

· 专题:双清论坛“湿地保护和修复的基础理论及关键技术问题” ·

## 湿地生态学的研究进展与展望\*

王国栋 姜明\*\* 盛春蕾 吕宪国

中国科学院 湿地生态与环境重点实验室/中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

**[摘要]** 湿地生态学作为湿地科学的一门主要分支学科,目标是理解湿地生物体与环境之间的相互关系,并用来解决面临的各种各样复杂的湿地环境问题。作为一门新兴学科,湿地生态学从无到有,经历了萌芽期、发展期和高速发展期三个阶段。湿地生态学的研究主题已经涵盖了不同时间、空间和理论尺度。研究领域已经涉及从经典理论研究到当代热点研究,从微观尺度研究到宏观尺度研究,从基础理论研究到实践应用研究。进入新时代,联合国可持续发展目标的提出以及我国长江大保护、黄河流域高质量发展等一系列国家战略的实施,使湿地生态学的发展迎来了新的机遇与挑战。目前,湿地与全球变化、湿地生物多样性保护、湿地退化过程与生态恢复机制等已成为国内外普遍关注的研究热点。建议继续健全湿地学科体系,积极促进学科交叉融合,培育新的学科增长点。采用新兴技术和分析工具,助力湿地学科建设发展。同时加强国际合作研究,实施国际湿地研究计划。

**[关键词]** 湿地生态;气候变化;生物多样性;文献计量分析;前沿探索;发展建议

湿地生态学作为湿地科学的一门主要分支学科,主要任务是理解湿地中生物体与生物体之间、生物与环境之间的相互关系及其功能,发现其系统运行的规律,以期解决复杂多变的湿地环境问题。过去50多年来,湿地生态学伴随着气候变暖、生物多样性锐减、水资源短缺、人口过快增长等全球或区域生态环境与社会问题经历了迅猛的发展,在此过程中,初步完成了学科体系的构架与核心理论的完善,同时致力于解决与湿地生态系统密切相关的复杂生态环境与社会问题<sup>[1]</sup>。联合国可持续发展目标(2015—2030年)包括17个方面,涵盖近200个指标,其中有70多个与湿地直接相关<sup>[2]</sup>。与之相适应,《拉姆萨尔湿地公约》组织实施了第四期拉姆萨尔战略计划(2016—2024年),包括4项目标和19项指标,旨在加强湿地保护、恢复和合理利用,直接支持联合国可持续发展目标<sup>[3]</sup>。为准确呈现湿地生态学的发展趋势,本文在使用文献计量学方法进行文献提取及分析的基础上,综合概述了湿地生态学



**姜明** 博士,中国科学院东北地理与农业生态研究所所长、研究员,博士生导师,兼任国际湿地科学家学会中国分会副主席/秘书长、国家湿地研究中心执行理事长、中国生态学会湿地生态专业委员会主任、《地理科学》《湿地科学与管理》副主编。主要从事湿地生态、土壤地理研究。发表学术论文200余篇,授权发明专利20项,获省部级一等奖3项。



**王国栋** 博士,中国科学院东北地理与农业生态研究所副研究员,硕士生导师,中国科学院湿地生态与环境重点实验室副主任,主要研究方向为湿地生态恢复的理论与技术。发表学术论文60余篇。

主要前沿科学问题,并对学科发展提出建议。本文为湿地生态学新的研究方向提供指导,同时有助于理解和确定科学中的范式转变。

收稿日期:2022-02-08;修回日期:2022-04-19

\* 本文根据第289期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email: jiangm@iga.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(41877075、42077070、U19A2042)、“一带一路”国际科学组织联盟专题联盟(ANSO-PA-2020-14)、中国科学院青年创新促进会项目(2019234)的资助。

## 1 湿地生态学发展趋势

### 1.1 湿地生态学文献计量方法

利用 STKOS(科技知识组织体系),在 *Dewey Decimal Classification*(《杜威十进分类法》)中获得 51 个湿地相关类目,筛选其中 9 种主要湿地类目(Wetland、Marsh、Swamp、Mire、Bog、Peatland、Fen、Everglades 和 Mangrove)为检索主题词,检索文献量占全部文献量的 81.4%。以 9 个湿地概念词为主题词,在 Web of Science[v. 5. 35]数据库的核心合集集中的六个子集(Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)—1900 年至今、Conference Proceedings Citation Index- Science (CPCI-S)—1990 年至今、Social Sciences Citation Index (SSCI)—1996 年至今、Conference Proceedings Citation Index- Social Science & Humanities (CPCI-SSH)—1991 年至今、Current Chemical Reactions (CCR-EXPANDED)—1985 年至今、Index Chemicus (IC)—1993 年至今)进行检索,检索时间跨度为 1900 年 1 月 1 日到 2020 年 12 月 31 日,利用 Web of Science 类别进行精炼,检索结果为 116 677 篇,其中 ECOLOGY 类别文献 24 541 篇。

### 1.2 湿地生态学文献计量结果分析

1900—2020 年期间,湿地科学和湿地生态学从无到有,共同发展,经历了萌发期、发展期和高速发展期三个阶段(图 1)。其中,1900—1970 年,为湿地科学的萌发期。期间,科学界对湿地生态系统的定义、分类等认识均十分有限,相关研究集中在对沼泽的基本认识,总体年发文量不超过 100 篇,而生态学领域年发文量不超过 20 篇。1971 年 2 月 2 日,来自

