

DOI: 10.5846/stxb202104130960

夏少霞, 于秀波, 王春晓. 中国湿地生态站现状、发展趋势及空间布局. 生态学报, 2022, 42(19): 7717-7728.

Xia S X, Yu X B, Wang C X. Current status, development and spatial planning of China's Wetland Ecological Stations. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7717-7728.

中国湿地生态站现状、发展趋势及空间布局

夏少霞^{1, 2}, 于秀波^{1, 2, *}, 王春晓^{1, 2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 湿地调查与监测是全面了解和掌握湿地变化, 开展湿地保护和修复的前提和基础。湿地生态站是开展湿地长期监测和野外试验的平台, 对研究湿地生态系统过程与功能, 揭示湿地变化机理具有重要作用。系统梳理了我国现有的湿地生态站, 分析了当前湿地生态站建设面临的问题, 指出: 与国际主要生态观测网络相比, 我国综合性湿地生态站数量较少、比例偏低, 导致在湿地生态系统监测和评估上存在较大空缺; 现有生态站存在层级结构不合理、监测指标体系不规范等问题, 制约了国家尺度湿地生态系统监测评估的需求。研究基于中国湿地生态站的现状, 提出综合性湿地生态站布局原则, 认为: 应反映湿地生态系统类型代表性及湿地的空间分布特征, 体现综合站-区域站-卫星站的层级结构特点, 服务国家湿地保护和生态修复的战略需求。按照上述布局原则, 对今后综合性湿地生态站的空间布局提出建议。同时, 对湿地站发展定位、聚焦的前沿科学问题、湿地联网研究及国际合作方面提出了展望。

关键词: 湿地生态站; 观测与研究; 空间布局; 未来展望

Current status, development and spatial planning of China's Wetland Ecological Stations

XIA Shaoxia^{1, 2}, YU Xiubo^{1, 2, *}, WANG Chunxiao^{1, 2}

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Wetland survey and monitoring is the prerequisite and foundation for comprehensively understanding and clarifying wetland ecosystem dynamics, and carrying out wetland conservation and restoration. Wetland Ecological Stations provide the platform for long-term wetland observation and in-situ experiments, which are indispensable in studying and revealing the processes, functions, as well as related mechanism of wetland change. There are some problems in the development of wetland ecological stations in China. Compared with the International Long-Term Ecological Research Network, the number and proportion of Wetland Ecological Stations in National Ecological stations are less and there are also some gaps on spatial planning of wetland ecological stations; in addition, wetland ecological stations are not laid out with obvious hierarchical structure (such as Master stations, Regular stations and Satellite stations), and the monitoring indicators and systems for wetland ecological stations are also not standard and uniform, which lead to limitations on monitoring and assessment of wetland ecosystem at national scale. In this study, we summarized and analyzed the status and problems in the development of Wetland Ecological Stations in China, and proposed the planning principles of the National

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (XDA23040203); 国家自然科学基金项目 (42171105, 41971133); 国家生态系统观测研究共享服务平台建设项目

收稿日期: 2021-04-13; 网络出版日期: 2022-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuxb@igsnr.ac.cn

Wetland Ecological Stations in existing National Ecological Stations System. We suggested that it should consider representativeness of wetland ecosystem types and the spatial distribution characteristics of wetlands in China, as well as to take account of the hierarchical structure of wetland stations and their combination to national development strategy and policy demand on wetland conservation and restoration. We proposed some targeted suggestions on spatial planning of China's Wetland Ecological Stations in the future based on the above principles. At the same time, the development orientation of wetland station was determined and the frontier and key scientific issues needing to be focused in the future were discussed, such as the changes of wetland landscape, lake eutrophication and invasive species control, climate change and carbon sequestration mechanism, etc. Finally, how to response to the national development strategy and policy demand was also analyzed. It is proposed to strengthen cooperation with international partners in the fields of biodiversity conservation and monitoring, climate change, transboundary wetlands and the conservation of migratory species.

Key Words: Wetland Ecological Station; observation and research; spatial planning; prospective

湿地是水陆生态系统交界面,是陆地生态系统和水体生态系统相互作用形成的自然综合体和独特的生态系统类型,在维护区域生态平衡和生物多样性方面具有重要作用^[1-3]。我国拥有丰富的湿地资源,根据第二次全国湿地资源调查结果,中国湿地总面积 5360.26 万 hm^2 ,其中,自然湿地占湿地总面积的 87.37%,主要包括沼泽湿地、河流湿地、湖泊湿地以及近海与海岸湿地,而人工湿地占湿地总面积的 12.63% (图 1 和图 2)^[4-6]。作为自然生态空间的重要组成部分,湿地为人类生存提供不可或缺的物质和环境资源,为全球 40% 的陆地生物,特别是 87% 的水鸟提供生境。然而,在过去很长一段时间,湿地面临巨大威胁,面积持续缩减、功能不断退化,依赖湿地生存的物种种群数量呈下降趋势,其中,超过 50% 的水鸟种群数量明显减少^[7-8]。

湿地监测和保护是生态文明建设的重要内容,2012

年,党的十八大提出“建设生态文明”的理念,明确指出“扩大湖泊、湿地面积,保护生物多样性”;2016 年国务院办公厅印发《湿地保护修复制度方案》,标志着湿地进入“全面保护”的新阶段^[9]。2020 年,中国政府提出碳达峰、碳中和的目标和愿景,而湿地生态系统具有较高的固碳潜力,特别是滨海湿地被认为是重要的“蓝色碳汇”。因此,开展湿地调查与监测,全面了解和掌握湿地变化,从“生态系统整体性”角度加强湿地研究显得尤为迫切^[10]。而野外生态站是支撑湿地研究的基础平台,可获取湿地生态变化的第一手数据^[11],是揭示湿地生态系统周期性规律,进行湿地科学管理的前提和基础,将为国家层面湿地保护和修复及国家“双碳”目标的实现提供理论和技术支撑。

自 20 世纪 50 年代以来,中国野外生态站的建设取得了长足进步。中国科学院筹建于 1988 年的中国生态系统研究网络 (CERN) 在我国生态系统监测、科学研究和试验示范等方面起到推动作用,其制订的生态系统水分、土壤、大气、生物要素长期监测指标,长期观测的场地及设置方法,统一的观测和分析的方法引领了野外生态站建设^[12]。2005 年,中国国家生态系统观测研究网络 (CNEN) 成立,在国家层面对分属于不同主管部门的、不同生态系统类型的生态站及其野外观测研究基地资源、观测设备资源、数据资源等进行统一的整合和规范化^[13]。2007 年,在国家林业局支持下,中国湿地生态系统定位研究网络 (简称湿地生态站网) 成立,由分布于全国重要湿地区的湿地生态站组成,在国际重要湿地、国内重要湿地优先建站,并逐步加密完善湿地生

