

湿地生态退化机制及其修复路径的研究进展

宫莉^{1,2}, 黄彬彬³, 李景寅^{1,2}, 王庆贵³, 王媛³, 王华康^{1,2}, 刘冠成^{3*}

¹济宁市南四湖自然保护区服务中心, 山东 济宁

²山东微山湖湿地生态系统定位观测研究站, 山东 济宁

³曲阜师范大学生命科学学院, 山东 济宁

收稿日期: 2026年5月7日; 录用日期: 2026年8月22日; 发布日期: 2026年9月24日

摘要

湿地是全球最重要的生态系统类型之一, 在水文调节、碳氮循环、生物多样性维持以及区域生态安全中发挥着不可替代的作用。然而, 受农业围垦、水文工程建设、城镇扩张及气候变化等多重因素叠加影响, 全球湿地面积与生态功能持续退化, 湿地生态系统结构简化、功能失衡和环境效应增强等问题日益突出。在此背景下, 湿地生态修复逐渐成为生态学与环境科学领域的研究热点, 并由早期以工程措施为主的修复模式, 向以过程机制和系统功能恢复为导向的综合修复转变。本文基于近年来国内外相关研究成果, 系统梳理了湿地退化的主要驱动机制, 重点从水文过程改变、土壤理化与生物地球化学性质退化、生物群落结构失衡以及气候变化背景下的复合扰动等方面, 总结了不同类型湿地退化的共性规律与关键限制因子。在此基础上, 围绕湿地生态修复技术的研究进展, 重点评述了水体与水文过程修复、湿地土壤修复以及动植物群落恢复等主要技术路径, 综合分析了典型国际案例及其生态效应。未来湿地修复研究需进一步强化长期监测与机制解析, 将全球变化背景下的适应性管理、生物地球化学过程调控以及生态系统服务综合评估纳入统一框架, 以提升湿地生态修复的科学性与可持续性。

关键词

湿地退化, 生态修复, 湿地环境, 生物多样性

Research Progress on the Mechanism of Wetland Ecological Degradation and Its Restoration Pathways

Li Gong^{1,2}, Binbin Huang³, Jingyin Li^{1,2}, Qinggui Wang³, Yuan Wang³, Huakang Wang^{1,2}, Guancheng Liu^{3*}

¹Jining Nansihu Nature Reserve Service Center, Jining Shandong

²Shandong Weishan Lake Wetland Ecosystem Observation Research Station, Jining Shandong

³School of Life Sciences, Qufu Normal University, Jining Shandong

*通讯作者。

文章引用: 宫莉, 黄彬彬, 李景寅, 王庆贵, 王媛, 王华康, 刘冠成. 湿地生态退化机制及其修复路径的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(9): 1527-1536. DOI: 10.12677/aep.2026.169154

Abstract

Wetlands are among the most critical ecosystems globally, playing an irreplaceable role in hydrological regulation, carbon and nitrogen cycling, biodiversity maintenance, and regional ecological security. However, under the combined effects of multiple factors such as agricultural reclamation, hydrological engineering, urban expansion, and climate change, global wetland areas and ecological functions continue to decline. Issues such as the simplification of wetland ecosystem structures, functional imbalances, and intensified environmental impacts have become increasingly prominent. Against this backdrop, wetland ecological restoration has gradually emerged as a research hotspot in ecology and environmental science, shifting from early restoration models dominated by engineering measures toward integrated approaches oriented toward restoring process mechanisms and ecosystem functions. Based on recent research achievements both domestically and internationally, this paper systematically reviews the main driving mechanisms of wetland degradation. It summarizes the common patterns and key limiting factors of different types of wetland degradation, focusing on alterations in hydrological processes, degradation of soil physicochemical and biogeochemical properties, imbalances in biological community structures, and compound disturbances in the context of climate change. Furthermore, the research progress in wetland ecological restoration technologies is discussed, emphasizing key technical pathways such as water and hydrological process restoration, wetland soil remediation, and the restoration of plant and animal communities. Typical international case studies and their ecological effects are comprehensively analyzed. Future research on wetland restoration should further strengthen long-term monitoring and mechanistic analysis, integrating adaptive management under global change, regulation of biogeochemical processes, and comprehensive assessments of ecosystem services into a unified framework to enhance the scientific rigor and sustainability of wetland ecological restoration.

