

doi: 10.12029/gc20220218001

裴理鑫, 叶思源, 何磊, 赵广明, 袁红明, 丁喜桂, 裴绍峰, 李雪, 王法明, Edward A. Laws. 2023. 中国湿地资源与开发保护现状及其管理建议[J]. 中国地质, 50(2): 459–478.

Pei Lixin, Ye Siyuan, He Lei, Zhao Guangming, Yuan Hongming, Ding Xigui, Pei Shaofeng, Li Xue, Wang Faming, Edward A. Laws. 2023. Wetland resources, development and protection in China and management recommendations[J]. Geology in China, 50(2): 459–478(in Chinese with English abstract).

中国湿地资源与开发保护现状及其管理建议

裴理鑫^{1,2}, 叶思源^{1,2}, 何磊^{1,2}, 赵广明^{1,2}, 袁红明^{1,2}, 丁喜桂^{1,2},
裴绍峰^{1,2}, 李雪³, 王法明⁴, Edward A. Laws⁵

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所滨海湿地生态地质重点实验室, 山东 青岛 266237; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
4. 中国科学院华南植物园小良热带海岸带生态系统研究站, 广东 广州 510650; 5. 路易斯安那州立大学海岸带与环境学院, 美国 巴吞鲁日市 70803)

摘要:【研究目的】中国作为世界上湿地类型最齐全的国家之一, 湿地面积 5360.26 万 hm^2 , 位居世界第四, 但近十年来随着人口迅猛膨胀和经济快速发展, 中国面临着湿地保护与经济快速发展的矛盾冲突, 分析中国湿地资源与开发保护现状及其退化原因是研讨湿地管理对策的前提。【研究方法】本文在分析中国湿地资源特征及其开发保护现状的基础上, 系统总结了我国湿地损失和退化的驱动因素, 由此提出中国湿地管理建议。【研究结果】中国湿地资源丰富, 其在发挥水质净化、蓄水防洪、气候调节等功能的同时, 为地方经济发展和当地居民提供了丰富的资源保障, 并由此发展了一系列具有良好经济效益和社会效益的利用模式。同时中国高度重视湿地保护, 颁布和实施了一系列湿地保护政策和工程, 湿地保护率达 52.65%。然而在人类活动和气候变化双重影响下, 中国湿地面积萎缩现象仍然普遍存在, 且在湿地保护修复管理实践中仍存在许多科学问题需要解决。【结论】当前中国湿地损失和退化趋势依然严峻, 为进一步加强湿地保护, 必须强化地球系统多学科的综合研究, 同时需考虑经济可行和社会需求问题的约束, 从而制订一个能满足社会经济发展要求且生态科学合理的可持续管理方案。

关键词: 湿地; 湿地资源; 湿地功能; 开发现状; 退化因素; 保护理念; 环境地质调查工程

创新点: (1) 本文对中国湿地资源开发和保护现状进行了综述, 并系统总结了我国湿地退化原因, 对今后有关中国湿地修复和保护研究有着一定帮助; (2) 本文根据我国国情提出了几种可能的湿地可持续管理建议。

中图分类号: X37 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)02-0459-20

Wetland resources, development and protection in China and management recommendations

PEI Lixin^{1,2}, YE Siyuan^{1,2}, HE Lei^{1,2}, ZHAO Guangming^{1,2}, YUAN Hongming^{1,2},
DING Xigui^{1,2}, PEI Shaofeng^{1,2}, LI Xue³, WANG Faming⁴, EDWARD A. LAWS⁵

收稿日期: 2022-02-18; 改回日期: 2022-10-31

基金项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费(2022QNLM040003-3)、科技部政府间科技创新合作重点专项(2016YFE0109600)、黄海湿地研究院课题项目基金资助项目(20210108)以及中国地质调查局项目(DD20230071, DD20221775, DD20189503)联合资助。

作者简介: 裴理鑫, 男, 1991 年生, 博士后, 主要从事滨海湿地碳循环、环境微生物等方面的研究; E-mail: peilixin09@163.com。

通讯作者: 叶思源, 女, 1963 年生, 研究员, 主要从事海洋地质、生物地球化学等方面的研究; E-mail: siyuanye@hotmail.com。

(1. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266237, Shandong, China; 2. Laboratory of Marine Geological Processes and Environmental Functions, National Laboratory of Marine Science and Technology, Qingdao 266237, Shandong, China; 3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 4. Xiaoliang Research Station for Tropical Coastal Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 5. Department of Environmental Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge 70803, USA)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] As one of the countries with the most diverse types of wetlands, China has a wetland area of 53.60 million hectares, ranking fourth in the world. However, with rapid population growth and economic development, China is facing conflicts between wetland protection and economic development in recent decades. Analyzing the current status of wetland resources and development, as well as the reasons for their degradation in China, is a prerequisite for discussing wetland management strategies. **[Methods]** Based on the analysis of the characteristics and current status of wetland resources in China, this article systematically summarized the driving factors of wetland loss and degradation, and proposed wetland management recommendations. **[Results]** China is rich in wetlands, which not only provide functions such as water purification, flood control, climate regulation, but also provide rich resource guarantee for local economic development, thereby developing a series of utilization modes with good economic and social benefits. At the same time, China attaches great importance to wetland protection and has issued and implemented a series of wetland protection policies and projects, with a wetland protection rate of 52.65%. However, under the dual impacts of human activities and climate change, wetland shrinkage in China is still widespread, and there are still many scientific issues need to be resolved in wetland protection and restoration management practices. **[Conclusions]** The current trend of wetland loss and degradation in China is still severe. To further strengthen wetland protection, it is necessary to strengthen comprehensive multidisciplinary research on the earth system and consider the constraints of economic feasibility and social demands, in order to formulate a sustainable management plan that meets the requirements of social and economic development and ecological science.

Key words: wetland; wetland resources; wetland function; development status; degradation factor; conservation concept; environmental geological survey engineering

Highlights: (1) This article provided a comprehensive review of the current status of wetland resource development and protection in China, and systematically summarized the reasons for wetland degradation, which will be helpful for future research on wetland restoration and protection; (2) This article proposed several possible strategies for sustainable wetland management based on the situation in China.

About the first author: PEI Lixin, male, born in 1991, post-doctoral, engaged in biogeochemistry and microbiology; E-mail: peilixin09@163.com.

About the corresponding author: YE Siyuan, female, born in 1963, professor, engaged in marine geology and biogeochemistry; E-mail: siyuanye@hotmail.com.

Fund support: Supported by the Marine S&T Fund of Shandong Province for the Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (No.2022QNL040003-3), the National Key R&D Program of China (No.2016YFE0109600), the Foundation of the Yellow Sea Wetland Research Institute (No.20210108), and the China Geological Survey Program (No. DD20230071, No.DD20221775, No.DD20189503).

1 引 言

湿地作为水陆交互作用形成的特殊自然综合体,与森林、海洋并称为全球三大生态系统,是地球表层系统的重要组成部分。湿地不仅是物种多样

性最为丰富的生态景观,同时也是自然界最具生产力的生态系统以及人类生命和文明的摇篮。更为重要的是湿地具有物质生产、蓄水防洪、净化水体、调节气候、生物多样性保护以及教育休闲旅游等生态服务功能,与人类生产生活以及社会发展紧密相

关,是人类最为重要的生存环境和资源资本,据估计全球湿地每年经济价值约为15万亿美元(Costanza et al., 1997)。由此,近年来湿地重要性逐渐受到世界各国和国际社会的广泛关注。

但由于湿地自然属性的特殊性——成因多样、分布广泛,再加之湿地研究方法和目的以及固有的地域性差异,目前在世界范围内尚未确立一套完善、统一的湿地定义和分类系统。关于湿地的定义和分类,当前被国际社会和研究人员普遍采用的是《湿地公约》提出的广义湿地定义和分类系统。即湿地系指不论其为天然或者人工、长久或者暂时性的沼泽地、泥炭地或水域地带,静止或流动的淡水、半咸水、咸水水体者,包括低潮时水深不超过6 m的海域。根据该定义,全球湿地被整体划分为海洋/海岸湿地、内陆湿地和人工湿地3大类42型,而中国作为世界上湿地类型最齐全的国家之一,湿地面积位居世界第四,涵盖了《湿地公约》定义的所有湿地类型。同时中国也是最早认识湿地的文明古国之一,魏晋时期(约365年—427年)的作家陶渊明在其《桃花源记》就描写道:在水源尽头有个“世外桃源——湿地”。那里水源丰富、土壤肥沃,适于耕种;花草葳蕤,飞鸟繁多,仿若一座动植物的天然博物馆,文中描述的地方是现今的湖南常德桃源村(陶渊明, 1979)。《古今图书集成·考工典》也有论述:先秦时的人民惊讶地发现,在海水低潮后留下的浅浅沼泽水域中,蕴含着能够防范洪水灾害、抵御恶劣天气的神秘力量(陈梦雷, 2006)。北魏时期(约公元383年)酈道元在《水经注》中就以实地考察的河流为线索,记录了沿途所搜集到的诸多园林资料,亲手绘制了先秦园林和湿地的图像,同时还详细标注了湿地的特征、资源价值、农业价值、生态作用和先秦时候人们对湿地的诸多利用与开发(酈道元, 2006)。

然而,在自然资源开发短期利益与可持续发展管理之间,中国也是冲突最大的国家之一。根据两次全国湿地资源调查结果显示,2003—2013年间,中国湿地面积减少了339.63万 hm^2 ,减少率达8.82%,其中自然湿地面积减少了337.62万 hm^2 ,减少率达9.33%(国家林业局, 2015)。依据国际湿地生态状况分类,中国湿地生态状况目前总体处于中等水平,具体表现为15%湿地评级为“好”,53%湿地

评级为“中”,32%湿地评级为“差”(国家林业局, 2015)。在全球,中国湿地面积的减少只是自然资本向生产性资本转变的一个例子,证实了人类对地球自然资源的不善管理。在此背景下,本文将对中国湿地资源现状进行综述,包括其地理分布演化、生态系统服务和功能、所受威胁以及为管理和保护它们而采取的措施和政策。最后根据中国国情,综合社会、经济和生态因素寻求生态保护与经济发展的平衡点,提出一个可持续的中国湿地管理策略,从而为世界其他发展中国家提供借鉴。

2 中国湿地资源与开发保护现状

2.1 中国湿地分布与演化

中国地处欧亚大陆东部,太平洋西岸,疆域辽阔,气候特征和地貌类型复杂多样,境内河流交错,湖泊星罗密布,海岸线绵长,湿地类型繁多。根据第二次全国湿地资源调查(2009—2013年),中国现有湿地总面积(未包括香港、澳门和台湾湿地面积以及水稻田面积)5360.26万 hm^2 ,湿地率5.58%,其中自然湿地面积4667.47万 hm^2 ,占湿地总面积的87.07%。按照中国现行湿地分类统计,其中自然湿地中内陆沼泽湿地2173.29万 hm^2 、河流湿地1055.21万 hm^2 、湖泊湿地859.38万 hm^2 、近海与海岸湿地(滨海湿地)579.59万 hm^2 ,依次占全国自然湿地总面积的40.68%、19.75%、16.09%、10.85%(国家林业局, 2014)。中国湿地分布具有范围广,区域差异显著的特点,考虑到与湿地形成有关的水系特征,本文根据全国地表水系空间分布数据将全国湿地资源区划分为长江流域湿地区(1152.96万 hm^2)、黄河流域湿地区(907.11万 hm^2)、西北诸河流域湿地区(1131.60万 hm^2)、东北诸河流域湿地区(829.21万 hm^2)、西南诸河流域湿地区(179.74万 hm^2)、雅鲁藏布江及西藏诸河湿地区(161.01万 hm^2)、淮河流域湿地区(130.81万 hm^2)、东南诸河流域湿地区(96.81万 hm^2)、海河流域湿地区(51.50万 hm^2)、以及珠江流域湿地区(26.72万 hm^2)等10个流域湿地区(图1)。由此看出,中国自然湿地资源主要分布于长江、黄河、西北以及东北诸河流域。