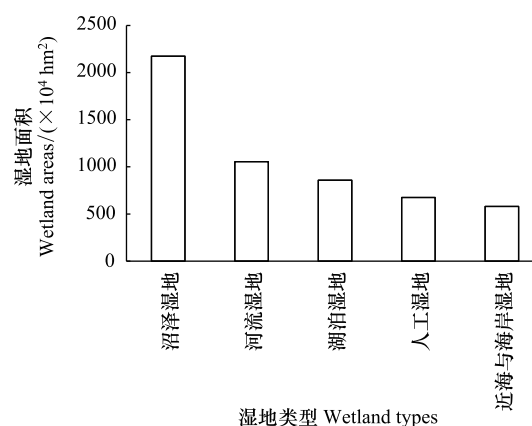


图 1 中国不同湿地类型的面积和比例

Fig.1 Areas and proportion of different wetland types in China

湿地类型统计数据来源于第二次湿地资源调查^[4]

态站的布局,对湿地的生态特征、生态功能及人为干扰进行长期定位观测。2013 年,由中国科学院、国家林业局、中国农科院、高校等联合发起,成立中国湿地生态系统野外站联盟(简称湿地联盟),旨在制定相对统一的监测指标和技术规范,开展湿地生态站长期定位观测和多生态站联合研究,揭示湿地生态系统的结构与功能规律,为国家、部门建设野外生态站提供决策依据。上述湿地生态站/网的建设和探索,推动了湿地生态学的研究,使得国内湿地生态站得到了持续和快速的发展。

然而,当前湿地生态站建设发展中仍面临一些问题,规划布局、监测指标规范与设施完备程度等方面仍需提升,与国家尺度湿地状况及其变化监测的需求仍有较大差距^[14]。如湿地生态站中湿地类型及区域分布不均衡,难以反映全国湿地生态系统整体变化状况;具有长期稳定运行经费,完备的监测实验设施和指标体系的生态站较少,湿地生态站的综合能力有待提高;从国际发展趋势来看,新增湿地类型生态站迫在眉睫。为响应“山水林田湖草沙”与生态文明建设战略,实现湿地全面保护恢复以及国家“双碳”目标,亟待建设综合性湿地生态站。本研究归纳分析了中国湿地生态站的现状与问题,并提出了湿地生态站未来的发展趋势及空间布局。

1 中国湿地生态站现状及面临的问题

1.1 湿地类型生态站在现有国家野外生态站体系中存在明显空缺

国际上,逐渐重视湿地生态系统研究及湿地类型生态站的建设。国际长期生态学研究网络(International Long-Term Ecological Research Network, ILTER)含有美洲、欧洲、非洲、东亚太平洋 4 个区域网络的 743 个站点(注:不包括海洋类型生态站),其中淡水河流与淡水湖泊站点共 167 个,所占比例为 22.48%^[15]。英国环境变化网络(Environmental Change Network, ECN)共有 57 个观测站,其中湖泊站 16 个、河流和溪流站 29 个,所占比例为 78.95%^[16]。美国国家生态观测网络(National Ecological Observatory Network, NEON)共有 106 个野外观测站,其中淡水观测站点 46 个,所占比例为 43.40%(图 3)。

近 20 年来,中国湿地生态站建设也取得了长足发展,在科学技术部、国家林业和草原局、中国科学院、中国林业科学研究院及高校的共同支持下,陆续建设了 55 个湿地生态站。其中,2015 年和 2021 年,科技部先后支持和遴选了 53 个和 69 个有固定基础设施和长期定位观测数据的野外生态站进入国家站体系(不包括海洋类型生态站),其中,湿地类型生态站为 12 个,包括梁子湖站、东湖站、太湖站、三江站、兴凯湖、盘锦站、若尔盖站、洱海站、鄱阳湖站、洞庭湖站、长三角城市湿地站和长江河口湿地站(表 1)。然而,目前国家生态站体系中,湿地生态站的比例仅为 9.84%,低于国际长期生态系统研究网络的平均水平。与森林、荒漠和草地等生态系统类型相比,湿地野外生态站的总数量和在国家站中的数量也明显偏少。同时,湿地类型代表性不足,以湖泊类型湿地站为主,河流和沼泽类型湿地生态站偏少;湿地生态站分布与湿地集中分布区不匹配,青藏高原区和蒙新干旱区湿地偏少;目前尚无河流湿地类型的国家站,且蒙新高原湿地、华南沿海和东部平原区无国家站(图 4)。

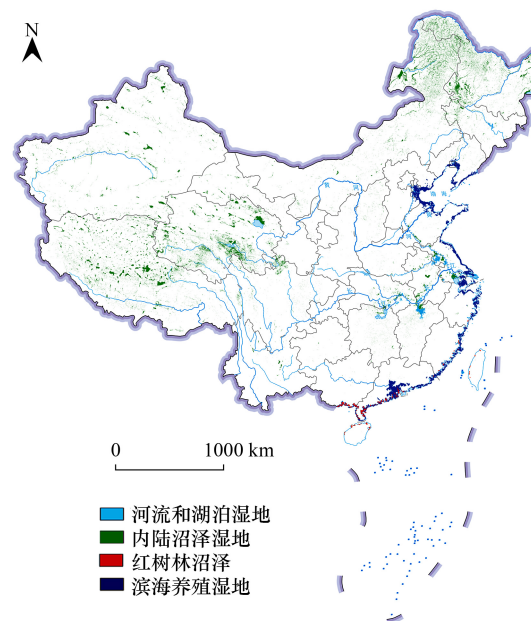


图 2 中国主要湿地分布

Fig.2 The distribution of wetlands in China

湿地分布数据来源于中国科学院东北地理与农业生态研究所,包括了河流和湖泊湿地、内陆沼泽、红树林沼泽及滨海养殖塘等湿地类型^[5-6]

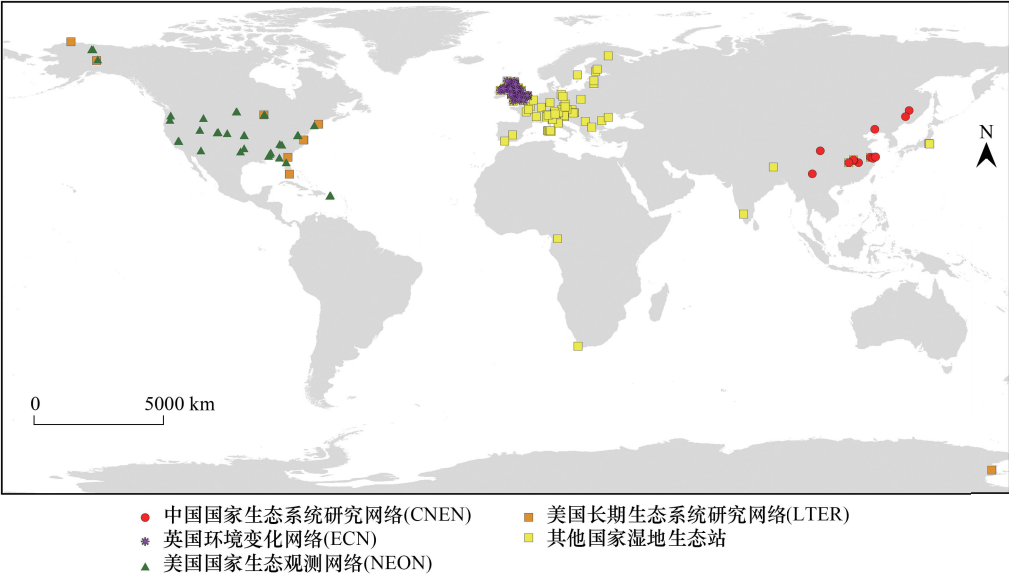


图 3 全球主要生态系统研究网络湿地生态站分布图

Fig.3 The distribution of wetland ecological stations of the International Long-term Ecosystem Research Network