Keywords

Wetland Degradation, Ecological Restoration, Wetland Environment, Biodiversity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湿地是陆地与水体之间过渡性的生态系统类型，广泛分布于河流、湖泊、海岸带及地下水补给区，是全球生物圈中生产力最高、生态过程最为复杂的生态系统之一[1] [2]。根据《拉姆萨尔公约》的定义，湿地包括天然或人工形成的沼泽、泥炭地、水域及水深不超过 6 m 的海域[3]。尽管其在全球陆地面积中所占比例不足 6%，但湿地却提供了超过 40% 的生态系统服务功能，包括水质净化、洪水调蓄、碳汇功能、生物多样性维持及区域气候调节等[4] [5]。因此，湿地被广泛认为是维系全球生态安全和人类福祉的关键生态系统。在全球变化背景下，湿地在碳循环和气候调节中的作用尤为突出。大量研究表明，湿地土壤中储存了全球约 20%~30% 的陆地有机碳，其单位面积碳储量显著高于森林和草地生态系统[6] [7]。同时，湿地又是甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)等温室气体的重要排放源，其碳汇与碳源功能具有明显的双重性[8] [9]。这种“高碳储量 - 高温室气体排放潜力”的特征，使湿地成为全球碳中和与气候变化研究中的关键节点，也进一步凸显了湿地生态系统结构和功能稳定性的重要性。

然而,自 20 世纪以来,在人口增长、城市扩张和农业集约化的共同驱动下,全球湿地生态系统经历了前所未有的退化与损失[10] [11]。联合国环境规划署(UNEP)和生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)的评估结果显示,全球湿地面积自 1970 年以来减少了约 35%,其退化速度明显快于森林和草地生态系统[12] [13]。湿地围垦、排水造田、水资源过度开发、水体污染以及工程化河道整治等人类活动,严重改变了湿地的水文过程、物质循环和生物群落结构,导致湿地生态功能持续衰退[14] [15]。湿地退化不仅表现为面积减少,更体现在生态系统功能的系统性衰退[16]。例如,水文连通性破坏导致湿地水位波动幅度异常,改变了沉积和营养物质循环过程[17]。富营养化和污染输入加剧了植被退化和生物群落简化;土壤结构破坏和氧化环境增强促使有机碳矿化加速,削弱了湿地的长期碳汇功能[18]。这些变化使得湿地逐渐从“生态调节器”转变为潜在的生态风险源。在此背景下,湿地生态修复逐渐成为国际生态学、环境科学和生态工程领域的研究热点[19]。与早期以工程措施为主的“景观恢复”不同,当前湿地修复研究更加注重生态过程重建、系统稳定性提升以及多功能协同恢复。国际上提出了“基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)”“生态系统过程导向修复(process-based restoration)”等新理念,强调通过恢复自然水文过程、生物相互作用和物质循环机制,实现湿地生态系统的自我维持和长期稳定[20] [21]。

尽管湿地生态修复研究取得了大量进展,但不同湿地类型退化机理复杂、修复目标多样,现有技术体系在适用性、长期效果和综合评价方面仍存在明显不足。因此,系统梳理湿地退化机制、总结不同技术路径的适用条件和生态效应,对于提升湿地修复科学性和工程实践成效具有重要意义。

2. 湿地生态系统退化因素及机制

湿地退化是指湿地生态系统结构、功能和过程的负面变化,包括面积减少、生物多样性丧失和生态系统功能衰退[22]。退化机制复杂,涉及自然和人为因素的交互作用。而湿地退化往往通过水文变化、土壤氧化和生物群落破坏等途径发生[23]。

2.1. 自然因素

气候变化是湿地退化的主要自然驱动因素。全球变暖导致极端天气增多,如干旱和洪水交替,改变湿地水文循环。例如,在青藏高原多年冻土区,冻土退化导致湿地凋落物分解加速,释放温室气体,形成正反馈循环[24]。研究显示,1970~2015 年间,海洋/滨海湿地和内陆湿地面积减少 35%,部分地区下降达 59%。海平面上升侵蚀滨海盐沼湿地,改变盐度梯度,导致植被退化[25]。地质和水文变化也促进退化。河流改道或沉积物减少导致湿地淤积或侵蚀,如黄河三角洲湿地因上游水库拦截沉积物而退化[26]。在冻土区,冻土融化改变土壤含水量,影响植物群落组成。

2.2. 人为因素

人为活动是湿地退化的主导因素,占全球湿地损失的 80%以上。农业扩张是最主要原因,通过排水和围垦转化湿地为耕地。中国武昌湖湿地自 1980 年以来面积减少 40%,主要为农业开发。农业活动引入化肥和农药,导致富营养化,改变磷循环机制[27]。磷形态从活性磷向稳定磷转化,减少生物可用性[28]。城市化和工业化加速退化,城市扩张填充湿地,工业废水污染水体,导致重金属积累和酸化[29]。滨海湿地受围填海影响严重,中国沿海湿地损失率高达 22%。此外,外来物种入侵也是重要的因素,如互花米草在滨海盐沼扩散,取代本土植被[30]。

