

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

姜明^{1,2}, 邹元春^{1,2}, 章光新¹, 佟守正^{1,2}, 武海涛^{1,2}, 刘晓辉^{1,2},
张仲胜^{1,2}, 薛振山^{1,2}, 吕宪国^{1,2*}

(1. 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, 吉林 长春 130102;

2. 长白山湿地与生态吉林省联合重点实验室, 吉林 长春 130102)

摘要:湿地是重要的自然生态系统,也是自然生态空间的重要组成部分。国内外湿地研究源远流长。现代湿地科学发源于湖沼学,中国湿地科学历经60 a的发展,目前已初步形成了完整的学科体系。从学科定义和分支、研究对象和内容、应用领域概述了湿地科学的学科体系,从湿地生物地球化学循环、湿地生态水文与水资源、湿地生物多样性、湿地生态系统服务、湿地生态恢复与重建、湿地监测等方面评述了中国湿地科学研究的主要进展,并据此提出了未来优先研究领域。当前生态文明建设的新时代赋予湿地科学前所未有的发展机遇和动力,中国湿地科学研究得到了大力发展,并已经跻身于国际湿地科研队伍前列。

关键词:学科体系;研究热点;发展趋势;优先领域;新阶段

中图分类号:P941.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-5948(2018)03-279-09

1 湿地科学的学科体系

1.1 湿地科学的定义

湿地是负地形或岸边带及其所承载的水体、土壤与生物相互作用所形成的地理综合体。由于湿地类型的多样性、分布的广泛性、面积的差异性、淹水条件的易变性以及湿地边界的不确定性^[1],导致湿地的生态功能特殊性及其生态过程的复杂性,湿地研究的多学科性、边缘交叉性,为湿地研究提供了广阔的创新空间,有利于形成多学科、多层次的湿地科学体系^[2]。近年来,中国湿地研究经历了由面上考察到长期定位研究、由资源调查到结构、功能和过程研究、由沼泽研究扩展到湿地各种类型研究等过程^[3]。

湿地科学是一门研究湿地的形成演化、发育规律、类型、分布、生态过程、结构与功能和保护与合理利用的科学。湿地科学的主要特征表现在:
① 位于水陆交错带的湿地具有许多区别于其它陆地生态系统的属性;
② 尽管类型多样,但湿地也具

有共有的规律性;
③ 湿地研究需要跨学科研究方法,只有准确理解了湿地诸多方面的特性和共性,才能更有效地制定湿地保护和恢复的政策法规、管理方法与工程技术^[4]。尽管湿地具有丰富的类型、结构、功能和生物多样性,但是都具有共同的水文动态属性,因此,任何成功的湿地保护和恢复措施都需要构建正确的饱和或淹水时机、时长、深度等水文属性^[5]。有些湿地一年甚至几年中只有数周被淹没,而栖息于该湿地的物种已经适应了这种水文周期,剧烈的水文变化往往导致湿地植被的演替甚至整个湿地生态系统的演化^[6]。

在学科属性上,湿地科学是一门融合了地球科学、生物学、生态学、化学、物理学、信息科学与系统科学、工程与技术科学和管理学等的理论与技术,并发展出以整体性-系统性-综合性-复杂性思维和自然-社会-技术多学科交叉方法为研究特色的新兴应用基础型交叉学科。作为基础科学、技术科学和社会科学的交叉学科,还可以继续划分为湿地地理学、湿地生态学、湿地环境学、湿地

收稿日期:2018-04-19; 修订日期:2018-06-19

基金项目:国家重点研发计划专项项目(2016YFC0500408)和国家自然科学基金项目(41771120)资助。

作者简介:姜明(1971-),男,内蒙古自治区兴安盟人,博士,研究员,从事湿地生态学和自然地理学研究。E-mail: jiangm@iga.ac.cn

*通讯作者:吕宪国,研究员。E-mail: luxg@iga.ac.cn

生物学等湿地基础学科,湿地工程学、湿地保护学、湿地修复学等湿地应用学科,以及湿地管理学、湿地经济学、湿地美学等湿地社会学科。随着湿地科学体系的进一步发展,各分支学科还可以进一步细分为沼泽学、湖泊湿地学、河流湿地学、红树林学、滨海湿地学、泥炭地学等,进而通过不同级别的分支学科实现湿地科学的系统化和专业化的统一。

1.2 湿地科学的研究对象和内容

湿地科学的研究尺度包括生物种群、生物群落、生态系统、景观和区域等不同层次。湿地科学的研究对象包括陆地(森林、草原、农田等)和水体系统(河流、湖泊、海洋)的水陆过渡带和生态交错区。湿地科学的研究内容包括:①湿地生态系统的形成、发育和演替研究;②湿地生态系统的结构与功能研究;③湿地生物多样性研究;④湿地生态系统的生态过程研究,主要包括生物过程(有机物的生产)、化学过程(营养物质循环)和物理过程(能量流动)3个主要过程;⑤湿地生态系统评价,包括湿地生态系统功能评价、生态效益评价和湿地环境影响评价等;⑥湿地生态系统健康研究;⑦湿地生态系统的保护、恢复与重建研究;⑧建立湿地生态系统模型等。

