

doi: [10.12097/gbc.2023.04.043](https://doi.org/10.12097/gbc.2023.04.043)

地球系统科学视角下美国湿地保护修复的经验及启示 ——以大沼泽地综合修复计划为例

胡雅璐, 张万益*, 王泉, 袁建国, 杜璨

HU Yalu, ZHANG Wanyi*, WANG Quan, YUAN Jianguo, DU Can

中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

摘要: 湿地作为地球上初级生产力最高、生物多样性最丰富的生态系统, 受到人类活动、气候变化等多种因素影响, 正在遭遇全球性的退化危机。近几十年来, 美国在地球系统科学指导下建立了全面的湿地保护法律体系、科学的生态系统修复理念、多部门分工协作机制, 形成了一套较完善的湿地保护修复模式, 值得中国学习和借鉴。以美国大沼泽地综合修复计划为例, 对其生态修复工作模式进行了综述, 通过系统对比研究, 发现中国湿地保护修复工作存在管理机制待完善、理念科学性不足、调查监测体系待加强等。建议设立国家湿地生态修复大科学计划, 聚焦湿地生态系统中的土壤、水文条件等关键问题, 建设全国湿地监测网络, 建立综合调查、实时监测、及时预警、动态调整的湿地生态修复工作模式。

关键词: 湿地; 生态系统保护和修复; 地球系统科学; 美国大沼泽地

中图分类号: P5; X171 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)08-1305-10

Hu Y L, Zhang W Y, Wang Q, Yuan J G, Du C. Experience and implications of wetland conservation and restoration in the United States from the perspective of earth system science: Take the comprehensive Everglades restoration plan as an example. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(8): 1305–1314

Abstract: As an ecosystem with the highest primary productivity and the richest biodiversity on Earth, wetlands are facing a global degradation crisis due to the impact of human activities, climate change and other factors. In recent decades, the United States has established a comprehensive legal system of wetland protection, a scientific concept of ecosystem restoration, and a multi-sectoral division of cooperation mechanism, forming a relatively complete wetland protection and restoration model under the guidance of earth system science, which is worth learning and referring for China. Taking the comprehensive restoration plan of Everglades as an example, the working mode of wetland restoration is summarized. Through systematic comparative study, it is found that there are some problems in the restoration of wetlands in China, such as the management mechanism to be improved, the scientific concept to be insufficient, and the investigation and detection system to be strengthened. It is suggested to set up a national scientific plan for wetland ecological restoration, to focus on key issues such as soil and hydrological conditions in wetland ecosystems, to build a national wetland monitoring network, and to establish a wetland ecological restoration model featuring comprehensive investigation, real-time monitoring, timely warning and dynamic adjustment.

Key words: wetland; ecosystem protection and restoration; earth system science; Everglades

收稿日期: 2023-04-28; 修订日期: 2023-11-06

资助项目: 中国地质调查局项目《自然资源管理与现代地质工作战略研究》(编号: DD20230558)和国家自然科学基金青年基金项目《恒山区新太古代花岗岩岩石的成因: 对热状态的指示》(批准号: 42202219)

作者简介: 胡雅璐(1993-), 女, 博士, 助理研究员, 从事地质调查战略研究工作和前寒武纪地质学研究。E-mail: huyalu993@163.com

* 通信作者: 张万益(1974-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事地球系统科学与地质调查规划研究及地质找矿工作。E-mail: wanyizhang0810@qq.com

广义上的湿地由 1971 年《湿地公约》定义,是流动或静止的水体(包括在低潮位时水深 ≤ 6 m 的水域),泥炭地、天然或人工地域、暂时性或长久性的沼泽地,作为一个多圈层强烈交互的复杂关键带,是地貌、流体和生物地球化学过程相互作用频繁的区域,在调节水文、保护生物多样性、改善气候、维护区域生态平衡等方面发挥其他生态系统不可替代的重要作用(林业部野生动物和森林植物保护司, 1994)。然而,因其生态系统的脆弱性和复杂性,过去一个多世纪以来全球自然湿地的损失率超过 50%(O' Connell, 2003),湿地退化已经成为影响人类社会可持续发展的重要限制因素之一。党的十八大以来,党中央高度重视湿地保护修复工作。党的二十大报告明确指出,必须牢固树立和践行“绿水青山就是金山银山”的理念,站在人与自然和谐共生的高度谋划发展,推行草原森林河流湖泊湿地休养生息。这为湿地保护修复工作提出了新的方向和要求。