2.3. 水文过程机制

水文过程改变是驱动湿地退化的“一级因子”,其影响具有系统性和放大效应。湿地退化的水分过

程主要涉及水文条件的改变,如排水、蒸发增加或水位下降,水文连通性破坏,导致土壤水分饱和度降低[31]。排水是常见人为干预,造成地下水位下降,土壤从厌氧状态转向好氧状态,促进有机质氧化分解,释放温室气体如 CO_2 和 CH_4 ,形成正反馈循环[32]。例如,在高山湿地,气候变暖加速冻土融化,改变水分循环,增加土壤通气,导致有机质快速降解[33]。海岸湿地退化中,海平面上升或河流沉积减少改变盐水入侵和淡水补给平衡,影响水盐梯度,造成植被死亡和土壤侵蚀[34]。水分过程机制的核心是水交换失衡,包括冠层截留、渗透和蒸腾作用的破坏,进而影响整个生态系统的稳定性[35]。

2.4. 土壤过程机制

湿地土壤具有高有机质含量、高孔隙度和长期还原环境等典型特征,是湿地生态功能的重要物质基础[36]。土壤过程的机制主要聚焦于退化引起的物理、化学变化。围垦、排水和工程扰动使湿地土壤由“稳定碳汇”转变为“活跃碳源”,导致土壤氧化,有机碳氧化为 CO_2 释放,减少土壤有机质含量,并增加土壤密度和酸化,其退化过程往往具有不可逆性[7] [37]。一方面,排水后土壤体积收缩、结构塌陷,孔隙结构由大孔隙向小孔隙转变,土壤持水能力和缓冲能力显著下降[38]。另一方面,氧化条件增强导致有机质快速分解,微生物代谢从厌氧过程向好氧呼吸转变,使土壤有机碳库持续萎缩[30]。尤其是在泥炭湿地,排水诱发泥炭降解,释放大量的碳和氮,成为温室气体源。土壤过程还涉及氧化还原电位升高,促进铁、硫酸盐和氮的还原过程变化,影响土壤肥力。此外人类活动如过度放牧或农业活动也会增加土壤紧实度,降低孔隙率,阻碍水分渗透,导致营养元素如 N、P、K 流失[39]。在农业和城市化湿地中,外源营养盐和污染物的持续输入进一步加剧了土壤功能失衡。氮、磷富集改变了微生物群落组成和酶活性结构,可能诱导“富营养化-植被退化-内源污染释放”的恶性循环[40]。重金属和持久性有机污染物的积累则对植物根系和微生物群落产生长期毒性效应,削弱湿地修复潜力[41]。

2.5. 生物过程机制

水文和土壤环境变化最终反映在生物群落层面。生物过程机制包括微生物、植物和动物群落的动态变化[42]。湿地退化通常伴随着植被覆盖度下降、群落结构单一化以及优势种替代过程的加速。原本由多年生挺水植物、沉水植物和浮叶植物共同构成的复杂群落,逐渐被少数耐旱或耐盐物种所主导[43]。这种群落简化不仅降低了湿地的景观多样性,更重要的是削弱了生态系统功能的冗余度和稳定性。植被结构退化会改变根际微环境,影响微生物群落和养分循环过程。退化降低土壤微生物生物量和酶活性,如碳水化合物酶、氮酶和磷酶下降,影响营养循环[44]。微生物降解有机质的能力减弱,导致碳固存减少。同时,栖息地质量下降导致水禽、底栖动物和鱼类种群减少,湿地食物网结构趋于简化,生态系统对外界干扰的抵抗力明显下降[45]。

3. 湿地生态修复技术研究进展

3.1. 基于水体与水文过程的修复技术

水文修复被认为是湿地生态修复的核心技术,其目标并非简单抬升水位,而是恢复接近自然状态的水文动态过程,包括水位波动、洪泛节律和水体交换路径[46]。只有恢复或模拟接近自然的水文过程,其他修复措施才能发挥长期效应。在北美和欧洲,拆坝复河、恢复洪泛区连通性已成为河流湿地修复的主要手段[47]。大量研究表明,恢复季节性水位波动比维持恒定水位更有利于湿地生态功能的长期恢复[17] [48]。动态水位能够调控植被更新、抑制单一物种扩张,并促进沉积物和营养盐在空间上的重新分配。在泛滥平原湿地中,通过拆除堤坝或设置生态泄洪口,使洪水在特定时期进入湿地范围,可显著提高植被多样性和土壤有机质积累速率[49]。