资料来源于国际长期生态系统研究网络(<https://www.ilternet.edu/>)

表 1 中国现有湿地类型生态站列表

Table 1 The list of China's current wetland ecological stations

序号 No	湿地站名称 Name of wetland ecological station	省份 Province	湿地类型 Wetland types	湿地生态站网 China Wetland Ecosystem Research Network	湿地联盟 Chinese Wetland Ecosystem Research Station Alliance	国家站 National wetland ecological station
1	三江平原沼泽湿地生态试验站	黑龙江	沼泽湿地	√	√	√
2	兴凯湖湿地生态研究站	黑龙江	湖泊湿地		√	√
3	黑龙江扎龙湿地生态系统观测研究站	黑龙江	沼泽湿地	√		
4	吉林查干湖湿地生态系统观测研究站	吉林	湖泊湿地	√		
5	吉林莫莫格湿地生态系统观测研究站	吉林	沼泽湿地	√		
6	辽宁盘锦湿地生态系统野外科学观测研究站	辽宁	滩涂湿地			√
7	辽宁双台河口湿地生态系统观测研究站	辽宁	滩涂湿地	√		
8	内蒙古大兴安岭汗马湿地生态系统观测研究站	内蒙古	沼泽湿地	√		
9	内蒙古额尔古纳湿地生态系统观测研究站	内蒙古	沼泽湿地	√		
10	内蒙古呼伦湖湿地生态系统观测研究站	内蒙古	湖泊湿地	√		
11	内蒙古包头黄河湿地生态系统观测研究站	内蒙古	沼泽湿地	√		
12	内蒙古乌梁素海湿地生态系统观测研究站	内蒙古	湖泊湿地	√		
13	北京汉石桥湿地生态系统观测研究站	北京	沼泽湿地	√		
14	北京野鸭湖国家湿地公园观测研究站	北京	沼泽湿地		√	
15	河北北戴河滨海湿地生态系统观测研究站	河北	滩涂湿地	√		
16	河北衡水湖湿地生态系统观测研究站	河北	湖泊湿地	√		
17	黄河三角洲滨海湿地生态试验站	山东	滩涂湿地		√	
18	山东微山湖湿地生态系统观测研究站	山东	湖泊湿地	√		
19	山西长子精卫湖湿地生态系统观测研究站	山西	湖泊湿地	√		
20	新疆博斯腾湖湿地生态系统观测研究站	新疆	湖泊湿地	√		
21	宁夏黄河湿地生态系统观测研究站	宁夏	沼泽湿地	√		
22	甘肃黑河湿地生态系统观测研究站	甘肃	沼泽湿地	√		

续表

序号 No	湿地站名称 Name of wetland ecological station	省份 Province	湿地类型 Wetland types	湿地生态站网 China Wetland Ecosystem Research Network	湿地联盟 Chinese Wetland Ecosystem Research Station Alliance	国家站 National wetland ecological station
23	甘肃敦煌西湖湿地生态系统观测研究站	甘肃	湖泊湿地	√		
24	青海湖湿地生态系统观测研究站	青海	湖泊湿地	√		
25	青海三江源湿地生态系统观测研究站	青海	沼泽湿地	√		
26	申扎高寒草原与湿地生态系统观测试验站	西藏	沼泽湿地		√	
27	若尔盖高寒湿地生态站	四川	沼泽湿地	√		√
28	三峡水库消落区湿地研究站	重庆	沼泽湿地	√	√	
29	红枫湖湖泊生态系统研究站	贵州	湖泊湿地		√	
30	贵州草海湿地生态系统观测研究站	贵州	沼泽湿地	√		
31	抚仙湖高原深水湖泊研究站	云南	湖泊湿地		√	
32	云南滇池湿地生态系统观测研究站	云南	沼泽湿地	√		
33	云南洱海湖泊生态系统国家野外科学观测研究站	云南	湖泊湿地			√
34	安徽升金湖湿地生态系统观测研究站	安徽	湖泊湿地			
35	江西鄱阳湖湖泊湿地观测研究站	江西	湖泊湿地	√	√	√
36	梁子湖湖泊湿地生态系统观测研究站	湖北	湖泊湿地		√	√
37	湖北东湖湖泊生态系统国家野外科学观测研究站	湖北	湖泊湿地			√
38	天鹅洲湿地生态系统定位站	湖北	滩涂湿地		√	
39	香溪河生态系统实验站	湖北	河流湿地		√	
40	湖北洪湖湿地生态系统观测研究站	湖北	湖泊湿地	√	√	
41	湖南洞庭湖湿地生态系统野外科学观测研究站	湖南	湖泊湿地	√	√	√
42	江苏盐城滨海湿地生态系统观测研究站	江苏	滩涂湿地	√		
43	太湖湖泊生态系统国家野外观测研究站	江苏	湖泊湿地	√	√	√
44	洪泽湖湿地生态系统观测研究站	江苏	湖泊湿地	√	√	
45	长三角生态绿色一体化发展示范区湿地生态系统上海市野外科学观测研究站	上海	沼泽湿地			√
46	长江河口湿地生态系统上海市野外科学观测研究站	上海	滩涂湿地	√	√	√
47	杭州湾湿地生态系统定位观测研究站	浙江	滩涂湿地	√	√	
48	浙江西溪湿地生态系统观测研究站	浙江	沼泽湿地	√		
49	福建闽江河口湿地生态系统观测研究站	福建	滩涂湿地	√		
50	福建泉州湾湿地生态系统观测研究站	福建	滩涂湿地	√		
51	广东海丰湿地生态系统观测研究站	广东	滩涂湿地	√		
52	南沙河口湿地生态系统观测研究站	广东	海湾湿地		√	
53	广东湛江红树林湿地生态系统观测研究站	广东	红树林沼泽	√		
54	广西北海湿地生态系统观测研究站	广西	滩涂湿地	√		
55	海南东寨港红树林湿地生态系统观测研究站	海南	红树林沼泽	√	√	

资料来源于中国湿地生态系统定位观测研究网络 (<http://www.cnern.org.cn/>), 湿地生态系统观测研究野外站联盟 (<http://wetland.ihb.cas.cn/>) 以及科学技术部 (<http://www.most.gov.cn>) 和国家生态系统观测研究网络 (<http://www.cnern.org.cn/>)

