



DOI: 10.5846/stxb202007311996

吴胜男, 王晓锋, 刘婷婷, 王继龙, 袁兴中, 何奕忻, 孔维苇. 基于 CiteSpace 的湿地恢复研究进展. 生态学报, 2022, 42(3): 1224-1239.

基于 CiteSpace 的湿地恢复研究进展

吴胜男^{1,2,3}, 王晓锋^{1,2,3,*}, 刘婷婷^{1,2}, 王继龙^{1,2,3}, 袁兴中^{1,2,3,4}, 何奕忻⁵, 孔维苇^{1,3}

1 长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室, 重庆 401331

2 三峡库区地表生态过程重庆市级野外科学观测研究站, 开州 405400

3 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

4 重庆大学建筑城规学院, 重庆 400030

5 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041

摘要: 由于人类活动、气候变化等影响, 全球湿地退化不断加剧, 关于湿地恢复的相关研究也越来越多, 但缺乏系统的文献梳理, 对研究领域的热点演变特征及发展趋势认识不足。基于文献计量学软件 CiteSpace 5.5.R2 及中国知网 (CNKI) 和 Web of Science 核心数据库检索的文献数据, 对湿地恢复领域的发文量、作者群、发文机构、文献共被引、高频关键词及突现等进行可视化分析。结果表明: (1) 国内外关于湿地恢复研究的发文量总体上均呈现增长趋势, 2008 年之后发文量均显著提升, 国内研究较国外晚了近 10 年, 但发展迅速, 国际影响力提升较快; (2) 国外主要研究机构包括 United States Geological Survey、Louisiana State University、University Florida、University Wisconsin 等, 均为美国机构, 形成了以 William JM-John WD、Zedler JB、Jos TA Verhoeven-Leon P M Lamers、Jeffrey WM 等核心研究团队; 国内以中国科学院、北京师范大学、中国林业科学研究院为主, 形成了崔保山-白军红、吕宪国-姜明-佟守正-薛振山、杨薇-孙涛、李伟-崔丽娟-张曼胤、欧阳志云-郑华-王效科、张平究等研究团队; 国内外湿地恢复研究团队及机构间联系虽较为紧密, 但仍待进一步加强; (3) 研究期间, 湿地恢复领域的发展经历了以水环境治理为目的的初期探索阶段、以系统性和功能性恢复为主的湿地恢复过程与评价研究阶段、应对人类活动与气候变化为主的湿地保护与修复阶段, 近十年湿地恢复理论体系不断完善, 研究主题更聚焦; (4) 国外湿地恢复研究的核心内容包括水文与水环境恢复、植被恢复与植物群落演替、人工湿地对水污染治理、生态系统管理与评价、生物多样性恢复等, 不同阶段研究的热点不同, 近十年来气候变化对滨海湿地的影响及恢复措施研究是主要的研究热点。国内湿地恢复研究主要内容与国外基本一致, 研究者在东北平原、三江源、黄河三角洲等典型区域开展了大量理论与技术探索; 近年来气候变化下滨海湿地的退化机制及生态响应也成为国内研究的热点; (5) 与国际湿地恢复研究相比, 国内湿地恢复研究应从长期湿地恢复过程监测、植物群落演替及调控、水文调控及模型预测、湿地生态系统管理等方面进一步给予更多关注, 尽快完善适应我国地理环境特征的湿地恢复研究的理论框架。湿地恢复研究目前仍处于快速发展期, 研究广度和深度不断增强, 未来长时间内, 气候变化和人类活动双重干扰下湿地恢复、保护、过程监测等仍是湿地科学的关注热点。

关键词: CiteSpace; 湿地恢复; 知识图谱; 研究进展; 热点演变

湿地是位于陆地生态系统与水生生态系统之间的过渡生态系统, 具有独特的土壤、植被、水文及生物特征, 与海洋、森林并称地球三大生态系统。湿地生态系统具有水源涵养、污染净化、生物多样性、气候调节及碳汇等多种生态功能, 同时具有脆弱性、过渡性、复杂性、高生产力以及高生物多样性等特征^[1-3], 因此成为受人类活动影响最大、退化最严重的生态系统类型^[4]。近半个多世纪以来, 全球自然湿地的损失率超过 50%^[5]。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41807321); 重庆市委基础研究与前沿探索 (cstc2018jcyjAX0672); 四川省科技计划项目 (2021YFS0286)

收稿日期: 2020-07-31; **网络出版日期:** 2021-10-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaofeng6540@163.com,

湿地退化已经成为影响人类社会可持续发展的重要限制因素^[5-6]。因此,湿地生态修复成为生态学、环境科学、地球科学等共同关注的热点。近年来,研究者围绕①变化环境下湿地生态系统结构与功能演变^[7],②退化湿地的关键生态过程及调控机制,包括水文过程、生物群落演替、生物地化过程等^[8-10],③湿地健康评估及生态管理^[11-12],④湿地生态恢复与重建^[13]等,形成了大量的研究成果。随着研究不断深入,湿地恢复生态学的研究热点也不断变化,从最初的退化现状调查、退化驱动因素分析,发展到退化湿地生态功能评估、恢复理论与技术研发,至今湿地生态管理及可持续利用等^[14-16]。随着湿地恢复理论的不完善,湿地恢复实践的不断探索,分析方法和研究手段的不断进步,以及湿地退化主导因素的不断改变,湿地恢复研究也从恢复理论和恢复技术研究向着“恢复-管理-保护-利用”整合研究转变^[17],逐渐形成了从宏观到微观,从全球尺度到区域尺度,从基础研究到技术研究等多维学科体系,成为恢复生态学的重要组成。至今,湿地恢复生态学研究从自然湿地恢复向着城市湿地、乡村湿地研究转变^[18-19],从单元湿地向着大江大河流域管理、全域湿地整体修复转变,从理论、技术的突破向着自然管理和自然恢复理念转变。尽管一些学者对湿地恢复相关研究进行了总结和综述^[17, 20],但由于湿地恢复研究广度和深度不断增强,宏观-微观尺度变化复杂,目前国内对湿地恢复研究热点的发展、转变、演化等综合分析鲜见报道。

文献计量学是以发文量、作者群、发文机构、被引文献、关键词时序演变及突现特征等作为分析对象,运用数学和计算机统计方法,分析学科发展过程、研究热点演变、研究力量分布等,进而提出学科发展方向^[21]。随着各学科文献数量大爆发,文献计量学成为了多种学科发展动态研究的重要方法。CiteSpace 知识图谱是由美国德雷塞尔大学信息科学与技术学院陈超美博士所开发的,用来分析、挖掘及进行科研文献可视化的应用软件^[22],具有极强的文献计量统计和知识图谱可视化功能,成为当前最流行的文献计量工具。国内外学者已经将其应用于生态工程^[23]、生态风险^[24]、生态经济^[25]、生态安全^[26]、城市森林^[27]、地理信息系统^[28]、可持续发展^[29]等方面。在湿地恢复研究已经发展到多学科、多领域和多方向的背景下,利用该软件文献计量和可视化分析,能够较好的进行湿地恢复生态学研究热点的探索。

本文借助 CiteSpace 5.5.R2 知识图谱软件和文献计量学分析,通过中国知网(CNKI)和 Web of Science 核心数据库检索,对湿地恢复相关文献进行可视化分析,描绘湿地恢复研究发文量、作者、发文机构、文献共被引以及关键词分析等知识图谱,对湿地恢复研究发展至今的研究成果作进一步的梳理和总结,旨在客观揭示湿地恢复研究的动态、发展过程及演变趋势,挖掘湿地恢复理论及实践研究的前沿与热点,以为湿地恢复研究提供科学参考。

1 研究方法

1.1 数据来源

数据选取于 CNKI 文献库和 Web of Science 核心数据集。中文文献的检索,选取 CNKI 中期刊、硕士、博士三个数据库,使用高级检索,以主题 = “湿地” 并且主题 = (“修复” 或 “恢复”) 精确检索,共得检索结果 7494 条。为保证选取文献质量,进一步对 CNKI 数据库进行筛选,选取 SCI 来源期刊(限中文)、EI 来源期刊、核心期刊、CSSCI、CSCD 五个核心数据库,精确检索,最终整理有效文献 1236 条(检索截止日为 2021 年 1 月 1 日)。外文文献数据样本选择 Web of Science 中核心数据库,以主题 = “Wetland recovery” OR “Wetland restoration” OR “Wetland rejuvenation” 进行检索,文献类型选择 “article”,共得检索结果为 7922 篇,将检索结果分为国内和国外两部分,其中,国内相关文献共检索到 981 篇,去重后得出有效文献共 976 篇;国外相关文献共 6941 篇,去重后得出有效文献共 6173 篇,分布于 1981—2021 年。