与此同时,生态补水在干旱区和人为控水湿地中发挥着重要作用[50]。但研究也指出,单纯依赖外源补水而不恢复自然连通性,往往只能取得短期效果,且可能引发次生盐渍化或营养盐累积问题。因此,当前水文修复技术更强调“补水与连通并重”,通过恢复自然水动力过程激活湿地系统的自组织能力。水体修复除了水文恢复,更重要的还有污染物的去除,主要包括物理、化学和生物方法去除污染物[51]。在人工湿地处理废水中,广泛通过植物吸收和微生物降解去除氮磷。而在滨海盐沼修复中,利用潮汐动力学恢复水体。像我国太湖竺山湖湿地构建多起伏基底形态,促进水流循环,通过改善水动力,提高生物多样性,水质从劣V类升至II类[52]。

3.2. 基于土壤结构与功能恢复的修复技术

相较于水文修复,土壤修复往往见效缓慢,但对湿地长期稳定性具有决定性作用。近年来的研究逐渐认识到,湿地修复若忽视土壤过程,往往只能实现“表层恢复”,难以维持生态功能的持续性[53]。土壤修复的内容主要针对污染和退化,包括重金属去除和有机质恢复。地形重建是当前土壤修复中的重要技术之一。通过构建高低起伏的地形单元,可以在相同水位条件下形成湿润、间歇淹水和长期淹水等不同微环境,为多样化生物群落提供生境基础[54]。这种空间异质性被认为是提升湿地系统稳定性和恢复力的关键因素。重金属的去除目前普遍微生物修复技术,比如利用细菌矿化有机磷,降低污染物浓度,红树林湿地使用微生物调控汞污染[55]。此外,通过有机质补偿和改良材料投加,可改善土壤理化性质和微生物功能。生物炭、腐殖质等材料不仅能够提高土壤有机碳含量,还可增强土壤对营养盐和污染物的吸附能力,从而降低内源污染释放风险[56]。然而,不同材料在不同湿地类型中的适用性仍存在较大差异,其生态安全性和长期效应仍是当前研究关注的重点。

3.3. 基于动植物群落重建的生态修复技术

生物修复是湿地生态修复中最直观、也是最容易被社会关注的部分。当前研究逐渐从“单一物种引入”转向“群落结构与功能重建”,强调恢复物种之间的相互作用和生态网络结构[57]。在植被修复方面,国际研究普遍强调使用本地物种,并通过功能性状互补的方式构建多层次群落结构[58]。这种策略不仅有助于提升生产力,还能够增强系统对水位变化和营养盐波动的缓冲能力[59]。研究表明,具有发达根系和通气组织的挺水植物,在改善土壤氧化还原环境和调控温室气体排放方面具有重要作用[60]。外来种控制是关键,如移除互花米草。在动物修复方面,恢复关键功能类群(如底栖无脊椎动物、水禽和鱼类)被认为是重建湿地生态过程的重要途径[61]。这些动物通过摄食、扰动和迁移行为,直接参与营养盐循环和能量流动,对湿地系统稳定性产生深远影响。

3.4. 修复技术的比较与争议

尽管水文修复、土壤修复和生物修复技术在湿地生态修复中均取得了显著进展,但不同技术路径在适用条件、成本投入、修复效率、长期效果及潜在生态风险方面存在明显差异(见表1),相关研究也呈现出一定的争议。首先,水文修复虽被认为是湿地修复的“核心”,但其长期效果高度依赖于区域水文条件的可持续性。在缺水地区,单纯依靠外源生态补水往往难以维持水位稳定性,反而可能引发次生盐渍化或外来物种扩散问题。部分研究指出,动态水位调控虽然理论上更接近自然节律,但在实践中受到防洪、农业用水等社会需求的强烈制约,导致修复目标与社会经济目标之间的矛盾。其次,土壤修复技术,如生物炭添加、地形重建等,在提升碳汇功能和改善土壤结构方面显示出良好前景,但其成本较高,且长期生态安全性尚不明确。例如,生物炭对不同湿地类型中微生物群落的长期影响仍存在争议,部分研究发现其可能抑制某些关键功能菌群的活性。再者,生物修复中本地种引种与外来种控制策略在执行层

面常面临不确定性。移除入侵物种(如互花米草)后的生态位空缺可能导致二次入侵或本地种恢复失败。此外, 公众对某些修复措施(如植被砍伐、底泥疏浚)的接受度也影响了技术的推广应用。

Table 1. Comparison of the effects of different wetland restoration techniques
表 1. 不同湿地修复技术效果比较

修复类型	技术代表	成本投入	修复效率	生态风险	适用条件	长期效果
水文修复	生态补水、 连通性恢复	中 - 高	中 - 慢	次生盐渍化、 水资源竞争	缺水型、 断联型湿地	较好， 但依赖外部水源保障
土壤修复	生物炭添加、 地形重建	高	慢	材料生态毒性、 微生物功能改变	污染型、 有机质退化型湿地	较好， 但需长期监测
生物修复	本地种恢复、 外来种清除	低 - 中	中 - 快	二次入侵、 公众接受度低	植被退化型、 入侵型湿地	中等， 受群落演替动态影响