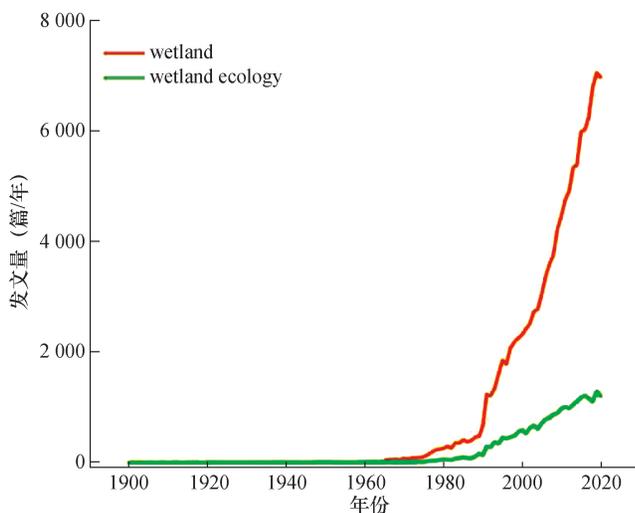


图 1 1900—2020 年期间湿地科学领域和湿地生态学领域年发文量

18 个国家的代表在伊朗拉姆萨尔签署了一个旨在保护和合理利用全球湿地的公约《关于特别是作为水禽栖息地的国际重要湿地公约》(又称“《拉姆萨尔湿地公约》”,以下简称“《湿地公约》”),并对湿地(Wetland)进行了科学定义,该定义也被科学界广泛认可和接受。自此,湿地科学和湿地生态学进入了发展期。1971—1990 年,湿地科学和湿地生态学年发文量呈明显上升的趋势,科学界对湿地的认识逐渐深入,并扩展到各种湿地类型。该时期湿地科学年发文量不超过 800 篇,而湿地生态学领域年发文量不超过 200 篇。20 世纪 90 年代以来,各国政府及科学界对湿地重要性的认识逐渐深入,中国于 1992 年加入《湿地公约》,湿地科学研究进入高速发展期。1991 年以来,湿地科学和湿地生态学研究领域年发文量呈现迅猛增长的趋势。2000 年,湿地科学领域年发文量超过 2 000 篇,湿地生态学领域年发文量超过 500 篇。2010 年,湿地科学领域年发文量接近 5 000 篇,湿地生态学领域年发文量接近 1 000 篇。近十年来,湿地科学和湿地生态学领域年发文量依然保持着快速增长的势头。2020 年,湿地科学领域年发文量达到 7 000 篇,湿地生态学领域年发文量达到 1 200 篇(图 1)。

从 9 个湿地概念词在 1900—2020 年期间在湿地科学领域的发文量可以看出,湿地科学研究最早起源于对草本沼泽(Marsh)的研究(图 2)。20 世纪五六十年代,关于木本沼泽(Swamp)和泥炭沼泽(如 Bog、Mire)的研究也逐渐兴起。20 世纪 70 年代,《湿地公约》签署以后,科学界对湿地的定义和类型等的认识越来越深入,有关红树林(Mangrove)、泥炭地(Peatland)等不同湿地类型以及大沼泽地(Everglades)等特定区域的湿地科学研究全面发展(图 2)。同时,伴随着《湿地公约》对湿地(Wetland)的定义,湿地一词被学术界广泛认可,以其为主题词的发文量迅猛发展。2020 年发文量突破 3 000 篇,已占湿地科学年度总发文量的一半以上,不仅涵盖了所有天然湿地类型,同时也涉及人工湿地等新兴领域。

从 9 个湿地概念词在 1900—2020 年期间在湿地生态学领域的发文量可以看出,湿地生态学研究与湿地科学研究整体发展趋势一致(图 3)。湿地生态学研究同样兴起于对草本沼泽(Marsh)和泥炭沼泽(如 Bog)的研究。《湿地公约》诞生以后,有关红树林(Mangrove)、木本沼泽(Swamp)等不同湿地类型以及大沼泽地(Everglades)等特定区域的湿地生

态学领域科学研究逐渐发展(图3)。同样地,湿地(Wetland)一词逐渐被生态学学界认可,以其为主题词的发文量迅猛发展。2020年,年发文量突破600篇,已占湿地生态学领域年度总发文量的一半左右。

1900—2020年期间,湿地生态学领域累计发文量最多的国际期刊为 *Wetlands* 和 *Ecological*

*Engineering*, 两个期刊分别为国际湿地科学家学会(SWS)和国际生态恢复学会(SER)会刊,两家期刊研究领域相通又各有侧重,代表了国际湿地生态学领域总体研究水平及发展趋势。另外, *Ecology* 和 *Journal of Ecology* 等老牌生态学经典期刊均有大量以湿地为主题的学术论文发表(表1)。

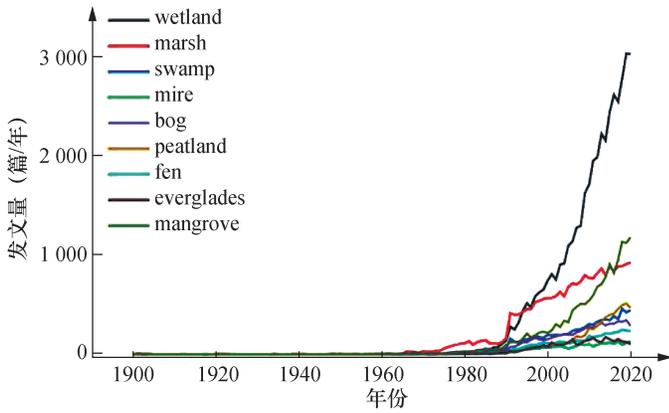


图2 1900—2020年期间湿地科学领域9种湿地概念词(Wetland、Marsh、Swamp、Mire、Bog、Peatland、Fen、Everglades和Mangrove)为主题的年发文量

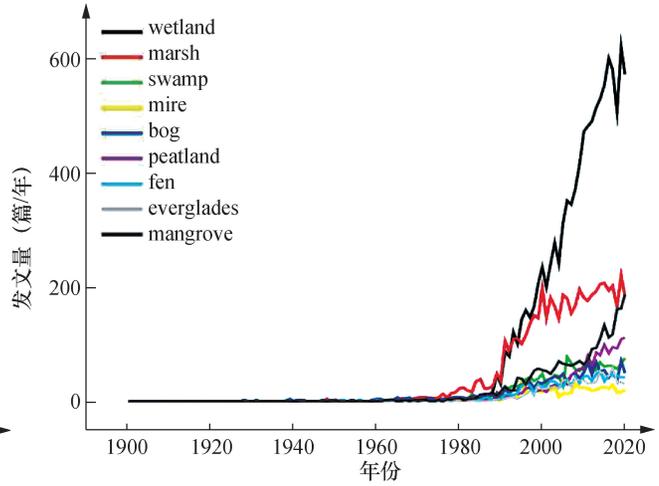


图3 1900—2020年期间湿地生态学领域9种湿地概念词(Wetland、Marsh、Swamp、Mire、Bog、Peatland、Fen、Everglades和Mangrove)为主题的年发文量