1.2 现有湿地类型生态站布局层级结构不合理

ILTER 通常将野外生态站划分为综合站、常规站和卫星站以反映不同站点的层级特征。综合站通常具有全面、深入开展生态学领域研究工作所需的野外设施、研究装置以及综合研究能力完整的生态系统方法(一般相当于国内的国家站);常规站原则上与综合站一致,某些指标可能会通过更简单的方法进行衡量;卫星站通常只具备对某些生态过程或现象观测的野外装置,不具备完整的生态系统方法,侧重于具体的科学问题或监测重点^[15]。以 NEON 为例,采用系统抽样的方法,筛选了代表美国 20 个“生态气候区”的站点作为“核心站”(相当于综合站或国内的国家站),这些站点收集 30 年周期的观测数据,用以反映所在区的生态气候变异

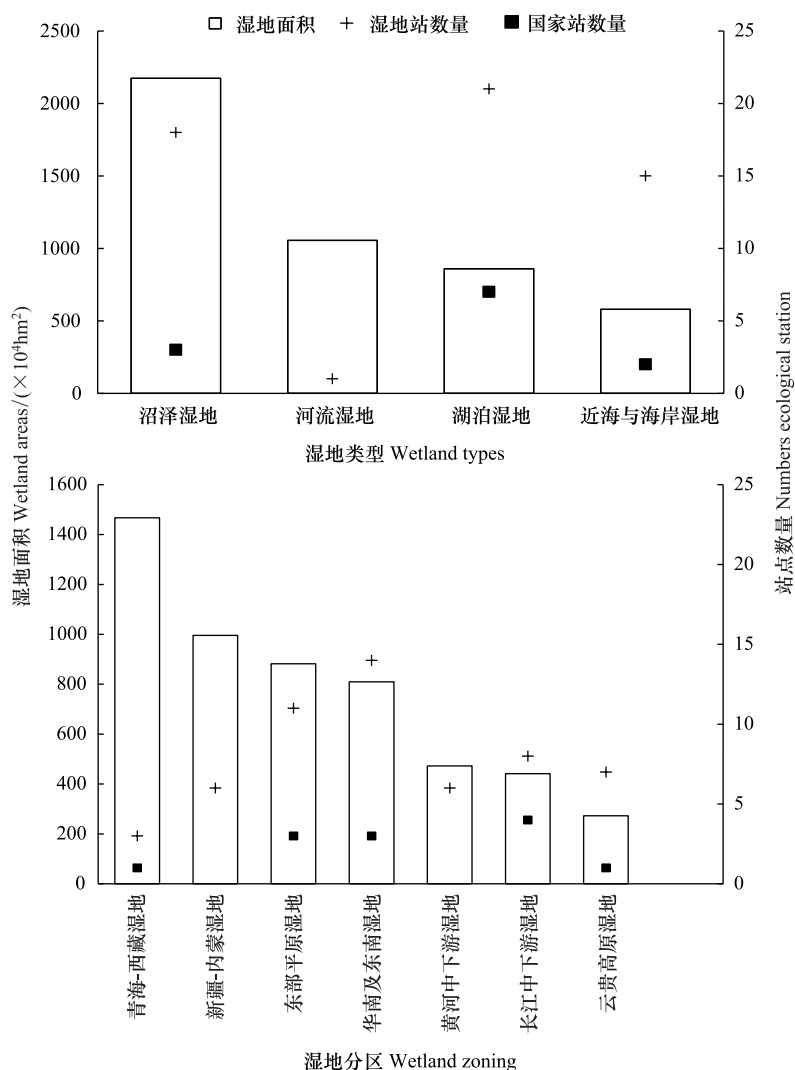


图4 湿地类型及湿地分区及其对应的湿地生态站数量

Fig.4 Wetland types and wetland zonings and corresponding wetland ecological station numbers

性;同时布设了若干“可移动站点”(相当于卫星站),这些站点将以3—5年的周期轮换,用来获取特定环境梯度(如河流的上、中、下游)的数据;为了对以上两种站点补充,NEON还建立了短期的(周或月为周期)灵活的监测系统,进而研究区域的一些不连续事件和变化^[17];上述“核心站”通过高速互联网与一系列“卫星站”相连接,形成生态站的层级结构,并通过整合局地 and 区域的数据来量化不同研究单元对气候变化、土地利用以及物种变化的响应过程^[17]。目前,我国湿地生态站的层级结构不明显,湿地生态站建设中以常规站为主,区域卫星站明显不足,导致区域观测体系存在一定的空缺。同时,达到综合站/核心站水平的湿地生态站(如国家站)数量偏少,生态站的整体研究实力与国际长期生态系统监测网络存在一定差距。因此,合理布局“核心站”(如国家站)与“卫星站”(一般生态站),在不同湿地区内形成层级结构,实现站点间的相互补充和联动性非常关键。

1.3 湿地生态站缺乏适用的、可操作的长期监测指标体系

对生态站而言,长期观测的方法体系、指标筛选、观测频度都必须是稳定的,随意地变更某一项内容都会对观测结果造成影响,使数据不具有科学性和可比性,更无法系统反应生态过程的变化^[18]。制定统一的监测指标体系和观测规范将有效提升生态监测数据的质量和值。国际上,不同的生态系统观测网络根据研究主题的差异,监测指标的选择也呈现一定的差异性。如ILTER主要开展长时间、大空间尺度上不同的生态过

程、格局和现象的研究^[19],NEON 则侧重引起生态系统变化的不同要素,包括人文要素的监测,指标体系涵盖了地表水、土壤、气象、降雨、生物类群、植被、人类活动、土地利用、管理政策等各个方面^[17]。ECN 侧重生态要素监测以及大尺度的调查,监测指标包括水体、土壤、气象和生物等方面,其水体监测指标非常全面,涵盖水体物理和化学性质以及藻类和无脊椎动物等^[16]。欧洲长期生态系统研究网络除了水分、土壤、大气、生物等监测指标外,还包括能量、物质循环的相关指标^[20]。

CERN 编制了《中国生态系统研究网络长期观测规范》丛书,制定了水分、土壤、大气、生物等关键要素观测规范^[21-24],但该规范主要适用于农田、森林、草地/荒漠以及水域生态系统,对湿地生态系统则缺乏针对性。2011 年,《重要湿地监测指标体系》国家标准发布,从湿地类型、面积、气象要素、水文、水质、土壤、植被和群落、野生动物、外来物种 9 个方面构建了湿地状态的监测指标体系^[25];国家林业和草原局也发布了湿地生态系统定位观测技术规范^[26]。然而,由于湿地类型多样,不同类型湿地的监测指标因湿地特点而异,难以完全统一,上述标准和规范在数据有效性和观测可操作性上尚存在一定的局限性。建立适用的、可操作的湿地生态站监测指标体系和规范非常重要,监测指标的选择既需要反应湿地关键特征,又要尽可能简化、长期、有效。因此,既需要设置一些共性指标,纳入常规观测(如水、生产力、营养指标、盐度)。也需要保留一些个性化指标,进行自主观测(如滨海湿地的潮汐、湖泊和沼泽湿地的积水水深和淹水时长)。