然而由于自然和人为因素影响,过去半个多世纪,气候变化和人类活动的双重影响导致湿地严重退化,已危及区域生态安全和社会经济的可持续发

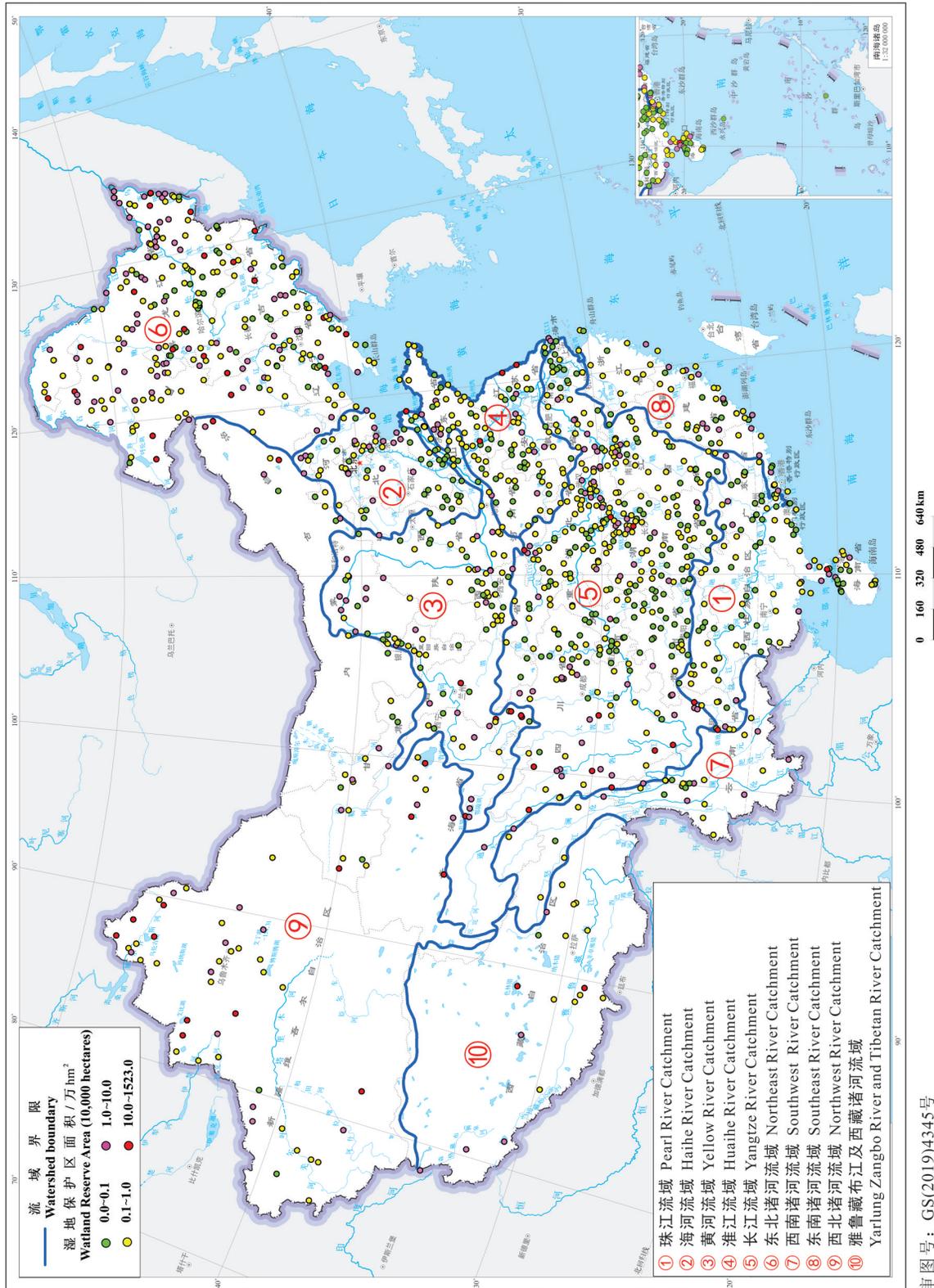


图1 各流域自然湿地分布现状
Fig.1 Distribution of natural wetlands in various catchment of China

审图号: GS(2019)4345号

展。《千年生态系统评估报告》指出,全球湿地 20 世纪的退化率已超过 50% (Assessment Millennium Ecosystem, 2005)。而中国湿地生态状况也不容乐观,根据 2015 年国务院新闻办公室报道近 50 年中国湿地损失率达 21.6%。虽然自 21 世纪以来,中国对湿地的价值有了较深入的认识,建立了湿地保护区,但在两次全国湿地资源调查间(2003—2013 年)中国湿地面积仍减少了 339.63 万 hm^2 ,减少率达 8.82%(国家林业局, 2014)。表 1 总结了我国主要湿地变化状况,进一步说明我国当前湿地面积萎缩现象仍然普遍存在。

2.2 中国湿地资源与功能

湿地作为重要的自然资源,为人类提供了许多被认为对社会有价值的功能(Tiner, 2020),包括地

表水存储,洪水防控,泥沙截留,养分转化,以及气候调节,水质净化和海岸线防护等,同时也为鱼类、贝类、野生动植物等提供了重要的栖息场所,为人类提供食物、原材料和休闲娱乐场所(Mitsch and Gosselink, 2007)。中国作为湿地资源大国,湿地分布辽阔,类型齐全,服务功能突出,在生物多样性保育、净化水质、涵养水源、气候调节等方面发挥着重要作用(国家林业局, 2015; 丁喜桂等, 2016; Wang et al., 2022)。表 2 列举了国内湿地生态系统服务功能研究的 10 项案例,归纳其主要生态系统服务类型(国家林业局, 2015)。

2.2.1 湿地生物资源

湿地作为地球上典型的生物多样性热点,有着丰富的动物、植物以及微生物资源(图 2)。

表 1 中国 13 处主要湿地面积变化动态
Table 1 Area evolution of 13 major wetlands in China

序号	湿地名称	湿地面积不同年份变化				变化率/%	参考文献
		时间 1	面积/ km^2	时间 2	面积/ km^2		
1	黄河三角洲湿地	2005 年	1367.0	2019 年	998.0	-27.0	高瑞等, 2021
2	长江三角洲湿地	1980 年	3904.2	2015 年	3423.4	-12.3	焉恒琦等, 2020
3	辽河三角洲滨海湿地	1982 年	1354.2	2015 年	1387.6	2.5	刘婷等, 2017
4	珠江三角洲湿地	1980 年	688.7	2015 年	654.7	-4.9	吴海曼和张春明, 2021
5	青藏高原湿地	2008 年	111717.0	2016 年	115584.0	3.5	郎芹等, 2021
6	若尔盖高原沼泽湿地	2007 年	4241.4	2016 年	4075.5	-3.9	甄硕等, 2017
7	蒙古高原南部湿地	2000 年	796.9	2018 年	666.2	-16.4	Jie et al., 2021
8	东北沼泽湿地	1980 年	107600.0	2015 年	74500.0	-30.8	王延吉等, 2020
9	红碱淖湿地	1986 年	58.6	2018 年	35.7	-39.1	郑玉峰等, 2020
10	三江平原湿地	2000 年	6084.7	2020 年	5614.0	-7.7	孟瑶等, 2022
11	盐城滨海湿地	1991 年	4093.8	2018 年	2420.3	-40.9	闫文文等, 2022
12	太湖流域湿地	1990 年	31259.2	2019 年	22069.2	-29.4	朱颖等, 2022
13	环巢湖湿地	1975 年	971.8	2020 年	905.3	-6.8	赵秋雨等, 2022

注:变化率正值表示湿地面积增加,负值表示湿地面积减少。

表 2 国内 10 处主要湿地的主要生态系统服务类型
Table 2 Main ecosystem service types of 10 major wetlands in China

序号	湿地名称	生物资源			调节功能			文化功能	
		物质生产	生物保育	净化水质	蓄水防洪	气候调节	护岸防灾	休闲旅游	科研教育
1	长江口湿地	√	√	√	√	√		√	√
2	鄱阳湖湿地		√	√	√	√			
3	洞庭湖湿地	√	√	√	√	√		√	√
4	洪泽湖湿地	√	√		√	√		√	
5	江苏滨海湿地	√	√	√		√	√	√	√
6	白洋淀湿地	√	√	√	√	√		√	√
7	盘锦地区湿地	√	√	√	√	√		√	√
8	鸭绿江口湿地	√	√	√	√	√		√	√
9	大兴安岭湿地	√	√	√	√	√		√	√
10	湛江红树林	√	√	√		√	√	√	√

湿地植物是湿地生态系统的核心,是湿地其他类群生物生长和代谢所需物质能量的主要来源,同时也为它们提供了天然庇护所和栖息地。根据第二次全国湿地资源调查结果,中国湿地高等植物种类约 4200 种,平均湿地植物物种密度为 0.0043 种/ km^2 ,接近植物区系最丰富的巴西(0.0046 种/ km^2),表明中国湿地植物物种多样性是比较丰富的(国家林业局, 2015)。但由于中国国土辽阔,气候和地貌类型多样,湿地植物多样性分布存在不均一性。湿地植物多样性丰富地区多集中在黑龙江、青藏高原以及川西北若尔盖地区,而在中国北部、西北部干旱地区以及农业发达的华北平原等地区,沼泽湿地率很低,相应湿地植物多样性也较低(国家林业局, 2015)。

湿地动物在湿地物质循环、能量流动以及生态稳定方面扮演着重要角色。截至 2013 年,全国湿地调查记录显示湿地有无脊椎动物 1703 种,脊椎动物 2312 种(国家林业局, 2015)。中国湿地动物总体表现出很高的物种多样性,但由于湿地生态系统本身

差异多变,导致湿地动物物种分布在地域或空间上表现出较高的不均一性。例如在西南地区,由于不同河流、湖泊等湿地类型在空间上缺少连通性,长期的地理隔离形成了许多特有鱼类类群,物种多样性较高,而在东部沿海地区由于缺乏地理隔离,特有鱼类少,物种多样性相对较低。而鸟类由于具有飞行能力,其扩散能力强,因此缺少特有种。从整个国家尺度考虑,没有 1 种仅分布于中国的特有水鸟种类(国家林业局, 2015)。不过中国湿地是候鸟重要的迁徙驿站,例如在中国洞庭湖湿地就养育着 258 种鸟类,其中世界最稀少的涉禽之一小白额雁占世界总数的 30%在该湿地越冬;中国三江平原湿地为白枕鹤、丹顶鹤、东方白鹳、北鸕和雁鸭类等濒危鸟类提供了繁殖和迁徙的场所。

湿地微生物主要包括细菌、古菌、真菌、病毒以及一些显微藻类和小型原生生物等(周德庆, 2011)。以湿地土壤为例,每克土壤中仅微生物数量就可能达上亿,而微生物物种可达数万种,其中包含产抗生素、降解环境污染物的菌种等,是一种宝贵的生物资源(周



图2 湿地代表性动植物资源
Fig.2 Typical wetland plant and animal resources

攀等,2022)。但不同于湿地植物和动物,湿地微生物个体微小,难以用肉眼观测,也不能用仪器在野外直接观测,同时当前绝大多数微生物尚不能被分离培养,再加之其本身数量巨大、种类繁多,导致大规模统计调查难以实现(Fierer,2017;朱永官等,2017),因而在全国性资源调查统计中往往被忽略。近年来中国对于湿地微生物的重视程度逐渐上升,高通量测序技术以及生物信息学方法的迅猛发展极大提高了湿地微生物资源调查研究的深度和广度(Orgiazzi et al., 2015)。通过对中国青藏高原、内陆和沿海三种不同类型,共计42处湿地调查发现,中国湿地土壤细菌门类组成主要以变形菌门(Proteobacteria)为主,其次为绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes)(An et al., 2019)。对于湿地真菌,子囊菌门(Ascomycota)和担子菌门(Basidiomycota)常为中国湿地土壤的优势菌门(陈伟等,2019;裴理鑫,2021)。一个不争的事实是现有大多研究还是主要局限于局部尺度的湿地土壤微生物,且不同研究间存在方法不一,缺少动态监测,数据整合困难等问题(李香真等,2016),很难实现对全国湿地微生物资源的定量描述,因而当前对全国尺度湿地微生物资源的认识水平还有很大的提升空间。