美国湿地保护与修复工作已经有近 60 年历史(王相, 2000),取得了良好的效果,美国湿地面积在数量和质量上都较 20 世纪末有了很大程度的提升。美国大沼泽地湿地被联合国教科文组织和《湿地公约》秘书处分别列为人与生物圈保护区和国际重要湿地(肖协文等, 2012),具有重要的生态和生物多样性保护意义。针对其设置的《大沼泽地综合修复计划》(CERP)是美国治理和恢复湿地的典型案例,相关经验值得中国湿地保护和修复借鉴。

1 大沼泽地综合修复计划的工作模式

大沼泽地位于美国佛罗里达州南部(图 1-a),约一个世纪前,其面积是新泽西州的 2 倍,拥有茂密的森林、开阔的草原、阳光充足的农田和丰富的沼泽,为 810 万居民提供了水源,也是多种野生动物的栖息地。自 19 世纪开始的人工运河、农业开发和城市化建设,使得大沼泽地生态系统遭到了严重的破坏,50% 的原始湿地干涸,面临水位下降、生态污染、外来物种入侵等一系列生态问题(张立, 2013; 褚晓琳等, 2021)。因此,美国国会 2000 年为修复大沼泽地生态系统制定了 CERP,为保护和修复佛罗里达州中部和南部(包括大沼泽地)的水资源、恢复被破坏的生态系统提供框架和指南。该计划覆盖了 47000 km² 的面积(图 1-b),涉及到 16 个县市,计划耗资 82 亿美元,预期 30 年完成,是美国历史上规模

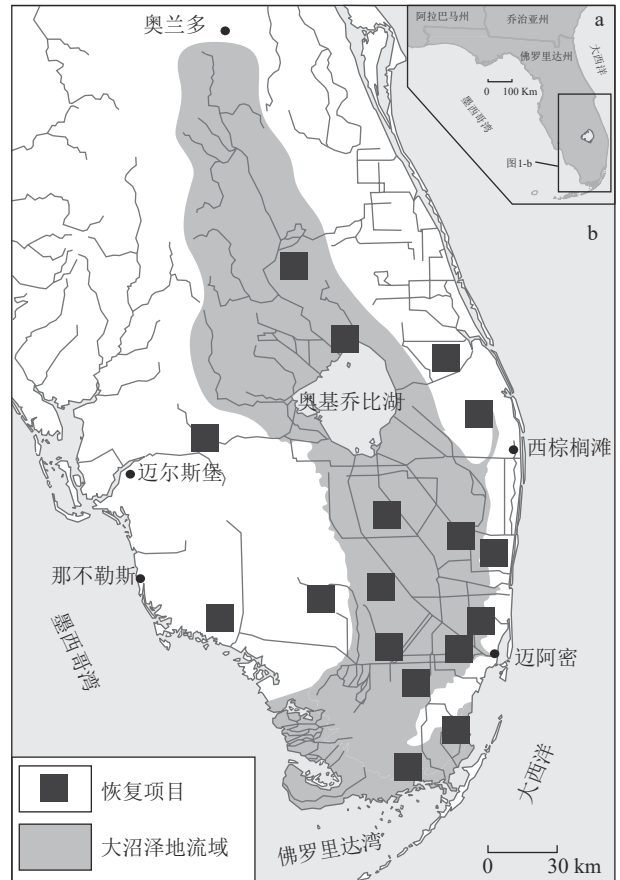


图 1 美国大沼泽地地理位置(a)和大沼泽地地区湿地恢复项目分布图(b)

Fig. 1 The geographical location of the Everglades (a) and distribution of the Everglades restoration projects (b)

最大、最复杂的生态修复工作之一。

1.1 调查措施

CERP 生态修复工作开始之前,首先要确定湿地生态系统退化的根本原因,以采取应对措施。美国地质调查局进行了生态地质调查工作,主要采用实地调查和遥感相结合的方式,针对地球系统中的水圈、陆圈和生物圈展开调查。调查对象多样,包括湿地水域面积、水位、植被的种类和面积、土壤层厚度、基岩、地面海拔等。

调查结果显示(Ingebritsen et al., 1999),1990 年,大沼泽地水域面积减少至一个世纪前的 50%,日平均水位最低达 1 英尺(0.30 m),仅为丰水时期的 1/8。作为大沼泽地最大的湖泊,奥基乔比湖的水位曾一度超过海平面 20~21 英尺(6.10~6.40 m),1990 年降至 13~16 英尺(3.96~4.88 m)。陆圈中,大沼泽地地区地面以每年 1 英寸(2.54 cm)的速度沉降,在河流三角洲地区甚至可达 3 英寸/年(7.62 cm/a),