表1 1900—2020年期间湿地生态学领域累计发文量最多的20家国际SCI期刊杂志

期刊名称	发文量(篇)	影响因子(2020)
<i>Wetlands</i>	2 439	2.204
<i>Ecological Engineering</i>	2 221	4.035
<i>Marine Ecology Progress Series</i>	742	2.824
<i>Ecology</i>	583	5.499
<i>Biological Conservation</i>	583	5.990
<i>Journal of Ecology</i>	526	6.260
<i>Journal of Wildlife Management</i>	473	2.469
<i>Global Change Biology</i>	452	10.863
<i>Oecologia</i>	449	3.225
<i>Journal of Experimental Marine Biology and Ecology</i>	431	2.171
<i>Biogeosciences</i>	423	4.295
<i>Ecological Applications</i>	380	4.657
<i>Ecological Modelling</i>	369	2.974
<i>Freshwater Biology</i>	368	3.809
<i>Restoration Ecology</i>	367	3.404
<i>Biodiversity and Conservation</i>	309	3.549
<i>Journal of Applied Ecology</i>	302	6.53
<i>Plant Ecology</i>	278	1.854
<i>Journal of Vegetation Science</i>	276	2.685
<i>Ecosystems</i>	273	4.217

1900—2020 年期间,湿地生态学领域累计发文量最多的国家为美国,达到 10 966 篇,远远高于其他国家。加拿大、中国、英国和澳大利亚紧随其后,发文量均在 1 600 篇以上。另外,德国、荷兰、法国、西班牙、瑞典等欧洲国家发文量较大。除此之外,亚洲的日本、南美洲的巴西以及非洲的南非等国家发文量也较大。总体来说,过去一个多世纪,湿地生态学领域研究集中在北美、欧洲、澳大利亚等国家和地区。近年来,中国、日本、巴西、南非等其他新兴国家和地区湿地生态学研究发展势头迅猛(表 2)。

1900—2020 年期间,湿地生态学领域累计发文量最多的研究机构为美国地质调查局,承担了美国乃至整个北美地区的滨海、内陆湿地和水域生态系统的研究、管理和决策咨询工作。其中以其下设的湿地与水生生物研究中心(原美国国家湿地研究中心)最为著名。其次为美国佛罗里达州立大学,以佛罗里达大沼泽地、红树林和滨海盐沼湿地研究闻名。中国科学院累计发文量排名第四,是唯一一家除美国之外发文量排名前十的研究机构。其中以东北地理与农业生态研究所最为著名,为国际湿地研究联盟的发起单位,同时是国际湿地科学家学会中国分会、中国国家湿地研究中心、中国科学院湿地研究中心、中国科学院湿地生态与环境重点实验室的挂靠

单位,主要以中国沼泽湿地研究闻名。除此之外,发文量较多的其他几家研究机构均为美国著名的大学或科研管理机构(表 3)。

### 1.3 湿地生态学研究主题

目前,湿地生态学的研究主题已经涵盖了不同时空尺度和学科理论。例如,湿地生态学的研究领域已经涉及从经典理论研究(例如食物链、生活史、生物多样性等)到当代热点研究(例如气候变化、海平面上升、生物入侵等),从微观尺度研究(例如细胞生物学、微生物生态学等)到宏观尺度研究(例如生物地理学、长期生态学等),从基础理论研究(例如竞争、承载力等)到实践应用研究(例如保护、管理和政策等)(图 4)。

湿地生态学经典理论研究主题主要涉及食物链、群落结构和过程、生物多样性、行为和繁殖等。其中,植物群落结构和过程研究是湿地生态学研究的核心内容。近年来,随着遥感等地理空间技术的进步和大尺度生态数据的积累以湿地物种分布、宏观进化、大尺度环境格局和过程等宏观尺度的生态学研究逐渐兴起。与之相适应,跨尺度的湿地生态学问题越来越受到关注,关于生物学、地球物理学、社会经济学多过程相互作用以及格局形成、尺度依赖的研究也逐渐增多。另一方面,新一代基因测序

表 2 1900—2020 年期间湿地生态学领域累计发文量前 20 国家

排名	国别	发文量	排名	国别	发文量
1	美国	10 966	11	日本	546
2	加拿大	1 959	12	巴西	519
3	中国	1 891	13	意大利	459
4	英国	1 750	14	芬兰	436
5	澳大利亚	1 622	15	瑞士	375
6	德国	1 054	16	丹麦	358
7	荷兰	1 020	17	比利时	347
8	法国	880	18	捷克	334
9	西班牙	718	19	波兰	334
10	瑞典	617	20	南非	321

表 3 1900—2020 年期间湿地生态学领域累计发文量前 10 的研究机构

排名	研究机构	发文量	排名	研究机构	发文量
1	美国地质调查局	1 179	6	美国农业部	540
2	美国佛罗里达州立大学	1 076	7	美国路易斯安那州立大学	459
3	美国加州大学	693	8	美国佐治亚大学	437
4	中国科学院	666	9	美国北卡罗来纳大学	366
5	美国佛罗里达大学	543	10	美国鱼类及野生动物管理局	360



炭形成的前沿,亟待深入研究<sup>[10]</sup>。人类活动使泥炭沼泽退化加剧,严重威胁其碳库的稳定性。泥炭沼泽碳库的稳定性既是发挥湿地碳中和作用的关键,也是全球变化研究中的难点,因此亟需聚焦土壤碳库演变机制及其对气候变化的响应,运用土壤学、微生物学和生态学等知识,通过包括大尺度样带研究、模型模拟、通量监测、野外土壤剖面模拟增温和室内控制等实验手段,从不同尺度揭示气候变化背景下泥炭沼泽土壤碳库的稳定性及其调控机制,为退化泥炭沼泽恢复和保护提供数据支撑和自然解决方案,丰富泥炭沼泽土壤碳库可持续管理理论<sup>[11]</sup>。滨海湿地固存的碳被称为“蓝碳”,碳汇功能强大,是降低大气二氧化碳浓度、减缓全球气候变化的重要途径,其单位面积碳埋藏速率是森林生态系统的几十到上千倍。近年来,滨海湿地固碳能力及其对气候变化和人类活动的响应已逐渐成为研究热点<sup>[12]</sup>。但是,目前对滨海湿地生态系统的碳储量、速率、过程机制和生态系统服务功能尚缺乏足够的了解。需要结合土地遥感数据和地理信息系统,建立模型预测未来不同气候变化情景下滨海湿地碳库功能及其变化趋势,阐明全球及我国滨海湿地对气候变化和人类活动的响应和适应机制<sup>[13]</sup>。