1.4 湿地生态站多站点联网观测研究相对薄弱

生态系统的空间变异性是生态系统研究的重要问题之一,而建立站点-样带-网络等不同尺度的站点间联网观测和研究是开展大尺度生态系统研究的重要途径^[27]。我国湿地类型多样,分布广泛,在气候变化和人类活动等多重因素影响下,湿地结构及其生物地球化学循环过程发生了改变,为开展湿地的系统性修复、湿地碳汇潜力评估带来挑战。针对不同湿地类型及特征开展有目标的、区域联网观测是解决上述问题的必要条件,集成和整合长期观测站点的数据、技术和资源,对推动湿地生态系统研究至关重要^[28-29]。在过去的数十年间,中国森林生态系统、草地生态系统的区域联网研究取得了长足的发展,如草地样带^[30-31]和中国南北样带^[32-33]。湿地生态站也于 2013 年发起成立野外站联盟,以促进湿地生态站的长期定位观测和区域间的联网研究,但是多数的研究成果仍以单站点的长期监测为主,针对不同湿地类型或不同气候区湿地生态系统演变过程的大尺度联合和对比研究尚比较薄弱,亟需加强。

2 湿地生态站的定位、布局原则及布局规划

2.1 湿地生态站的定位

湿地生态站要面向湿地生态学前沿,依托稳定的设施、固定的研究队伍,针对典型湿地类型开展生态系统层面的长期观测,实现监测、研究、示范、服务一体化。其主要任务是积累湿地生态系统长期动态观测与实验数据,揭示湿地生态系统长期变化的规律,提炼并推广湿地保护与修复的技术模式,为湿地生态系统研究共享观测与实验设施以及标准化数据,为湿地保护和管理相关的国家战略提供决策支持。

2.2 湿地生态站的布局原则

湿地生态站应根据湿地的分布、类型、代表性等进行科学布局和顶层设计,考虑以下原则:

第一、涵盖我国代表性湿地生态系统类型。我国的湿地主要分为 5 大类 34 型,即沼泽湿地(面积占比 40.68%,下同)、河流湿地(19.75%)、湖泊湿地(16.05%)、近海与海岸湿地(10.85%)和人工湿地(12.63%)。湿地生态站应涵盖除人工湿地外的其他湿地类型,生态站的布局数量总体上也应体现不同湿地类型所占的比例。

第二、反映我国湿地的空间分布特点。我国的湿地分布总体呈现集中成片的特点,一般而言,全国湿地可分为七个主要分布区,即东北湿地区、新疆-内蒙湿地区、青海-西藏湿地区、云贵高原湿地区、黄河中下游湿地区、长江中下游湿地区、华南及东南湿地区。其中,东北湿地区主要是森林沼泽和草本沼泽湿地,黄河和长江中下游是河流湿地和湖泊湿地;华南及东南湿地主要是红树林滩涂、淤泥质海岸等近海与海岸湿地;其余三个

区则以高原草本沼泽湿地为主,湿地生态站的分布应充分考虑湿地不同分区的特征。

第三、体现综合站与卫星站的层级结构特点。考虑设施投入及服务需求,针对湿地类型、分区及重要性程度进行有目的、多层次观测。对代表性的湿地类型应设置一些核心站/综合站,同时,在关键区域和重要湿地应设置区域站,并布设若干卫星站,形成核心站/综合站-区域站-卫星站的层级结构。

第四、响应国家对湿地保护与恢复的战略需求。当前,黄河流域生态保护和高质量发展,京津冀协同发展及雄安新区建设、长江产业带与长江绿色廊道建设以及粤港澳大湾区建设是重大国家战略,在这些区域的关键湿地和河口区,应布设核心站/综合站。

2.3 湿地生态站的空间布局建议

我国目前共有 55 个湿地生态站,其中纳入国家站体系的湿地生态站 12 个,其他湿地生态站 43 个(图 5)。按我国自然地理条件差异性及其主要湿地分布区域,结合湿地生态站现状及面临问题,按照上述布局原则,提出如下建议:

第一、加强湿地生态站建设,结合我国湿地类型及其分布特征,填补现有的监测空缺。

与国际主要生态观测网络相比,我国国家级湿地类型生态站数量较少、比例偏低,在湿地生态系统监测布局上存在较大空缺。同时,湿地类型代表性不足,以湖泊类型湿地站为主,河流和沼泽类型湿地站偏少;湿地站分布与湿地面积不匹配,青藏高原区和蒙新干旱区湿地偏少。因此,建议进一步增加湿地生态站布设,如杭州湾以北淤泥质滩涂区域,增设沿海滩涂湿地站;在东北平原湿地区,增加森林沼泽和草本沼泽类型湿地站;在青藏高原区,增加高原湿地站;加强河流生态站建设。形成覆盖自然湿地类型以及湿地分区的监测布局体系。

第二、整合我国现有湿地类型生态站,加强综合站/核心站建设,形成层级结构合理的湿地野外站体系。

目前我国达到核心站/综合站水平的湿地生态站数量偏少,生态站的整体综合研究实力与国际生态系统监

测网络还存在一定差距。建议合理布局“核心站”(如国家站)与卫星站(一般生态站),在不同湿地区内形成层级结构,实现站点间的相互补充和联动。如加强蒙新高原湿地、华南沿海和京津冀区域国家站建设,推动黄河和长江流域的河流类型湿地生态站建设。同时,在区域卫星站布设中,应依托已有一定基础并具有长期稳定监测能力的湿地生态站,进一步培育和加强其监测设施和监测能力建设,形成有层次的综合站与卫星站结合的野外生态站体系。

第三、服务国家重大需求,在大江大河源头区及国家重要湿地区建设综合性湿地生态站。

目前,长江中下游的鄱阳湖、洞庭湖、长三角及长江口等区域已布设了国家站,黄河三角洲(2009 年建站,依托中国科学院烟台海岸带研究所)、杭州湾(2003 年建站,依托中国林科院亚热带林业研究所),大湾区的广东海丰(2013 年建站,依托广东省林业科学研究院)和广东湛江(2017 年建站,依托中国林业科学研究院)以及雄安新区白洋淀流域(中国科学院筹建)等地区目前也已布设或计划布设生态站(见表 1),但上述生态站均为部委与地方政府合作建站,尚未列入国家站建设体系。建议进一步提高上述区域生态站监测水平和能力建设,服务于长期湿地生态系统结构与功能的研究及国家湿地保护和修复的战略需求(图 5)。

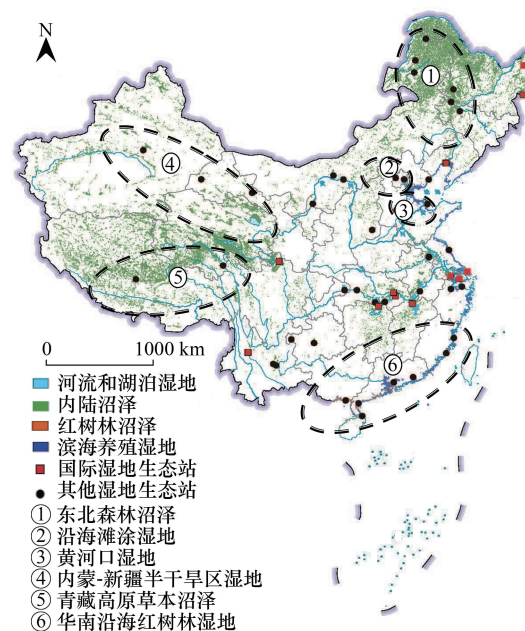


图 5 中国湿地生态站分布及其综合性生态站布局规划

Fig. 5 The distribution of wetland ecological stations and planning of core station in future