4. 综合讨论与未来展望

4.1. 湿地生态修复的系统化路径

为了更好地将湿地退化机制与修复路径衔接起来, 本文提出一个基于“退化诊断 - 目标设定 - 技术匹配 - 监测评估”的概念框架(如图 1 所示)。该框架旨在将分散的修复技术整合为系统化解解决方案, 指导不同情境下的修复实践。



Figure 1. Schematic diagram of the decision tree for wetland ecological restoration
图 1. 湿地生态修复决策树示意图

4.2. 社会经济维度与前沿科学问题

尽管湿地生态修复在技术层面取得了长足进步,但修复成效不仅取决于自然过程,还深受社会经济因素的制约。政策法规的完善程度、资金投入的持续性以及公众参与的积极性,往往决定了修复项目能否从试点走向规模化应用。因此,未来湿地修复应进一步融入生态补偿机制、绿色金融工具(如湿地碳汇交易)和社区共管模式,构建“政府引导-市场驱动-公众参与”的多元治理体系。在此基础上,未来湿地修复研究应聚焦以下更具前瞻性与交叉性的科学问题:

(1) 智能化精准诊断:如何利用多源遥感(如 Sentinel、Landsat)与人工智能(如深度学习、时间序列分析)技术,构建湿地退化的早期预警模型,实现对退化类型、程度与驱动因子的高精度、动态化识别?

(2) 微观过程调控:如何将基因组学(如宏基因组学)与代谢组学技术应用于修复后微生物群落的监测与调控,揭示关键功能菌群(如产甲烷菌、反硝化菌)的恢复机制,并开发靶向调控策略?

(3) 综合效益量化:如何构建耦合生态-社会经济效应的多维度评估模型,量化湿地修复对区域气候调节(如碳汇、局地降温)、水资源安全(如净化成本节约)及人类福祉(如休闲、健康)的综合贡献,为修复工程的投入产出分析提供科学依据?

(4) 全球变化适应性管理:在全球变暖与极端天气频发的背景下,如何设计具有“气候韧性”的湿地修复策略,使其能够在海平面上升、干旱加剧或洪水频发等情境下维持关键生态功能?

通过上述方向的探索,湿地生态修复有望从“经验驱动”迈向“数据-机制-决策”一体化的智慧修复范式,真正实现生态效益、社会效益与气候效益的协同提升。总体来看,湿地生态修复已从早期以工程措施为核心的“结构恢复”阶段,逐步转向以生态过程和系统功能为导向的综合修复阶段。未来研究需要更加注重不同技术之间的协同作用,避免单一技术路径导致的功能偏移或生态风险。在全球变化背景下,湿地修复应进一步纳入碳循环与温室气体调控目标,将湿地生态修复与气候变化缓解和适应策略相结合。同时,加强长期监测和多尺度评估,构建“管理措施-生态过程-系统功能”一体化框架,将是提升湿地修复科学性和可持续性的关键方向。

基金项目

山东省自然科学基金青年基金(ZR2025QC226); 2025 年山东四湖省级自然保护区生态保护和高质量发展科研项目。

参考文献

- [1] Günther, A., Barthelmes, A., Huth, V., Joosten, H., Jurasinski, G., Koebisch, F., *et al.* (2020) Prompt Rewetting of Drained Peatlands Reduces Climate Warming Despite Methane Emissions. *Nature Communications*, **11**, Article No. 1644. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>
- [2] Li, Z., Kong, L., Hu, L., Wei, J., Zhang, X., Guo, W., *et al.* (2024) Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands: A Bibliometric Analysis and Mini-Review. *Science of the Total Environment*, **906**, Article ID: 167582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167582>
- [3] Barry, T. (2025) Conservation and Restoration of Icelandic Wetlands: An Evaluation of Progress towards Implementation of the Ramsar Convention on Wetlands. *Wetlands*, **45**, Article No. 34. <https://doi.org/10.1007/s13157-025-01913-z>
- [4] Liu, F., Zhang, Y., Liang, H. and Gao, D. (2019) Long-Term Harvesting of Reeds Affects Greenhouse Gas Emissions and Microbial Functional Genes in Alkaline Wetlands. *Water Research*, **164**, Article ID: 114936. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114936>
- [5] Wang, X., Xiao, X., Xu, X., Zou, Z., Chen, B., Qin, Y., *et al.* (2021) Rebound in China's Coastal Wetlands Following Conservation and Restoration. *Nature Sustainability*, **4**, 1076-1083. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00793-5>
- [6] Peacock, C.L. (2025) Carbon Storage in Coastal Wetlands: Wetland Carbon. *Nature Geoscience*, **18**, 816-817. <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01773-6>