1.3 湿地科学的应用领域

在当前生态文明建设的大背景下,国家重视湿地科学应用研究工作,重点集中在以下3方面。

1.3.1 气候变化

湿地与气候变化息息相关,虽然湿地总面积有限,但是在全球陆地有机碳储量和碳排放格局中都占有重要地位。减少碳排放和水消耗是湿地应对气候变化管理的核心目标。减排需要重点解决湿地退化驱动力识别、最小固碳水量、最优水位控制、最佳植物配置、最小净增温潜势等关键技术。为了攻克上述技术瓶颈,湿地科学理论的升华和突破将会为技术集成和实际应用奠定基础,并成功应用于气候变化敏感地区的脆弱湿地,进一步提高中国湿地适应性管理水平。

1.3.2 湿地保护修复

生物多样性和生态系统服务政府间科学与政策平台发布的全球土地退化评估报告指出,在过去300 a,全球有87%的湿地丧失,自1900年以来,全球有54%的湿地丧失^[7]。第二次全国湿地资源调查表明,2003~2013年期间,中国天然湿地面积减少

率仍然高达9.33%,而湿地面积的减少主要是由于人类的不合理开发与利用。湿地保护和修复是生态文明建设的重要内容,事关国家生态安全,事关经济社会可持续发展,事关中华民族子孙后代的生存福祉。鉴于湿地生态系统的多样性和系统内外互动的复杂性,有效的湿地保护修复原理和实践必须建立在科学理论基础之上,否则往往事倍而功半,甚至会造成整个湿地保护修复项目的失败^[5]。

1.3.3 人工湿地构建

人工湿地经过多年的发展,已经细化为水质净化型、水文调蓄型、生物多样性支撑型、景观型、产品供给型和多功能复合型等类型,其在城乡都表现出强大的生命力。针对不同功用的人工湿地的技术改良和一些通性问题,如高效低成本的基质、堵塞、臭味、病虫、越冬、占地面积、植物配置、微生物驯化及与其它技术的融合等,都需要进一步的基础理论支撑^[8]。

2 中国湿地科学发展现状与展望

2.1 湿地生物地球化学循环

湿地特殊的生态环境特征决定了湿地元素地球化学循环过程与陆地生态系统及水生生态系统都有差别^[9]。对于湿地生态系统中关键限制性元素的认知,是理解并联系微观—宏观各个尺度上元素循环与生态系统中物种组成、群落结构乃至景观格局的核心问题。

湿地因其富含有机质、滞水、厌氧等条件,是典型的沉积环境^[10],有利于金属元素的沉积与富集。湿地中氮、硫和磷的循环过程则更为复杂,尤其是对于具有价态的变价元素而言,湿地中的还原环境或氧化、还原环境交替,易导致变价元素形态和过程的多样性,从而影响湿地生态系统的相关功能。例如,铁的生物地球化学循环在湿地中扮演着“维生素”的角色,并激发了重要的环境效应^[11],不仅双边和多边作用于碳、氮、磷和硫等生源要素^[12,13],还通过铁膜影响镉、铅、砷、锑等重金属和类金属元素的化学行为和生物有效性^[14,15];硫在湿地渍水土壤中价态多以 S^{2-} 形式存在,并且易于与金属阳离子形成较为稳定的化合物而促进了金属元素的沉积。在河口地区,由于陆地与海洋、咸水与淡水的交互作用,导致了河口地区元素的集散过程^[16]、地化循环与其它湿地生态系统差异显著^[17]。由于湿地生态系统中有有机质含量丰富,

因此,元素有机赋存态占元素总量的比例较高,加之湿地中土壤微生物种类繁多,二者相互作用导致湿地土壤中元素的有机态循环过程更值得关注,尤其是某些重金属的有机态化合物往往毒性较高。例如,湿地生态系统往往是周围环境汞的汇,但是,同时又是甲基汞的源^[18,19]。此外,较高的微生物活性,导致土壤中源于有机生命体的化合物较多,低分子量有机物较多。在湿地经历较为频繁的冻融过程之后,其释放的氮、磷等营养元素更多^[20,21]。

气候变化和人类活动已经成为改变湿地关键元素生物地球化学循环的主要营力,在局地乃至区域尺度上,人类活动的影响已经远远超过气候变化,对于湿地生物地球化学循环的改变更为直接和迅速^[22,23]。气候变化对沼泽关键生物地球化学过程产生重大影响,尤其是在北半球高纬度地区^[24],过去、现在和未来可能更快、更剧烈的气候变暖和降雨格局变化,将在更大的空间尺度上改变该地区湿地的发育、发展与分布格局,并通过复杂的反馈过程作用于湿地碳循环过程^[25,26]。

湿地生态系统是全球陆地碳库的重要组成部分,在调控地球气候中发挥着至关重要的作用。目前相关研究主要集中在群落尺度的控制实验和单一或少数元素及生态系统功能指标变量的区域模拟,缺乏大尺度上元素地球化学循环改变与生态系统及景观格局演变耦合作用机制的认知,因此,其结果远不足以作为多重胁迫下湿地生态系统适应性调控提供充分的科学依据^[27],尚需有机联系湿地生态系统分子—组织—个体—种群—群落—生态系统各个尺度上元素生物地球化学循环过程与局部—区域—全球等宏观尺度上的生态过程、格局与功能^[28]。