1.2 分析方法

本文对湿地恢复概念提出以来的中外文献进行发文量、关键词、作者群体、发文机构、发文期刊、高被引作者及论文等分别进行分析和可视化,所有分析均采用 CiteSpace 5.5R2 版本进行。

2 结果与分析

2.1 发文量的时间分析

2.1.1 国外研究发文量时序分析

国外湿地恢复研究自 1981 年起呈持续上升趋势。从发文数量时间变化看,国外湿地恢复研究大致可以分为 3 个阶段:(1)1981—1990 年为起步阶段,湿地恢复研究极少,主要因为人类对湿地生态功能认识仍较为薄弱;(2)1991—2009 年为发展期,外文文献数量逐年上升。1992 年联合国环境与发展会议提出全球生态环境退化的严峻性之后,湿地功能退化及恢复研究迅速发展;(3)2010—2020 年为快速增长期,文献增长速率较前一阶段提高了 1 倍。经过近 40 年的发展,国际湿地恢复研究仍然处于发展阶段。尤其 2018 年 Ramsar Convention 发布《Global Wetland Outlook》,指出全球湿地(特别是亚洲)仍处于不断恶化阶段,并呼吁湿地健康关乎地球生命系统的可持续发展^[30];同时,Kirwan 等提出,湿地对全球气候变化具有重要的缓冲价值和负反馈,有效的湿地恢复将成为应对气候变化的重要途径^[7]。在全球环境变化不断加剧的背景下,湿地恢复研究对全球生态稳定具有独特意义,受到越来越多的关注。

2.1.2 国内研究发文量时序分析

国内湿地恢复研究起步较晚,但发展迅速(图 1)。中文文献发文总量呈现明显的阶段性:2000 年之前,处于零散研究期,2001—2010 年为高速增长期,2010 年至今属波动稳定期;尽管中文文献总量大,2006 年之后甚至超过国外英文文献发文量,但核心数据检索量占比较少(约 22%),高质量成果占比低。同时,国内学者发表的外文文献数量 2005 年之后缓慢增加,2014 年后呈爆发式增长,2015 年之后发文量超过中文核心期刊的发文量,在国际湿地恢复研究的贡献快速提升(近三年发文量占外文发文量的 26%,仅次于美国)。2000 年之前,我国处于生态破坏型的经济发展阶段,湿地退化严重^[31],仅围绕太湖^[32]、东湖^[33]以及沿海滩涂^[20]等退化湿地开展少量研究。2000 年,我国正式发布了《中国湿地保护行动计划》,2004 年通过了《全国湿地保护工程规划》(2004—2030 年),标志着我国大规模湿地保护和恢复工作正式开始^[15]。十八大生态文明建设战略的提出,进一步推动了我国湿地保护与修复研究工作的发展。

2.2 研究团队分析

2.2.1 国外发文团队分析

使用 CiteSpace 对国外湿地恢复领域发文团队进行分析,得到作者合作图谱(图 2),该图谱有 847 个节点,1097 条连接,网络密度为 0.0031。节点圈层颜色表示作者发文时间的变化,颜色越亮,作者发文时间距现在越近;节点越大说明作者的发文量越多;连接线条的颜色越深表明作者之间的合作越密切。从图 2 可以看出,发文数量最多的学者有 William JM,出现频次为 51 次;Zedler JB,出现频次为 44 次;John WD,出现频次为 36 次。发文量在 15 篇以上的作者还有 Jeffrey WM、Robert RT、Robert Rlane、Jos TA Verhoeven 等,高发文量的学者主要来自美国和荷兰。从作者关联分析,国外湿地恢复研究形成了 William JM-John WD 团队、Zedler JB 团队、Jos TA Verhoeven-Leon P M Lamers 团队、Jeffrey WM 团队等主要力量,其他团队发文量较少。William J Mitsch 是国际湿地生态工程研究的奠基者,该团队在湿地生态恢复领域的影响最大;Zedler JB 团队主要研究湿地恢复过程的生态调控机制、滨海湿地管理与恢复评价,围绕密西西比河上游湿地恢复及河口-滨海湿地生物多样性恢复方面开展了大量研究工作^[34];Jos TA Verhoeven-Leon P M Lamers 团队是欧洲泥炭地研究的主

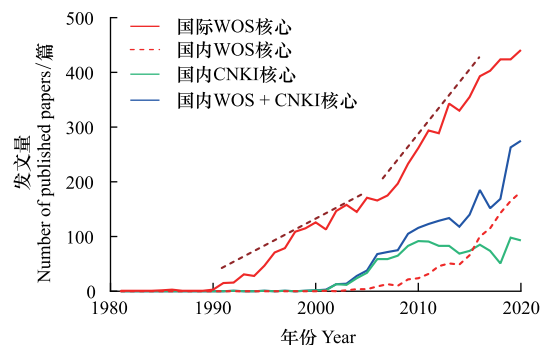


图 1 1981—2020 年湿地恢复研究领域中外文文献发文数量
Fig.1 The number of domestic and international literatures published on wetland restoration from 1981 to 2019

要力量,与 Jeffrey WM 团队分别在湿地(泥炭地、河流、盐碱湿地)生态恢复过程(生物过程、水过程、生物地化过程)、湿地生态系统服务功能研究^[35—36]及湿地补偿对策^[37]等方面开展了相关工作。从作者网络图谱来看,国际研究者之间交流较多,团队间联系较为密切。

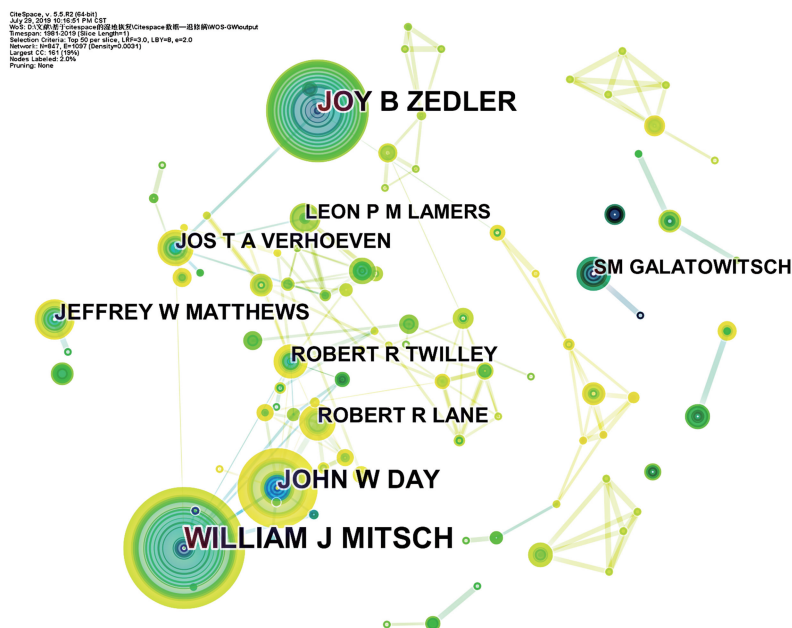


图 2 1981—2020 年湿地恢复外文文献发文作者图谱

Fig.2 Author's map of international studies on the wetland restoration from 1981 to 2020

2.2.2 国内发文团队分析

国内湿地恢复研究的作者图谱中,外文发文作者图谱 3(WOS 数据库)有 219 个节点,421 条连接,网络密度为 0.0176;中文图谱 3(CNKI 数据库)有 221 个节点,326 条连接,网络密度为 0.0134,均低于国际发文作者图谱的网络密度。分析可见,国内研究团队主要有崔保山-白军红、吕宪国-姜明-佟守正-薛振山、杨薇-孙涛、李伟-崔丽娟-张曼胤、欧阳志云-郑华-王效科、张平究等,其中崔保山、吕宪国团队在英文和中文期刊的发文量均较大,崔丽娟团队是中文文献中发文量最大的团队。