2.2.2 湿地净化功能

湿地被誉为“地球之肾”,是因为其净化功能,其实质是湿地中的土壤、植物以及微生物对进入湿地中一系列污染物质的沉降、过滤、吸附、生物吸收以及生化转变等过程的综合(姚鑫坛和杨桂山,2009;赵直等,2012)。中国对湿地认识和记载已有几千年的历史,但系统开展湿地净化研究始于20世纪50年代。以N、P污染物的净化为例,湿地对氮的去除主要通过土壤的吸附和过滤、植物的吸收、微生物的硝化和反硝化作用(Bachand and Horne, 1999),对于磷的去除主要通过土壤颗粒的吸附和沉淀作用,以及植物和微生物的吸收利用(Gray et al., 2000)。如河北白洋淀芦苇湿地对陆源N、P营养物质截留率依次为42%和65%(尹澄清等,1995)。在三江平原小叶章湿地,湿地系统对输入N、P污染物的总净化率可达53.11%和58.95%(徐宏伟,2005),显示了湿地对于N、P富营养污染物的净化能力。而对于重金属,湿地系统主要通过其土壤

基质的吸附沉淀以及植物的吸收和富集将有毒重金属离子转化为无毒物质,从而达到去除重金属污染的目的(葛光环等,2013)。例如,赵丹慧等(2019)利用不同湿地植物构建了15种人工湿地处理三江平原农田退水,实验结果发现人工湿地对于Cr、Pb、Cu、Zn的平均累积去除率依次为91.82%、54.33%、12.92%、72.61%。而在广东韶关凡口,利用人工湿地处理铅锌矿选矿废水,历时10年的监测结果表明,其对Pb、Zn、Cd的净化率分别可达99.0%、97.3%和94.9%(招文锐等,2001)。但是,随着污染水平的提高,湿地系统净化功能会受到损害,甚至最终可能转变为污染源。因此,湿地的净化潜能并不是无限的,今后人们在享受湿地提供的一系列净化功能时,也应注重湿地的管理和保护,避免将其由“地球之肾”转变为污染源。

2.2.3 湿地蓄水防洪

中国对湿地蓄水防洪功能的认识源于先秦时期(公元前221年),当时的秦国商人为了展示自己国家的雄厚实力则会自豪谈论都城雍城(水上秦都),是如何国家大旱也依旧不干涸,能够源源不断为百姓提供水源(陈梦雷,2006)。湿地具有水系调节器的生态功能,包括调节河川径流、补给地下水、维持区域水平衡以及洪水减缓等。特别是在减少洪水风险方面,使其成为区域、国家乃至国际上水资源管理政策的重要组成部分。具体而言,在汛期由于湿地土壤孔隙度较高且具有较强的土壤饱和持水量,其可通过吸收和储存来水以消减地表径流、降低流速和消弱洪峰从而降低洪水风险;而在非汛期,湿地可以缓慢释水或以下渗侧渗的方式发挥水源供给和补给地下水的作用。中国东北三江平原沼泽湿地土壤的草根层和泥炭层孔隙度在72%~93%,最大持水量为400%~600%,最终全区沼泽湿地蓄水量可高达 $3.84 \times 10^9 \text{ m}^3$ (闫敏华等,2004;刘兴土,2007),由此在汛期其可有效减缓洪水向下游推进的速度,削减洪峰,而在非汛期巨大的蓄水能力,可有效发挥水源补给作用。研究表明鄱阳湖湿地洪水经其调节后可消减洪峰流量的15%~30%,尤其是1954年特大洪水,经鄱阳湖湿地调蓄削减率高达53%(赵同谦等,2003),有效减轻了对长江下游的洪水灾害威胁。中国若尔盖湿地泥炭分布面积超过5000 km²,泥炭最深处达38 m,泥炭总储量

达70亿m³,按1m³泥炭储水800kg计算,若尔盖沼泽泥炭区蓄水可达56亿m³,该储水量可满足中国14亿人口11年的生活需水量,是黄河流域的重要“蓄水池”(周公乐,2005)。此外,若尔盖湿地是黄河水系重要的涵养源,黄河流经这里后,水的径流量在平水期可增加29%,枯水季可增加45%(杜受祜和虞洪,2015)。若尔盖湿地是中国西部高原水塔,对调节区域水资源平衡,稳定流域内的生态平衡和大西北的内陆气候有重要意义。

2.2.4 湿地气候调节与固碳功能

湿地在调节区域气候特征和缓解全球气候变化方面也具有重要作用。由于湿地的主体是由大面积水体构成,加之其中的底泥、软岸以及植被等诸多要素共同作用下,湿地得以实现气候调节这一极为重要的生态功能。首先在区域尺度上,湿地的气候调节主要通过其本身巨大水面的水蒸气蒸发以及周边植被的水汽蒸腾作用,使得湿地和大气之间不断进行能量和物质交换,进而改变周边区域空气温度和湿度。三江平原沼泽湿地与周边旱地相比,其近地层气温低,湿度大,具有显著的“冷湿岛”效应,且越靠近地面,“冷湿”效应越明显(聂晓和王毅勇,2010);在广州,研究发现气温随着与城市湿地景观距离的增大逐渐升高,而相对湿度恰恰相反,同时湿地周围的平均风速也随湿地距离增大而降低,说明了湿地的小气候调节作用(彭小芳等,2008)。而在全球尺度上,湿地的气候调节主要通过吸收和固定大气中的二氧化碳,从而起到减缓气候变暖趋势的气候调节作用。中国拥有亚洲最大面积的湿地,中国湿地面积为5342万hm²,若按Wang et al.(2021)固碳速率计算,其碳汇功能超过1.71亿t碳/年。

2.3 中国湿地资源开发利用

湿地作为地球上最为重要的生态系统之一,其涵盖广泛的食物链和丰富的生物多样性,为人类生

产生活提供了大量的物质资源。由此千百年来诸多文明都孕育于湿地之中,甚至依赖于湿地。中国早在先秦时期,湿地就已经被加以利用,在其基础上创造出了无数美轮美奂的皇家园林(陈梦雷,2006)。中国对湿地资源的利用涉及湿地面积、淡水、植物、动物以及泥炭、矿物、休闲地等(表3)。特别是进入21世纪以来,随着人口增长和经济社会的迅猛发展,人们对于湿地食用、药用等资源的需求日益增长,由此发展了一系列具有良好经济效益和社会效益的利用模式(图3)。

2.3.1 湿地农业

湿地农业是通过培育湿地动植物产品,为人类社会提供食品以及生产原料的一种农业形态(国家林业局,2015)。例如湿地种植利用、湿地水产养殖都是传统湿地农业的常见形态。据统计中国60%以上的粮食作物、经济作物和畜产品以及80%以上的淡水鱼类均是由湿地农业所生产(刘红梅等,2010)。不过中国湿地类型多样,区域差异显著,不同地区有着各自独特的湿地农业模式(国家林业局,2015)。例如珠江三角洲地区,由于当地气候多雨、地势平坦且河涌发育,由此形成了一种独特的基塘湿地农业模式,包括桑基鱼塘模式、蔗基鱼塘模式等;在重庆巴南、渝西地区,由于人多地少,结合当地自然环境及水热特点,形成了“双千田”组合模式;在长江中下游地区,为提高单位面积产量和收益,形成了立体稻作种养模式;在东北三江平原地区,结合当地水土资源特点,因地制宜,形成“稻-苇-鱼”复合生态系统湿地生态农业。

2.3.2 湿地旅游

湿地旅游是生态旅游的重要组成部分,其是以生态和自然环境为取向展开的一种既能获得经济效益,又能促进生态保护的旅游活动。近年来随着中国湿地公园建设的持续推进,湿地旅游开始兴旺。目前中国湿地旅游形式主要包括乡村湿地旅

表3 湿地资源利用

Table 3 Utilization of wetland resources

序号	利用类型	具体利用方式
1	湿地种植	观赏型、食用型、药用型、环保型湿地植物物种种植利用
2	湿地养殖	淡水湿地池塘养殖、滩涂湿地养殖等
3	湿地旅游	乡村湿地旅游、湿地公园旅游等
4	湿地产品	湿地食用产品、湿地药用产品、湿地饮用产品以及工艺品等
5	泥炭	燃料发电、化工、有机肥料等



图3 湿地资源利用模式

Fig.3 Utilization patterns of wetland resources

游和湿地公园旅游(国家林业局,2015)。中国的湿地乡村旅游活动主要开展于湿地资源丰富、乡村湿地景观优美的区域,如山东微山湖、江西婺源。湿地公园旅游多围绕生态环境优美、湿地景观多样化的生态型主题公园,如杭州西溪国家湿地公园、湖北神农架大九湖国家湿地公园等。

2.3.3 湿地产品加工

湿地不仅为人类社会提供水稻、鱼、虾、贝类、水生蔬菜等湿地食用产品,其还可提供大量原材料,用以加工制成各种生活和建筑用品,以及药用、工艺等产品(Mitsch and Gosselink, 2007)。例如在中国东北的辽河三角洲湿地,芦苇湿地被广泛的人工管理以最大限度地提高芦苇产量用于造纸业,据统计每年用于生产纸浆的芦苇生物量产量已达40万t(Brix et al., 2014)。湿地植物其茎、枝、皮多柔韧,是制作编制品以及工艺产品的优良原材料,在中国当前编织品和工艺品中有相当一部分是湿地植物制成,且随着人民生活水平的提高,人民对于编织品和工艺品的需求也越来越多,具有十分广阔的生产前途。以湿地植物席草和杞柳为例,常被用以制作枕席、簸箕等生活必需品以及挂席、地毯席等工艺品。此外,许多湿地动植物体内含有有效药

理成分,具有治疗和保健作用。以蕺菜为例,又名鱼腥草,由于体内含有鱼腥草素,具有清热、解毒、利尿、镇痛等功效,常被用以制作口服液或注射液等药剂。最后,以湿地动植物或其提取物为原料制作加工成饮用产品,也是湿地产品利用开发的形式之一。当前中国湿地饮品类型较多,主要以加工利用莲、荸荠等制作系列饮品,其中藕汁饮料是当前中国工业化生产较多的产品,且在江苏已形成很多著名的品牌,如“倾心、千纤、怡味莲”等品牌。

2.3.4 泥炭

泥炭是在沼泽湿地发育过程中由动植物残体经漫长的生物地球化学过程形成和积累的有机矿产,其质轻、持水、通气性良好,含有很高的有机质、腐殖酸等营养成分,是良好的土壤调节剂和栽培基质。据统计中国共有泥炭资源量46.87亿t,位居世界第三,主要集中分布在西南的若尔盖高原、云贵高原、东部的长江中下游平原及东北的长白山、三江平原等地(国家林业局,2015)。在中国泥炭用途广泛,在农业上常被用作有机肥料和育苗及花卉培植的基质,在工业上被用作燃料发电以及化工、医药、制陶和建筑材料等。然而与国外多为高位鲜类泥炭相比,中国泥炭资源以低位草本泥炭为主,工

业开发成本相对较高,经营效益不佳。同时当前国内市场简单粗放,缺乏规模化、标准化、产业化,泥炭资源存在惊人的浪费,生产的落后局面严重。据不完全统计,2016年中国国内开发泥炭量约100万 m^3 ,与进口泥炭量相当,其中一半用于景观绿化,近一半用于种苗培育,少量用于有机无机复混肥料的生产(王利伟等,2019)。

2.4 中国湿地保护政策与实践

湿地作为地球三大生态系统之一,是维护国土生态安全的基本屏障和实现经济社会可持续发展的物质基础(杨邦杰等,2011)。自1992年加入《湿地公约》后,中国湿地保护管理工作不断加强,其中湿地保护和履约机构在原有国家林业局设立,地方上各级湿地保护管理机构也逐步建立,相应湿地保护相关政策、通知和制度先后出台,由此采取了一系列保护和合理利用湿地资源的措施和行动计划,为湿地保护修复提供了有力的支撑和保障。经过近30年的努力,当前初步建立起以自然保护区为主体,湿地公园与保护小区并存,森林公园、水源保护区等互为补充的湿地保护体系。截止到2021年底,中国共拥有重要国际湿地64块、湿地自然保护区602个,国家湿地公园和众多湿地保护小区1600余处,湿地保护率达52.65%。