2.2 湿地生态水文与水资源

湿地生态水文与水资源研究以湿地生态系统恢复、管理和服务为导向,重点集中在湿地生态水文过程与模型、生态需水、生态水文调控与生态补水、流域湿地水资源综合管理、气候变化对湿地生态水文的影响等方面^[29,30]。

湿地生态水文过程是湿地生态水文学研究的核心内容,主要研究湿地水文的物理过程、化学过程和水文过程的生态效应,旨在揭示湿地水文、水质特性和湿地生物之间的相互作用和反馈机制。中国科学院东北地理与农业生态研究所在三江平

原开展了湿地蒸散发、水量平衡和水动力模拟等研究,促进了中国湿地生态水文研究的发展^[31,32]。中国学者开展了大量的湿地水文过程的生态效应研究,尤其在黄河三角洲和松嫩平原开展了湿地水文情势与盐分变化交互作用对湿地植物生长和演替的影响研究,确定了水位、盐度和碱度生态阈值^[33-35]。

湿地生态水文模型是在认识环境变化和湿地生态水文过程与机理的基础上,运用计算机技术,建立模拟和预测湿地水文和植被等系统的主要构成要素之间相互作用机制及变化状况的模型,是揭示湿地生态-水文过程相互作用关系、湿地生态需水量精细计算、变化环境下湿地生态水文响应机理和演变趋势等研究不可或缺的有效工具^[36]。湿地生态格局及其与水文过程相互作用机制模拟研究逐渐受到中国学者的关注,主要围绕湿地水文与水动力^[37]、湿地水文与生态演变^[38]、湿地生态需水^[39]、湿地水文功能^[40]、气候变化对湿地的影响^[41,42]和湿地恢复重建与水文调控^[43]等主题,应用湿地生态水文模型,开展了相关的研究工作,对推动中国湿地生态水文学发展具有重要意义。

湿地生态水文对气候变化具有高度敏感性和脆弱性而备受关注。气候变化通过改变全球水文循环的现状而引起水资源在时空上的重新分布,导致大气降水的形式和数量发生变化;同时,气候变化对气温、辐射、风速、CO₂浓度和洪水、干旱水文极值事件发生频率和强度等造成直接影响,从而改变湿地水文循环过程和水文情势,进而对湿地生态水文过程产生深远的影响^[44,45]。在气候变化导致湿地干旱缺水、面积萎缩和功能退化的现实背景下,关于气候变化对湿地生态水文影响的研究成为当前气候变化和可持续发展研究领域关注的热点和重点^[46]。近年来,气温升高、蒸发量增大和降水量减少导致黄河源区湖泊和若尔盖高原湿地水位下降、河流径流量减少和沼泽水文和生态功能退化^[47]。一方面,由于海平面上升,导致长江口崇明岛盐沼植物生理特征发生改变、生态脆弱性问题凸显和湿地面积的不断减少^[48];另一方面,海平面上升引起的海水入侵改变了湿地原有的水-盐交互作用,引起湿地土壤和植物等发生变化。海平面上升导致的潮位变化引起江苏省滨海潮滩表土积盐和植被退化,甚至引起了整个湿地生态系统发生逆向演替^[49]。

未来中国湿地生态水文与水资源研究要重点开展湿地生态水文学理论方法与技术创新、基于湿地生态需水与水文服务的流域水资源综合管控、湿地生态水文对气候变化的响应及适应策略、湿地“水文-生态-社会”系统综合管理等方面研究。

2.3 湿地生物多样性

高度丰富的生物多样性是湿地的重要特征,也是湿地受到国际社会普遍关注的原因之一。中国湿地生物多样性研究主要开展了以湿地植物和水鸟栖息地为核心的基础研究和恢复技术研究,近年来湿地无脊椎动物研究也逐渐受到关注。

植物分布格局及其形成机制是湿地植物多样性研究的核心内容。湿地植物分布具有带状格局特征^[50],水深和土壤养分等环境梯度是植物组成及其丰富度的主控因子^[51],还可以采用生境分布模型方法,通过构建优势种分布对水深变化的响应模型,确定植物优势种分布的关键水深生态参数^[52]。在人类活动干扰下,湿地泥沙淤积会发生变化,泥沙淤积造成植物根区缺氧,并对植物的分生组织等造成机械压力,同时,泥沙淤积能带来丰富的营养,引起湿地植物分布格局的改变^[53]。互花米草(*Spartina alterniflora*)已经对中国温州以南的红树林造成严重威胁。在漳江口,互花米草已经广泛侵入河口,并已经扩散到红树林的下潮汐边缘;它没有入侵拥有封闭树冠的红树林地区,但是,已经入侵了被人类活动干扰了树冠的红树林区^[54]。湿地种子库作为繁殖体的储备库,在植被演替更新和受损湿地恢复中起着十分重要的作用^[55]。水深及其波动是利用土壤种子库进行湿地恢复的关键限制性环境因子之一,长期淹水环境会造成香蒲(*Typha orientalis*)等非目标物种的大量生长,进而影响湿地植物多样性恢复的效果。湿地被开垦后,土壤种子库的物种丰富度和种子密度随着开垦年限的增加迅速下降,开垦超过15 a后,绝大多数的沼泽地中的物种已经消失,湿地自然恢复难度加大^[56,57]。作为泥炭地的优势植物,泥炭藓(*Sphagnum* spp.)存在逾600 a的超长期的持久孢子库,可能是泥炭藓面对多变环境、通过有性更新维持泥炭地苔藓地被格局的重要适应机制^[58]。