2020年,我国政府在第七十五届联合国大会作出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的庄严承诺。2021年,国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》,方案坚持系统理念,推进山水林田湖草沙一体化保护和修复,提高生态系统质量和稳定性,提升生态系统碳汇增量。为此,加强我国国家尺度上湿地碳储量及固碳速率的系统估算与预测研究势在必行。首先,应建立湿地生态系统碳汇监测核算体系,开展湿地碳汇本底调查、碳储量评估、潜力分析,实施湿地生态保护修复碳汇成效监测评估;其次,要加强湿地生态系统碳汇基础理论、基础方法、前沿颠覆性技术研究,加强河湖、湿地保护修复,为巩固湿地生态系统固碳作用,提升泥炭地、滨海盐沼、红树林等湿地生态系统固碳能力提供科技支撑。这对履行《巴黎协定》规定的减排增汇目标,实现我国碳中和、碳达峰目标具有重要意义。

### 2.1.3 海平面上升与滨海湿地动态

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出,由于冰原融化过程的不确定性,在最高排放情景下,全球海平面上升平均

值有可能超过预期(到2100年上升2米,到2150年上升5米)<sup>[14]</sup>。全球模型预测显示,至2080年全球将有多达20%的滨海湿地因海平面上升而最终消失<sup>[15]</sup>。海平面上升对全球滨海湿地造成了严重的威胁,因此,滨海湿地应对海平面上升的作用及其脆弱性成为国内外生态学家普遍关注的研究热点。湿地土壤表面高程是否能够跟上不断上涨的海平面成为滨海湿地成功应对海平面上升的关键<sup>[16]</sup>。湿地土壤表面高程变化是地表和地下多种过程在垂直方向综合作用的结果。由于地质作用下的深层沉陷相对一致且影响十分微小,因此滨海湿地土壤表面高程变化过程主要受到地表过程和浅层地下过程的影响。这些过程可能涉及表层泥沙淤积和侵蚀、浅层沉陷、地下根系生长与分解等物理或生物过程<sup>[17]</sup>。近年来,科学家利用新兴的地面高程监测系统—水平标志层技术(SET-MH)等技术手段,结合对滨海湿地土壤物理和生物学过程的研究,同时通过模型模拟,已经初步分析了滨海盐沼和红树林湿地对海平面上升的响应过程,揭示了地理、水文和生物过程对滨海土壤表面高程的影响机制等生态学问题<sup>[18, 19]</sup>。未来的研究将注重从景观及更大的空间尺度结合泥沙沉积、潮汐变化、全球及区域气候变化等地理变量来综合预测未来海平面上升情景下的滨海盐沼和红树林湿地的动态及其脆弱性。

## 2.2 湿地与生物多样性保护

### 2.2.1 生物多样性与湿地生态系统多功能性

生物多样性是人类生存和发展的重要基础。2021年10月,联合国《生物多样性公约》缔约方大会第十五次会议(COP15),通过了《昆明宣言》,发布了“共建全球生态文明,保护全球生物多样性”的倡议。湿地支撑了超过10万种物种的生存,如何保护湿地生物多样性,决定了湿地生态系统功能、服务及人类福祉<sup>[3]</sup>。全球变化和人类活动引起的生物多样性丧失将会对湿地生态系统功能产生诸多不利影响,如生产力下降、养分循环失衡、传粉能力下降等<sup>[20]</sup>。人类社会的幸福感至少部分依赖于湿地等生态系统提供的产品和服务,而这些则直接来自于生态系统功能。因此,始于20世纪90年代的生物多样性与生态系统功能研究也已成为湿地生态学界关注的热点。目前多数实验结果认为,植物多样性越高,湿地生态系统稳定性和抗入侵能力等也越强<sup>[21, 22]</sup>。然而,随着研究的深入,人们逐步认识到湿地生态系统并非仅仅提供单个生态系统功能,而是能同时提供多个功能,即湿地生态系统具有多功

能性。于是,诸多问题应运而生,例如:如何量化多样性丧失对湿地生态系统多功能性的影响?生物多样性对多个湿地生态系统功能是否存在响应?这种响应是否与对单个湿地生态系统功能的响应一致?

2007年以后,研究者发现维持生态系统多功能性比维持单个生态系统功能需要更多的物种<sup>[23]</sup>。由此,生物多样性与生态系统多功能性的研究才受到广泛关注,逐渐成为当前生态学研究热点。目前,与生物多样性对单个生态系统功能影响的探索相比,对湿地生态系统多功能性研究的数据仍相对缺乏,一些显著进展主要表现在时空尺度、实验设计、测度多功能性的方法等方面<sup>[23]</sup>。然而,相关研究仍存在许多问题,如缺少公认的测定多功能性指数的测度标准、湿地生态系统不同功能之间的权衡制约着多功能性的客观评价、缺少在不同时空尺度上的研究、有关地下生态系统多功能性的研究相对缺乏等。因此,未来将在建立及优化湿地生态系统多功能性综合评价指标的基础上,继续开展全球变化背景下不同时空尺度下不同维度的多样性(物种多样性、功能多样性、谱系多样性)与湿地生态系统多功能性的关系及其影响机制的研究,同时关注多样性丧失对湿地生态系统多功能性的影响及不同生态系统功能间的权衡关系。

### 2.2.2 生物入侵与湿地生物多样性及人类健康

生物入侵是一个影响深远的全球性问题,其对生态系统、环境和社会经济的影响也日益明显。生物入侵不仅导致湿地生态系统组成和结构的改变,而且能彻底改变湿地生态系统的基本功能和性质,最终导致本地种的灭绝、群落多样性降低,并给社会经济造成重大损失。例如,互花米草对我国滨海盐沼的入侵已经引起了滨海盐沼生态系统结构和过程的改变,导致滨海盐沼物种丰度与生物多样性减少<sup>[24]</sup>。目前,生物入侵与湿地生物多样性保护已成为湿地生态学研究热点领域。经过近些年的发展,入侵生态学在湿地生态系统生物入侵机理(例如遗传学、适应性进化、生理响应、种间互作、群落可侵入性)、入侵后效(例如生态系统结构、生物多样性、人类健康)以及入侵种对环境变化的响应等方面都取得了很大进步<sup>[25]</sup>。但是,由于影响入侵生物的因素很多,湿地入侵生态学研究仍然面临很多挑战。例如,如何综合多重因素建立针对湿地生态系统的入侵生态学框架,以及如何更加精细地确定影响入侵的因素等。另外,由于全球变化和人类活动影响的加剧,某些本地物种同样表现出极强的入侵特性。