2.4.1 湿地保护政策

中国政府高度重视湿地保护工作,先后出台了一系列的湿地保护政策,包括2000年《中国湿地保护行动计划》、2004年《关于加强湿地保护管理的通知》、2005年《关于做好湿地公园发展建设工作的通知》以及2013年《推进生态文明建设规划纲要》等。2017年,国家林业和草原局贯彻落实国家《湿地保护修复制度方案》,并修订了《湿地保护管理规定》,27个省份出台了省级湿地保护立法。为了进一步加强湿地保护,实现人与自然和谐共生,2021年12月24日,《中华人民共和国湿地保护法》首部专门保护湿地的法律出台,从而标志着中国湿地保护正式走向法制化,为中国湿地保护创造了良好条件。在湿地保护工程规划上,2003年国务院批准了《全国湿地保护工程规划(2002—2030)》,标志着中国湿地保护工作开始进入新的历史阶段,之后湿地保护工作被纳入国民经济和社会发展的“五年计划”之中,例如,2012年《全国湿地保护工程“十二五”实施

规划》、2016年《全国湿地保护“十三五”实施规划》以及2021年《全国湿地保护“十四五”实施规划》等(安树青等,2021)。经探索研究,当前中国已成功建立并实施了湿地生态补偿制度,极大提高了中国重要湿地的保护管理能力。此外,在湿地科研支撑方面,国家林业局成立了湿地监测中心、湿地研究中心、国家高原湿地研究中心以及国家湿地保护与修复技术中心,自然资源部建立了中国北方滨海盐沼湿地生态地质野外科学研究观测站,中国地质调查局成立了滨海湿地生态地质重点实验室,相应一些科研院所和大专院校也成立了湿地研究机构和设立湿地学科专业,为中国湿地保护管理工作提供了强有力的技术支撑。

2.4.2 中国湿地保护实践

2017年,国家林业和草原局贯彻落实国家《湿地保护修复制度方案》,实施湿地保护修复工程和补助项目1500多个,恢复湿地23万 hm^2 ,安排退耕还湿51万 hm^2 (国家林业局,2015)。如在东北湿地地区,针对该区大规模的农业开发、保护管理能力薄弱和湿地资源保护和利用缺乏统一规划和协调机制问题,开展了退耕还湿、植被恢复、水环境治理等一系列退化湿地生态系统恢复工程,以提高湿地生态系统的自我维持能力,维护区域湿地生态系统健康(翟金良等,2003;师君和张明祥,2004);在黄河中下游湿地区,针对该区水资源匮乏问题,每年在6月进行大规模调水调沙工程,以此补充下游及黄河三角洲地区生态需水,同时实施了退耕还湿等措施,以恢复湿地保水蓄水等生态功能(李国英,2002;周银军和刘春锋,2009;连煜等,2015);在长江中下游湿地区,针对该区围湖造田和城市化问题,采取退耕还湖、还泽、还滩等措施,以扩大湿地面积,实现区域生态惠民和经济可持续发展(陈家宽等,2010;林程吉,2010;王冬梅等,2017;杨龔等,2019);在滨海湿地区,针对油田开采、盐田和农业开发等湿地资源不合理和过度开发问题,主要围绕重点河口湿地和鸟类迁移重要驿站开展湿地保护和恢复项目,包括在盐城湿地保护区侵蚀海岸采用生态桩防止海岸侵蚀,在辽河三角洲进行植被修复提高碳汇和提高生物量进行造纸等,将其建立为具有良性循环和经济增值的湿地开发利用示范区(Brix et al., 2014; 杨棠武等, 2021);在东南和南部

湿地区,针对该区泥沙淤积、水质污染和生物多样性减少问题,主要通过来自工农业的污染源进行控制,加强重要湿地保护力度等措施,以完善湿地保护,维持湿地健康(刘剑秋,2006;姜海萍等,2013);在西南湿地区,针对该区一些近城湖泊有机污染严重、湿地开发不合理等问题,开展典型高原湿地保护体系项目建设,以完善高原湿地生态监测体系,促进湿地可持续利用理念的推广和利用(王长科和张安定,2001;张晓云等,2005;赵湘江和杨兰,2021);在西北干旱半干旱湿地区,针对该区由于干旱和上游截流导致湿地大面积萎缩和干涸问题,主要通过完善区域水资源的管理和协调,以改善荒漠区湿地生态环境,维持其湿地生态系统健康(王效科等,2003;张彦增,2010;陈亚宁等,2012;李虔辉,2013;胡顺等,2022);在青藏高原湿地区,针对该区过度放牧、湿地萎缩和功能减退问题,通过科学控制放牧强度实施湿地面积扩增和功能恢复(白军红等,2004;杨川陵,2007;赵志刚和史小明,2020)。

3 中国湿地损失和退化驱动因素

根据调查显示当前中国湿地损失和退化的主要驱动因素,除了气候变化等一些自然因素外,人类活动占用和环境污染是其主要原因(安树青等,2021;刘强等,2023)。此外,地质因素有时也会占据很大的主导作用。例如,Sun(2022)等基于遥感数据的研究发现,在西藏亚东地区由于地质构造活动造成湖盆底部产生了一系列延伸断层致使湖水泄漏至地下,导致近30年来亚东地区典型盐湖湿地规模不断缩小。

3.1 气候变化

湿地作为对气候变化较为敏感的生态系统,气候变化预计将成为湿地生态系统损失和变化的重要驱动因素(Mitsch and Gosselink,2007)。首先对于内陆湿地,气候变化将会通过气温和降水量的变化影响内陆湿地的分布和功能,不过影响方向会因湿地水源补给方式和所处地区不同而存在差异(孟焕等,2016)。例如,在新疆额尔齐斯河流域,由于其径流补给以季节性积雪融水为主,受全球气候变化的影响,气温升高引起春冬季节积雪融水增加,而夏冬季节降水量又有所增加,导致该河流域沼泽和湖泊湿地面积自然增大;而在长江中下游地区,

由于该区绝大多数湿地都以大气降水补给为主,21世纪以来,受到全球气候变化影响降水量呈减少趋势,造成湿地水资源补给减少,水分消耗增大,加速了湿地的萎缩(杨涵等,2012);同样在中国华北地区,在气候变化影响下,温度升高、降水量减少、蒸发量增加,致使白洋淀、扎龙等湿地水资源短缺,萎缩严重(张仲胜等,2015)。并且有研究指出,在未来全球气候变暖的背景下,中国大兴安岭地区湿地面积将呈显著减少趋势,到2050年将约有30%的湿地消失,而到2100年将约有60%的湿地消失(Liu et al., 2011)。总体来讲,气候变化对中国内陆湿地的影响将因地域以及气候环境的不同而存在差异,气候变化所带来的水源补给量增加对湿地产生的正面影响能否大于气温升高、蒸散量增加引起的负面影响,决定了内陆湿地的萎缩与扩展(孟焕等,2016)。

而对于滨海湿地生态系统,气候变化会在世界范围内造成海平面上升、海水表层温度上升、海洋酸碱度变化以及风暴潮等不利影响,由此在气候变化背景下滨海湿地的功能和分布将受到严重威胁(Cai et al., 2009; Li et al., 2018; Wang et al., 2022)。据IPCC第六次评估报告显示,由于气候变暖所致冰原融化的不确定性,全球海平面上升平均值将有可能超过预期,到2100年上升2 m,2150年上升5 m(IPCC, 2021)。如果海平面上升没有伴随相等程度的沼泽沉积物垂直增加,那么滨海湿地将由于日益严峻的淹没、侵蚀以及海水入侵而逐渐解体(Mitsch and Gosselink, 2007; Ye et al., 2015; Kirwan et al., 2016; Perillo et al., 2018)。据估计,如果海平面上升1 m,湿地公约所指定的国际重要湿地将有一半受到威胁(Nicholls,2004)。数据显示中国沿海海平面变化总体趋势呈波动上升模式,其中1980—2016年间海平面上升速率为3.2 mm/a,高于同期全球海平面上升的平均速率(国家海洋局,2017)。杨桂山等通过分析近几十年来中国沿海平原的区域差异和海平面变化,对可能出现的海平面上升和淹没区域进行了预测,提出黄河三角洲(包括古代、现代和废弃)、莱州湾沿岸、苏北沿海、长江三角洲、珠江三角洲以及台湾西部沿海是最易受到沿海灾害的地区,据估计波及面积约350万hm²(Yang and Shi, 1995;杨桂山,2002)。除海平面上升影响外,气候变化所带来的海水温度上升和酸碱度

变化也将无形造成滨海湿地生态环境的破坏(Du et al., 2013b; 雷茵茹等, 2016)。例如:1998年的ENSO事件,海水温度的异常升高造成全球16%的珊瑚礁死亡,其中包括中国南海东沙环礁潟湖中的珊瑚发生大面积死亡(Du et al., 2013b)。珊瑚礁对水温变化敏感,在30℃以上的海水中难以生存,有研究表明预计到21世纪末,珠江流域年均地表气温将上升1.9~3.4℃,到那时许多珊瑚礁将面临更加严重威胁(Yu et al., 2004)。此外,气候变化背景下极端气候灾害频率的增加也将会对湿地造成物理性的侵蚀和破坏(Gilman et al., 2008),诸如2008年中国南方低温天气频出以及1961—2010年间热带气旋和台风等极端气候灾害频率和强度的增加,导致中国南方大面积的红树林湿地受灾(陈鹭真等, 2010; Du et al., 2013a)。

3.2 城市化和土地利用转变

随着中国人口的增加、经济和社会的迅猛发展,越来越多的湿地资源被用于城市建设和围垦开发,用以满足日益增长的粮食、住宅以及商业需求。目前在中国湿地围垦、城市开发占用和改变湿地用途是造成自然湿地面积大幅消减和功能下降的主要原因(国家林业局, 2000; 杨邦杰等, 2011)。例如,新中国成立之初,为满足粮食和防洪需求,对湖泊湿地进行了大规模的围垦,半个世纪以来全国天然陆域湿地面积共计减少了约1350万 hm^2 ,其中约有81%是由于围垦开发湖泊所致(国家林业局, 2015)。对于自然湿地中的另一湿地类型——河流湿地,由于缺乏规划和合理措施,拦河大坝的建设是其自然湿地面积减少的直接原因。首先一些水利工程的修建阻断了天然河流和湖泊等湿地水体的联系,再加之上游无节制的灌溉、工业和城市的用水截流,迅速导致内陆湿地的广泛损失和破碎。如塔里木河、黑河等重要内陆河,由于水资源的不合理利用,导致下游缺水,植被死亡,绿洲消失。而沼泽湿地作为中国最主要的湿地类型,历史上也面临围垦开发严重问题(赵魁义, 1999)。以三江平原为例,经50多年的开发,其湿地面积已由1949年的534万 hm^2 减少到2000年的90.69万 hm^2 ,而相应的耕地面积则由1949年的79.6万 hm^2 增加到1996年的366.8万 hm^2 (汪爱华等, 2002)。另外作为中国两大沼泽集中地之一的高原湿地区,虽未进行大规模

的垦殖,但旅游开发、城镇建设等基础设施占用也导致该区湿地资源及其质量不容乐观。同时穿过湿地的道路、铁路等线状基础设施的建设,也使得湿地斑块化,加剧了湿地的消失。对于滨海湿地,特别是进入21世纪以来,沿海地区经济快速发展,对土地需求日益增加,大规模的围填海、浅海滩涂水产养殖、盐田开发和港口码头开发等造成中国近海自然湿地的不断萎缩(国家林业局, 2015; 叶思源等, 2021)。根据中国地质调查局1975年、2000年以及2017年三期次全国滨海湿地类型和面积统计,全国滨海湿地总面积(不含港澳台地区,下同)1975年为89820.6 km^2 , 2000年为85971.6 km^2 , 2017年为83560.5 km^2 ; 全国天然滨海湿地1975年面积约21393.9 km^2 , 2000年面积为14905.3 km^2 , 2017年面积仅为9862.2 km^2 (叶思源等, 2021)。