近年来,水鸟栖息地监测和预测研究取得长足进步,在地理信息系统空间分析的框架下,探索影像光谱纹理原始信息的繁殖栖息地巢址选择关键因子提取方法^[59];莫莫格迁徙白鹤(*Grus leuco-*

geranus)中途停歇地水深和食物源空间密度信息反演^[60];盐城越冬丹顶鹤(*Grus japonensis*)、扎龙繁殖丹顶鹤多空间尺度下栖息地选择特征提取及栖息地选择模型^[61,62];洞庭湖地区越冬的3种食草雁类种群数量变化与退水时间和藁草(*Carex* spp.)生长状况直接相关^[63]。同时,水鸟栖息地的适宜性分布及其对气候变化的适应性调控受到重视,如果采取有效的适应性对策,能有效缓解气候变化对栖息地影响的适宜性程度^[64]。无脊椎动物也是湿地生态系统的重要组成部分,对湿地环境变化响应敏感。对中国浅海、河流和湖泊中的无脊椎动物已经开展了较多研究,主要以底栖无脊椎动物研究为主;对沼泽中的无脊椎动物开展的研究相对较少,且以土壤动物研究为主,对典型水生无脊椎动物研究比较罕见。水生螺类是湿地水生无脊椎动物的重要类群,是天然沼泽被开发为农田^[65]、洪泛湿地水文连通阻隔影响和不同河段洪泛湿地系统结构差异^[66]的良好指示物种。

2.4 湿地生态系统服务

湿地是重要的自然生态系统,也是自然生态空间的重要组成部分。湿地处于陆地与水生态系统之间的过渡带,是长期水陆交互作用下形成的具有类型多样、结构复杂、功能强大的复杂生态系统,这种复杂性不仅表现为水圈、土壤圈、生物圈的交叉和水文要素、生物要素和土壤要素的耦合,还表现为不同于森林、草原等陆地生态系统和海洋、河流生态系统的特殊生态过程,从而形成了“地球之肾”、“生物超市”、“碳库”、“水库”等生态系统,在全球生态系统中占有日益重要的地位。湿地生态过程与生态功能问题已经成为21世纪中国地理学综合研究的主要领域。湿地快速评价涉及到功能指标(生物指标、结构指标)的使用^[67,68]和湿地垦殖前、后生态系统服务的显著变化^[69];Costanza R等^[70]使用不同年份单位价值量评估了全球生态系统服务价值变化,尽管这些价值系数存在不确定性,但是,其弥补了区域数据的缺乏。生态系统并非出于“均衡”状态,时间和空间上的异质性才是其普遍特征^[71]。

因为能为人们带来超额利润,所以湿地具有价值。由于湿地资源的稀有性,人们愿意为保存湿地而支付一定的费用。湿地评价研究可以提高全社会对湿地保护重要意义的认识,湿地评价也是运用经济手段保护生态系统和环境的需要、建

立综合的资源环境与经济核算体系的需要,更是湿地系统恢复与重建的需要。采用市场价格法、影子工程法、机会成本法、替代花费法和类推法,评估了扎龙湿地服务价值(涵养水源价值、固碳价值、侵蚀控制价值、废物处理价值、生物栖息地价值);采用市场价格法,评估了扎龙湿地的直接实物产品价值;采用旅行费用法(TCM法)和类推法,评估了扎龙湿地直接服务价值(存在价值、遗产价值、备选半备选价值),结果表明,扎龙湿地直接使用价值占总价值的10.07%,其环境价值占58.38%,其非使用类价值占31.55%,扎龙湿地的总经济价值将随着市场需求的变化而波动^[71]。维持与保护湿地生态系统功能是未来实现湿地可持续发展的基础,客观准确深入地研究湿地生态系统功能,量化其经济价值,可以促进自然资本开发的合理决策,有利于人类自身的可持续发展。

2.5 湿地生态恢复与重建

中国湿地修复工作始于20世纪70年代。当时为了保护 and 恢复黑颈鹤(*Grus nigricollis*)越冬栖息地,1980年,中国政府在贵州省威宁彝族回族苗族自治县草海国家级自然保护区实施了蓄水工程,使该保护区的湿地面积和湿地功能得到显著恢复。1996年,湿地公约第六届缔约方大会提出缔约国开展湿地恢复,之后,许多国家也都相继开展了大规模的湿地恢复工作。中国政府于2000年正式发布了《中国湿地保护行动计划》,并在2004年通过了《全国湿地保护工程规划》(2004-2030年),由此标志着中国大规模湿地保护与恢复工作的正式开始。在湿地管理部门不断努力和多个国际组织帮助下,以泥炭地保护为前提,在若尔盖高原退化泥炭地实施了筑坝保水恢复工程^[72];在黄河下游三角洲湿地,实施了调水、调沙和水盐调控等恢复措施^[42];在滇池、太湖、巢湖等水质恶化的湖泊湿地,实施了大规模的面源污染物治理^[73,74];在扎龙湿地和科尔沁湿地等缺水湿地^[75,76],实施了大规模生态补水工程,使这些湿地的面积、水鸟生境和湿地的多种功能得到显著恢复。