然而,与外来物种入侵相比,由于其具有较强的隐秘性,所以当地物种的入侵并没有引起足够的认识,而其对湿地生态系统造成的危害甚至更大<sup>[26, 27]</sup>。如何区别及揭示外来物种—本地物种入侵机理、入侵后效及其防控机制将成为研究的热点。

近年来,生物地理学、遗传学、进化学等学科的发展及技术的进步为湿地入侵生态学研究提供了新的机遇。将这些交叉学科的新理论和新技术有机地融合起来,运用到湿地生态系统生物入侵机理和生态学后效的研究中,将有助于湿地入侵生态学理论的发展。例如,表观遗传学、代谢组学和转录组学的迅猛发展为研究湿地生态系统入侵生物的遗传和进化提供了新技术和新方法;全球变化生物学的发展则从宏观尺度上为预测湿地生态系统入侵生物的地理格局变化提供了新视角和新思路。除了继续探讨入侵机制和生态学后效外,湿地生态系统入侵生物对人类健康的影响将继续成为今后的研究重点。尽管目前已有部分研究揭示了湿地生态系统入侵生物对人类媒介性疾病的影响,但是媒介生物种类繁多,而且入侵物种与媒介生物之间的相互作用过程目前尚未明晰<sup>[26]</sup>。未来应该从媒介生物的寄主选择性、入侵生物微环境条件以及二者互作关系等角度来更深层次阐明入侵生物与人类健康的关系。此外,其他一些对人类健康有直接或间接危害的有毒有害动植物将成为今后研究的重点。

### 2.3 湿地退化过程与生态恢复机制

20世纪,由于气候变化和人类活动的叠加影响,全球沼泽湿地生态系统严重退化,面积减少了近60%,远超过其他陆地生态系统的退化和丧失的速度<sup>[28]</sup>。第二次全国湿地资源调查结果显示,2003—2013年,我国湿地面积减少了339.63万公顷,减少率为8.82%。20世纪80年代以来,世界范围内进行了大规模的湿地恢复工作。美国政府1988年提出并实施了“零净损失”的湿地保护政策,对于不可避免的湿地丧失必须通过湿地恢复或重建进行补偿,该政策被加拿大、德国、澳大利亚和英国等地作为湿地保护政策目标<sup>[29]</sup>。进入21世纪,世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)提出基于自然的解决方案,并于2016年世界保护大会上正式通过了其定义,旨在通过保护、可持续管理和修复自然的或被改变的生态系统的行动,有效地和适应性地对当今社会面临的挑战,同时提供人类福祉和生物多样性。党的十八大和十九大分别明确提出“实施重大生态修复工

程,扩大湿地面积”和“强化湿地保护和恢复”等政策,为湿地恢复研究提出了明确目标与战略需求。国务院 2016 年颁发了《湿地保护修复制度方案》,实施了《全国湿地保护工程实施规划(2016—2020 年)》,2018 年发布了《关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知》,2020 年出台了《全国重要生态系统保护和修复重大工程规划(2021—2035 年)》。2021 年 10 月 20 日通过了《对《中华人民共和国湿地保护法(草案)》的第二次审议》,2022 年 6 月 1 日起正式实施。与此同时,“长江大保护”“黄河流域高质量发展”上升为我国国家战略,恢复和重建受损的湿地生态系统已经受到国际社会和我国政府前所未有的广泛关注和重视。

世界各国开展了关于沼泽、河流、湖泊以及滨海湿地等各种湿地类型的退化机理研究,其中以美国佛罗里达州大沼泽地、巴西潘塔纳尔沼泽地、欧洲莱茵河流域、北美五大湖、美国墨西哥湾滨海湿地等世界重要湿地分布区为热点区域。目前关于湿地退化机理的探究已深入到生态学、水文学、生物学、土壤学以及生物地球化学等各领域,并在遥感技术支持下,注重宏观退化过程与微观退化机理的结合。虽然我国的湿地退化与恢复研究起步较晚,但发展迅速,研究覆盖了东北三江平原沼泽湿地、四川若尔盖高原湿地、青海三江源湿地、黄河三角洲湿地、辽河三角洲湿地、东南沿海滨海红树林湿地以及太湖、洞庭湖、白洋淀等湖泊湿地<sup>[30]</sup>。然而退化机理研究大多为宏观、定性的退化过程与机理研究,而较少从生理生化过程、生物地球化学过程、土壤生物化学过程等方面开展退化微观过程与机理研究,阻碍了对湿地退化机理的深入认识。

当前国际上湿地恢复机制研究由注重单要素的恢复过程,向微观机理与宏观过程相结合的多目标兼顾的综合恢复机制发展。既注重湿地结构的恢复,又强调湿地功能的提升。以美国大沼泽湿地为例,从 20 世纪 80 年代开始进行了一系列恢复与治理研究与示范工程,探明了流域尺度水资源分配不均和来源于农业施肥的磷污染是大沼泽地退化的关键胁迫因子,并利用横跨时空尺度特征的“系统性生态指标”对河湖连通等水利工程和本地物种恢复等生物措施的恢复过程进行动态跟踪监测研究,综合评估洪水控制、水质净化和生物多样性维持等湿地功能的恢复机理与效果<sup>[28]</sup>。我国目前的研究更多侧重水、土、生物等单要素、单目标的恢复,但近年来逐渐开始注重基于多要素的生态系统修复机制及流

域尺度功能提升的优化管理研究。例如中国科学院东北地理与农业生态研究所科研团队对我国东北内陆沼泽湿地的研究发现,气候变化和人类活动导致的水文情势改变与盐分聚集已造成大面积的湿地退化。在多年植被和水文恢复研究的基础上,近年来重点开展了水文—生物—栖息地多途径协同恢复机理研究,并逐渐探索以湿地生态系统功能提升为目标的沼泽湿地恢复机制<sup>[31]</sup>。在我国大江大河湿地水污染修复与水环境治理过程中,我国科学家在单要素、单过程、局部性修复的基础上,正逐步探讨针对复杂流域系统全要素、全流域、全过程的流域综合修复机制。