- [7] Wu, Y., Zhang, R., MacDougall, A.S., Tian, D., Wang, J. and Niu, S. (2025) Wetland Restoration Is Effective but Insufficient to Compensate for Soil Organic Carbon Losses from Degradation. *Global Ecology and Biogeography*, **34**, e70063. <https://doi.org/10.1111/geb.70063>
- [8] Turetsky, M.R., Kotowska, A., Bubier, J., Dise, N.B., Crill, P., Hornibrook, E.R.C., *et al.* (2014) A Synthesis of Methane Emissions from 71 Northern, Temperate, and Subtropical Wetlands. *Global Change Biology*, **20**, 2183-2197. <https://doi.org/10.1111/geb.12580>
- [9] Cao, M., Wang, F., Ma, S., Geng, H. and Sun, K. (2024) Recent Advances on Greenhouse Gas Emissions from Wetlands: Mechanism, Global Warming Potential, and Environmental Drivers. *Environmental Pollution*, **355**, Article ID: 124204. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124204>
- [10] 江丹丹, 山来才, 王辉. 湿地退化原因分析及修复方法概述[J]. 山东水利, 2021(9): 86-88.
- [11] Kundu, S., Kundu, B., Rana, N.K. and Mahato, S. (2024) Wetland Degradation and Its Impacts on Livelihoods and Sustainable Development Goals: An Overview. *Sustainable Production and Consumption*, **48**, 419-434. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.024>
- [12] UNEP (2021) Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies. United Nations Environment Programme.
- [13] IPBES (2019) Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat.
- [14] Kayendeke, E.J., Olabisi, L.S., Kansime, F. and Mfitumukiza, D. (2024) Leverage Points for Decelerating Wetland Degradation: A Case Study of the Wetland Agricultural System in Uganda. *Sustainability*, **16**, Article No. 10174. <https://doi.org/10.3390/su162310174>
- [15] Xu, G., Kang, X., Wang, F., Zhuang, W., Yan, W. and Zhang, K. (2024) Alpine Wetlands Degradation Leads to Soil Nutrient Imbalances That Affect Plant Growth and Microbial Diversity. *Communications Earth & Environment*, **5**, Article No. 397. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01562-w>
- [16] 杨阳, 张亦. 我国湿地研究现状与进展[J]. 环境工程, 2014, 32(7): 43-48+78.
- [17] Liu, Q., Gan, L., Wu, H., Liang, L., Yan, D., Wang, X., *et al.* (2025) Water Level Fluctuations Control Wetland Hydrological Connectivity in Driving the Integrity of Wetlands. *Journal of Hydrology*, **657**, Article ID: 133095. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133095>
- [18] Ding, J., Dou, M., Ge, W., Cao, Y., Guo, X., Yin, Y., *et al.* (2025) Degradation-Induced Changes in Soil Nutrient Availability Alter Leaf and Root Traits and Their Coordination in a Riparian Wetland Ecosystem. *Plant and Soil*, **514**, 2779-2795. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07544-x>
- [19] Yan, J., Zhu, J., Zhao, S. and Su, F. (2023) Coastal Wetland Degradation and Ecosystem Service Value Change in the Yellow River Delta, China. *Global Ecology and Conservation*, **44**, e02501. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02501>
- [20] Palmer, M.A., Menninger, H.L. and Bernhardt, E. (2010) River Restoration, Habitat Heterogeneity and Biodiversity: A Failure of Theory or Practice? *Freshwater Biology*, **55**, 205-222. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02372.x>
- [21] Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. and Maginnis, S. (2016) Nature-Based Solutions to Address Global Societal Challenges. IUCN, xiii+97.
- [22] 方小燕, 晏凯, 梁延岗, 等. 1990-2020 年汉江流域陕西段湿地重点区退化趋势及驱动力分析[J]. 湿地科学, 2025, 23(6): 1190-1200.
- [23] 刘诗琳, 刘吉平, 于洋. 1980-2020 年东北地区湿地变化驱动力分异研究[J]. 农业灾害研究, 2024, 14(10): 269-271.
- [24] 张倚浩, 阎建忠, 程先. 气候变化与人类活动对青藏高原湿地的影响研究进展[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2180-2193.
- [25] Gardner, R. C. and Finlayson, C. (2018) Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and Their Services to People. Ramsar Convention Secretariat.
- [26] 尹聪, 兰丽茜, 宋晓晓, 等. 黄河三角洲湿地发展概述及治理修复建议[J]. 海洋开发与管理, 2024, 41(2): 110-114.
- [27] 朱康辉, 温淼, 杨捷钧, 等. 土壤磷形态变化特征对毛乌素沙区湿地退化的响应[J]. 土壤通报, 2025, 56(3): 832-840.
- [28] Jiang, Y., Zou, Y., Sun, M., Zhu, W. and Xu, W. (2025) Wetland Degradation Promotes Soil P Fraction Transformation by Altering P-Cycling Functional Genes and Metabolic Pathways. *Frontiers in Microbiology*, **16**, Article 677320. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1677320>
- [29] Mao, D., Wang, Z., Wu, J., Wu, B., Zeng, Y., Song, K., *et al.* (2018) China's Wetlands Loss to Urban Expansion. *Land Degradation & Development*, **29**, 2644-2657. <https://doi.org/10.1002/ldr.2939>
- [30] 杨小立, 蔡竟芳, 王大郅, 等. 淹水和互花米草生物炭对滨海湿地土壤理化特征和微生物群落的影响[J]. 环境科