图中黑色虚线区域为我国湿地集中连片分布,且具有湿地类型代表性的区域,目前已布设一般湿地生态站,但尚缺乏综合性湿地生态站(国家站)

3 湿地生态站发展展望

3.1 以湿地生态学的关键科学问题为导向,聚焦学科发展前沿

湿地生态站的建设应满足湿地生态学发展的需要,开展生态系统及其关键要素的长期定位监测,揭示湿地生态系统变化规律及其过程演变机制,为湿地保护、恢复及合理利用提供理论指导、技术支撑及试验示范。建议应重点关注以下湿地科学领域的热点问题:

3.1.1 湿地景观格局及其环境效应

湿地生态系统是受人类活动影响显著的自然生态系统之一,湿地开发利用导致的景观格局演变及环境效应是湿地生态学领域研究的热点问题^[34]。如建坝和湿地围垦,改变了长江中下游湖泊湿地水文过程^[35],三江平原沼泽湿地的丧失,改变了局地微气候^[36],养殖污染影响周边区域的水质等^[37]。此外,湿地景观格局的变化,也导致湿地景观破碎化,物种多样性及生态系统其它功能也受到影响。湿地景观格局演变过程与驱动因子之间存在着复杂关系^[38],深入了解其相互关系和作用机制,是湿地保护和合理利用的前提,特别是对一些国际重要湿地和国家重要湿地应开展持续的监测和评估,将为国际履约和政府部门决策以及湿地保护与区域经济可持续发展提供支撑。

3.1.2 水体的富营养化变化及治理

水体富营养化是全球普遍的问题,对中国而言,大部分的湖泊处于中营养或富营养的水平^[39],而自 20 世纪 80 年代末开始沿海富营养化态势加剧^[40],蓝藻水华和滨海赤潮等现象频发,导致水环境质量急剧下降。水体富营养化对生物组成结构及食物网、生态系统生产力以及生态系统地球化学过程具有显著的影响,导致生态系统稳定性下降,生物多样性降低^[39,41]。而污染物变化及富营养化的形成机制、环境影响及调控对策是当前亟待解决的难题。通过原位监测,获取富营养化的关键环境限制因子及氮磷营养元素阈值是维持健康水体的前提。

3.1.3 外来物种入侵的影响机制及其调控

外来物种入侵也是湿地面临的关键威胁因素之一,如长江中下游湖泊中的克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)^[42]、凤眼蓝(*Eichhornia crassipes*)^[43]以及沿海的互花米草等(*Spartina alterniflora* Loisel.)^[44]。此外,在资源有限的情况下,入侵物种在生长、形态和生理等性状上具有更高的可塑性,对环境变化的适应性更强,如对水分以及营养物质的耐受性,从而更容易在竞争中处于优势^[45]。此外,外来物种入侵对湿地生态系统生物地球化学循环、生物群落及其环境具有显著影响^[44,46],加强外来物种入侵对湿地生态系统影响的过程机制研究,开展调控对策及试验示范,对控制外来入侵物种,维持健康生态系统具有重要意义。

3.1.4 湿地生物多样性维持机制

湿地是陆地与水体的过渡地带,具有其它任何单一生态系统都无法比拟的天然基因库和独特的生境,维持着丰富的生物多样性,湿地与生物多样性对生态环境和人类生存发展具有积极的影响。物种组成是湿地生态组分的重要内容,特别是一些湿地重要指示物种,如湿地植被、迁徙水鸟、兽类、两栖爬行类、鱼类等关键物种,可反映湿地在某一时刻所处的状态,是国际重要湿地的重要监测指标^[47]。然而,现有的湿地生态系统监测不能满足湿地生物多样性保护的需要,特别是对湿地动物的监测和调查尚存在不足,建立统一的物种监测和调查规范,加强生物多样性监测非常必要^[48—49],可以为揭示生物多样性变化机制和保护决策提供科学依据,也是制定合理的生物多样性保护策略的重要前提。

3.1.5 气候变化及湿地碳汇潜力估算

湿地的各种生态服务功能为社会可持续发展和人类福祉提供重要保障,特别是在固碳和减缓全球气候变化方面的作用已达成共识^[50]。滨海湿地在吸收二氧化碳方面发挥重要作用,特别是红树林沼泽、海草床和盐沼湿地等,其单位面积对碳储存的贡献,要超过陆地生态系统,被称为蓝碳^[51]。而湖泊和沼泽湿地,其碳源/汇强度与水文条件变化密切相关,碳收支估算的不确定性和难度更高,导致其固碳功能与固碳潜力估算存在

争议^[52]。开展不同湿地类型碳通量原位观测和碳储量的长期定位观测研究,有利于提高对湿地生态系统中碳储存的驱动因素和影响机制的科学认识,对维持和发展湿地的固碳潜力,增加陆地生态系统碳库,达成“碳达峰、碳中和”的战略目标具有重要的实践意义。

3.2 建立系统、科学的湿地监测指标体系,开展长期定位监测

湿地生态系统研究的核心是湿地的结构、功能及发育演替等基本过程^[28],湿地生态站的监测指标需表征和测度湿地生态系统特征和功能的变化,反映湿地生态系统的整体特征,同时能服务于不同自然区或气候带内同一湿地类型的自然过程或者同一个自然区内不同湿地类型之间的对比研究。尽管不同类型湿地站监测指标体系因湿地特点而异,难以完全统一,但是不同类型湿地站仍存在一些共性指标,如作为主要驱动力的水文要素指标,生产力/生物量指标等。将这些简单、有效的共性指标纳入长期观测,可以提高不同湿地站之间数据的系统性和可比性。此外,根据不同类型湿地的特点制定一些个性化指标,作为自选性观测指标,如滨海湿地生态站的潮汐观测、沼泽湿地的积水水深和淹水时长等,将有利于加强对特定湿地生态系统关键过程的深入理解。此外,湿地生态站监测应涵盖湿地生态特征的变化,除了湿地生态组分外,生态过程与生态系统服务变化的监测也非常关键,如植物物候、营养循环、物质生产、栖息地面积等监测指标^[53]。