崔保山团队常年围绕黄河河口三角洲湿地的生态需水和水文过程调控等开展相关研究,重点开展了人类活动(城市化、围填海活动、重大工程建设等)影响下河口-滨海湿地生态过程及修复研究^[38—39];吕宪国-姜明-佟守正-薛振山团队则以我国东北典型退化湿地为核心,对我国沼泽湿地发育、结构与功能评价、生物多样性监测、生态恢复与生态恢复及重建技术、景观格局演变以及高精度资源调查等方面具有重要贡献^[40—42];李伟-崔丽娟-张曼胤团队在湿地生态功能评价、湿地管理、湿地恢复技术等领域发挥重要作用^[43—44],制定了系列湿地恢复技术标准,倡导“城市湿地”、“小微湿地”的保护与修复^[45—46]。欧阳志云-郑华-王效科团队主要是基于湿地生态服务功能评价及生态规划对我国湿地保护管理对策进行优化^[47—48]。总体上,我国湿地恢复研究已经形成稳定团队,且分别在河口/滨海湿地、东北沼泽湿地、内陆典型湿地修复,以及湿地资源保护与管理等领域开展了丰富的研究工作。尽管如此,我国湿地类型众多,退化驱动因素复杂,湿地恢复研究仍需加强不同团队之间的合作,提高国家尺度湿地恢复研究队伍的凝聚。

2.3 发文机构分析

为探索国内外湿地恢复研究的主要机构力量,使用 CiteSpace 对文献发文机构进行可视化分析(图 4、图 5)。可视化图谱中每个节点表示一个机构,节点的大小表示其发文量,图谱中带有紫色外圈的节点为高中心性节点(中心性>0.1),起到节点间关联纽带的作用。国外发文机构图谱有 309 个节点,616 条连接,网络密度

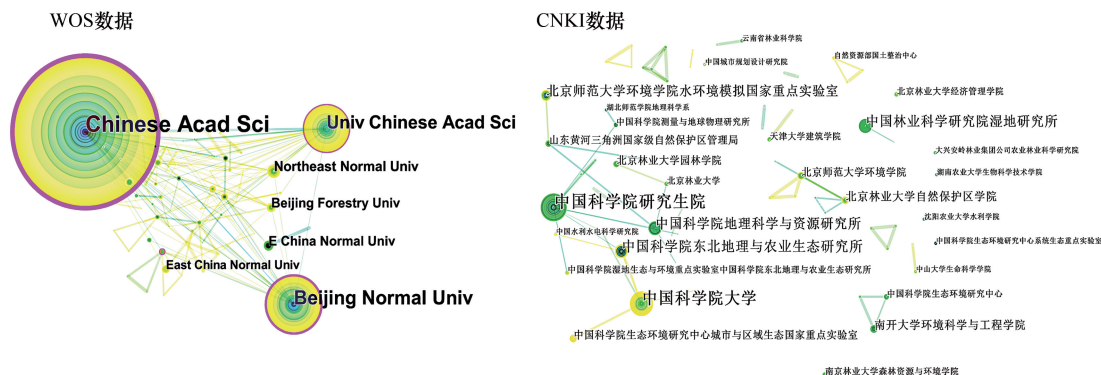


图5 1992—2020 年湿地恢复国内发文机构图谱

Fig.5 Map of domestic publishing institutions of studies on wetland restoration from 1992 to 2020

时间线分析文献在不同时间段的共被引情况(即突现性)。中心性越高的文献能够反映一个研究领域的基础理论或基础知识,突现性高的文献则反映一定时期内研究热点的转变,对该领域发展方向具有一定指示意义^[21]。通过对共被引文献的主题聚类,可以较好的反映基础研究的发展历程^[26]。由于目前 Citespace 仅支持英文文献共被引分析,因此本研究仅对 WOS 核心数据库中中英文文献进行分析,时间区间设为 1981—2020 年,Node Type 选择为 Reference,阈值设置为 Top 50 per slice,选取最短路径(Pathfinder)算法,最后得到 1366 个节点、3888 条连线的文献共被引聚类图谱(图 6)。

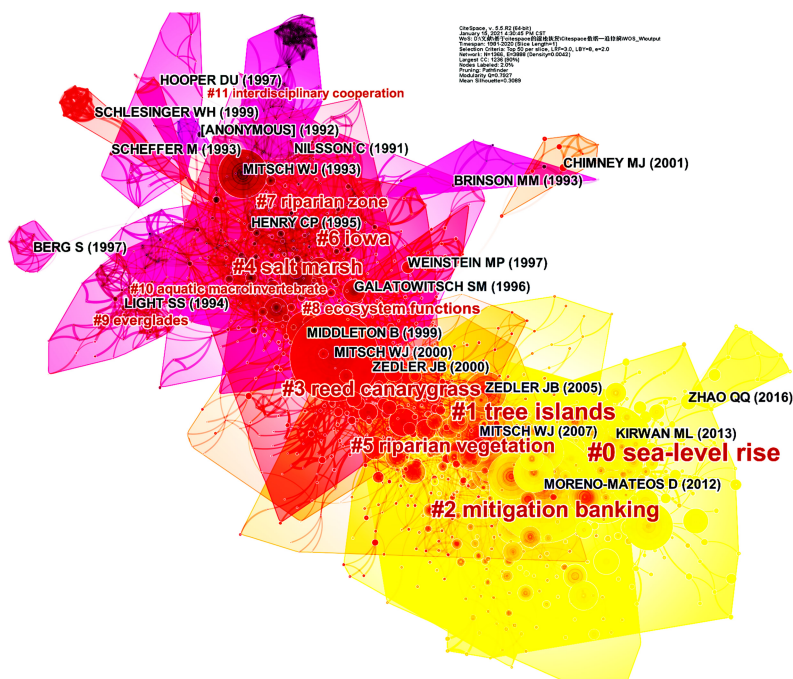


图6 1981—2020 年国内外湿地恢复研究的文献共被引图谱

Fig.6 Co-citation map of the international literatures about wetland restoration from 1981 to 2020

文献共被引聚类图谱中,共得到 21 个聚类主题(表 1),根据时间轴切片可清晰的划分为 3 个阶段:

第一阶段为 2000 年前,涉及的聚类主题最多(13 个),属于湿地恢复理论与技术的早期摸索阶段。从所含聚类主题分析,该阶段基本形成了以沼泽、湖泊为对象,以水环境治理为目的的湿地恢复研究阶段,同时在湿地退化评价和湿地恢复方法方面进行了初步探索。1975 年至 1985 年,美国环保署开始实施以水污染治理

为目的的湿地恢复项目可行性评估^[51],到 20 世纪 90 年代,美国佛罗里达大沼泽、密西西比河上游湿地、墨西哥湾、特拉华湾等开展湿地恢复项目,之后瑞典、西班牙、瑞士、丹麦等欧洲国家也开展湿地恢复研究^[15, 20, 51—53],并逐渐形成北美和欧洲两个主要的研究中心^[2, 15]。然而,尽管开展了恢复项目,但仍缺乏充分的理论研究,因此未形成高被引或高突现文献(表 4、5)。直至 1999 年,Zedler JB 指出“人工的湿地恢复工程可能无法达到功能恢复的目的,难以与自然湿地的功能等效”^[54],使得湿地恢复研究开始从重形态向重功能恢复转变,成为转折性文献。

表 1 文献共被引聚类主题表

Table 1 Clustering theme of the co-cited reference

聚类名称 Clueter name	大小 Size	同质性 Silhouette	平均年份 Mean year	聚类名称 Clueter name	大小 Size	同质性 Silhouette	平均年份 Mean year
#0 sea level rise	161	0.887	2012	#11 interdisciplinary	42	0.970	1990
#1 tree islands	139	0.799	2007	#12 eutrophication	20	0.986	1993
#2 mitigation banking	125	0.832	2008	#13 health assessment	19	0.979	2001
#3 reed canarygrass	110	0.861	2000	#14 conservation tillage	16	0.996	1999
#4 salt marsh	108	0.834	1994	#15 reference standards	11	0.984	1992
#5 riparian vegetation	101	0.785	2003	#16 great lakes	11	0.999	1995
#6 Iowa	100	0.776	1995	#17 Yellow River delta	10	0.992	2016
#7 riparian zone	78	0.733	1996	#18 nutrient removal project	9	0.993	2002
#8 ecosystem functions	63	0.841	1998	#19 spartina-foliosa	8	0.992	1989
#9 everglades	53	0.944	1995	#20 potamogeton crispus	5	0.994	1995
#10 macroinvertebrate	47	0.878	1995				