我国湿地类型丰富,面积广阔,但同时依然面临着严峻的湿地退化问题。深入揭示不同湿地类型退化机理与修复机制,既是适应我国湿地生态学这一新兴学科自身不断发展完善的理论需要,同时也是服务我国“退耕还湿”“退田还湖”等重大国家生态战略的实践需求。未来的湿地退化与生态恢复研究,将在结合遥感、生态模型等新技术和新手段的支持下,不断加深针对不同湿地类型的宏观退化过程和微观退化过程与机理及其定量化的研究,在此基础上,注重结构恢复和功能提升的多目标兼顾的流域尺度综合恢复机制,完善湿地生态恢复理论。同时,适应国家生态战略需求,加强大江大河流域湿地生态需水估算和“水文—生态—社会”系统的综合管控研究,开展流域尺度多因子驱动、多目标兼顾的适应性退化湿地生态恢复技术研发与示范,提出制定适宜我国国情的基于自然的湿地生态修复方案,并逐渐建立完善的湿地生态恢复效果评价机制。另外,适时开展湿地生态产业模式研发与市场化、多元化生态补偿机制探索。

### 3 湿地生态学发展建议

#### 3.1 积极促进学科交叉融合,培育新的学科增长点

经历过去 50 多年来迅猛的发展,湿地生态学已经从经典理论研究扩展到多过程、多尺度、多学科综合研究,关注系统模拟与科学预测,重视服务社会需求的基础理论研究与实践应用研究相结合的一门综合学科<sup>[32, 33]</sup>。与学科发展相适应, *Wetlands*、*Wetlands Ecology and Management*、《湿地科学》和《湿地科学与管理》等专业学术期刊相继出现。在受气候变化和人类活动深刻影响的背景下,湿地科学研究需要综合生态学、地理学、水文学、遗传学、土壤学、生物学、环境学和地球化学等学科的理论 and 方

法,以解决全球变化背景下湿地生态系统面临的复杂生态学问题<sup>[34]</sup>。例如,遥感学、遗传学与生态学的交叉使得生态学家得以从宏观和微观不同空间尺度分析全球湿地生态系统面临的生物入侵现象,并从遗传基因层面探讨生物入侵的分子基础、认识入侵种表型可塑性的分子调控机制,揭示外来生物入侵的生态遗传学基础,最终促进了湿地入侵生态学的迅猛发展<sup>[25]</sup>。再如,湿地水鸟生态学的研究与分子生态学、进化生态学、行为生态学、景观生态学和保护生物学的交叉研究,使得科学家得以更深入地探索湿地鸟类生态学现象、过程和规律的内在分析与进化机制及其理论。遥感学、同位素生态学与水鸟生态学的交叉融合,显著提高了湿地水鸟区系分布、种群生态和数量、繁殖、行为、栖息地和迁徙等水鸟生态学领域研究水平<sup>[35]</sup>。随着学科交叉融合以及调查技术不断更新的同时,聚类分析、偏对应分析、主分量分析等多元数据分析方法被应用到湿地水鸟生态学的研究当中<sup>[36]</sup>。总之,多学科交叉的研究是现代生态学的最基本特征之一,目前我国的湿地生态学研究还处于起步和综合研究阶段。因此,湿地生态学研究需加强多学科交叉研究,并注重方法学的研究,借鉴先进理论、技术与经验,促进湿地生态学的蓬勃发展。

### 3.2 采用新兴技术和分析工具,助力学科建设发展

湿地生态学研究越来越依赖大型、复杂数据集和专业技术。其中技术的进步(如全基因组测序的遗传学研究,空中和卫星传感器监测湿地生态系统,同位素示踪)和统计的改进(如贝叶斯建模、机器学习)为湿地生态学家提供了快速生成大量数据的工具。例如,在湿地监测研究中,监测的方法和手段是关键。20世纪初,由于受技术条件限制,湿地监测基本采取定点、定时的人工实地采样方法,湿地监测内容相对简单,基本限于对湿地的分类、分布和数量的调查,因而其相关研究是零星的和非系统的。随着技术的发展,自动化仪器逐渐被应用于湿地监测中,主要体现在湿地面积监测、水质监测和气象监测等方面。航空遥感技术的出现,基本解决湿地分布偏远、环境高湿低温等难题。在20世纪60年代,湿地监测进入了卫星遥感监测阶段。与航空遥感监测相比,卫星遥感对湿地监测具有宏观性、实时性、连续性、经济性和数据综合性等诸多优点。雷达遥感技术和高光谱遥感技术将会在湿地监测中得到更广泛的应用,成为对湿地实现全天候监测的主要技术手段。湿地监测研究已经逐渐形成体系,湿地监测

从零星的野外监测点,到非系统的湿地监测站,再发展到大型的湿地监测台站,目前已经逐渐发展为网络化的监测台站和众多研究网络。湿地监测的内容不断丰富,从最初的湿地类型、湿地面积等较为单一的监测到目前的湿地景观变化、湿地植物以及湿地土壤流失、湿地沙化监测等较为系统的监测。湿地监测的手段不断改进,从最初单纯的湿地野外综合考察到现代遥感技术与GIS技术支持下的湿地动态监测,监测研究不断趋于量化、准确化和网络化。高空间分辨率和高光谱分辨率将是卫星遥感监测总体发展趋势,其中,在湿地遥感分类技术上,从传统的目视解译方法逐步发展到有统计学分类(监督分类和非监督分类)、人工智能分类(神经网络、专家系统和蚁群算法分类)、支持向量机分类、决策树分类和面向对象分类方法等。监测指标也从常见作物长势指标(如LAI、NDVI、TCI、VCI和NPP等)扩展为湿地植物长势指标、气候指标和物候指标等<sup>[37]</sup>。再如,在滨海湿地生态学研究,由于海平面上升和湿地地面高程变化的年际变化十分微小,两者的年平均变化速率均在毫米尺度。因此,目前流行的卫星/机载雷达测高、激光测高(LiDAR)、GPS测高等测绘技术可提供滨海湿地区域数字高程模型(DEM)等三维基层,不同时间序列数据可以识别大时间尺度下滨海湿地演化导致的地形的空间异质性,为滨海湿地应对海平面上升研究提供重要的基线图,但这些技术均无法满足湿地地面高程变化年际尺度的测量精度。为满足毫米尺度高精度湿地地面高程变化的研究需求,美国地质调查局于21世纪初研发了地面高程监测系统—水平标志层技术(SET-MH),用以进行湿地地面高程变化过程和土壤垂向沉积过程的高精度实地监测。SET-MH方法可以满足区域湿地地面高程变化的高精度重复监测的需求,测量精度为 $\pm 1.3$  mm,成为目前唯一满足滨海湿地应对海平面上升研究需求的高精度水准监测技术<sup>[18, 38]</sup>。近年来,SET-MH技术已经开始应用于全球红树林和滨海盐沼湿地应对海平面上升的生态学研究中。另外,湿地生态学越来越注重使用模型作为统计学工具来分析复杂数据。因此,丰富的复杂数据和先进的分析能力可以将湿地生态学推向一个数据驱动的多学科交叉的新时代。可视化、描述和分析数据中的模式将成为理解湿地生态学相关机制的重要基石。