3.3 推动大尺度联网观测研究,揭示湿地变化的过程机理

湿地生态站的长期建设,还应注重跨站点联网研究,建立标准化的科研样地,在区域尺度上开展时间序列的对比观测与试验数据,为湿地生态系统长时间、大尺度生态学对比研究、生态系统动态及其功能演变研究、生态过程时空分异规律研究提供稳定平台^[29]。湿地站的长期联网观测应注重以下方面:第一,相同湿地类型在不同自然区域的联网研究,如南方和北方的湖泊湿地,高原和平原的湖泊湿地,其生态系统结构和关键驱动因素可能有所不同;其次,在同一个自然区域里,生态系统在演变过程当中湿地生态系统结构和功能的变化,如以流域为单元,研究其内部不同湿地类型的变化;第三,开展与湿地生态系统密切相关的其他类型生态站的联网观测,例如,沼泽湿地站还应考虑河流、森林、农田等生态站的联网观测。总体来讲,结合我国湿地分布的特点和规律,可初步考虑从以下方向开展研究:第一、不同纬度梯度海陆交汇过程(营养输入、水文变化)及其时滞效应对水体富营养化的响应过程与机理^[40];第二、不同湿地地区营养(氮、磷)输入与生产力及生物多样性之间的协同作用机制;第三、水位梯度对不同类型湿地优势植被生物量分配及土壤微生物竞争关系的影响^[54—56];第四、不同纬度梯度或气候带湿地生态系统固碳潜力及对气候变化的响应^[50]等。

3.4 服务国家重大需求,支撑湿地生态修复和“双碳”目标实现

作为“山水林田湖草沙”生命共同体的重要组成部分,近年来湿地研究受到政府部门、科研机构以及国际组织的高度重视,湿地生态系统研究正处于蓬勃发展时期。基于不同类型湿地生态站获取的长期、连续的科学数据,可为厘清陆地生态系统碳源汇格局,提升湿地固碳潜力提供基础数据;为湿地生物多样性保护和生态修复提供技术模式;有力支撑“碳达峰、碳中和”、生物多样性和国际重要湿地履约等国家战略。同时,湿地生态站的观测和研究还将为京津冀协同发展和雄安新区建设、黄河流域生态保护和高质量发展、长江大保护和长江经济带建设以及粤港澳大湾区建设中相关政策和工程实施提供技术支撑。关键湿地站还应在支撑区域或地方生态保护和修复工程中发挥重要作用,如长江口、黄河口互花米草控制及长江中下游湖泊富营养化治理、白洋淀及上游地区生态环境综合治理与退化湿地生态修复等。

3.5 加强湿地生态站科学研究的国际交流与合作

湿地生态站建设及其观测和研究工作的开展,对解决区域内的生态和环境问题发挥了重要作用。然而,我国湿地生态站在生态系统综合观测和系统研究方面与国际长期生态系统研究网络尚存在差距,如美国 NEON 在生态系统“站网”监测设施、标准化数据质量控制体系及数据共享建设方面起到了示范作用。加强同上述机构的合作,将对提升单站点及湿地生态站网的综合研究实力具有推动作用。同时,从国际化和全球的视野,强化与国际知名机构在生物多样性保护与观测、气候变化与湿地碳汇研究、跨国界湿地及迁徙物种的合作保护等领域的联合研究,将为解决洲际或更大尺度湿地生态学问题做出贡献。

4 小结

湿地生态站的发展方兴未艾,在今后建设和发展中,应针对不同湿地类型的特点,建立系统、科学的共性和个性化监测指标体系,进行统一、可比的科学监测和系统研究。进一步加强湿地生态站建设,填补现有湿地站布局的空缺,形成体现湿地分类和分布特点、具有层级结构的湿地监测站点网络,推动湿地长期定位监测和联网研究,服务于湿地相关的国家重大战略需求。同时,应聚焦学科发展前沿,以湿地景观格局及其环境效应、水体的富营养化治理、外来物种入侵的影响机制及其调控、生物多样性维持、气候变化等科学问题为导向,制定清晰的目标定位。此外,还应加强与国际长期生态系统研究网络的合作,提升湿地生态系统监测和研究的能力,推动在生物多样性保护与观测、气候变化、跨界湿地及迁徙物种的合作保护等领域的国际合作。

致谢:本文写作过程中得到中国科学院东北地理与农业生态研究所宋长春研究员、郭跃东研究员、复旦大学李博教授、鞠瑞亭教授、中国科学院南京地理与湖泊研究所张奇研究员、徐力刚研究员、中国科学院亚热带农业生态研究所谢永宏研究员、陈心胜研究员、中国科学院烟台海岸带研究所韩广轩研究员、中国林业科学院湿地研究所张曼胤研究员的指导,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. 湿地科学, 2003, 1(1): 7-11.
- [2] 唐小平, 王志臣, 张阳武, 周天元. 全国湿地资源调查技术体系设计及结果分析. 林业资源管理, 2013, (6): 62-69.
- [3] 孙志高, 刘景双, 李彬. 中国湿地资源的现状、问题与可持续利用对策. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 83-88.
- [4] 第二次全国湿地资源调查结果公布. 湿地科学与管理, 2014, 10(1): 65.
- [5] Mao D H, Wang Z M, Du B J, Li L, Tian Y L, Jia M M, Zeng Y, Song K S, Jiang M, Wang Y Q. National wetland mapping in China: a new product resulting from object-based and hierarchical classification of Landsat 8 OLI images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 164: 11-25.
- [6] Jia M M, Wang Z M, Li L, Song K S, Ren C Y, Liu B, Mao D H. Mapping China's mangroves based on an object-oriented classification of Landsat imagery. Wetlands, 2014, 34(2): 277-283.
- [7] 许凤娇, 周德民, 张翼然, 牛振国. 中国湖泊、沼泽湿地的空间分布特征及其变化. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1606-1614.
- [8] 张明祥. 新形势下我国的湿地生物多样性保护对策. 环境保护, 2017, 45(4): 21-24.
- [9] 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.
- [10] 杨永兴. 国际湿地科学研究进展和中国湿地科学研究优先领域与展望. 地球科学进展, 2002, 17(4): 508-514.
- [11] 傅伯杰, 刘世梁. 长期生态研究中的若干重要问题及趋势. 应用生态学报, 2002, 13(4): 476-480.
- [12] 于贵瑞, 于秀波. 中国生态系统研究网络与自然生态系统保护. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 275-283.
- [13] 卢康宁, 段经华, 纪平, 李惠鑫, 陈欢欢, 杨振寅. 国内陆地生态系统观测研究网络发展概况. 温带林业研究, 2019, 2(3): 13-17.
- [14] 高春东, 何洪林. 野外科学观测研究站发展潜力大应予高度重视. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 344-348.
- [15] Haase P, Frenzel M, Klotz S, Musche M, Stoll S. The long-term ecological research (LTER) network: relevance, current status, future perspective and examples from marine, freshwater and terrestrial long-term observation. Ecological Indicators, 2016, 65: 1-3.
- [16] Parr T W, Hirst D J. The UK environmental change network and the internet: their role in detecting and interpreting environmental change. Advances in Sustainable Development. // Pykh, Yuri A., D. Eric Hyatt, and Roman JM Lenz. Environmental indices: Systems analysis approach-Volume I. EOLSS Publications, 2000: 223-236.
- [17] Keller M, Schimel D S, Hargrove W W, Hoffman F M. A continental strategy for the national ecological observatory network. Frontiers in Ecology and the Environment, 2008, 6(5): 282-284.
- [18] Mirtl M, Borer E T, Djukic I, Forsius M, Haubold H, Hugo W, Jourdan J, Lindenmayer D, McDowell W H, Muraoka H, Orenstein D E, Pauw J C, Peterseil J, Shibata H, Wohner C, Yu X, Haase P. Genesis, goals and achievements of long-term ecological research at the global scale: a critical review of ILTER and future directions. Science of the total Environment, 2018, 626: 1439-1462.
- [19] Hobbie J E, Carpenter S R, Grimm N B, Gosz J R, Seastedt T R. The US long term ecological research program. BioScience, 2003, 53(1): 21-32.
- [20] Mirtl M. Introducing the next generation of ecosystem research in Europe: LTER-Europe's multi-functional and multi-scale approach//Müller F, Baessler C, Schubert H, Klotz S, eds. Long-Term Ecological Research: Between Theory and Application. Dordrecht: Springer, 2010: 75-93.
- [21] 袁国富, 朱治林, 张心昱, 唐新斋. 陆地生态系统水环境观测指标与规范. 北京: 中国环境出版集团, 2019.