第二阶段(2001—2009 年),研究主题更聚焦于湿地恢复的多样性、复杂性和系统性,如何有效评价湿地功能恢复效果成为研究的重心,进入了以湿地系统恢复为主要目的的研究阶段。该阶段共被引文献聚类主题主要是“nutrient removal project”、“health assessment”、“riparian vegetation”、“tree islands”,高被引和高突现文献较多(表 2),表明学科理论体系逐渐完善并得到了较好的发展,形成了一些湿地恢复研究的基础理论^[55]。2000 年,Zedler JB 发表“Progress in wetland restoration ecology”,提出湿地恢复过程不仅受水的制约,也受到景观、地形、土壤、养分、干扰、生物入侵、种子库等空间因子制约,湿地恢复不仅需要考虑水要素,更要考虑注重功能性、系统性及可预测性的设计,其主张湿地恢复过程的可预测性是评估恢复项目成功与否的关键^[55]。Cui 等^[38]基于黄河三角洲湿地恢复 7 年的观测,利用水质、土壤盐度、有机质、植物群落及鸟类种类等指标进行了湿地恢复效果评价,提出尽管淡水输入工程对黄河三角洲湿地恢复具有显著作用,但恢复过程仍存在不可预测性,长期的湿地监测至关重要。同期,崔保山等^[56—58]基于生态学原理,提出了湿地生态系统健康评价的理论与方法,明确了湿地健康评价应从结构、功能、变化以及干扰等方面进行指标选择,形成了以湿地生态特征、功能整合性特征及社会政治环境特征三方面的评价理论,促使以湿地功能的系统性恢复为主要目标的研究阶段的发展。作为一个特殊的“自然-社会-经济”复合生态系统,生态系统服务功能评价也在该阶段被用于湿地恢复的评价^[59-60]。Zedler 等^[6]对全球湿地生态服务功能退化进行评估,提出湿地生态服务价值丧失具有不可逆性,进一步推动湿地恢复向着功能恢复为目的的研究方向发展。由此,该阶段形成了生态系统视角的湿地恢复的评价方法,且指出湿地恢复更注重结构与功能的同步恢复。

此外,“mitigation banking”自该阶段开始成为主要聚类主题。“mitigation banking”是美国在上世纪 70 年代提出的生态补偿策略。管理者恢复受损湿地或人工营造湿地,并以货币形式出售给开发者,以补偿其对湿地的破坏^[61]。然而,从功能恢复的视角,Zedler 等指出人工恢复湿地功能不能与自然湿地等效,对 mitigation banking 政策能否达到预期效果开展了系列讨论,并提出了优化方案^[54—55]。该阶段湿地恢复研究已经涉及河流、湖泊、滨海、沼泽、库塘等所有湿地类型^[51],且国内外湿地恢复项目也大范围开展,并有意识的建立了部分

长期监测站点,为湿地生态过程的长期评估提供了重要基础。

表 2 高被引文献与高突现文献信息表
Table 2 Information of highly cited and high bursts literatures

频次 Frequency	作者 Author	年份 Year	文献 Literature	主要论点 Main idea	突现性 Bursts	突现值 Strength
138	Moreno-Mateos D	2012	Structural and Functional Loss in Restored Wetland Ecosystems	湿地恢复工程在世纪尺度上不能完全恢复湿地结构和功能	△[1]	40.79
88	Barbier EB	2011	The value of estuarine and coastal ecosystem services	河口、海岸湿地具有较高的生态系统服务价值,应纳入全球各地长期生态恢复计划	△[2]	32.64
72	McLeod E	2011	A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO ₂	滨海湿地具有蓝碳功能,人类活动和气候变化导致滨海湿地蓝碳功能严重退化,迫切需要恢复和保护措施防止进一步的退化和流失	△[6]	25.42
68	Erwin KL	2009	Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world	气候变化导致湿地恢复过程更加复杂,不同地理区域的湿地要采用不同的管理和恢复技术	△[8]	22.81
67	Kirwan ML	2013	Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise	人类活动和海平面升高导致滨海湿地的稳定性面临严峻威胁	△[4]	26.62
65	Davidson NC	2014	How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area	全球自然湿地的退化是长期和普遍的,并且退化速度仍在加快,气候变化对湿地退化的等于甚至高于人类活动	×	
61	Zedler JB	2005	Wetland Resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability	湿地资源不断减少,生态系统服务功能持续丧失,且这种丧失是不可逆的,人工恢复难以替代	△[3]	27.67
60	John W Day	2007	Restoration of the Mississippi Delta: Lessons from Hurricanes Katrina and Rita	河口三角洲地区应同所在区域的发展计划协同制定大规模的恢复计划,实现多目标的生态恢复	△[10]	21.09
55	Zedler JB	2000	Progress in wetland restoration ecology	可预测性是评价湿地恢复项目成败的关键	△[5]	25.72
55	Zedler JB	1999	Tracking Wetland Restoration: Do Mitigation Sites Follow Desired Trajectories?	人工恢复湿地无法达到功能恢复的预期,难以与自然湿地的功能等效,湿地补偿措施可能无法达到湿地功能恢复的效果	△[9]	22.41
55	Costanza R	2014	Changes in the global value of ecosystem services	湿地的生态系统服务价值高于其他任何生态系统,但全球土地利用和气候变化导致这部分价值严重退化	△[7]	24.68
50	Cui BS	2009	Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China	水文调控有效的恢复了黄河三角洲湿地生态系统结构,但仍存在单一物种带来的生境均质化问题,湿地演变和有机碳积累过程仍存在不确定性	×	

文献突现性栏中×表示非高突现文献,△表示高突现文献,[数字]表示突现性排序

第三阶段(2010 年至今)基本进入以应对气候变化和人类活动为目的的湿地恢复研究阶段,包含的聚类主题有“#0 sea level rise”和“#17 Yellow river delta”。从表 2 可见,2010 年之后形成了较多的高突现文献,表明湿地恢复研究出现了新的研究热点。该阶段湿地恢复在应对气候变化中的价值受到广泛关注^[7, 10, 64—65],这与全球环境变化的热点基本相符。2009 年,Erwin 等^[64]指出气候变化成为全球湿地退化的主要驱动力。一方面,全球气候变化导致海平面上升,滨海湿地面积萎缩、土壤与植被变化、碳汇功能退化等问题凸显^[7];另一方面,气候变化也会加剧高纬度和高寒地区湿地面积的萎缩和生态功能退化^[66—67]。McLeod 等^[10]提出滨海湿地具有重要的蓝碳功能,海平面升高导致蓝碳功能的退化;Kirwan 等^[7]也指出人类活动和海平面升高导

致滨海湿地的稳定性面临巨大威胁;Barbier 等^[59]对全球各种类型的河口-海岸湿地的生态服务功能进行了评估,提出气候变化将加速海岸系统的退化。这些研究成为该阶段研究热点发展的知识基础,气候变化背景下滨海湿地生态响应及恢复成为该阶段最重要的研究内容。然而,该阶段对高纬度、高寒地区的湿地退化研究相对薄弱,未来也应进一步加强。此外,过去 40 年全球开展了大量湿地恢复项目,大尺度的湿地恢复工程的长期监测、演变规律以及应对气候变化中的贡献等需要持续关注^[68]。未来一段时间,人类活动和气候变化双重干扰下的湿地功能保护与可持续恢复理论与方法的突破是湿地恢复生态学的重要方向。

2.4.2 核心关键词及其时序演变特征分析

关键词分析能够反映研究时段内研究主题的前沿热点。借助 CiteSpace 可对研究期间文献高频关键词进行提取,进一步对关键词进行聚类 and 突现性分析。聚类分析能够揭示关键词间的关联和时间线视图,反映研究期间的主要研究内容^[27],在一定程度上能揭示研究领域内各知识的形成和发展^[24]。关键词突现性指一定时期内关键词出现频率的快速增加,反映该时段的研究热点或新的研究趋势^[24],探索目前在湿地恢复研究热点的演化趋势^[21]。