### 3.3 加强国际合作研究,实施国际湿地研究计划

自《湿地公约》签署以来,湿地保护和研究日益

受到国际关注。目前,《湿地公约》已成为国际上重要的自然保护公约之一。截至 2021 年 10 月,缔约方达 172 个,全球有 2 433 处湿地被列入国际重要湿地名录。国际生态学会(INTECOL)已经先后召开了十一届国际湿地大会,2021 年 10 月,第十一届国际湿地大会在新西兰基督城召开。中国政府与湿地生态学家高度重视国际合作研究,2018 年国际湿地科学家学会中国分会正式成立。同年,在中国长春举办了“湿地与生态文明国际学术研讨会”,吸引了来自包括《湿地公约》组织、湿地国际、国际湿地科学家学会、韩国湿地学会、美国地质调查局国家湿地研究中心、罗马尼亚多瑙河三角洲研究所等 120 余家国际湿地组织、国内外知名研究机构 and 高等院校,来自世界各地的包括 6 位中国科学院/中国工程院院士在内的 400 余位科学家参会并进行学术交流。会议期间,中国科学家联合各方共同发起“建立国际湿地研究联盟”倡议,呼吁加强湿地与全球变化、湿地生物多样性保护、湿地恢复与资源合理利用等研究,维护湿地不可替代的重要生态功能,搭建了湿地生态学领域的高水平国际合作研究平台。2020 年,国际湿地研究联盟已正式加入一带一路国际科学组织联盟(ANSO),正为区域生态安全、“一带一路”和生态文明建设提供科学数据基础、理论指导和决策支持。2019 年 12 月,在原中国科学院湿地研究中心的基础上,中国科学院与国家林业和草原局共建“国家湿地研究中心”在北京揭牌,标志着我国湿地研究国家级平台的成立和我国湿地合作研究进入了新阶段。《湿地公约》第十四届缔约方大会将于 2022 年 11 月在中国武汉举办,我国将继续深度参与全球生态治理,深化双多边湿地合作,为全球湿地保护贡献中国方案和中国智慧,展示负责任大国形象。

国际上许多科学计划与湿地生态学研究相关。2005 年,千年生态系统评估(MA)对湿地与水的综合报告,为合理利用湿地的理念提供了有利的理论依据,同时也提出了众多湿地生态学问题。这些国际研究计划为湿地生态学研究提供了理想场所、契机和平台。中国政府高度重视湿地保护,湿地生态学研究也得到跨越式发展。急需开展湿地的全球尺度对比研究,提出并牵头相关国际湿地研究计划,以早日实现引领国际湿地科学研究的目标。2017 年,中国科学家联合美国地质调查局国家湿地研究中心、密西西比河下游海湾水科学中心、美国路易斯安那州立大学等共同承担了国家自然科学基金重点国际合作研究项目“北方冻土区沼泽湿地退化过程及

恢复机制研究”,中美双方科学家对中国黑龙江流域湿地、美国阿拉斯加州冻土区湿地和密西西比河流域湿地进行了多次大规模野外联合科学考察,开展湿地的全球尺度对比研究,针对高强度人类活动和气候变化叠加影响下中高纬冻土区湿地退化关键过程与恢复机制这一国际生态学前沿问题,开展了多年联合攻关。该项目同时打造了一支沼泽湿地退化与恢复国际化联合研究团队,提升了我国冻土区沼泽湿地生态学领域的科学研究水平,引领了国际湿地生态学研究。

21 世纪被誉为湿地保护与恢复的世纪,中国开启了一系列涉及湿地的重大科学研究计划。例如,国家“973”计划、国家重点研发计划、国家科技基础性工作专项等,为湿地保护与恢复提供了强有力的科技支撑。2021 年 10 月,国家自然科学基金委员会第 289 期双清论坛“湿地保护和修复的基础理论及关键技术问题”在北京召开。论坛设置“湿地变化与区域生态安全”“湿地关键过程与驱动机制”“湿地修复技术体系与模式”和“湿地功能维持与区域可持续发展”4 个议题,通过瞄准退化湿地恢复的关键科学问题和重大湿地修复工程生态效应变化与评估等国家重大需求问题,重点围绕我国湿地退化机理、修复机制、关键技术体系和模式等,剖析了当前与湿地研究紧密结合的生态学前沿发展的现状、热点、难点及未来所面临的挑战和发展趋势,凝练了亟需解决的重大关键科学问题,研讨了重点研究方向,对未来 5~10 年湿地科学、湿地保护和修复相关的基础及前沿科学问题研究提出了具体建议。与会专家一致认为,湿地保护和修复是一个重大问题,未来仍需要对湿地生态系统的结构、功能及关键生态过程进行深入研究,加强湿地分类及湿地碳汇功能、湿地土壤的生物地球化学循环等研究。把湿地生态系统结构中相对稳定的共性生态要素作为研究主线,从类型、区域的角度,开展中国重要湿地保护、修复研究,将湿地起源、演化、人类和自然过程、退化因素等连在一起研究。结合当前的国家发展理念,将“双碳”目标与湿地保护紧密地联系起来,完善以沼泽学为基础的多学科交叉科学体系。

进入新时代,湿地生态学研究正越来越受到科学界、社会公众、非政府组织和政府管理部门的关注和重视。在国际湿地生态学研究持续升温的大背景下,中国湿地生态学研究逐渐形成了自己的特色,已取得了长足进展。在生态文明新时代,湿地生态学进入了蓬勃发展的新阶段。