3.3 环境污染

大量研究表明,湿地环境污染已成为中国湿地面临的最严重威胁(国家林业局, 2014)。湿地作为流域汇水区,经常面临大量未经处理的生活污水和工业废水被直接排入湿地,同时,来自农业退水的大量农药、化肥和除草剂等也均将汇集到湿地之中,这些污染物很快超出湿地耐受处理阈值,对湿地生物多样性造成严重威胁,促使湿地生态功能严重退化(雷昆和张明祥, 2005)。党的十八大以前,由于污水排入、海水养殖以及局部海域的油类污染,中国近岸海域滨海湿地的污染也非常严重。尤其是无机氮、磷的污染,其导致从辽东湾、渤海湾直到江苏、浙江、福建等地近海海域赤潮频发,严重破坏滨海景观,并威胁滨海湿地生物多样性和海岸的稳定性,如沿海大量的养殖造成的富营养化,导致湿地植被根系变浅,这也是海岸侵蚀,滨海湿地面积萎缩的原因之一(Deegan et al., 2012; 叶思源等, 2021)。

4 中国湿地开发利用和保护现存问题及其管理建议

4.1 湿地开发利用现存问题

目前,中国的湿地资源开发利用产业已有一定的基础,但仍存在着开发利用不足与过度利用两种倾向。一方面,由于缺乏对湿地资源可持续利用的科学把握和正确理解,许多个人和团体试图从湿地

中获取最大个人利益而不考虑其可持续性收获,导致过度利用湿地资源的现象屡禁不止。其中对湿地渔业资源的过度利用,甚至掠夺式利用现象更为司空见惯。以广东为例,根据第一次和第二次湿地资源调查数据显示,仅10年时间发现其中天然鱼类种类减少了186种,减少率达30%(广东省林业局,2001,2013)。这种对于湿地鱼类资源的过度消耗,将造成湿地野生经济鱼类资源日趋衰竭,致使湿地生物多样性面临严重威胁,生态平衡遭到破坏,最终将对天然渔业资源造成毁灭性打击(屈明和胡喻华,2015)。相反地,由于当前湿地资源开发利用研究基础薄弱、科技支撑不够、管理模式落后等原因,中国现有湿地资源开发利用面临层次低、规模小、技术落后和科技含量低等问题,导致大量宝贵资源开发利用不足(国家林业局,2015)。以中国丰富的动植物资源为例,中国有高等湿地植物4200种,湿地脊椎动物2312种,其中具有或可作为潜在开发利用种类的数目达数百种,但目前常规利用的种类约100种左右,存在大量野生湿地资源处于未利用状态。此外,中国长江中下游水生蔬菜资源丰富,栽培历史悠久,但目前水生蔬菜的开发利用仍处于初级阶段,管理粗放,产业化经营规模很小。而且当前中国湿地产品大多数为初级产品,缺乏深加工利用,产品综合利用率低。最后,值得注意的是在湿地资源利用的同时,以凤眼莲、福寿螺、克氏原螯虾为主的外来物种入侵给中国湿地资源保护及可持续利用敲响了警钟。这些外来入侵物种已在国内许多地区造成了明显危害,存在极大的生态风险(方玲,2011;国家林业局,2015;肖珍芝和舒服,2015)。

4.2 湿地保护现存问题

首先,面对经济发展,湿地保护被迫让位。中国是世界上人口最多,人均自然资源占有量低的发展中国家。近50年来面对人口迅猛膨胀和经济快速发展,中国不得不大力开发湿地资源,用作灌溉水源、农业生产、水产养殖以及城市发展,以提高经济效益和人民生活水平,由此相应湿地生态保护与经济社会发展之间的矛盾也日益突显(Shi et al., 2001; Ren et al., 2008)。其次,中国开展湿地保护工作较晚,包括中国大多数开展旅游的湿地,甚至国家级湿地公园均缺乏必要的以及公益性的宣教教

育活动和宣传教育设施。据调查统计,中国仅有25%的公众对湿地有所了解,其中很多人认为湿地就是未利用土地,湿地资源是取之不尽用之不竭的(国家林业局,2015)。更为重要的是,个别地方政府负责人对湿地资源的巨大价值和重要作用知之甚少,在湿地保护方面不作为,甚至一味地牺牲湿地资源来换取更为明显的短期经济利益,导致湿地不合理围垦、占用等。其次,对湿地价值认识的不足。许多湿地修复工程趋于景观化,忽略了湿地生态属性的修复。最后,湿地保护管理缺乏科技支撑。根据笔者多年对湿地修复工程的实地调查发现,在盘锦红海滩修复保护实践过程中,人们将三角洲自然进积过程中形成的植被演替误认为湿地退化,进行了徒劳的修复活动;在黄河三角洲,由于未能科学区分湿地面积退化的地质过程和人类活动控制因素,盲目地关闭油井肯东12井和老168井,直接造成了巨大的经济损失;在江苏盐城丹顶鹤保护区在修复翅碱蓬植被过程中,由于选取不合适的生态位,使其修复实践屡遭失败;还如在退渔/耕还湿地的湿地保护活动中,错误地将已演化至滨海湿地终极的农用地划为保护的對象,极大地限制了地方经济的发展。因此为满足湿地保护修复的迫切需要,必须加强地球系统多学科的综合研究,由此从多维空间上阐述和论证湿地的形成、演化和衰亡的规律,从而制订一个能满足社会经济发展要求和生态科学合理的可持续保护方案。

4.3 加强湿地保护的管理建议

保护湿地首要任务需要全面提升湿地调查研究水平。一方面建立长期监测网站,适时发现湿地出现的生态问题;另一方面对关系到湿地稳定性的热点科学问题深入调查研究,以支撑湿地修复工程。特别地,由于中国人口庞大和资源短缺,需要针对分布于不同地理条件下的湿地,开展湿地资源开发利用研究。在湿地清洁水源、提供娱乐、洪水与侵蚀控制、工业材料利用和食品等方面充分发掘潜在的可再生资源,并在生态科学合理的基础上,结合社会需求和经济可行性,评估在湿地分布区开展经济活动类型和规模,探寻可持续的湿地保护解决方案。而目前禁止湿地保护区人类活动的政策过于一刀切,保护湿地的最佳方式应该是以可持续的方式管理湿地自然资源,以造福中国广大人民。

以下是湿地可持续管理的几种可能途径:(1)以科学为基础指导农林牧渔业活动;(2)湿地管理需顺从湿地自然演替规律;(3)在分配水资源之前,必须对生态需水量进行评估;(4)在控制入侵植物方面,应因地制宜,不应采取一刀切的政策;(5)湿地可以净化水,但其去污能力需要科学评估,以确保水净化功能的可持续利用;(6)每个湿地有不同的资源,为合理利用这些资源,有必要对各湿地进行潜在资源盘点;(7)湿地资源利用不足会限制经济发展和人类福祉,而过度利用则会导致湿地服务的丧失。因此,在开发利用湿地资源之前,有必要对各湿地资源进行科学的评价,确定合理的开发利用规模;(8)气候变化和海平面上升将直接影响内陆和沿海湿地的演变。比如北部的内陆湿地会因为冰川融化而增加,而沿海地区,由于海平面上升和沿海地区的经济发展,湿地会受到挤压。因此,评估湿地适应能力对于应对气候变化和海平面上升至关重要。

5 未来中国湿地的科学研究方向

近年来,中国高度重视湿地科学研究现状和新时期国家生态安全、粮食安全和水安全战略,由此未来中国湿地研究应聚焦国家需求和国际前沿,强化基础研究创新,努力展现湿地在生态文明建设中的核心价值以及独特优势,以满足国家生态安全与国民经济建设对湿地利用与保护理论和方案不断增长的需求。因此,本文建议在对湿地生态系统的科学研究方面应该特别关注以下三个方面:

(1)湿地碳循环与全球变化。湿地碳库的规模和稳定性是湿地发挥碳中和作用的关键,同时也是全球变化研究中的难点。湿地泥炭的形成主要依赖于水位,而其积累速率主要受温度的影响,然而当前及未来气候变化将如何影响湿地碳库的形成、扩张或收缩仍存在很大的不确定性。此外,目前缺少覆盖全国的湿地钻孔记录数据来研究国家尺度湿地碳积累的格局和机制。因此当前湿地研究亟需聚焦土壤碳库演变机制及其对气候变化的响应,通过包括大尺度的样带研究、温室气体通量监测、长期野外模拟增温和室内控制试验等手段,从不同角度揭示全球变化背景下湿地碳库的稳定性及调控机制。

(2)湿地退化过程与生态恢复机制。目前有关湿地退化和恢复机理研究大多为宏观、定性的过程

和机理研究,很少有研究从土壤生物化学、微生物生态学等方面开展微观过程和机理研究,这严重阻碍了对湿地退化和恢复机理的深入了解。未来湿地退化与生态恢复研究,在结合遥感、生态模型等新技术和新手段的同时,需同步加深各湿地类型宏、微观退化和恢复过程及机理研究,由此完善湿地生态恢复和保护理论,实现修复技术的开发。

(3)湿地生态系统服务的可持续利用模式。湿地保护遇到的最大阻碍是面对经济发展,湿地保护被迫让位。为实现生态保护与经济发展共赢,需加强湿地“生态-社会-经济”系统的综合管控研究,开展兼顾生态保护和经济发展的管理尝试和示范,提出制定适应中国国情的湿地利用和保护方案,以实现湿地生态系统的可持续利用和发展。

6 结 论

(1)中国境内江河纵横,滩涂蜿蜒,湖泊星罗棋布,沼泽散缀南北,拥有湿地面积5360.26万 hm^2 ,位居世界第四,涵盖了《湿地公约》定义的所有湿地类型。受全球变化和人类活动影响,近几十年来,中国湿地面积在持续减少与全球湿地变化趋势一致。

(2)中国湿地资源丰富,在发挥水质净化、蓄水防洪、气候调节等功能的同时,由于物产丰富,环境优美,极大促进周边农业、养殖业以及旅游业的发展,且由此发展了一系列具有良好经济效益和社会效益的利用模式,为地方经济发展和当地居民提供了丰富的资源保障。

(3)当前中国高度重视湿地保护,先后出台了一系列的湿地保护政策,并初步建立以自然保护区为主,湿地公园和自然保护区并存,其他保护形式互补的湿地保护体系。截至2021年底,中国共拥有重要国际湿地64块、湿地自然保护区602个,国家湿地公园和众多湿地保护小区1600余处,湿地保护率达52.65%。

(4)除了气候变化等一些自然因素外,人类活动占用和环境污染是当前中国湿地损失和退化的主要驱动因素,为进一步加强湿地保护,必须加强地球系统多学科的综合研究,由此从多维空间上阐述和论证湿地的形成、演化和衰亡的规律,从而制订一个能满足社会经济发展要求和生态科学合理的可持续管理方案。