- [22] 潘贤章, 郭志英, 潘恺. 陆地生态系统土壤观测指标与规范(第二版). 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [23] 胡波, 刘广仁, 王跃思. 陆地生态系统大气环境观测指标与规范. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [24] 吴冬秀, 张琳, 宋创业, 张淑敏. 陆地生态系统生物观测指标与规范. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 27648—2011 重要湿地监测指标体系. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [26] 国家林业局. LY/T 2898—2017 湿地生态系统定位观测技术规范. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [27] 孙鸿烈, 陈宜瑜, 于贵瑞, 于秀波. 国际重大研究计划与中国生态系统研究展望——中国生态大讲堂百期学术演讲暨 2014 年春季研讨会评述. 地理科学进展, 2014, 33(7): 865-873.
- [28] 姜明, 吕宪国, 刘吉平, 杨青. 湿地生态系统观测进展与展望. 地理科学进展, 2005, 24(5): 41-49.
- [29] 杨萍, 白永飞, 宋长春, 吴冬秀. 野外站科研样地建设的思考、探索与展望. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 125-134.
- [30] 樊江文, 张良侠, 张文彦, 钟华平. 中国草地样带植物氮磷元素空间格局及其与气候因子的关系. 草地学报, 2014, 22(1): 1-6.
- [31] 于海玲, 李愈哲, 樊江文, 钟华平. 中国草地样带不同功能群植物叶片氮磷含量随水热因子的变化规律. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2867-2874.
- [32] 徐丽, 何念鹏. 中国南北样带典型森林土壤属性数据集[DB/OL]. 中国科学数据, 2018. (2018-08-02). DOI: 10.11922/sciencedb.602.
- [33] 任书杰, 于贵瑞, 姜春明, 方华军, 孙晓敏. 中国东部南北样带森林生态系统 102 个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征. 应用生态学报, 2012, 23(3): 581-586.
- [34] 刘红玉, 吕宪国, 张世奎. 湿地景观变化过程与累积环境效应研究进展. 地理科学进展, 2003, 22(1): 60-70.
- [35] 杨桂山, 马荣华, 张路, 姜加虎, 姚书春, 张民, 曾海鳌. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.
- [36] 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.
- [37] 焉恒琦, 朱卫红, 毛德华, 王宗明, 梁旻轩, 康应东, 杨桃. 长江三角洲国际重要湿地人为胁迫遥感解析. 中国环境科学, 2020, 40(8): 3605-3615.
- [38] 高常军, 周德民, 栾兆擎, 张海英. 湿地景观格局演变研究评述. 长江流域资源与环境, 2010, 19(4): 460-464.
- [39] Qin B Q, Gao G, Zhu G W, Zhang Y L, Song Y Z, Tang X M, Xu H, Deng J M. Lake eutrophication and its ecosystem response. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(9): 961-970.
- [40] Wang B D, Xin M, Wei Q S, Xie L P. A historical overview of coastal eutrophication in the China Seas. Marine Pollution Bulletin, 2018, 136: 394-400.
- [41] Wang Z H, Mu D H, Li Y F, Cao Y, Zhang Y J. Recent eutrophication and human disturbance in Daya Bay, the South China Sea: dinoflagellate cyst and geochemical evidence. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 92(3): 403-414.
- [42] 曹玲亮, 周立志, 张保卫. 安徽三大水系入侵物种克氏原螯虾的种群遗传格局. 生物多样性, 2010, 18(4): 398-407.
- [43] 周晴, 潘晓云. 中国南部基塘区农业模式的变迁与凤眼蓝的入侵. 植物生态学报, 2014, 38(10): 1093-1098.
- [44] 高抒, 杜永芬, 谢文静, 高文华, 王丹丹, 吴晓东. 苏沪浙闽海岸互花米草盐沼的环境-生态动力过程研究进展. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(11): 2339-2357.
- [45] Davidson A M, Jennions M, Nicotra A B. Do invasive species show higher phenotypic plasticity than native species and, if so, is it adaptive? A meta-analysis. Ecology Letters, 2011, 14(4): 419-431.
- [46] 王大卫, 沈文星, 汪浩. 互花米草入侵对东部沿海生境的影响. 生物学杂志, 2020, 37(6): 104-107.
- [47] 关蕾, 刘平, 雷光春. 国际重要湿地生态特征描述及其监测指标研究. 中南林业调查规划, 2011, 30(2): 1-9.
- [48] 赵魁义, 何舜平, 李伟. 中国湿地生物多样性研究. 中国科学院院刊, 2010, 25(6): 659-667.
- [49] 马克平. 监测是评估生物多样性保护进展的有效途径. 生物多样性, 2011, 19(2): 125-126.
- [50] 段晓男, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 463-469.
- [51] Macreadie P I, Nielsen D A, Kelleway J J, Atwood T B, Seymour J R, Petrou K, Connolly R M, Thomson A C, Trevathan-Tackett S M, Ralph P J. Can we manage coastal ecosystems to sequester more blue carbon?. Frontiers in Ecology and the Environment, 2017, 15(4): 206-213.
- [52] 宋洪涛, 崔丽娟, 栾军伟, 李胜男, 马琼芳. 湿地固碳功能与潜力. 世界林业研究, 2011, 24(6): 6-11.
- [53] 江波, Wong C P, 陈媛媛, 欧阳志云. 湖泊湿地生态服务监测指标与监测方法. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2956-2964.
- [54] 王丽, 胡金明, 宋长春, 杨涛. 水分梯度对三江平原典型湿地植物小叶章地上生物量的影响. 草业学报, 2008, 17(4): 19-25.
- [55] 管博, 栗云召, 夏江宝, 董洪芳, 吕振波, 于君宝. 黄河三角洲不同水位梯度下芦苇植被生态特征及其与环境因子相关关系. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2633-2639.
- [56] 姚鑫, 杨桂山, 万荣荣, 王晓龙. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响. 湖泊科学, 2014, 26(6): 813-821.