围绕湿地水污染修复问题,中国设立了《水体污染控制与治理科技重大专项》,针对中国江河、湖泊和其它类型湿地开展了大规模的恢复工作,例如,经过恢复后,松花江、辽河等污染水体的水质和生物多样性等都得到了显著提高^[77]。当前,湿地植物恢复方面的研究主要集中在植物物种的

筛选技术、有性或无性繁殖技术研发以及大面积推广应用等方面。如何在适宜的时间、选择适宜的品种和采用适合的恢复技术,已经成为湿地植物恢复的热点^[78,79]。利用沉水、浮水和耐盐植物,构建不同类型人工湿地,结合不同基质和水流方式,揭示人工湿地的净化效果、关键过程和影响因素^[80,81],为水体污染控制提供理论和技术支撑。

从当前中国退化湿地恢复内容和发展态势可以看出,中国退化湿地恢复已经从过去的注重单一要素恢复,走向了湿地多要素协同恢复,恢复目标也从过去的单一目标朝着多目标方向发展,恢复技术手段也朝着更经济、更实用、更易于推广的方向发展。

2.6 湿地的调查与监测

湿地调查与监测是全面了解和掌握湿地资源及其变化的主要手段,美国、加拿大和英国等国家都对湿地开展了深入研究。20世纪60年代初,中国开展了针对全国范围内的浅水湖泊、沼泽和泥炭资源的调查,调查区包括三江平原、若尔盖高原、青藏高原、新疆维吾尔自治区、神农架、横断山、沿海地区以及黄河和长江中下游地区等。20世纪80年代初期,卫星影像最早被应用于湖泊、芦苇(*Phragmites australis*)沼泽和海岸湿地调查规划中^[82,83]。1999年,中国第一幅1:400万沼泽图由中国科学院长春地理研究所(现中国科学院东北地理与农业生态研究所)编绘、制印和出版、发行。在1995~2003年和2009~2013年,中国先后两次对全国范围内的湿地资源进行了调查,基本掌握了全国湿地资源的分布、类型、成因和发生、发展规律。2013年,根据由中国科学院东北地理与农业生态研究所主持的科技部基础性工作专项的项目内容,又针对沼泽类型、植物、水和泥炭资源,进行了系统调查。

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、环境高湿低温等特点这一难题。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^[84]。

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,监测研究不断趋于定量化、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^[85]。在过去的20 a中,中国湿地遥感监测研究和应用从深度到广度上都得到了长足发展。

3 未来优先研究重点

3.1 进一步完善湿地科学理论框架

湿地研究也成为国际生态学研究的热点领域,出现了《Wetlands》、《Wetlands Ecology and Management》和《湿地科学》等专业学术期刊。湿地科学研究要综合地理学、水文学、生态学、土壤学、生物学、环境学和地球化学等学科的理论和方法。目前,湿地生态系统研究还处于起步和综合研究阶段,各个分支学科还需要进一步完善。

3.2 关注并牵头设置国际湿地研究计划,促进湿地科学发展

自1971年《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,缔约方达170个,全球有2 309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10次国际湿地大会。国际上许多科学计划与湿地研究相关。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科学问题。这些国际研究计划为湿地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,湿地科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。

3.3 服务国家和地方需求,在解决实际问题中发展学科理论

湿地对营养物质、重金属等物质具有很强的吸附、降解和转化作用,因此,其在水质净化方面的应用潜力巨大。创新人工湿地构建理论、方法和应用实践研究将极大地丰富湿地科学研究理论。湿地具有重要的水文调蓄功能,开展湿地关键水文过程、湿地生态需水和农业用水科学调配、盐碱化湿地综合治理与资源利用等研究,将为区域商品粮基地建设、生态与环境保护提供相关的理论与关键技术。

4 结论

从1960年4月,中国科学院长春地理研究所(现中国科学院东北地理与农业生态研究所)和东北师范大学在长春召开首次沼泽研究协作会议,到第一部《沼泽学概论》、第一幅《中国沼泽图》、第一部《中国沼泽志》、第一部《中国湿地植被》、第一部《中国湿地与湿地研究》、第一个“中国湿地植物标本馆”和第一个“中国沼泽湿地数据库”等湿地研究系列成果问世,标志着本学科在中国的发展经历了从无到有、从探索到创建的艰苦历程。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。近年来,湿地科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。在国际湿地科学研究热持续升温的大背景下,中国湿地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,湿地科学进入了蓬勃发展的新阶段。