1912—2000 年下降幅度高达 10 英尺(3.05 m, 图 2)。在农业区, 泥炭厚度从奥基乔比湖附近的约 12 英尺(3.66 m)向南逐渐变薄, 到南部边界附近的约 5 英尺(1.52 m), 地表泥炭土层不断减薄。

究其原因, 水土条件改变引起的水圈和陆圈的相互作用导致了大沼泽地生态系统退化。1928 年, 当地为了农产品种植和防治洪水修建了永久性堤坝, 阻断了大沼泽地和源头的联系。随后, 大沼泽地持续为当地农业、沿大西洋海岸城市地区地下水、国家公园建设供水, 导致水位持续下降并引发地面沉降。加之泥炭土土壤层有机物氧化, 造成地面加速下沉。地面沉降显著地改变了土地的坡度, 又阻碍了自然的、浅层的水流模式的恢复。同时, 水土条件的改变对植被格局产生了巨大影响。一方面, 农业地区和东部防洪堤以东地区的泥炭海绵和原生植被几乎消失, 失去了大部分自然过滤、抑制和延缓风暴流的能力。另一方面, 该地区土壤层较薄, 农业的发展依赖于厚的石灰岩基岩上覆盖的较薄的泥炭土, 地表泥炭土层不断变薄甚至消失, 将导致该地区不再适合农作物生长。

通过调查, 美国地质调查局认为, 水资源的科学管理是大沼泽地区生态修复的关键(Ingebritsen et al.,

1999)。首先是针对剩余的湿地进行更科学地管理, 由于其与源头的水文条件分离和地面沉降, 将剩余湿地作为集中管理的系统更合理; 其次是通过生物技术选择耐水作物, 减轻地面沉降。

1.2 修复措施

1.2.1 科学支撑修复方案研究

湿地生态系统修复计划和工程实施的一个重要前提是找到生态系统退化的根本原因, 然后对症下药。尽管大沼泽地综合修复计划经过调查研究已经发现, 水土条件的改变是造成其退化的根本原因, 但是其退化过程涉及泥炭—水流—植被等来自多个圈层的多重要素相互作用的地球系统过程, 十分复杂。

Harvey et al.(2008)设置了一个基本假设, 大沼泽地的景观形成是基于水流流速、植被阻力和剪应力之间的反馈并设置了现场实验来模拟沉积物在湿地水流中的重新分配。他们在大沼泽地建造了长 8 m、宽 1 m 的实验水槽, 并配备了泵系统, 将水流流速提高一个数量级(大沼泽地排水前的可能流速), 发现沉积物以 3.2~5.3 cm/s 的速度在河床中自然移动。而目前, 在自然条件下 90% 大沼泽地沉积物的移动速度低于 1 cm/s。通过对比发现, 通过调整水管理措施, 最大限度地提高水面坡度(主要控制流速), 可以恢复排水前沉积物再分布的模式。

基于以上认识, 沼泽地综合动态模型采用 PeatAccrete 数值模式(Larsen et al., 2007, 2011; 图 3),

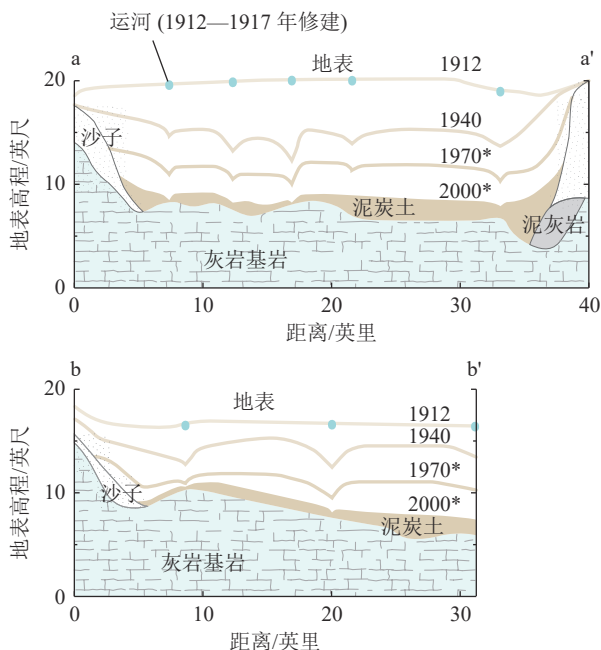


图 2 大沼泽地地区地面沉降 a-a' 和 b-b' 剖面图(*为估计所得)