References

- An Jiaxing, Liu Chi, Wang Qian, Yao Minjie, Rui Junpeng, Zhang Shiheng, Li Xiangzhen. 2019. Soil bacterial community structure in Chinese wetlands[J]. *Geoderma*, 337: 290–299.
- An Shuqing, Zhang Xuanbo, Zhang Haifei, Shen Meiya, Wang Yidao, Chen Jun. 2021. A strategic study on wetland restoration and conservation in China[J]. *Wetland Science & Management*, 15(2): 41–44 (in Chinese with English abstract).
- Assessment Millennium Ecosystem. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis: A Report of the Millennium Ecosystem Assessment*[M]. Washington: World resources institute, 1–155.
- Bachand Philip A. M., Horne Alex J. 1999. Denitrification in constructed free-water surface wetlands: I. Very high nitrate removal rates in a macrocosm study[J]. *Ecological Engineering*, 14(1): 9–15.
- Bai Junhong, Ou Yanghua, Xu hui Feng, Zhou Caiping, Gao Junqin. 2004. Advances in studies of wetlands in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Progress in Geography*, 23(4):1–9 (in Chinese with English abstract).
- Brix Hans, Ye Siyuan, Laws Edward A, Sun Dechao, Li Guosheng, Ding Xigui, Yuan Hongming, Zhao Guangming, Wang Jin, Pei Shaofeng. 2014. Large-scale management of common reed, *Phragmites australis*, for paper production: A case study from the Liaohe Delta, China[J]. *Ecological Engineering*, 73: 760–769.
- Cai Feng, Su Xianze, Liu Jianhui, Li Bing, Gang Lei. 2009. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention[J]. *Progress in Natural Science*, 19(4): 415–426.
- Chen Jiakuan, Lei Guangchun, Wang Xuelei. 2010. Analysis of Top Ten Cases about Effective Management of Wetland Nature Reserves in Middle and Lower Reaches of Yangtze River Basin[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1–190 (in Chinese).
- Chen Luzhen, Wang Wenqing, Zhang Yihui, Huang Li, Zhao Chunlei, Yang Shengchang, Yang Zhiwei, Chen Yuechao, Xu Hualin, Zhong Cairong, Su Bo, Fang Baizhou, Chen Naiming, Zeng Chuazhi, Lin Guanghui. 2010. Damage to mangroves from extreme cold in early 2008 in southern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34(2): 186–194 (in Chinese with English abstract).
- Chen Menglei. 2006. *Collection of Ancient and Modern Books*[M]. Jinan: QiLu Press, 1–4811 (in Chinese).
- Chen Wei, Ji Xiuling, Zhang Qi, Zhang Dongfang, Yuan Fei, Wei Yunlin. 2019. Diversity and composition of fungal community in Napahai plateau wetlands[J]. *Microbiology China*, 46(3): 494–503 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yaning, Yang Qing, Luo Yi, Shen Yanjun, Pan Xiangliang, Li Lanhai, Li Zhongqin. 2012. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China[J]. *Arid Land Geography*, 35(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Costanza Robert, d'Arge Ralph, de Groot Rudolf, Farber Stephen, Grasso Monica, Hannon Bruce, Limburg Karin, Naeem Shahid, O'Neill Robert V, Paruelo Jose, Raskin Robert G, Sutton Paul, van den Belt Marjan. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 387(6630): 253–260.
- Deegan Linda A, Johnson David Samuel, Warren R Scott, Peterson Bruce J, Fleeger John W, Fagherazzi Sergio, Wollheim Wilfred M. 2012. Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss[J]. *Nature*, 490(7420): 388–392.
- Ding Xigui, Wang Jisong, Zhao Guangming, Yuan Hongming, Wang Jin, Ye Siyuan. 2016. Accretion rate and controlling factors of carbon and nutrients during coastal wetland evolution in Yellow River Delta[J]. *Geology in China*, 43(1): 319–328 (in Chinese with English abstract).
- Du Shouhu, Yu Hong. 2015. Construction of Zoige national ecological special zone – optimization scheme of the West Route of South-to-North Water Transfer Project combining "engineering management" and "ecological restoration"[J]. *Decision-Making & Consultancy*, (3): 54–59 (in Chinese).
- Du Yaodong, Ai Hui, Duan Hailai, Hu Yamin, Wang Xianwei, He Jian, Wu Hongyu, Wu Xiaoxuan. 2013a. Changes in climate factors and extreme climate events in South China during 1961–2010[J]. *Advances in Climate Change Research*, 4(1): 1–11.
- Du Yaodong, Cheng Xuhua, Wang Xianwei, Ai Hui, Duan Hailai, He Jian, Wu Xiaoxuan. 2013b. A review of assessment and adaptation strategy to climate change impacts on the coastal areas in south China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 4(4): 201–207.
- Fang Ling. 2011. Impact of Herbivory by Invasive Apple Snail (*Pomacea canaliculata*) on Wetland Aquatic Plants and Nutrients in Water Body[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 67 (in Chinese with English abstract).
- Fierer Noah. 2017. Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10): 579–590.
- Forestry Administration of Guangdong Province. 2001. *Survey Report on Wetland Resources in Guangdong Province*[R] (in Chinese).
- Forestry Administration of Guangdong Province. 2013. *Survey Report on Wetland Resources in Guangdong Province*[R] (in Chinese).
- Gao Rui, Wang Zhiyong, Zhou Xiadong, Liu Rui. 2021. Monitoring and analysis of wetland change dynamics in the Yellow River Delta using multi-temporal remote sensing[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (4): 22–27 (in Chinese with English abstract).
- Ge Guanghuan, Ko Kun, Chen Aixia. 2013. Research status on the contribution of plant and substrates to heavy metals removal in wetland system[J]. *Contemporary Chemical Industry*, (7): 1006–1008 (in Chinese with English abstract).
- Gilman Eric L, Ellison Joanna, Duke Norman C, Field Colin. 2008. Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review[J]. *Aquatic Botany*, 89(2): 237–250.
- Gray Shalla, Kinross John, Read Paul, Marland Angus. 2000. The

- nutrient assimilative capacity of maerl as a substrate in constructed wetland systems for waste treatment[J]. *Water Research*, 34(8): 2183–2190.
- Hu Shun, Ling Kang, Wang Junyou, Qiao Shufeng, Ge Mengyan, Sun Ziyong, Ma Rui. 2022. Co-evolution mechanism of groundwater and wetland ecosystem in a typical inland watershed in northwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 49(5): 22–31 (in Chinese with English abstract).
- IPCC. 2021. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[R].
- Jiang Haiping, Zhu Yuansheng, Chen Chunmei. 2013. Discussion on water ecological protection and restoration in the Pearl River catchment[J]. *Pearl River*, 34(S1): 21–24 (in Chinese).
- Jie Wenhui, Xiao Chunlei, Zhang Ce, Zhang En, Li Jingyue, Wang Bing, Niu Haiwei, Dong Shuangfa, 2021. Remote sensing-based dynamic monitoring and environmental change of wetlands in southern Mongolian Plateau in 2000–2018[J]. *China Geology*, 4(4): 353–363.
- Kirwan Matthew L, Temmerman Stijn, Skeehean Emily E, Guntenspergen Glenn R, Fagherazzi Sergio. 2016. Overestimation of marsh vulnerability to sea level rise[J]. *Nature Climate Change*, 6(3): 253–260.
- Lang Qin, Niu Zhenguo, Hong Xiaoqi, Yang Xinying. 2021. Remote sensing monitoring and change analysis of wetlands in the Tibetan Plateau[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(2):230–237 (in Chinese with English abstract).
- Lei Kun, Zhang Mingxiang. 2005. The wetland resource in China and the conservation advices[J]. *Wetland Science*, 3(2): 81–86 (in Chinese with English abstract).
- Lei Yinru, Cui Lijuan, Li Wei, Kang Xiaoming, Zhang Manyin, Yang Yan, Xiao Hongye. 2021. Impacts of climate change on coastal wetlands in China and countermeasures[J]. *Wetland Science & Management*, 12(2): 59–62 (in Chinese with English abstract).
- Li Daoyuan. 2006. *Shui Jing Zhu* [M]. Beijing: Huaxia Publishing House, 1–774 (in Chinese).
- Li Guoying. 2002. The Yellow River water and sediment regulation[J]. *Yellow River*, 24(11): 29–33 (in Chinese with English abstract).
- Li Qianhui. 2013. Water resources management in arid region of northwest China: A case study of Guyuan City[J]. *Henan Science and Technology*, (13): 181–181 (in Chinese).
- Li Xiangzhen, Gu Liangdong, Li Jiabao, Yao Minjie. 2016. Soil microbial diversity observation in China: Current situation and future consideration[J]. *Biodiversity Science*, 24(11): 1240–1248 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiuzhen, Bellerby Richard, Craft Christopher, Widney Sarah E. 2018. Coastal wetland loss, consequences, and challenges for restoration[J]. *Anthropocene Coasts*, 1(3): 1–15.
- Lian Yu, Zhang Jianjun, Wang Xingong. 2015. The Yellow River Delta ecological restoration and habitat protection based on water and sediment regulation[J]. *Environmental Impact Assessment*, 37(3): 6–8,17 (in Chinese with English abstract).
- Lin Chengji. 2010. Characteristics, value, problems and protection countermeasures of wetland resources in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Hubei University of Science and Technology*, (7): 30–31 (in Chinese).
- Liu Jianqiu. 2006. *Wetland Research in Minjiang Estuary*[M]. Beijing: Science Press, 1–353 (in Chinese).
- Liu Hongjuan, Bu Rencang, Liu Jintong, Leng Wenfang, Hu Yuanman, Yang Libing, Liu Huitao. 2011. Predicting the wetland distributions under climate warming in the Great Xing'an Mountains, northeastern China[J]. *Ecological Research*, 26(3): 605–613.
- Liu Hongmei, Zhao Jianning, Li Gang, Yang Dianlin. 2010. Problems and strategies for sustainable development of wetland agriculture in China[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, (13): 342–343 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qiang, Lin Nan, Wang Changqi, Jia Liguang, Cheng Long, Guo Xiaodong, Zhang Yan. 2023. Wetland evolution and its driving factors in Songnen Plain[J]. *Geology and Resources*, 32(1): 96–104 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ting, Liu Xingtuo, Du Jia, Song Kaishan. 2017. Pattern and change of coastal wetlands in the Liaohe River Delta for 5 periods[J]. *Wetland Science*, 15(4): 622–628 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xingtuo. 2007. Water storage and flood regulation functions of marsh wetland in the Sanjiang Plain[J]. *Wetland Science*, 5(1): 64–68 (in Chinese with English abstract).
- Meng Huan, Wang Lin, Zhang Zhongsheng, Xue Zhenshan, Lu Xianguo, Zou Yuanchun. 2016. Researches on the impacts of climate change on spatial distribution and main ecological functions of inland wetland ecosystem in China[J]. *Wetland Science*, 47(23): 7–10 (in Chinese with English abstract).
- Meng Yao, Han Xiaoying, Liu Qiaobo, Su Dan, Sun Xihan. 2022. Ecosystem pattern and composition with changes of Sanjiang plain[J]. *Environmental Science and Management*, 47(7): 151–155 (in Chinese with English abstract).
- Mitsch William J, Gosselink James G. 2007. *Wetlands*, 4th ed[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 1–596.
- Nie Xiao, Wang Yiyong. 2010. "Cold-humidity island" effect of marsh wetlands on localized micro-climate[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 26(2): 189–192 (in Chinese with English abstract).
- Nicholls Robert J. 2004. Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: Changes under the SRES climate and socio-economic scenarios[J]. *Global Environmental Change*, 14(1): 69–86.
- Orgiazzi Alberto, Dunbar Martha Bonnet, Panagos Panos, de Groot Gerard Arjen, Lemanceau Philippe. 2015. Soil biodiversity and DNA barcodes: Opportunities and challenges[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 80: 244–250.

