al.* Effects of bivalve aquaculture on plankton and benthic community. *Science of the Total Environment*, 2024, **914**: 169892. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.169892.
- [70] Leu E, Daase M, Schulz KG, *et al.* Effect of ocean acidification on the fatty acid composition of a natural plankton community.

- Biogeosciences*, 2013, **10**(2): 1143-1153. DOI: 10.5194/bg-10-1143-2013.
- [71] Socha E, Gorsky A, Lottig NR, *et al.* Under-ice plankton community response to snow removal experiment in bog lake. *Limnology and Oceanography*, 2023, **68**(5): 1001-1018. DOI: 10.1002/lno.12319.
- [72] Amorim CA, Jeppesen E, Moura AN. How do additions of submerged macrophytes, large-bodied cladocerans and nutrients impact tropical plankton communities? A mesocosm experiment. *Hydrobiologia*, 2025, **852**(2): 489-501. DOI: 10.1007/s10750-024-05646-8.
- [73] Bai HF, Zhao NX, Yin XW, *et al.* Community structure and relationship with environmental factors in zooplankton in Weihe River basin, Northwest China. *Journal of Dalian Ocean University*, 2014, **29**(03): 260-266. DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-1388.2014.03.012. [白海锋, 赵乃锡, 殷旭旺等. 渭河流域浮游动物的群落结构及其与环境因子的关系. 大连海洋大学学报, 2014, **29**(03): 260-266.]
- [74] Min WW, Wang PP, Li LJ, *et al.* Relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors in the Wei River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(09): 1397-1406. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2015.09.09. [闵文武, 王培培, 李丽娟等. 渭河流域浮游植物功能群与环境因子的关系. 环境科学研究, 2015, **28**(09): 1397-1406.]
- [75] Ji XB, Chen BH, Wang K, *et al.* A new microalgae community-epimicroplastic microalgae (EMP-MA). *Algal Research*, 2023, **71**: 103059. DOI: 10.1016/j.algal.2023.103059.
- [76] Nava V, Leoni B. A critical review of interactions between microplastics, microalgae and aquatic ecosystem function. *Water Research*, 2021, 188: 116476. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116476.
- [77] Shang KY, Han Y, Gao X, *et al.* Spatial pattern of periphytica algae communities in major tributaries of the upper Jinsha River and the environmental drivers. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(05): 1392-1406. DOI: 10.18307/2024.0515. [尚坤钰, 韩毓, 高欣等. 金沙江上游主要支流着生藻类群落的空间格局及其影响因子. 湖泊科学, 2024, **36**(05): 1392-1406.]
- [78] Dong YT, Yang J, Zhu NW, *et al.* Pollution status of sediment in lake and rivers and research progress of in-situ remediation technology. *Environmental Engineering*, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/11.2097.X.20251011.1958.002>. [董延婷, 杨杰, 朱南文等. 河湖底泥污染现状及原位修复技术研究进展. 环境工程, 2025.]
- [79] 白海锋. 渭河流域水生生物群落时空分布特征、驱动机制及水生态系统健康评价[学位论文]. 西安: 西北大学, 2022.
- [80] Xiong CH, Zhang RL, Xu YP, *et al.* Health assessment on rivers in Shanghai City using benthic index of biotic integrity. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(6): 1067-1078. DOI: 10.18307/2015.0611. [熊春晖, 张瑞雷, 徐玉萍等. 应用底栖动物完整性指数评价上海市河流健康. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1067-1078.]
- [81] Zheng B, Gao X, Li Z, *et al.* Evaluation of water ecological health of urban rivers in Tianjin based on macroinvertebrate biological integrity index. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, **45**(4): 1726-1735. DOI:10.20103/j.stxb.202401040035. [郑彪, 高欣, 李翌等. 基于大型底栖动物生物完整性指数(B-IBI)的天津市城市河流水生态健康评价. 生态学报, 2025, **45**(4): 1726-1735.]
- [82] Yin XW, Xu ZX, Gao X, *et al.* Macroinvertebrate community structure and its relationships with environmental factors in Weihe River basin, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(1): 218-226. DOI:10.13287/j.1001-9332.2013.0158. [殷旭旺, 徐宗学, 高欣等. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2013, **24**(1): 218-226.]