参考文献

- [1]陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向[J]. 湿地科学, 2003, **1**(1): 7-11.
- [2]黄锡畴. 湿地科学建设的浅议——祝贺《湿地科学》创刊[J]. 湿地科学, 2003, **1**(1): 2-6.
- [3]吕宪国, 刘晓辉. 中国湿地研究进展——献给中国科学院东北地理与农业生态研究所建所50周年[J]. 地理科学, 2008, **28**(3): 301-308.
- [4]Aber J S, Pavri F, Aber S W. Wetland Environments: A Global Perspective[M]. New York: Wiley-Blackwell, 2012.
- [5]Young P. The “New Science” of wetland restoration[J]. Environmental Science & Technology, 1996, **30**(7): 292-296.
- [6]Page S E, Baird A J. Peatlands and Global Change: Response and Resilience[J]. Annual Review of Environment & Resources, 2016, **41**(1): 35-57.
- [7]Intergovernmental Science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystems. Summary for policymakers of the thematic assessment of land degradation and restoration[R]. https://sciencesnaturelles.ch/uuid/a53c5083-e9e3-5f9a-8324-bb1477807559?r=20170706115333_1522065442_d2d63005-ccc2-5b8f-babe-28e158dfbbfd, 2018-03-28.
- [8]Valipour A, Ahn Y H. Constructed wetlands as sustainable ecotechnologies in decentralization practices: a review[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, **23**(1): 180-197.
- [9]王国平, 刘景双. 湿地生物地球化学研究概述[J]. 水土保持学报, 2002, **16**(4): 144-148.
- [10]王国平, 吕宪国. 沼泽湿地环境演变研究回顾与展望——纪念中国科学东北地理与农业生态研究所建所50周年[J]. 地理科学, 2008, **28**(3): 309-313.
- [11]姜明, 吕宪国, 杨青, 等. 湿地铁的生物地球化学循环及其环境效应[J]. 土壤学报, 2006, **43**(3): 493-499.
- [12]Yu X F, Grace M R, Sun G Z, *et al.* Application of ferrihydrite and calcite as composite sediment capping materials in a eutrophic lake[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, **18**(3): 1185-1193.
- [13]Zou Y C, Zhang S J, Huo L L, *et al.* Wetland saturation with introduced Fe(III) reduces total carbon emissions and promotes the sequestration of DOC[J]. Geoderma, 2018, **325**: 141-151.
- [14]刘春英, 陈春丽, 弓晓峰, 等. 湿地植物根表铁膜研究进展[J]. 生态学报, 2014, **34**(10): 2470-2480.
- [15]Jia X Y, Tian Z J, Qin L, *et al.* Iron regulates the performance of wetland vegetation through synchronous effect on phosphorus acquisition efficiency[J]. Chinese Geographical Science, 2018, **28**(2): 337-352.
- [16]Li S, Cui B, Xie T, *et al.* What drives the distribution of crab burrows in different habitats of intertidal salt marshes, Yellow River Delta, China[J]. Ecological Indicators, 2018, **92**: 99-106.
- [17]Liu X H, Jiang M, Dong G H, *et al.* Ecosystem Service Comparison before and after Marshland Conversion to Paddy Field in the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Wetlands, 2017, **37**(3): 593-600.
- [18]刘汝海, 王起超, 吕宪国, 等. 三江平原湿地汞的地球化学特征[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(5): 661-663.
- [19]王起超, 刘汝海, 吕宪国, 等. 湿地汞环境过程研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, **17**(6): 881-885.
- [20]王洋, 刘景双, 王国平, 等. 冻融作用与土壤理化效应的关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, **23**(2): 91-96.
- [21]于晓菲, 王国平, 吕宪国, 等. 冻融交替处理下湿地土壤可溶性铁的动态变化研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1387-1394.
- [22]白军红, 王庆改. 中国湿地生态威胁及其对策[J]. 水土保持研究, 2003, **10**(4): 247-249.
- [23]白军红, 邓伟, 王庆改, 等. 松嫩平原湿地环境问题及整治方略[J]. 湿地科学, 2008, **6**(1): 1-6.
- [24]王娇月, 韩耀鹏, 宋长春, 等. 冻融作用对大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤有机碳矿化的影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2018, **14**(1): 59-66.
- [25]马学慧, 等. 中国泥炭地碳储量与碳排放[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [26]Zhang Z, Craft C B, Xue Z, *et al.* Regulating effects of climate, net primary productivity, and nitrogen on carbon sequestration rates in temperate wetlands, Northeast China[J]. Ecological Indicators, 2016, **70**: 114-124.
- [27]Rhee J S, Iamchaturapatr J. Carbon capture and sequestration by a treatment wetland[J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(3): 393-401.
- [28]张仲胜, 李敏, 宋晓林, 等. 气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展[J]. 土壤学报, 2018, **55**(2): 273-282.
- [29]杨志峰, 崔保山, 孙涛. 湿地生态需水机理、模型和配置[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [30]章光新, 张蕾, 冯夏清, 等. 湿地生态水文与水资源管理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [31]陈刚起, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原沼泽蒸发研究[J]. 地理科学, 1993, **13**(3): 220-226.
- [32]崔丽娟. 三江平原沼泽生态系统水量平衡: 以别拉洪河流域为例[J]. 地理科学, 1994, **14**(4): 384-386.
- [33]崔保山, 赵欣胜, 杨志峰, 等. 黄河三角洲芦苇种群特征对水深环境梯度的响应[J]. 生态学报, 2006, **26**(5): 1533-1541.
- [34]章光新. 水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述[J]. 生态学报, 2012, **32**(13): 4254-4260.
- [35]邓春暖, 章光新, 李红艳, 等. 莫莫格湿地芦苇对水盐变化的生理生态响应[J]. 生态学报, 2012, **32**(13): 4146-4153.
- [36]吴燕锋, 章光新. 湿地生态水文模型研究综述[J]. 生态学报, 2018, **38**(7): 2588-2598.
- [37]Feng X Q, Zhang G X, Xu Y J. Simulation of hydrological processes in the Zhalong wetland within a river basin, Northeast China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, **17**(7): 2797-2807.
- [38]胡东来. 嫩江流域水循环与湿地生态演变相互作用及综合调控[D]. 上海: 东华大学, 2009.
- [39]刘大庆. 基于水循环模拟的沼泽湿地生态需水研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [40]宋文彬, 谢先红, 徐婷, 等. 洪河沼泽湿地水文过程模型构建及水文功能分析[J]. 湿地科学, 2014, **12**(5): 544-551.