国外湿地恢复研究文献的关键词聚类见表 3。总体看,几个聚类主题的基础关键词在 2000 年之前均已出现,表明早期探索阶段湿地恢复研究的知识体系已经基本形成,尽管之后大量湿地恢复文献出现,但并未脱离早期的知识基础。从高频关键词分布分析(表 3),1991—2020 年间,湿地恢复研究已经涵盖了“lake”、

表 3 国外高频关键词聚类及时序演变

Table 3 Clustering analysis of the high frequency keywords from international literatures and their timely sequencing

聚类 Cluster	年份 Year		
	1991—2000	2001—2009	2010—2020
#0 hydrology and water quality	nitrogen (37)、hydrology (25)、phosphorus (22)、eutrophication (18)、lake (16)、sediment(23)、dynamics (34)、stream (20)、soil (28)、pattern(22)	nitrogen (90)、hydrology (68)、phosphorus (95)、eutrophication (41)、lake (58)、sediment (48)、dynamics (103)、stream (15)、soil (78)、pattern (82) constructed wetland (70)、nutrient (48)、river (73)、water (86)、water quality (62)	nitrogen (194)、hydrology (133)、phosphorus (182)、eutrophication (100)、lake (70)、sediment (162)、dynamics (208)、stream (69)、soil (120)、pattern (159) constructed wetland (178)、nutrient (98)、river (187)、water (238)、water quality (171) carbon (91)、biogeochemical (78)、removal (71)、model (124)、USA (42)
#1 vegetation and community	vegetation (55)、succession (24)、community (22)、growth (31)、habitat (26)	vegetation (191)、succession (39)、community (99)、growth (95)、habitat (63) plant (72)、biodiversity (56)、everglade (55)、species richness (55)、diversity (69)、marsh (43)、floodplain (46)	vegetation (466)、succession (9)、community (203)、growth (148)、habitat (182) plant (112)、biodiversity (259)、everglade (54)、species richness (90)、diversity (209)、marsh (45)、floodplain (69) bioma (42)、abundance (45)、population (77)、peatland (36)
#2 ecosystem management and conservation	management (36)、ecosystem (20)、conservation (19)、mitigation (22)、disturbance (33)、forest (19)	management (120)、ecosystem (106)、conservation (91)、mitigation (21)、disturbance (57)、forest (36) impact (42)、response (41)、ecology (66)、assessment (22)	management (396)、ecosystem (464)、conservation (301)、mitigation (20)、disturbance (35)、forest (95) impact (218)、response (143)、ecology (125)、assessment (69) ecosystem service (246)、system (72)、indicator (52)
#3 salt marsh and coastal wetland	salt marsh (37)、Louisiana (18)	salt marsh (139)、Louisiana (35)	salt marsh (239)、Louisiana (77) climate change (266)、sea level rise (112)、coastal wetland (105)、salinity (97)、estuary (46)、mangrove (43)
#4 landsat			land use (145)、landscape (112)

() 中数字表示关键词出现频次

“river”、“everglade”、“salt marsh”、“constructed wetland”等众多湿地类型,重点关注水文与水环境、植被

恢复与植物群落演替、生物地化循环、生态系统管理、生态系统服务功能、生物多样性、湿地生态系统管理等方面。从关键词聚类分析,湿地恢复研究基础方向主要有(1)湿地水文与水环境,(2)湿地植物群落与植被,(3)湿地生态系统管理与评价。同时气候变化下滨海盐沼湿地恢复单独聚为一类,在 2010 年之后得到广泛研究。因此湿地恢复研究领域的主要目标是水、生物及生态的恢复,这与崔保山等^[20]在 2000 年初提出的观点一致。

从不同时段高频关键词分布(表 3)及关键词突现性来看(表 4),各方面研究内容随时间推移深度和广度均不断增加,同时新的研究热点不断涌现。1991 年之前,并未出现高频关键词和关键词突现。1991—2000 年间,水体富营养化的诊断及氮、磷营养物去除研究,退化湿地植物群落演替过程研究,湿地生态系统管理、保护、缓冲等理论研究是最主要的内容,“*succession*”、“*mitigation*”、“*seed bank*”、“*macrophyte*”、“*spartina alterniflora*”等关键词突现性较高,湿地退化过程中植物群落演替机制^[69]、“湿地缓冲银行”^[70]、互花米草在湿地植被恢复中的应用^[71]是该阶段的研究热点。

2001—2009 年,利用人工湿地进行水质净化的研究开始得到广泛研究^[72]。随着生态学原理的引入,种群动态调控技术、群落结构优化配置与组建技术、群落演替控制与恢复技术、种群行为控制技术、种群行为恢复技术等湿地植被恢复技术不断完善^[15],同时适生植物筛选、植物生长、生理适应等得到较多的研究^[73—74]。生态系统管理方面开始注重生态系统原理在湿地恢复中的运用,生态系统评价、生物多样性评价得到一定发展。该阶段突现性较高的关键词有“*constructed wetlands*”、“*assessment*”、“*organic matter*”、“*ecosystem service*”、“*establishment*”、“*groundwater*”等,人工湿地、湿地恢复效果评估、种群形成、地下水、生态服务等湿地该阶段的研究热点。

2010—2020 年,(1)湿地土壤、水体中碳、氮生物地化循环过程研究,(2)湿地恢复过程中水、生物、土壤要素与植被恢复的关系构建^[15, 51], (3)生态系统服务功能评价等内容受到越来越多的关注。湿地恢复研究不在关注单一要素变化,开始重视湿地生态系统各要素的演变关系^[5, 75]。同时,气候变化、海平面升高影响下滨海湿地生态系统退化与恢复研究成为该阶段的重要研究主题。高突现的关键词主要有“*ecosystem service*”、“*climate change*”、“*sea level rise*”、“*land use*”、“*coastal wetland*”等,表明研究热点集中于湿地生态系统服务功能评估、人类活动与气候变化双重干扰下滨海湿地退化与恢复研究。综合关键词和热点演变看,国外湿地恢复研究经历了从单一要素向综合要素的研究发展,从重结构恢复到功能恢复为主的发展,从问题诊断向生态系统功能响应及系统评估研究发展,从以人类活动为主导的退化湿地修复与重建向应对人类活动-气候变化共同干扰的湿地修复发展等若干方面的进步,研究体系仍在不断扩展和深化。

我国湿地恢复研究高频关键词聚类与突现性分析见表 4、表 5。我国研究者发表在外文期刊的文献分析中,高频关键词主要有“*coastal wetland*”、“*climate change*”、“*community*”、“*vegetation*”、“*constructed wetland*”、“*ecosystem service*”、“*management*”、“*biodiversity*”、“*dynamics*”、“*soil*”、“*nitrogen*”、“*phosphorus*”、“*sediment*”等。国内发表的中文文献关键词分析结果大体一致,新增“景观设计”、“湿地公园”、“城市湿地”、“可持续发展”等。与国外研究比较来看,国内湿地恢复研究高频关键词的构成及聚类与国外研究基本一致,表明我国湿地恢复研究起步较晚,但研究体系已经基本形成。从我国学者发表的外文文献的关键词突现分析可见(表 4),我国湿地恢复研究热点在 2010 年前主要是水体富营养化控制及水污染治理,与国外 1991—2000 年的热点相似;2010 年之后生物地球化学、生物多样性、有机碳、气候变化等成为湿地恢复研究的热点,这与国外湿地恢复研究近 10 年的热点保持同步。而中文文献在 2010 年之前的研究热点是湿地保护与可持续发展对策研究,2010 年之后研究热点转变为生态系统评价、生物多样性、人工湿地、植被恢复、滨海湿地、生态工程、海绵城市、湿地公园、生态系统服务等方面(表 4)。

然而,湿地恢复受到湿地发育阶段、自然地理环境以及人类活动等多方面因素的影响^[17],不同地区湿地恢复研究应考虑时空差异。当前,我国湿地恢复的研究对象涵盖太湖、巢湖、洞庭湖、武汉东湖、滇池等湖泊,东北地区和若尔盖地区的沼泽,松嫩平原、黄河三角洲、长江口等河口、海岸湿地,以及红树林湿地等多种类型^[15],尤其在东北沼泽湿地、三江源湿地、黄河三角洲以及滨海湿地研究中取得了丰富的研究成果^[76—80](表 4)。