- 学学报, 2025, 45(8): 288-301.
- [31] 郝好鑫, 李红清, 陈雪宝, 等. 水位变化下菜子湖湿地多目标生态修复方案研究[J]. 湿地科学, 2024, 22(1): 120-128.
 - [32] 张天宝, 刘晓辉, 安雨, 等. 室内模拟水位下退耕还湿地表层土壤温室气体排放研究[J]. 湿地科学, 2019, 17(6): 705-712.
 - [33] Chen, M., Yang, Z., Abulaizi, M., Hu, Y., Tian, Y., Hu, Y., *et al.* (2023) Soil Bacterial Communities in Alpine Wetlands in Arid Central Asia Remain Stable during the Seasonal Freeze-Thaw Period. *Ecological Indicators*, **156**, Article ID: 111164. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111164>
 - [34] Haywood, B.J., Hayes, M.P., White, J.R. and Cook, R.L. (2020) Potential Fate of Wetland Soil Carbon in a Deltaic Coastal Wetland Subjected to High Relative Sea Level Rise. *Science of the Total Environment*, **711**, Article ID: 135185. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135185>
 - [35] Okotto-Okotto, J., Raburu, P.O., Obiero, K.O., Obwoyere, G.O., Mironga, J.M., Okotto, L.G., *et al.* (2016) Spatio-Temporal Impacts of Lake Victoria Water Level Recession on the Fringing Nyando Wetland, Kenya. *Wetlands*, **38**, 1107-1119. <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0831-y>
 - [36] Zheng, H., Liu, D., Yuan, J., Li, Y., Li, J., Miao, Y., *et al.* (2024) Wetland Restoration after Agricultural Abandonment Enhances Soil Organic Carbon Efficiently by Stimulating Plant- Rather than Microbial-Derived Carbon Accumulation in Northeast China. *CATENA*, **241**, Article ID: 108077. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108077>
 - [37] 马婵华, 李彤, 徐争强, 等. 若尔盖高寒湿地退化过程中土壤有机碳变化规律的研究[J]. 四川环境, 2025, 44(4): 53-61.
 - [38] Abulaizi, M., Chen, M., Tian, Y., Hu, Y., Han, D., Hu, Y., *et al.* (2025) Response of Soil Organic Carbon and Its Components to Alpine Wetland Degradation in Arid Central Asia. *Land*, **14**, Article No. 387. <https://doi.org/10.3390/land14020387>
 - [39] 唐明艳, 杨永兴. 不同人为干扰下纳帕海湖滨湿地植被及土壤退化特征[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6681-6693.
 - [40] Lin, C.Y., Li, X.L., Zhang, J., Sun, H.F., Zhang, J., Han, H.B., *et al.* (2021) Effects of Degradation Succession of Alpine Wetland on Soil Organic Carbon and Total Nitrogen in the Yellow River Source Zone, West China. *Journal of Mountain Science*, **18**, 694-705. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6117-0>
 - [41] Liang, J., Yang, Z., Tang, L., Zeng, G., Yu, M., Li, X., *et al.* (2017) Changes in Heavy Metal Mobility and Availability from Contaminated Wetland Soil Remediated with Combined Biochar-Compost. *Chemosphere*, **181**, 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.081>
 - [42] 王汝苗, 李晶, 刘魏魏, 等. 微生物代谢可塑性对退化湿地固碳的调控机制及生态恢复启示[J]. 林业科学, 2025, 61(7): 52-58.
 - [43] 马维伟, 李广, 石万里, 等. 甘肃尕斯库勒湖湿地退化过程中植物生物量及物种多样性变化动态[J]. 草地学报, 2016, 24(5): 960-966.
 - [44] 陈好, 马维伟, 龙永春, 等. 尕斯库勒湖湿地草甸土退化过程土壤氮矿化演变特征[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 3906-3919.
 - [45] 邵珍珍, 吴鹏飞. 小型表栖节肢动物群落对高寒湿地退化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 6990-7001.
 - [46] Zou, J., Ziegler, A.D., Chen, D., McNicol, G., Ciais, P., Jiang, X., *et al.* (2022) Rewetting Global Wetlands Effectively Reduces Major Greenhouse Gas Emissions. *Nature Geoscience*, **15**, 627-632. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00989-0>
 - [47] Waltham, N.J., Burrows, D., Wegscheidl, C., Buelow, C., Ronan, M., Connolly, N., *et al.* (2019) Lost Floodplain Wetland Environments and Efforts to Restore Connectivity, Habitat, and Water Quality Settings on the Great Barrier Reef. *Frontiers in Marine Science*, **6**, Article 71. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00071>
 - [48] Grabas, G.P., Fiorino, G.E. and Reinert, A. (2019) Vegetation Species Richness Is Associated with Daily Water-Level Fluctuations in Lake Ontario Coastal Wetlands. *Journal of Great Lakes Research*, **45**, 805-810. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.05.008>
 - [49] Brown, R.S., Murdock, J.N., Womble, S.G. and Duwadi, S. (2025) Floodwater Monitoring and Soil Incubations Reveal Complementary Nutrient Retention Patterns in a Reconnected Floodplain Wetland. *Freshwater Science*, **44**, 283-300. <https://doi.org/10.1086/737226>
 - [50] 王若楠, 贺国鑫, 饶刚, 等. 永定河潜流人工湿地对再生水的净化效果[J]. 湿地科学, 2025, 23(6): 1268-1276.
 - [51] 凌松, 杨盛林, 刘晓薇, 等. 生态补水型城市河湖湿地系统溶解性有机质来源解析及其与水质关联性[J]. 湖泊科学, 2024, 36(6): 1795-1807.
 - [52] 李春华, 叶春, 刘福兴, 等. 近自然湿地生态修复的概念、理论与实践[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 394-402.