- [41]姚允龙, 王蕾. 基于SWAT的典型沼泽性河流径流演变的气候变化响应研究[J]. 湿地科学, 2008, **6**(2): 198-203.
- [42]Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, *et al.* Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China[J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(7): 1090-1103.
- [43]黄翀, 刘高焕, 王新功, 等. 不同补水条件下黄河三角洲湿地恢复情景模拟[J]. 地理研究, 2010, **29**(11): 2026-2034.
- [44]董李勤, 章光新. 全球气候变化对湿地生态水文的影响研究综述[J]. 水科学进展, 2011, **22**(3): 429-436.
- [45]Li F P, Zhang G X, Xu Y J. Spatiotemporal variability of climate and streamflow in the Songhua River Basin, northeast China[J]. Journal of Hydrology, 2014, **514**: 53-64.
- [46]王浩, 严登华, 贾仰文, 等. 现代水文水资源学科体系及研究前沿和热点问题[J]. 水科学进展, 2010, **21**(4): 479-489.
- [47]赵志龙, 张德铨, 刘林山, 等. 青藏高原湿地研究进展[J]. 地理科学进展, 2014, **33**(9): 1218-1230.
- [48]Zhu Z, Zhang L, Wang N, *et al.* Interactions between the range expansion of saltmarsh vegetation and hydrodynamic regimes in the Yangtze Estuary, China[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2012, **96**(1): 273-279.
- [49]杨桂山, 施雅风, 张琛. 江苏滨海滩涂湿地对潮位变化的生态响应[J]. 地理学报, 2002, **57**(3): 325-332.
- [50]娄彦景, 赵魁义, 马克平. 洪河自然保护区典型类型湿地植物群落特征及物种多样性梯度变化分析[J]. 生态学报, 2007, **27**(9): 3883-3891.
- [51]Lou Y J, Zhao K Y, Wang G P, *et al.* Long-term changes in marsh vegetation in Sanjiang Plain, northeast China[J]. Journal of Vegetation Science, 2015, **26**(4): 643-650.
- [52]Lou Y J, Gao C Y, Pan Y W, *et al.* Niche modelling of marsh plants based on occurrence and abundance data[J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 198-207.
- [53]Chen X S, Liao Y L, Xie Y H, *et al.* The combined effects of sediment accretion (burial) and nutrient enrichment on the growth and propagation of *Phalaris arundinacea*[J]. Scientific Reports, 2017, **7**: 39963.
- [54]Zhang Y H, Huang G M, Wang W Q, *et al.* Interactions between mangroves and exotic *Spartina* in an anthropogenically disturbed estuary in southern China[J]. Ecology, 2012, **93**(3): 588-597.
- [55]Middleton B A. Soil seed banks and the potential restoration of forested wetlands after farming[J]. Journal of Applied Ecology, 2003, **40**(6): 1025-1034.
- [56]Wang G D, Wang M, Lu X G, *et al.* Effects of farming on the soil seed banks and wetland restoration potential in Sanjiang Plain, Northeast of China[J]. Ecological Engineering, 2015, **77**: 265-274.
- [57]Wang G D, Middleton B, Jiang M. Restoration potential of sedge meadows in hand-cultivated soybean fields in northeastern China[J]. Restoration Ecology, 2013, **21**(6): 801-808.
- [58]Bu Z, Sundberg S, Feng L, *et al.* The Methuselah of plant diaspores: *Sphagnum* spores can survive in nature for centuries[J]. New Phytologist, 2017, **214**(4): 1398-1402.
- [59]江红星, 刘春悦, 钱法文, 等. 基于3S技术的扎龙湿地丹顶鹤巢址选择模型[J]. 林业科学, 2009, **45**(7): 76-83.
- [60]Jiang H X, Liu C Y, Sun X W, *et al.* Remote Sensing Reversion of Water Depths and Water Management for the Stopover Site of Siberian Cranes at Momoge, China[J]. Wetlands, 2015, **35**(2): 369-379.
- [61]Liu C Y, Jiang H X, Hou Y Q, *et al.* Habitat changes for breeding waterbirds in Yancheng National Nature Reserve, China: a remote sensing study[J]. Wetlands, 2010, **30**(5): 879-888.
- [62]Liu C Y, Jiang H X, Zhang S Q, *et al.* Multi-scale analysis to uncover habitat use of red-crowned cranes: Implications for conservation[J]. Current Zoology, 2013, **59**(5): 604-617.
- [63]Zou Y A, Tang Y, Xie Y H, *et al.* Response of herbivorous geese to wintering habitat changes: conservation insights from long-term population monitoring in the East Dongting Lake, China[J]. Regional Environmental Change, 2017, **17**(3): 879-888.
- [64]Zheng H F, Shen G Q, Shang L Y, *et al.* Efficacy of conservation strategies for endangered oriental white storks (*Ciconia boyciana*) under climate change in Northeast China[J]. Biological Conservation, 2016, **204**: 367-377.
- [65]Wu H T, Guan Q, Lu X G, *et al.* Snail (Mollusca:Gastropoda) assemblages as indicators of ecological condition in freshwater wetlands of Northeast China[J]. Ecological Indicators, 2017, **75**: 203-209.
- [66]Guan Q, Wu H T, Lu K L, *et al.* Longitudinal and lateral variation in snail assemblages along a floodplain continuum[J]. Hydrobiologia, 2017, **792**(1): 345-356.
- [67]殷书柏, 吕宪国. 湿地功能快速评价中的若干理论问题[J]. 湿地科学, 2006, **4**(1): 1-6.
- [68]袁军, 吕宪国. 湿地功能评价研究进展[J]. 湿地科学, 2004, **2**(2): 153-160.
- [69]刘晓辉, 吕宪国. 三江平原湿地生态系统固碳功能及其价值评估[J]. 湿地科学, 2008, **6**(2): 212-217.
- [70]Costanza R, Groot R D, Sutton P, *et al.* Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014, **26**(1): 152-158.
- [71]崔娟娟. 湿地价值评价研究[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [72]闵泓翔. 若尔盖高原湿地退化现状、成因及恢复对策研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2012.
- [73]Huang K, Jin Z, Li J, *et al.* Technologies and engineering practices of water pollution control for a typical urban river in Dianchi watershed[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2014, **23**(12 C): 3469-3475.
- [74]Wang J, Zhao Q, Pang Y, *et al.* Dynamic simulation of sediment resuspension and its effect on water quality in Lake Taihu, China[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2017, **17**(5): 1335-1346.
- [75]佟守正, 吕宪国, 苏立英, 等. 扎龙湿地生态系统变化过程及影响因素分析[J]. 湿地科学, 2008, **6**(2): 179-184.
- [76]王国平. 水资源开发对科尔沁湿地环境的负面效应[J]. 国土与自然资源研究, 2001, **2**: 45-47.
- [77]杨育红, 阎百兴. 小流域面源污染减控措施优化管理[J]. 生态