Fig. 2 a-a' and b-b' profiles of land subsidence of the Everglades area

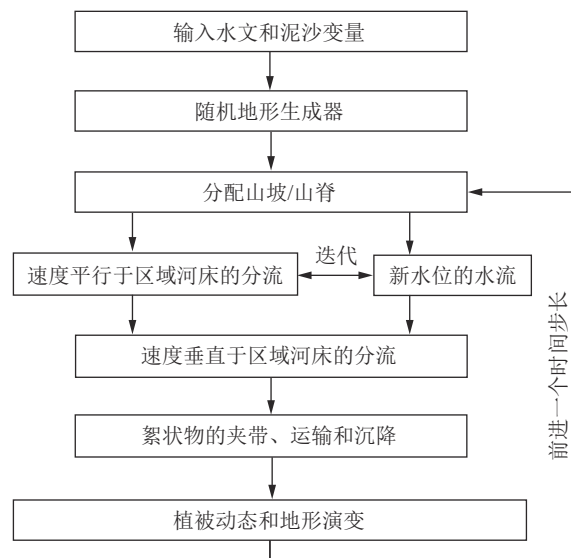


图 3 湿地生态系统水文综合动态模型的模块化结构(据 Larsen et al., 2011 修改)

Fig. 3 Modular structure of wetland ecosystem hydrological integrated dynamic model

有效地模拟了浅水水流、河床剪应力、沉积物运输和植被动态,并提出了泥炭堆积和泥沙输运 2 种反馈机制控制沼泽地景观特色。同时,基于表征大沼泽地脊蛻漫滩水文和生态系统的目标,在过去的 3 年里,选择一个大沼泽地区域内保存完好的平行排水系统(即 200 m 宽低槽及附近草木茂密的山脊),连续测量了流速、水深、风速。基于实测数据,利用植被流理论提出了单变量比例关系,表明水流流速随水流水面坡平方和植被茎径四次方而增加,而随植被面积的增加线性下降,与水深无关,水深影响仅控制植被的淹没深度,得出洪泛区除控制水深外,可以通过操作频率和脉冲持续流入时间控制水面坡度,从而增加对水流速度、水流滞留时间、泥沙沉淀、生物地球化学转换及其他过程的控制。由此可以有效地控制沼泽地演变的趋势。特别是模拟结果显示,当水深为中等深度($>45\text{ cm}$)时,水流脉冲释放可以使水面坡度在 $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ 范围内。大沼泽地水面坡度通常为 $4 \times 10^{-5} \sim 6.5 \times 10^{-5}$,因此,只要大沼泽地湿地达到 45 cm 的地表水位,就可以不用释放额外的水流脉冲。

1.2.2 多管齐下进行修复

基于以上的调查研究,CERP 提出了 4 项具体修复措施。

(1) 水量控制

通过立法将佛罗里达州中南部地区划为洪水控制区,大沼泽地划为农业区,北部地区划为节水区。修建控制面积 868 km^2 的几座水库,以及 300 孔回采井分别存于地表及注入地下水库,储存的水 80% 用于环境,其他用于城镇及农业,以避免洪水期河口区水量过大,同时解决旱季缺水问题。

(2) 水质治理

以控制 N、P 等元素污染水平为目标,通过修建人工湿地、减少农业区内化肥和农药、设置污染物隔离带、制定详细的农事计划、暴雨治理分区等,降低水中富营养成分,改善进入沼泽地公园的水质,减少向海岸过量排放的淡水。

(3) 水的时空分布调控

以改善流入河口环境淡水的时间分布为目标,恢复其自然的淹没及干旱循环,而不是人工的忽高忽低的脉冲状态。以恢复自然片状流态为目标,拆除过去阻碍自然水流的防护堤及运河。同时修建科学的水坝、沟渠、堤坝等,以巩固河道,消除行洪障

碍,重塑大沼泽地区河流水文特征。为进一步调整湖泊涵蓄能力与河湖联通关系,将大沼泽中心区域、克卢萨哈奇河、卡罗萨哈提河等进行河湖联通。

(4) 生物多样性保护

大沼泽地所在的佛罗里达州生态系统是美国最容易受到外来物种入侵的生态系统之一,生物多样性系统较脆弱。CERP 通过采用生物措施来控制 and 减少有害外来物种入侵,在大沼泽农业区和暴雨治理区内保护迁徙鸟类,保护美洲豹等,对佛罗里达海湾群岛、比斯坎湾的珊瑚、海龟等物种栖息地保育等,在栖息地保护区严格控制工农业发展等方式,保护当地物种、恢复湿地生境、防止外来物种入侵。