表 4 1981—2020 年国内外湿地恢复文献突现词信息表
Table 4 List of keywords with high bursts strength in domestic and international literatures about wetland restoration from 1981 to 2020

国外湿地恢复研究关键词突现						国内湿地恢复研究关键词突现					
Burst analysis of the keywords from international researches						Burst analysis of the keywords from domestic literatures					
关键词 Keywords	年份 Year	强度 Strength	起 Begin	终 End	1991—2020	关键词 Keywords	年份 Year	强度 Strength	起 Begin	终 End	2000—2020
Soil	1991	4.8	1991	1995		Wetland	2000	10.6	2004	2010	
	1991	24.4	1994	2004		Phosphorus	2000	4.2	2006	2010	
	1991	7.0	1995	2003		Macrophyte	2000	4.9	2006	2015	
Plant community	1991	8.1	1996	2004		Nitrogen	2000	3.5	2008	2012	
	1991	22.1	1996	2003		Water quality	2000	4.5	2010	2015	
Community structure	1991	7.4	1996	2005		Waste water	2000	5.6	2011	2016	
	1991	18.5	1996	2006		Shallow lake	2000	3.4	2011	2015	
Seed bank	1991	11.5	1997	2003		Bird	2000	3.6	2014	2015	
North carolina	1991	8.2	1997	2002		Poyang lake	2000	3.3	2014	2016	
Florida	1991	10.8	1997	2004		Biogeochemistry	2000	4.2	2014	2015	
Fish	1991	8.4	1998	2006		Species richness	2000	3.5	2014	2017	
Bird	1991	19.0	1999	2004		Ecosystem service	2000	3.4	2015	2016	
Spartina alterniflora	1991	9.2	1999	2002		Pollution	2000	5.1	2016	2017	
Organic carbon	1991	8.2	2000	2003		Biodiversity	2000	3.5	2017	2018	
Heavy metal	1991	16.1	2001	2005		Salt marsh	2000	3.8	2017	2020	
Assessment	1991	17.2	2002	2009		Organic carbon	2000	3.4	2017	2020	
United states	1991	6.2	2002	2003		Climate change	2000	3.4	2017	2018	
Salt marsh	1991	15.4	2003	2008		Sanjiang plain	2000	4.2	2018	2020	
Establishment	1991	9.0	2004	2007		recovery	2000	4.4	2018	2020	
Disturbance	1991	17.3	2004	2011		关键词 Keywords	年份 Year	强度 Strength	起 Begin	终 End	1992—2020
Organic matter	1991	9.1	2005	2007		生态环境	1992	3.6	2004	2009	
Macrophyte	1991	11.4	2006	2009		自然保护区	1992	2.4	2006	2007	
Groundwater	1991	10.2	2008	2010		生态系统	1992	3.1	2006	2010	
Consequence	1991	13.3	2008	2011		可持续发展	1992	2.3	2006	2007	
Ecosystem service	1991	6.1	2008	2011		风景园林	1992	1.8	2008	2011	

续表

国外湿地恢复研究关键词突现										国内湿地恢复研究关键词突现									
Burst analysis of the keywords from international researches										Burst analysis of the keywords from domestic literatures									
关键词 Keywords	年份 Year	强度 Strength	起 Begin	终 End	年份 Year	强度 Strength	起 Begin	终 End	关键词 Keywords	年份 Year	强度 Strength	起 Begin	终 End	年份 Year	强度 Strength	起 Begin	终 End	关键词 Keywords	年份 Year
Biota	1991	9.9	2010	2012	1992	2.1	2008	2010	生态保护	1992	2.1	2008	2010	1992	2.1	2008	2010	红树林	1992
Fresh water	1991	6.2	2010	2012	1992	1.7	2009	2010	城市湿地	1992	2.0	2011	2012	1992	2.0	2011	2012	微生物	1992
Estuary	1991	12.3	2012	2014	1992	1.7	2012	2016	土壤种子库	1992	4.1	2012	2015	1992	4.1	2012	2015	生态系统评价	1992
Water quality	1991	13.9	2012	2013	1992	2.5	2012	2014	有机碳	1992	1.7	2012	2015	1992	1.7	2012	2015	生物多样性	1992
Riparian vegetation	1991	12.1	2012	2014	1992	3.1	2013	2016	人工湿地	1992	2.9	2013	2016	1992	2.9	2013	2016	植被恢复	1992
Biogeochemical	1991	14.2	2013	2015	1992	3.2	2015	2020	滨海湿地	1992	2.2	2016	2017	1992	2.2	2016	2017	生态工程	1992
Drought	1991	5.6	2013	2015	1992	2.5	2017	2020	海绵城市	1992	3.0	2017	2020	1992	3.0	2017	2020	生态系统服务	1992
Carbon	1991	11.0	2015	2017	1992	14.2	2018	2020		1992	14.2	2018	2020	1992	14.2	2018	2020		1992
Sea level rise	1991	19.6	2017	2020	1992	14.8	2018	2020		1992	14.8	2018	2020	1992	14.8	2018	2020		1992
Coastal wetland	1991	21.7	2017	2020	1992	12.0	2018	2020		1992	12.0	2018	2020	1992	12.0	2018	2020		1992
Ecological restoration	1991	14.8	2018	2020	1992	15.7	2018	2020		1992	15.7	2018	2020	1992	15.7	2018	2020		1992
Mangrove	1991	12.0	2018	2020	1992	14.2	2018	2020		1992	14.2	2018	2020	1992	14.2	2018	2020		1992
Climate change	1991	15.7	2018	2020	1992	14.2	2018	2020		1992	14.2	2018	2020	1992	14.2	2018	2020		1992
Phragmites australi	1991	14.2	2018	2020	1992	14.2	2018	2020		1992	14.2	2018	2020	1992	14.2	2018	2020		1992

但本土湿地演变规律及湿地发育过程的基础研究仍显薄弱,尚未完全形成适应我国地理特色的湿地恢复标准和理论框架。未来需要更广泛的实验研究和定位观测,在不同湿地植物群落演替及调控、水文调控模拟与预测、生态系统关键过程对湿地退化的响应机制、人工恢复湿地发育过程等方面开展更深入和更长期的研究。

表 5 国内研究文献的高频关键词聚类

Table 5 Clustering analysis of the high frequency keywords from domestic literatures

聚类 Cluster	高频关键词 High frequency keywords	聚类 Cluster	高频关键词 High frequency keywords
#0 滨海湿地与气候变化 Coastal wetland and climate change	China (103)、coastal wetland (73)、impact (67)、climate change (59)、community (45)、carbon (38)、biogeochemistry (31)、organic carbon (27)、degradation (23)、salt marsh (22)、spartina alterniflora (20)	#0 湿地管理与可持续发展 Wetland management and sustainable development	风景园林 (36)、湿地公园 (26)、生态环境 (23)、城市湿地 (8)、可持续发展 (6)
#1 植被与群落 Vegetation and community	vegetation (96)、dynamics (63)、soil (47)、ecosystem (41)、land use (38)、response (38)、Sanjiang plain (20)	#1 人工湿地与水环境 Constructed wetland and water environment	人工湿地 (54)、植物修复 (25)、富营养化 (20)、水质 (12)、水生植物 (10)、水环境 (6)
#2 人工湿地与水质 Constructed wetland and water quality	constructed wetland (82)、water (63)、nitrogen (64)、sediment (57)、river (47)、phosphorus (46)、model (46)、removal (37)、lake (29)	#2 黄河三角洲 Yellow River delta	植被恢复 (30)、黄河三角洲 (18)、土壤种子库 (8)、芦苇 (7)、生态工程 (6)
#3 黄河三角洲 Yellow River delta	diversity (56)、growth (49)、Yellow River delta (41)、plant (34)、salinity (33)、phragmites australis (27)、reclamation (22)、bioma (20)	#3 生态系统管理与评估 Ecosystem management and assessment	生物多样性 (16)、生态系统 (14)、生态保护 (7)、生态系统服务 (6)
#4 生态系统管理与保护 Ecosystem management and conservation	ecosystem service (75)、management (85)、conservation (60)、pattern (51)、biodiversity (44)、assessment (20)	#4 滨海湿地 Coastal wetland	滨海湿地 (24)、红树林 (11)、湿地土壤 (6)