-
- [53] Cui, L., Li, G., Ouyang, N., Mu, F., Yan, F., Zhang, Y., *et al.* (2018) Analyzing Coastal Wetland Degradation and Its Key Restoration Technologies in the Coastal Area of Jiangsu, China. *Wetlands*, **38**, 525-537. <https://doi.org/10.1007/s13157-018-0997-6>
- [54] Wan, D., Yu, P., Kong, L., Zhang, J., Chen, Y., Zhao, D., *et al.* (2024) Effects of Inland Salt Marsh Wetland Degradation on Plant Community Characteristics and Soil Properties. *Ecological Indicators*, **159**, Article ID: 111582. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111582>
- [55] Akram, H., Hussain, S., Mazumdar, P., Chua, K.O., Butt, T.E. and Harikrishna, J.A. (2023) Mangrove Health: A Review of Functions, Threats, and Challenges Associated with Mangrove Management Practices. *Forests*, **14**, Article No. 1698. <https://doi.org/10.3390/f14091698>
- [56] Bhaduri, D., Sihi, D., Bhowmik, A., Verma, B.C., Munda, S. and Dari, B. (2022) A Review on Effective Soil Health Bio-Indicators for Ecosystem Restoration and Sustainability. *Frontiers in Microbiology*, **13**, Article 938481. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>
- [57] Zheng, H., Liu, D., Li, Y., Chen, Z., Li, J., Dong, Y., *et al.* (2025) Wetland Restoration Suppresses Microbial Carbon Metabolism by Altering Keystone Species Interactions. *Frontiers in Microbiology*, **16**, Article 1570703. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1570703>
- [58] Wu, S., Dong, S., Wang, Z., Li, S., Ma, C. and Li, Z. (2024) Response of Species Dominance and Niche of Plant Community to Wetland Degradation along Alpine Lake Riparian. *Frontiers in Plant Science*, **15**, Article 1352834. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1352834>
- [59] 王梦梦, 张丽华, 当知才让, 等. 高寒湿地退化对植物群落特征与土壤特性的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 7910-7923.
- [60] Yang, T., Jiang, J., Shi, F., Cai, R., Jiang, H., Sheng, L., *et al.* (2024) Combination of Plant Species and Water Depth Enhance Soil Quality in Near-Natural Restoration of Reclaimed Wetland. *Ecological Engineering*, **208**, Article ID: 107376. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107376>
- [61] Liu, C.H., Shao, Y. and Cao, S.P. (2021) Soil Fauna Community Diversity and Response to Wetland Degradation in Nanniwan Wetland, Shaanxi, China. *Sains Malaysiana*, **50**, 1511-1520. <https://doi.org/10.17576/jsm-2021-5006-01>