## 参 考 文 献

- [1] 姜明, 邹元春, 章光新, 等. 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.
- [2] Nations U. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. 2015.
- [3] Ramsar Convention Secretariat. The Fourth Ramsar Strategic Plan 2016—2024. International Cooperation on Wetlands, 2016.
- [4] Osland MJ, Feher LC. Winter climate change and the poleward range expansion of a tropical invasive tree (Brazilian pepper-*Schinus terebinthifolius*). *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 607—615.
- [5] Osland MJ, Enwright NM, Day RH, et al. Beyond just sea-level rise: considering macroclimatic drivers within coastal wetland vulnerability assessments to climate change. *Global Change Biology*, 2016, 22(1): 1—11.
- [6] Middleton BA. Climate change and the function and distribution of wetlands. Springer, 2012.
- [7] Zhang XH, Jiang SS, Jiang W, et al. Shrub encroachment balances soil organic carbon pool by increasing carbon recalcitrance in a temperate herbaceous wetland. *Plant and Soil*, 2021, 464: 347—357.
- [8] Yu ZC, Loisel J, Brosseau DP, et al. Global peatland dynamics since the last glacial maximum. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(13).
- [9] 刘子刚. 湿地生态系统碳储存和温室气体排放研究. *地理科学*, 2004, 24(5): 634—639.
- [10] Yu ZC, Joos F, Bauska TK, et al. No support for carbon storage of > 1 000 GtC in northern peatlands. *Nature Geoscience*, 2021, 14(7): 465—467.
- [11] 陈槐, 吴宁, 王艳芬, 等. 泥炭沼泽湿地研究的若干基本问题与研究简史. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(1): 15—26.
- [12] Wang FM, Sanders CJ, Santos IR, et al. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change. *National Science Review*, 2020, 8(9): nwaa296.
- [13] 王法明, 唐剑武, 叶思源, 等. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 241—251.
- [14] Solomon S. The physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, id: 134593048.
- [15] Nicholls RJ, Cazenave A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 2010, 328(5985): 1517—1520.
- [16] Lovelock CE, Cahoon DR, Friess DA, et al. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise. *Nature*, 2015, 526(7574): 559—563.
- [17] Krauss KW, McKee KL, Lovelock CE, et al. How mangrove forests adjust to rising sea level. *The New Phytologist*, 2014, 202(1): 19—34.
- [18] Webb EL, Friess DA, Krauss KW, et al. A global standard for monitoring coastal wetland vulnerability to accelerated sea-level rise. *Nature Climate Change*, 2013, 3(5): 458—465.
- [19] McKee KL, Vervaeke WC. Will fluctuations in salt marsh-mangrove dominance alter vulnerability of a subtropical wetland to sea-level rise?. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1224—1238.
- [20] Wagg C, Bender SF, Widmer F, et al. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(14): 5266—5270.
- [21] Laliberté E, Zemunik G, Turner BL. Environmental filtering explains variation in plant diversity along resource gradients. *Science*, 2014, 345(6204): 1602—1605.
- [22] Fraser LH, Pither J, Jentsch A, et al. Plant ecology. Worldwide evidence of a unimodal relationship between productivity and plant species richness. *Science*, 2015, 349(6245): 302—305.
- [23] 徐炜, 马志远, 井新, 等. 生物多样性与生态系统多功能性: 进展与展望. *生物多样性*, 2016, 24(1): 55—71.
- [24] 谢宝华, 韩广轩. 外来入侵种互花米草防治研究进展. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3464—3476.
- [25] 吴昊, 丁建清. 入侵生态学最新研究动态. *科学通报*, 2014, 59(6): 438—448.
- [26] Carey MP, Sanderson BL, Barnas KA, et al. Native invaders-challenges for science, management, policy, and society. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(7): 373—381.
- [27] Muñoz-Vallés S, Cambrollé J. The threat of native-invasive plant species to biodiversity conservation in coastal dunes. *Ecological Engineering*, 2015, 79: 32—34.
- [28] Mitsch WJ, Gosselink JG. *Wetlands*. John Wiley & Sons, 2015.
- [29] Sparks RE. Wetland restoration, flood pulsing, and disturbance dynamics. *Restoration Ecology*, 2001, 9(1): 112—113.
- [30] 刘兴土. 中国主要湿地地区湿地保护与生态工程建设. 北京: 科学出版社, 2017.
- [31] 吕宪国, 邹元春. 中国湿地研究. 长沙: 湖南教育出版社, 2017.
- [32] Zhang L, Wang MH, Hu J, et al. A review of published wetland research, 1991-2008: ecological engineering and ecosystem restoration. *Ecological Engineering*, 2010, 36(8): 973—980.

- [33] McCallen E, Knott J, Nunez-Mir G, et al. Trends in ecology: shifts in ecological research themes over the past four decades. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2019, 17(2): 109—116.
- [34] 冷疏影. 地理科学三十年：从经典到前沿. 北京：商务印书馆, 2016.
- [35] Wang X, Cao L, Fox AD, et al. Stochastic simulations reveal few green wave surfing populations among spring migrating herbivorous waterfowl. *Nature Communications*, 2019, 10: 2187.
- [36] 何小芳, 吴法清, 贺锋, 等. 中国水鸟研究现状及展望. *环境科学与技术*, 2013, 36(S1): 301—305.
- [37] 张树文, 颜凤芹, 于灵雪, 等. 湿地遥感研究进展. *地理科学*, 2013, 33(11): 1406—1412.
- [38] 王国栋, 赵延彤, 赵美玲, 等. 评估滨海湿地应对海平面上升的脆弱性的研究范式. *湿地科学*, 2021, 19(1): 59—63.

## Progress and Prospects of Wetland Ecology

Wang Guodong    Jiang Ming\*    Sheng Chunlei    Lyu Xianguo

*Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102*

**Abstract** As a main branch of wetland science, wetland ecology aims to understand the relationship between wetland organisms and the environment, and to solve a variety of complex wetland environmental problems. As an emerging discipline, wetland ecology has experienced three stages: the sprouting period, developing period and high-speed developing period. The research topics of wetland ecology have covered different time, space and theoretical scales. The research field has involved from classical theoretical research to contemporary hot research, from micro-scale research to macro-scale research, from basic theoretical research to practical application research. In the new era, the proposal of the United Nations sustainable development goal and the implementation of a series of national strategies such as the protection of the Yangtze River and the high-quality development of the Yellow River Basin have offered new opportunities and challenges for the development of wetland ecology. At present, wetland and global change, wetland biodiversity protection, wetland degradation process and ecological restoration mechanism have become research hotspots at home and abroad. In the future, it is suggested to continue to improve the discipline system of wetlands, promote the interdisciplinary integration and cultivate new growth points. Adopting emerging technologies and analysis tools to help the construction and development of wetland discipline. At the same time, strengthening international cooperative research and implement the international wetland research plan.

**Keywords** wetland ecology; climate change; biodiversity; bibliometric analysis; forefront study; development suggestion

(责任编辑 张强)

\* Corresponding Author, Email: jiangm@iga.ac.cn