- 与农村环境学报, 2011, **27**(2): 11-15.
- [78]安树青. 湿地生态工程: 湿地资源利用与保护的优化模式[M]. 北京: 化学工业出版社环境科学与工程出版中心, 2003.
- [79]孟焕, 王雪宏, 佟守正, 等. 预处理方式对香蒲和芦苇种子萌发的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(19): 6142-6146.
- [80]梁雪, 贺锋, 徐栋, 等. 人工湿地植物的功能与选择[J]. 水生态学杂志, 2012, **33**(1): 131-138.
- [81]刘亮, 范航清, 李春干. 广东西端海岸四种红树植物天然种群生境高程[J]. 生态学报, 2012, **32**(3): 690-698.
- [82]张养贞, 华润葵, 李玉勤. 陆地卫星图象在三江平原沼泽调查中的应用[J]. 地理科学, 1993, **13**(1): 49-56.
- [83]刘侠, 张树林, 苏文盛. 陆地卫星图象在洞庭湖芦苇资源调查中的应用[J]. 地理科学, 1981, **1**(1): 52-57.
- [84]薛振山, 姜明, 吕宪国, 等. 农业开发对生态系统服务价值的影响——以三江平原浓江—别拉洪河中下游区域为例[J]. 湿地科学, 2012, **10**(1): 40-45.
- [85]张树文, 颜凤芹, 于灵雪, 等. 湿地遥感研究进展[J]. 地理科学, 2013, **33**(11): 1406-1412.

Progress and Prospects of Wetland Science in China —Commemoration on the 60th Anniversary of the Founding of Northeast Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences

JIANG Ming^{1,2}, ZOU Yuanchun^{1,2}, ZHANG Guangxin¹, TONG Shouzheng^{1,2}, WU Haitao^{1,2},
LIU Xiaohui^{1,2}, ZHANG Zhongsheng^{1,2}, XUE Zhenshan^{1,2}, LU Xianguo^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, P.R.China*; 2. *Jilin Provincial Joint Key Laboratory of Changbai Mountain Wetland and Ecology, Changchun 130102, Jilin, P.R.China*)

Abstract: As one of very important ecosystems on the earth, the wetlands are key components of the natural ecological spaces globally. Researches on the wetlands at home and abroad have a long history. The modern wetland science is originated from limnology. Wetland science has undergone 60 years of development in China. At present, it has formed a complete disciplinary system preliminarily. This article outlines the discipline system of wetland science from the discipline definition and branches, research objects and methods, and application fields; reviewed the main progresses of the researches on wetland science in China from 6 aspects (wetland biogeochemical cycles, wetland ecological hydrology and water resources, wetland biodiversity, wetland ecosystem services, wetland ecological restoration and rehabilitation and wetland monitoring), and put forward future research priorities. The new era of the ecological civilization construction has given unprecedented opportunities and impetus for the development of wetland science, and the researches on wetland science in China have been moving toward a new stage since then.

Keywords: disciplinary system; top issues; development trend; priority fields; new era