1.3 监测措施

在湿地生态修复项目实施的过程中,还需要监测生态系统对生态修复措施的反馈,以动态调整生态修复措施。CERP 从生态概念模型拓展对关键性生态系统驱动力和属性的监测,与大沼泽地恢复目标相关联,开发出了系统性的生态监测指标(Doren et al., 2009)。该指标综合考虑湿地生态系统中的地球物理、地球化学及生物过程,结合了时空尺度关系,包括水文参数、外来入侵物种、氮磷硫等营养物质浓度、污染情况、生物多样性等。

水文数据是湿地生态系统情况最直接的反映,基于此,美国为大沼泽地湿地建立了全覆盖的监测网络(图 4)。以往的监测工作由科学家进行实际野外测量,效率十分低下,亟需一种区域范围内的地表水文建模方法,使科学家能够在互联网上实时获取水文数据。于是,大沼泽地深度估算网络(EDEN)应运而生,其主要目的是提供大沼泽地湿地过去和现在的水文和地面高程数据库(Telis et al., 2006)。此外,EDEN 还可以提供降雨和蒸散数据、基准数据、生态应用、统计分析和数据可视化工具(Patino et al., 2018)。

EDEN 由来自美国地质调查局、南佛罗里达州水资源管理局等 5 个单位的 200 余个水位监测站构成,可提供 $400\text{ m} \times 400\text{ m}$ 网格化的大沼泽地景观淡水部分的每日水位数据。这些数据结合数字高程模型,可绘制连续水位面,计算水深、退潮率、水周期、干/湿日计数及其他派生的水文数据,进行进一步的生态学研究。例如,EDEN 的实时数据方法与栖息地适宜性指数(HSIs)等生物模型相结合,可以研究营养层对水动力变化的响应。总的来说,EDEN 为科学