- Pei Lixin. 2021. Effects of Soil Microbial Community on Carbon Cycle and its Response to Warming in Coastal Wetlands of the Yellow-Bohai Sea[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1-166 (in Chinese with English abstract).
- Peng Xiaofang, Sun Xun, Yuan Shaoxiong, Sun Ruyong, Chen Zhanghe. 2008. Landscape characteristics and microclimatic effects of the urban Wetlands in Guangzhou city[J]. Ecology and Environmental Sciences, 17(6): 2289-2296 (in Chinese with English abstract).
- Perillo Gerardo M.E., Wolanski Eric, Cahoon Donald R., Hopkinson Charles S. 2018. Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach[M]. Netherlands: Candice Janco, 1-984.
- Qu Ming, Hu Yuhua. 2015. The utilization status and sustainable development strategy of wetland resources in Guangdong[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 34(4): 18-21 (in Chinese with English abstract).
- Ren Hai, Jian Shuguang, Lu Hongfang, Zhang Qianmei, Shen Weijun, Han Weidong, Yin Zuoyun, Guo Qinfeng. 2008. Restoration of mangrove plantations and colonisation by native species in Leizhou bay, South China[J]. Ecological Research, 23: 401-407.
- Shi C, Hutchinson S M, Yu L, Xu S. 2001. Towards a sustainable coast: an integrated coastal zone management framework for Shanghai, People's Republic of China[J]. Ocean & Coastal Management, 44(5): 411-427.
- Shi Jun, Zhang Mingxiang. 2004. Wetland conservation and management in northeast China[J]. Forest Resources Management, (6): 40-43 (in Chinese with English abstract).
- State Oceanic Administration. 2017. China sea level bulletin 2016[J]. Ocean World, (4): 39-31 (in Chinese).
- Sun Ang, Yang Qinghua, Liu Zhi, Chen Hua, Han Lei, Jiang Shoumin, Meng Yueyue, Bian Yue, Yang Yongpeng. 2022. Distribution of wetlands and salt lakes in the Yadong region of Tibet based on remote sensing, and their geo-climatic environmental changes[J]. China Geology, 5(1): 1-12.
- Tao Yuanming. 1979. Tao Yuanming Collection[M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 1-293 (in Chinese).
- The state forestry administration of the People's Republic of China. 2000. China Wetland Protection Action Plan[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1-118 (in Chinese).
- The state forestry administration of the People's Republic of China. 2014. Results of the Second National Wetland Resource Survey[R]. (in Chinese).
- The state forestry administration of the People's Republic of China. 2015. China Wetlands Resources · Master Volume[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1-508(in Chinese).
- Tiner Ralph W. 2020. Wetlands[C]/Wang Y. Wetlands and Habitats. Boca Raton: CRC Press.
- Wang Aihua, Zhang Shuqing, He Yanfen. 2002. Study on dynamic change of mire in Sanjiang Plain based on RS and GIS[J]. Scientia Geographica Sinica, 22(4): 636-640 (in Chinese with English abstract).
- Wang Changke, Zhang Anding. 2001. Wetland resources and its protection in Zoige Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 21(5): 20-22 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dongmei, Liu Jinsong, Dai Xiaolin, Wang Chunmei. 2017. Study on long-term effective mechanism of returning polder (fields) to lake (wetland): Case of Gucheng Lake[J]. Yangtze River, 48(18): 23-26 (in Chinese with English abstract).
- Wang Faming, Sanders Christian J, Santos Isaac R, Tang Jianwu, Schuerch Mark, Kirwan Mirwan L, Kopp Robert E, Zhu Kai, Li Xiuzhen, Yuan Jiaca, Liu Wenzhi, Li Zhi'an. 2021. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change[J]. National Science Review, 8(9): 145-155.
- Wang Faming, Zhang Jingfan, Ye Siyuan, Liu Jihua. 2022. Coastal blue carbon ecosystems in China[J]. China Geology, 5(1): 193-194.
- Wang Liwei, Kong Fanjing, Zheng Jinping, Wang Denghong. 2019. Present situation and suggestions on the exploitation and utilization of peat resources in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(2): 142-147 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoke, Ouyang Zhiyun, Miao Hong. 2003. Formation, evolution and protection of wetland ecosystems in arid region, Northwestern China[J]. Territory & Natural Resources Study, (4): 52-54 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanji, Shen Xiangjin, Lu Xianguo. 2020. Change characteristics of landscape pattern and climate in Marsh Areas of Northeast China during 1980-2015 [J]. Earth and Environment, 48(3): 348-357 (in Chinese with English abstract).
- Wu Haiman, Zhang Chunming. 2021. Analysis on the area evolution of coastal wetland in the Pearl River Delta[J]. Jilin Water Resources, 12(475):23-27 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Zhenzhi, Shu Fu. 2015. Distribution, harm and control of main invasive alien species in Hongjiang[J]. Hunan Agricultural Sciences, (7): 21-23 (in Chinese with English abstract).
- Xu Hongwei. 2005. Nitrogen and Phosphorus Purification Function of Xiaoyezhang Wetland Ecosystem in Sanjiang Plain[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 1-65 (in Chinese).
- Yan Hengqi, Zhu weihong, Mao Dehua, Wang Zongming, Liang Minxuan, Kang Yingdong, Yang Guang. 2020. Landsat-based observation of human pressure to wetlands in Ramsar sites over the Yangtze River Delta[J]. China Environmental Science, 40(8): 3605-3615 (in Chinese with English abstract).
- Yan Minhua, Deng Wei, Chen Panqin. 2004. Precipitation and runoff changes and their influence factors of marshy river in the Sanjiang Plain, China[J]. Wetland Science, 2(4): 268-275 (in Chinese with English abstract).
- Yan Wenwen, Gu Dongqi, Sun Huifeng, Zhao Xiaolong, Zhao Jinxia, Wang Jin, Huang Pei, Ming Jie, Wang Jingchuan. 2022. Dynamic study on landscape structure of Yancheng coastal wetlands in

- recent 40 years[J]. *Marine Environmental Science*, 41(3):437–443 (in Chinese with English abstract).
- Yang Bangjie, Yao Changtian, Yan Chenggao, Wang Futian. 2011. Wetland conservation in China: Achievements, problems and development strategies[J]. *China Development*, 11(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chuanling. 2007. Analysis of swamp degradation in Qinghai Lake valley and its counterplan[J]. *Qinghai Prataculture*, 16(2): 21–26 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guishan. 2002. *Coastal Environmental Change and its Regional Response in China*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1–220 (in Chinese).
- Yang Guishan, Shi Yafeng. 1995. Advances in relative sea level rise and its impacts in the coast of China[J]. *Advances in Earth Science*, 10(5): 475–482.
- Yang Han, Wang Yanhui, Wu Jinhong. 2012. Remote sensing monitoring and analysis of wetland in Irtysh River Basin during the period from 1990 to 2010[J]. *Advances in Science and Technology of Water*, 32(1): 22–26 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tangwu, Wu Yan, Wu Qijiang, Xiong Yiyi, Liu Deyuan, Ge Pingyan, Kang Xiaoguang, Zhang Peng, An Shuqing. 2021. Sustainable wetland operation and maintenance model oriented towards habitat restoration for red-crowned crane: A case study of Sheyang estuary wetland in Yancheng City[J]. *Wetland Science & Management*, 17(2): 42–46 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yan, Lin Guojun, Wang Lingli, Chen Xiaojuan, Jiang Bo, Cai Jinzhou, Li Hongqing. 2019. Analysis on current status and protection countermeasures of wetlands in middle reaches of Yangtze River[J]. *Yangtze River*, 50(7): 59–63 (in Chinese with English abstract).
- Yao Xintan, Yang Guishan. 2009. Progress on the study of water purification ability of natural wetlands[J]. *Progress in Geography*, 28(5): 825–832 (in Chinese with English abstract).
- Ye Siyuan, Laws E A, Yuknis N, Ding Xigui, Yuan Hongming, Zhao Guangming, Wang Jin, Yu Xueyang, Pei Shaofeng, DeLaune R D. 2015. Carbon sequestration and soil accretion in coastal wetland communities of the Yellow River Delta and Liaohai Delta, China[J]. *Estuaries and Coasts*, 38(6): 1885–1897.
- Ye Siyuan, Xie Liujuan, He Lei. 2021. *Wetlands—the Kidney of the Earth & a Boat of Life*[M]. Beijing: Science Press, 1–212 (in Chinese).
- Yin Chengqing, Lan Zhiwen, Yan Weijin. 1995. Retention of allochthonous nutrients by ecotones of Baiyangdian Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 6(1): 76–80 (in Chinese with English abstract).
- Yu Kefu, Jiang Mingxing, Cheng Zhiqiang, Chen Tegu. 2004. Latest forty two years' sea surface temperature change of Weizhou Island and its influence on coral reef ecosystem[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 15(3): 506–510.
- Zhai Jinliang, He Yan, Deng Wei. 2003. Problems and management of wetland natural reserves in the Songnen–Sanjiang Plain[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, (1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoyun, Lü Xianguo, Gu Haijun. 2005. To annlysis threats, to describe present conservation situation and to provide management advices of the Ruoergai Marshes[J]. *Wetland Science*, 3(4): 292–297 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanzeng. 2010. *Wetland Restoration and Ecological Function of Hengshui Lake*[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1–244(in Chinese).
- Zhang Zhongsheng, Xue Zhenshan, Lü Xianguo. 2015. Quantitatively analysis of impact of climate change on areas of mires[J]. *Wetland Science*, 13(2): 161–165 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenrui, Yang Bing, Zhu Xinmin, Shu Wensheng. 2001. The stability of constructed wetland in treating heavy metal wastewater released from a Pb/Zn mine at Fankou of Guangdong Province[J]. *Ecological Science*, 20(4): 16–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Danhui, Wang Qingbo, Li Qi, Cai Tiji, Di Xueying, Sun Xiaoxin. 2019. Effects of heavy metal removal from farmland wastewater in Sanjiang Plain by different wetland plants[J]. *Wetland Science & Management*, 15(4): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Qiuyu, Jiang Peng, Zhu Zhiqiang, Wu yYanlan. 2022. Evolution and driving forces analysis of wetland landscape pattern around Chaohu Lake from 1975 to 2020[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 39(5): 45–53 (in Chinese).
- Zhao Kuiyi. 1999. *Marshes of China*[M]. Beijing: Science Press, 1–718 (in Chinese).
- Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong, Wei Yanchang. 2003. Ecosystem services and their valuation of terrestrial surface water system in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 18(4): 443–452 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiangjiang, Yang Lan. 2021. Ecological protection countermeasures of plateau lake wetland: A case of Guizhou Caohai national nature reserve[J]. *Wetland Science & Management*, 17(2): 71–73 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Sun Lin, Ju Feng, Guo Yue. 2012. Review on purification function of wetland[J]. *Scientific and Technological Innovation*, (27): 253–253 (in Chinese).
- Zhao Zhigang, Shi Xiaoming. 2020. Ecosystem evolution of alpine wetland in Tibetan Plateau and consideration for ecological restoration and conservation[J]. *Science & Technology Review*, 38(17): 33–41(in Chinese with English abstract).
- Zhen Shuo, Dong Liqin, Zheng Rumin, Yao Pengju. 2017. Landscape patterns of marsh wetlands in Zoigê Plateau in 2007 and 2016 and change[J]. *Wetland Science*, 15(4): 522–525 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yufeng, Quan Yu, Ren Yuyan, Xu Jing, Zhang Lianxia, Zhang Caiyun, He Chen. 2020. Characteristics and cause analysis of