() 中数字表示关键词出现频次

3 结论

本文借助 CiteSpace 软件,对 1981—2020 年国内外湿地恢复领域的文献进行计量学分析,从国内外文献发文量、发文团队、发文机构、文献共被引、关键词聚类分析及演化趋势分析得出以下结论:

(1) 国外湿地恢复研究的发文量总体上呈现增长趋势,2008 年之后发文量均显著提升,而国内研究较国外晚了近 10 年,但发展迅速,国际影响力提升较快。

(2) 国外湿地恢复研究主要机构包括 United States Geological Survey、Louisiana State University、University Florida、University Wisconsin 等,均为美国机构,形成了以 William JM-John WD、Zedler JB、Jos TA Verhoeven-Leon P M Lamers、Jeffrey WM 等核心研究团队;中国科学院、北京师范大学、中国林业科学研究院是国内湿地恢复研究的中坚力量,形成了崔保山-白军红、吕宪国-姜明-佟守正-薛振山及李伟-崔丽娟-张曼胤等主要研究团队。

(3) 湿地恢复研究主要经历了三个阶段,2000 年以前属于以水环境治理为目的的初期探索阶段,2001—2009 年进入以系统性和功能性恢复与评价为主的研究阶段,2010—2020 年是以应对气候变化和人类活动为目的的湿地恢复研究阶段。

(4) 国外湿地恢复研究的基础内容包括水文与水环境修复、植被修复与植物群落演替、人工湿地对水污染治理、生态系统管理与评价、生物多样性恢复等;近 10 年来,人类活动与气候变化双重干扰下对滨海湿地的响应及恢复研究、生态系统服务功能评价是研究热点。国内湿地恢复研究主要内容与国外基本一致,但在人工恢复湿地发育过程包括湿地植物群落演替、水文模型与预测、关键生态过程调控等方面研究仍较薄弱,需要更广泛的恢复试验和长期观测,尽快形成适应我国地理特色的湿地恢复标准和理论框架。

参考文献 (References):

- [1] Ying F, Miguez-Macho G. A simple hydrologic framework for simulating wetlands in climate and earth system models. *Climate Dynamics*, 2011, 37 (1): 253-278.
- [2] Mitsch W J, Gosselink J G. *Wetlands*. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [3] Meng B, Liu J L, Bao K, Sun B. Methodologies and management framework for restoration of wetland hydrologic connectivity: a synthesis. *Integrated Environmental Assessment Management*, 2020, 16(4): 438-451.
- [4] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water*. Washington DC: World Resources Institute, 2005.
- [5] Davidson N C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 2014, 65(10): 934-941.
- [6] Zedler J B, Kercher S. Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 30: 39-74.
- [7] Kirwan M L, Megonigal J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. *Nature*, 2013, 504(7478): 53-60.
- [8] Evenson G R, Golden H E, Lane C R, McLaughlin D L, D'Amico E. Depressional wetlands affect watershed hydrological, biogeochemical, and ecological functions. *Ecological Applications*, 2018, 28(4): 953-966.
- [9] Catford J A, Downes B J, Gippel C J, Vesk P A. Flow regulation reduces native plant cover and facilitates exotic invasion in riparian wetlands. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(2): 432-442.
- [10] McLeod E, Chmura G L, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte C M, Lovelock C E, Schlesinger W H, Silliman B R. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *The Ecological Society of America*, 2011, 9(10): 552-560.
- [11] Beuel S, Alvarez M, Amler E, Behn K, Kotze D, Kreye C, Leemhuis C, Wagner K, Willy D K, Ziegler S, Becker M. A rapid assessment of anthropogenic disturbances in East African wetlands. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 684-692.
- [12] Chen W, Cao C X, Liu D, Tian R, Wu C Y, Wang Y Q, Qian Y F, Ma G Q, Bao D M. An evaluating system for wetland ecological health: case study on nineteen major wetlands in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 1080-1088.
- [13] Li C H, Xian Y, Ye C, Wang Y H, Wei W W, Xi H Y, Zheng B H. Wetland ecosystem status and restoration using the Ecopath with Ecosim (EWE) model. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 305-314.
- [14] 陆健健, 何文珊, 童春富, 王伟. *湿地生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 张学峰, 房用, 李士江, 梁玉. *湿地生态修复技术及案例分析*. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [16] 彭少麟. *恢复生态学*. 北京: 气象出版社, 2007.
- [17] 姜明, 邹元春, 章光新, 佟守正, 武海涛, 刘晓辉, 张仲胜, 薛振山, 吕宪国. 中国湿地科学研究进展与展望——纪念中国科学院东北地理与农业生态研究所建所 60 周年. *湿地科学*, 2018, 16(3): 279-287.
- [18] Mao D H, Wang Z M, Wu J G, Wu B F, Zeng Y, Song K S, Yi K P, Luo L. China's wetlands loss to urban expansion. *Land Degradation Development*, 2018, 29(8): 2644-2657.
- [19] Lu S B, Zhang X L, Wang J H, Pei L. Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127: 325-330.
- [20] 崔保山, 刘兴土. 湿地恢复研究综述. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 45-51.
- [21] 施生旭, 童佩珊. 基于 CiteSpace 的城市群生态安全研究发展态势分析. *生态学报*, 2018, 38(22): 8234-8246.
- [22] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace 知识图谱的方法论功能. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
- [23] 曹永强, 刘明阳. 基于 CiteSpaceV 的国内生态工程研究文献可视化分析. *生态学报*, 2019, 39(11): 4190-4199.
- [24] 祝薇, 向雪琴, 侯丽朋, 王保盛, 唐立娜. 基于 Citespace 软件的生态风险知识图谱分析. *生态学报*, 2018, 38(12): 4504-4515.
- [25] 柯丽娜, 阴曙升, 刘万波. 基于 CiteSpace 中国海洋生态经济的文献计量分析. *生态学报*, 2018, 38(15): 5602-5610.
- [26] 秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱——基于 Citespace 的计量分析. *生态学报*, 2014, 34(13): 3693-3703.
- [27] 袁轶男, 刘兴沼, 聂晓嘉, 阙晨曦, 吴沙沙, 兰思仁. 国际城市森林研究知识图谱——基于 CiteSpace V 共被引分析. *生态学报*, 2019, 39 (20): 7780-7787.
- [28] Wei F W, Grubestic T H, Bishop B W. Exploring the GIS knowledge domain using CiteSpace. *The Professional Geographer*, 2015, 67(3): 374-384.
- [29] Zhu J, Hua W J. Visualizing the knowledge domain of sustainable development research between 1987 and 2015: a bibliometric analysis. *Scientometrics*, 2017, 110(2): 893-914.