- Hongjiannao wetland area change from 1986 to 2018 based on remote sensing[J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 46(3): 33–37 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Deqing. 2011. *Essential Microbiology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1–385 (in Chinese).
- Zhou Gongle. 2005. The greatest wetlands protection program in China[J]. *Green China*, (8): 34–39 (in Chinese).
- Zhou Pan, Ye Siyuan, Wang Jin, Yu Changbin, Yuan Hongming, Pei Lixin, Ding Xigui, Yang Juan, Hans Brix. 2022. Glomalin-related soil protein distribution and its relation to mineral weathering in the wetlands along the Bohai Sea, China[J]. *Geology in China*, 49(4): 1075–1087 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yinjun, Liu Chunfeng. 2009. Research progress of water and sediment regulation in the Yellow River[J]. *Haihe Water Resources*, (6): 54–57 (in Chinese).
- Zhu Ying, Wang Shan, Feng Yuqing. 2022. Response of the value of wetland ecosystem service in Taihu Basin to the change of landscape pattern in the past 30 years: Based on the implementation of the project of restoring the lake from the land [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 38(1): 88–93 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongguan, Shen Renfang, He Jizheng, Wang Yanfen, Han Xingguo, Jia Zhongjun. 2017. China soil microbiome initiative: Progress and perspective[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(6): 554–565 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 安树青, 张轩波, 张海飞, 沈美亚, 王怡道, 陈俊. 2021. 中国湿地保护恢复策略研究[J]. *湿地科学与管理*, 15(2): 41–44.
- 白军红, 欧阳华, 徐惠风, 周才平, 高俊琴. 2004. 青藏高原湿地研究进展[J]. *地理科学进展*, 23(4): 1–9.
- 陈家宽, 雷光春, 王学雷. 2010. 长江中下游湿地自然保护区有效管理十佳案例分析[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1–190.
- 陈鹭真, 钟才荣, 苏博, 方柏州, 陈乃明, 曾传志, 林光辉, 王文卿, 张宜辉, 黄丽. 2010. 2008年南方低温对我国红树植物的破坏作用[J]. *植物生态学报*, 34(2): 186–194.
- 陈梦雷. 2006. 古今图书集成图集[M]. 济南: 齐鲁书社, 1–4811.
- 陈伟, 季秀玲, 张琦, 张东芳, 袁飞, 魏云林. 2019. 纳帕海高原湿地真菌群落多样性和组成的分布[J]. *微生物学通报*, 46(3): 494–503.
- 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 沈彦俊, 潘响亮, 李兰海, 李忠勤. 2012. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. *干旱区地理*, 35(1): 1–9.
- 丁喜桂, 王吉松, 赵广明, 袁红明, 王锦, 叶思源. 2016. 黄河三角洲滨海湿地演化过程中的碳埋藏效率及其控制因素[J]. *中国地质*, 43(1): 319–328.
- 杜受祜, 虞洪. 2015. 建设若尔盖国家级生态特区——“工程治理”与“生态修复”相结合的南水北调西线工程优化方案[J]. *决策咨询*, (3): 54–59.
- 方玲. 2011. 福寿螺(*Pomacea canaliculata*)对湿地水生植物以及水体营养盐的影响[D]. 广州: 中山大学, 1–67.
- 高瑞, 王志勇, 周晓东, 刘睿. 2021. 利用多时相遥感监测与分析黄河三角洲湿地变化动态[J]. *测绘通报*, (4): 22–27.
- 葛光环, 寇坤, 陈爱侠. 2013. 湿地系统中植物和基质对重金属去除贡献的研究现状[J]. *当代化工*, (7): 1006–1008.
- 广东省林业局. 2001. 广东省湿地资源调查报告[R].
- 广东省林业局. 2013. 广东省湿地资源调查报告[R].
- 国家海洋局. 2017. 2016年中国海平面公报[J]. *海洋世界*, (4): 39–31.
- 国家林业局. 2000. 中国湿地保护行动计划[M]. 北京: 中国林业出版社, 1–118.
- 国家林业局. 2014. 第二次全国湿地资源调查结果[R].
- 国家林业局. 2015. 中国湿地资源·总卷[M]. 北京: 中国林业出版社, 1–508.
- 胡顺, 凌抗, 王俊友, 乔树锋, 葛孟琰, 孙自永, 马瑞. 2022. 西北典型内陆流域地下水与湿地生态系统协同演化机制[J]. *水文地质工程地质*, 49(5): 22–31.
- 姜海萍, 朱永生, 陈春梅. 2013. 珠江流域水生态保护与修复探讨[J]. *人民珠江*, 34(S1): 21–24.
- 郎芹, 牛振国, 洪孝琪, 杨鑫莹. 2021. 青藏高原湿地遥感监测与变化分析[J]. *武汉大学学报*, 46(2): 230–237.
- 雷昆, 张明祥. 2005. 中国的湿地资源及其保护建议[J]. *湿地科学*, 3(2): 81–86.
- 雷茵茹, 崔丽娟, 李伟, 康晓明, 张曼胤, 杨彦, 肖红叶. 2016. 气候变化对中国滨海湿地的影响及对策[J]. *湿地科学与管理*, 12(2): 59–62.
- 李国英. 2002. 黄河调水调沙[J]. *人民黄河*, 24(11): 29–33.
- 李虔辉. 2013. 西北干旱区域水资源管理——以固原市为例[J]. *河南科技*, (13): 181–181.
- 李香真, 郭良栋, 李家宝, 姚敏杰. 2016. 中国土壤微生物多样性监测的现状和思考[J]. *生物多样性*, 24(11): 1240–1248.
- 酆道元. 2006. 水经注[M]. 北京: 华夏出版社, 1–774.
- 连煜, 张建军, 王新功. 2015. 黄河三角洲生态修复与栖息地保护[J]. *三峡环境与生态*, 37(3): 6–8, 17.
- 林程吉. 2010. 长江中游湿地资源特点、价值与存在问题及保护对策[J]. *咸宁学院学报*, (7): 30–31.
- 刘红梅, 赵建宁, 李刚, 杨殿林. 2010. 我国湿地农业可持续发展存在的问题及对策[J]. *现代农业科技*, (13): 342–343.
- 刘剑秋. 2006. 闽江河口湿地研究[M]. 北京: 科学出版社, 1–353.
- 刘强, 林楠, 王长琪, 贾立国, 成龙, 郭晓东, 张妍. 2023. 松嫩平原湿地演变及其驱动因素分析[J]. *地质与资源*, 32(1): 96–104.
- 刘婷, 刘兴土, 杜嘉, 宋开山. 2017. 五个时期辽河三角洲滨海湿地格局及变化研究[J]. *湿地科学*, 15(4): 622–628.
- 刘兴土. 2007. 三江平原沼泽湿地的蓄水与调洪功能[J]. *湿地科学*, 5(1): 64–68.
- 孟焕, 王琳, 张仲胜, 薛振山, 吕宪国, 邹元春. 2016. 气候变化对中国内陆湿地空间分布和主要生态功能的影响研究[J]. *湿地科学*, 47(23): 7–10.
- 孟瑶, 韩晓盈, 刘侨博, 苏丹, 孙夕涵. 2022. 三江平原生态系统格局与构成及其变化研究[J]. *环境科学与管理*, 47(7): 151–155.
- 聂晓, 王毅勇. 2010. 沼泽湿地局地小气候“冷湿岛”效应[J]. *生态与农村环境学报*, 26(2): 189–192.

- 裴理鑫. 2021. 黄渤海滨海湿地土壤微生物群落结构对碳循环的影响及其对增温响应[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 1-166.
- 彭小芳, 孙逊, 袁少雄, 孙儒泳, 陈章和. 2008. 广州城市湿地的景观特点及小气候效应[J]. 生态环境学报, 17(6): 2289-2296.
- 屈明, 胡喻华. 2015. 广东省湿地资源利用现状与可持续发展对策探讨[J]. 中南林业调查规划, 34(4): 18-21.
- 师君, 张明祥. 2004. 东北地区湿地的保护与管理[J]. 林业资源管理, (6): 40-43.
- 陶渊明. 1979. 陶渊明集[M]. 北京: 中华书局, 1-293.
- 汪爱华, 张树清, 何艳芬. 2002. RS和GIS支持下的三江平原沼泽湿地动态变化研究[J]. 地理科学, 22(4): 636-640.
- 王冬梅, 刘劲松, 戴小琳, 王春美. 2017. 退圩(田)还湖(湿)长效机制研究——以江苏省固城湖为例[J]. 人民长江, 48(18): 23-26.
- 王利伟, 孔凡晶, 郑绵平, 王登红. 2019. 我国泥炭资源开发利用现状及建议[J]. 矿产保护与利用, 39(2): 142-147.
- 王效科, 欧阳志云, 苗鸿. 2003. 中国西北干旱地区湿地生态系统的形成、演变和保护对策[J]. 国土与自然资源研究, (4): 52-54.
- 王长科, 张安定. 2001. 若尔盖高原湿地资源及其保护对策[J]. 水土保持通报, 21(5): 20-22.
- 王延吉, 神祥金, 吕宪国. 2020. 1980—2015年东北沼泽湿地景观格局及气候变化特征[J]. 地球与环境, 48(3): 348-357.
- 吴海曼, 张春明. 2021. 珠江三角洲滨海湿地面积演变分析[J]. 吉林水利, 12(475):23-27.
- 肖珍芝, 舒服. 2015. 洪江市主要外来入侵物种的分布、危害及防治对策[J]. 湖南农业科学, (7): 21-23.
- 徐宏伟. 2005. 三江平原小叶章湿地生态系统对氮磷净化功能研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 65.
- 焉恒琦, 朱卫红, 毛德华, 王宗明, 梁旻轩, 康应东, 杨桃. 2020. 长江三角洲国际重要湿地人为胁迫遥感解析[J]. 中国环境科学, 40(8): 3605-3615.
- 闫敏华, 邓伟, 陈泮勤. 2004. 三江平原沼泽性河流域降水、径流变化及影响因素研究[J]. 湿地科学, 2(4): 268-275.
- 闫文文, 谷东起, 孙惠凤, 赵晓龙, 赵锦霞, 王晶, 黄沛, 明洁, 王景川. 2022. 近40年盐城海岸带湿地景观结构动态研究[J]. 海洋环境科学, 41(3):437-443.
- 杨邦杰, 姚昌恬, 严承高, 王福田. 2011. 中国湿地保护的现状、问题与策略——湿地保护调查报告[J]. 中国发展, 11(1): 1-6.
- 杨川陵. 2007. 青海湖流域湿地系统退化现状及原因分析[J]. 青海草原, 16(2): 21-26.
- 杨桂山. 2002. 中国海岸环境变化及其区域响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 1-220.
- 杨涵, 王延慧, 吴金鸿. 2012. 额尔齐斯河流域1990—2010年湿地遥感监测分析[J]. 水利水电科技进展, 32(1): 22-26.
- 杨棠武, 吴燕, 吴其江, 熊依依, 刘德元, 戈萍燕, 康晓光, 张鹏, 安树青. 2021. 丹顶鹤栖息地恢复导向型湿地可持续运维模式:以盐城射阳河口湿地为例[J]. 湿地科学与管理, 17(2): 42-46.
- 杨龔, 林国俊, 王伶俐, 陈晓娟, 蔡金洲, 江波, 李红清. 2019. 长江中游区湿地现状及保护对策分析[J]. 人民长江, 50(7): 59-63.
- 姚鑫坛, 杨桂山. 2009. 自然湿地水质净化研究进展[J]. 地理科学进展, 28(5): 825-832.
- 叶思源, 谢柳娟, 何磊. 2021. 湿地:地球之肾 生命之舟[M]. 北京: 科学出版社, 1-212.
- 尹澄清, 兰智文, 晏维金. 1995. 白洋淀水陆交错带对陆源营养物质的截留作用初步研究[J]. 应用生态学报, 6(1): 76-80.
- 翟金良, 何岩, 邓伟. 2003. 松嫩—三江平原湿地自然保护区面临的问题及管理对策[J]. 水土保持通报, (1): 1-6.
- 张晓云, 吕宪国, 顾海军. 2005. 若尔盖湿地面临的威胁、保护现状及对策分析[J]. 湿地科学, 3(4): 292-297.
- 张彦增. 2010. 衡水湖湿地恢复与生态功能[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1-244.
- 张仲胜, 薛振山, 吕宪国. 2015. 气候变化对沼泽面积影响的定量分析[J]. 湿地科学, 13(2): 161-165.
- 招文锐, 杨兵, 朱新民, 束文圣. 2001. 人工湿地处理凡口铅锌矿金属废水的稳定性分析[J]. 生态科学, 20(4): 16-20.
- 赵丹慧, 王清波, 李琦, 蔡体久, 邸雪颖, 孙晓新. 2019. 不同湿地植物对三江平原农田退水重金属的去除效果[J]. 湿地科学与管理, 15(4): 43-47.
- 赵魁义. 1999. 中国沼泽志[M]. 北京: 科学出版社, 1-718.
- 赵秋雨, 江鹏, 朱志强, 吴艳兰. 2022. 1975—2020年环巢湖湿地景观格局演变及驱动分析[J]. 长江科学院院报, 39(5): 45-53.
- 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 魏彦昌. 2003. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 自然资源学报, 18(4): 443-452.
- 赵湘江, 杨兰. 2021. 高原湖泊湿地生态保护对策:以贵州草海国家级自然保护区为例[J]. 湿地科学与管理, 17(2): 71-73.
- 赵直, 孙林, 鞠锋, 郭岳. 2012. 湿地净化功能研究进展[J]. 科学技术创新, (27): 253-253.
- 赵志刚 史小明. 2020. 青藏高原高寒湿地生态系统演变、修复与保护[J]. 科技导报, 38(17): 33-41.
- 甄硕, 董李勤, 郑茹敏, 姚鹏举. 2017. 2007年和2016年若尔盖高原沼泽湿地景观格局及变化[J]. 湿地科学, 15(4): 522-525.
- 郑玉峰, 全宇, 任余艳, 许晶, 张连霞, 张彩云, 何晨. 2020. 基于遥感的1986—2018年红碱淖湿地面积变化特征及成因分析[J]. 内蒙古林业科技, 46(3): 33-37.
- 周德庆. 2011. 微生物学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1-385.
- 周公乐. 2005. 中国湿地生物多样性保护与可持续利用——记我国最大的湿地保护项目第二阶段启动[J]. 绿色中国, (8): 34-39.
- 周攀, 叶思源, 王锦, 于长斌, 袁红明, 裴理鑫, 丁喜桂, 杨娟, Hans Brix. 2022. 环渤海湿地沉积物球囊霉素相关土壤蛋白分布特征及其对湿地土壤风化的影响[J]. 中国地质, 49(4): 1075-1087.
- 周银军, 刘春锋. 2009. 黄河调水调沙研究进展[J]. 海河水利, (6): 54-57.
- 朱颖, 王杉, 冯育青. 2022. 近30年太湖流域湿地生态系统服务价值对景观格局变化的响应:基于“退田还湖”工程的实施[J]. 中国园林, 38(1): 88-93.
- 朱永官, 沈仁芳, 贺纪正, 王艳芬, 韩兴国, 贾仲君. 2017. 中国土壤微生物组: 进展与展望[J]. 中国科学院院刊, 32(6): 554-565.