- [30] Ramsar Convention Secretariat. Global wetland outlook: state of the world's wetlands and their services to people, Gland, Switzerland, 2018.
- [31] Niu Z G, Zhang H Y, Wang X W, Yao W B, Zhou D M, Zhao K Y, Zhao H, Li N N, Huang H B, Li C C, Yang J, Liu C X, Liu S, Wang L, Li Z, Yang Z Z, Qiao F, Zheng Y M, Chen Y L, Sheng Y W, Gao X H, Zhu W H, Wang W Q, Wang H, Weng Y L, Zhuang D F, Liu J Y, Luo Z C, Cheng X, Guo Z Q, Gong P. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2813-2823.
- [32] 许木启, 黄玉瑶. 受损水域生态系统恢复与重建研究. *生态学报*, 1998, 18(5): 547-557.
- [33] 倪学明, 陈路, 周远捷. 东湖水生植被恢复与调控技术研究//陈宜瑜. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995.
- [34] Noe G B, Fellows M Q N, Parsons L, West J, Callaway J, Trnka S, Wegener M, Zedler J. Adaptive management assists reintroduction as higher tides threaten an endangered salt marsh plant. *Restoration Ecology*, 2019, 27(4): 750-757.
- [35] Lamers L P M, Vile M A, Grootjans A P, Acreman M C, van Diggelen R, Evans M G, Richardson C J, Rochefort L, Kooijman A M, Roelofs J G M, Smolders A J P. Ecological restoration of rich fens in Europe and North America: from trial and error to an evidence-based approach. *Biological Reviews*, 2015, 90(1): 182-203.
- [36] Herbert E R, Boon P, Burgin A J, Neubauer S C, Franklin R B, Ardón M, Hopfensperger K N, Lamers L P M, Gell P. A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere*, 2015, 6(10): 1-43.
- [37] Price E P F, Spyreas G, Matthews J W. Biotic homogenization of regional wetland plant communities within short time-scales in the presence of an aggressive invader. *Journal of Ecology*, 2018, 106(3): 1180-1190.
- [38] Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, Zhang K J. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1090-1103.
- [39] Bai J H, Xiao R, Cui B S, Zhang K J, Wang Q G, Liu X H, Gao H F, Huang L B. Assessment of heavy metal pollution in wetland soils from the young and old reclaimed regions in the Pearl River Estuary, South China. *Environmental Pollution*, 2011, 159(3): 817-824.
- [40] 王延吉, 神祥金, 吕宪国. 1980—2015 年东北沼泽湿地景观格局及气候变化特征. *地球与环境*, 2020, 48(3): 348-357.
- [41] 张树文, 颜凤芹, 于灵雪, 卜坤, 杨久春, 常丽萍. 湿地遥感研究进展. *地理科学*, 2013, 33(11): 1406-1412.
- [42] Zhang Z Q, Xing W, Wang G P, Tong S Z, Lv X G, Sun J M. The peatlands developing history in the Sanjiang Plain, NE China, and its response to East Asian monsoon variation. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 11316.
- [43] 崔丽娟, 庞丙亮, 李伟, 马牧源, 孙宝娣, 张亚琼. 扎龙湿地生态系统服务价值评价. *生态学报*, 2016, 36(3): 828-836.
- [44] 崔丽娟, 张曼胤, 赵欣胜, 王义飞, 李伟, 李胜男, 张岩. 湿地恢复监测与管理方法探讨. *世界林业研究*, 2011, 24(3): 1-5.
- [45] 郭子良, 张曼胤, 崔丽娟, 王大安, 王贺年, 杜栩. 中国国家湿地公园的建设布局及其动态. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 532-540.
- [46] 崔丽娟, 雷茵茹, 张曼胤, 李伟. 小微湿地研究综述: 定义、类型及生态系统服务. *生态学报*, 2021, 41(5): 2077-2085.
- [47] 江波, 陈媛媛, 肖洋, 赵娟娟, 欧阳志云. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估. *生态学报*, 2017, 37(8): 2497-2505.
- [48] 孔令桥, 郑华, 欧阳志云. 基于生态系统服务视角的山水林田湖草生态保护与修复——以洞庭湖流域为例. *生态学报*, 2019, 39(23): 8903-8910.
- [49] van Asselen S, Verburg P H, Vermaat J E, Janse J H. Drivers of wetland conversion: a global meta-analysis. *PLoS One*, 2013, 8(11): e81292.
- [50] TE D. Wetlands losses in the United States to 1980's. Washington DC: U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, 1990.
- [51] Zhou D, Yu J B, Guan B, Li Y Z, Yu M, Qu F Z, Zhan C, Lv Z B, Wu H F, Wang Q, Yang J S. A comparison of the development of wetland restoration techniques in China and other nations. *Wetlands*, 2020, 40(6): 2755-2764.
- [52] Bijlmakers L L, De Swart E O A M. Large-scale wetland-restoration of the Ronde Venen, the Netherlands. *Water Science & Technology*, 1995, 31(8): 197-205.
- [53] Martínez-Santos P, de Stefano L, Llamas M R, Martínez-Alfaro P E. Wetland restoration in the Mancha Occidental aquifer, Spain: a critical perspective on water, agricultural, and environmental policies. *Restoration Ecology*, 2008, 16(3): 511-521.
- [54] Zedler J B, Callaway J C. Tracking wetland restoration: do mitigation sites follow desired trajectories? *Restoration Ecology*, 1999, 7(1): 69-73.
- [55] Zedler J B. Progress in wetland restoration ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(10): 402-407.
- [56] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康研究进展. *生态学杂志*, 2001, 20(3): 31-36.
- [57] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I. 理论. *生态学报*, 2002, 22(7): 1005-1011.
- [58] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II. 方法与案例. *生态学报*, 2002, 22(8): 1231-1239.
- [59] Barbier E B, Hacker S D, Kennedy C, Koch E W, Stier A C, Silliman B R. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 2011, 81(2): 169-193.
- [60] BenDor T K, Riggsbee J A, Doyle M. Risk and markets for ecosystem services. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(24): 10322-10330.
- [61] Spanjer E L. Swamp money: the opportunity and uncertainty of investing in wetland mitigation banking. *Northwestern University Law Review*, 2018,

- 113(2): 371-406.
- [62] Suding K N. Toward an era of restoration in ecology: successes, failures, and opportunities ahead. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2011, 42: 465-487.
- [63] Maron M, Hobbs R J, Moilanen A, Matthews J W, Christie K, Gardner T A, Keith D A, Lindenmayer D B, McAlpine C A. Faustian bargains? Restoration realities in the context of biodiversity offset policies. *Biological Conservation*, 2012, 155: 141-148.
- [64] Erwin K L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecol Manage*, 2009, 17(1): 71-84.
- [65] Day Jr J W, Boesch D F, Clairain E J, Kemp G P, Laska S B, Mitsch W J, Orth K, Mashriqui H, Reed D J, Shabman L, Simenstad C A, Streever B J, Twilley R R, Watson C C, Wells J T, Whigham D F. Restoration of the mississippi delta: lessons from hurricanes katrina and rita. *Science*, 2007, 315(5819): 1679-1684.
- [66] Wang S J, Zhang M J, Li Z Q, Wang F T, Li H L, Li Y J, Huang X Y. Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 263-273.
- [67] Wang Z M, Huang N, Luo L, Li X Y, Ren C Y, Song K S, Chen J M. Shrinkage and fragmentation of marshes in the West Songnen Plain, China, from 1954 to 2008 and its possible causes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(3): 477-486.
- [68] Moreno-Mateos D, Power M E, Comín F A, Yockteng R. Structural and functional loss in restored wetland ecosystems. *PLoS Biology*, 2012, 10(1): e1001247.
- [69] Shaffer G P, Sasser C E, Gosselink J G, Rejmanek M. Vegetation dynamics in the emerging Atchafalaya Delta, Louisiana, USA. *The Journal of Ecology*, 1992, 80(4): 677-687.
- [70] Gilman E L. A method to investigate wetland mitigation banking for Saipan, Commonwealth of the Northern Mariana Islands. *Ocean & Coastal Management*, 1997, 34(2): 117-152.
- [71] Callaway J C, Josselyn M N. The introduction and spread of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in South San Francisco Bay. *Estuaries*, 1992, 15(2): 218-226.
- [72] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/3): 48-65.
- [73] Méndez M, Karlsson P S. Nutrient stoichiometry in *pinguicula vulgaris*: nutrient availability, plant size, and reproductive status. *Ecology*, 2005, 86(4): 982-991.
- [74] Güsewell S, Koerselman W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2002, 5(1): 37-61.
- [75] Reid A J, Carlson A K, Creed I F, Eliason E J, Gell P A, Johnson P T J, Kidd K A, MacCormack T J, Olden J D, Ormerod S J, Smol J P, Taylor W W, Tockner K, Vermaire J C, Dudgeon D, Cooke S J. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, 2019, 94(3): 849-873.
- [76] 秦伯强. 太湖生态与环境若干问题的研究进展及其展望. *湖泊科学*, 2009, 21(4): 445-455.
- [77] Wang G X, Zhang L M, Chua H, Li X D, Xia M F, Pu P M. A mosaic community of macrophytes for the ecological remediation of eutrophic shallow lakes. *Ecological Engineering*, 2009, 35(4): 582-590.
- [78] 张耀鸿, 张富存, 周晓冬, 谢晓金, 王小巍, 李强, 雷俊. 互花米草对苏北滨海湿地表土有机碳更新的影响. *中国环境科学*, 2011, 31(2): 271-276.
- [79] 陈雅慧, 袁琳, 曹浩冰, 王恒, 赵志远, 牛文蕾, 张利权. 基于胁迫梯度假说和互惠理论的海三棱藨草种群恢复技术. *生态学报*, 2019, 39(12): 4233-4241.
- [80] 彭逸生, 周炎武, 陈桂珠. 红树林湿地恢复研究进展. *生态学报*, 2008, 28(2): 786-797.