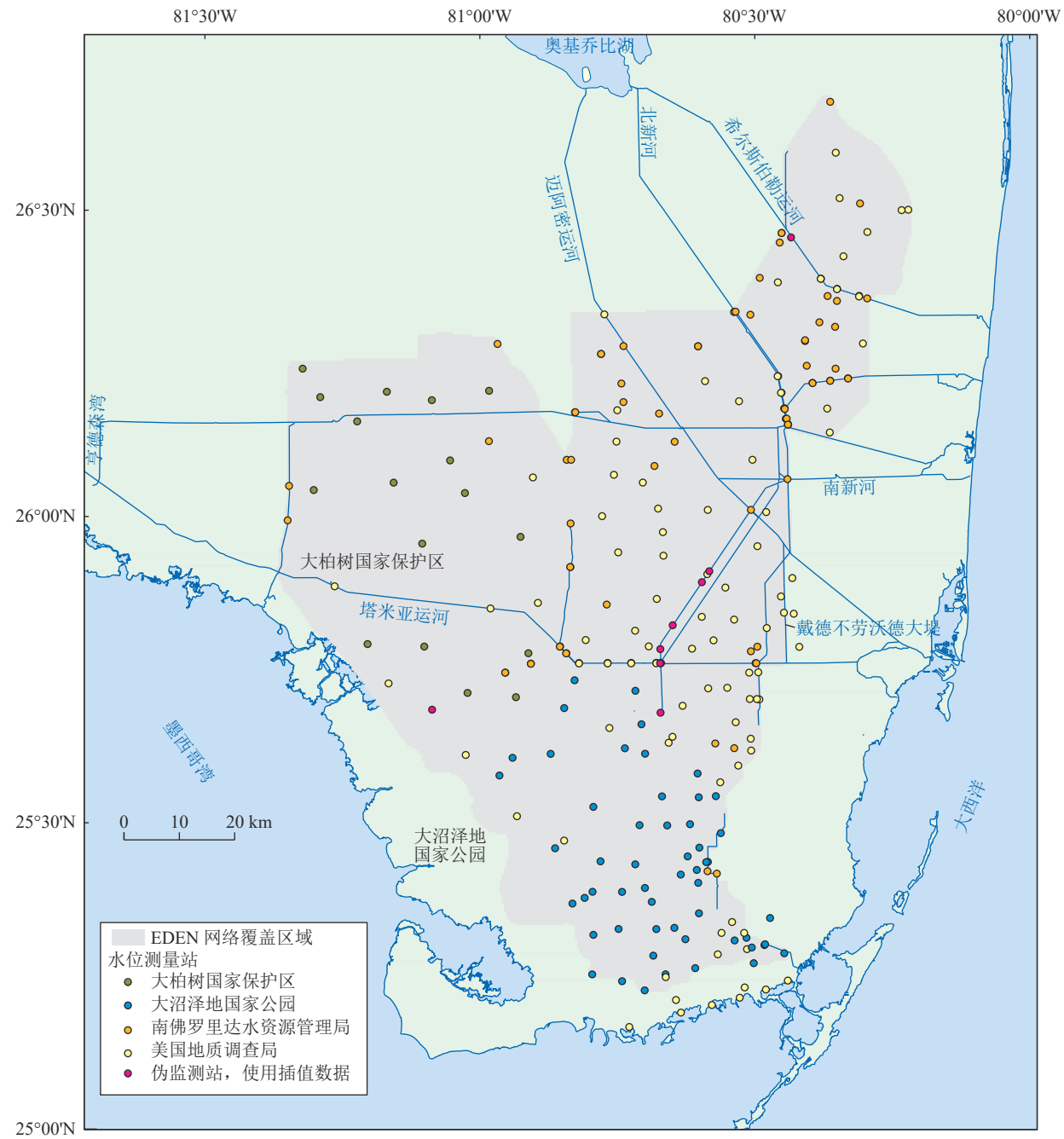


图 4 EDEN 监测站分布图

Fig. 4 Distribution of monitoring stations from EDEN

家和湿地管理人员提供了指导修复措施、描述水文变化及支持生物和生态评估的工具。

1.4 评价预警措施

根据生态系统监测数据,可以对生态系统进行定期评价和及时预警,对于了解大沼泽地湿地生态系统的结构、功能、响应及反馈具有重要意义,能够保障生态修复措施的顺利实施。科学家们据此编制

了红绿灯报告卡来协助管理人员、决策者和公众共同交流生态系统的健康状况(张立, 2013)。其采用红绿灯符号,绿色表示目标正在实现,黄色表示目标尚未实现,可能需要采取纠正措施,红色表示目标远未实现,需要采取纠正措施。此外, CERP 还要求每 2 年对规划与监测指标评估一次,并撰写评估报告。报告内容主要包括叙述性描述和流程图展示各个生

态模型,一系列规划项目方法,描述生物、水文和水质现状,以及对修复措施进行动态调整的建议。

及时预警方面,佛罗里达州作为美国最容易受到外来物种入侵的生态系统之一,物种入侵预警是其进行湿地生态修复的重要措施。预警工作能够在物种入侵的早期发现风险问题,迅速评估并处理(Westbrooks et al., 2011)。美国地质调查局资助佛罗里达大学开发了一种早期预警和快速响应决策/筛选工具(EDRR)。该工具根据生态系统监测数据,为外来物种成功入侵大沼泽地的可能性进行了排名预测,帮助管理人员决定是否对检测结果进行快速响应,是否需要额外深入的风险评估,以便对入侵物种进行积极应对。随后,当地管理者将该工具调整为全洲范围使用,迄今为止已经进行了 15 次风险筛查,为生态系统保护和修复提高了效率。

2 地球系统科学视角下美国湿地修复的经验

湿地生态系统是由岩石圈、水圈、大气圈、水圈和生物圈构成的整体系统,受水质水量、土壤质量及人类活动影响,其地质结构、地理格局、物理化学生物过程、生态功能和服务机制十分复杂。在湿地生态系统中,地球的内外营力显著影响湿地的成因和结构类型,并进一步影响其生境特征和生物生态类型(郎赞超等, 2022)。如发育于丘陵和山区的基岩质滨海湿地,陆缘以坚硬岩石为主;形成于高山融水流经的低洼地带的沼泽地,草本植物在常年过湿缺氧环境中形成泥炭地。因此,在对湿地生态系统进行保护和修复的过程中,始终把地球系统科学作为指导理论是成功的关键。

2.1 多部门协调决策

作为水、土、生物等圈层的复合系统,湿地生态系统的保护和修复工作必然涉及到多个管理部门的合作。美国的湿地保护修复体系是多部门协同的综合协调决策,分为联邦、州和地方政府三级(Heimlich et al., 1998; 宋圆圆等, 2013)。联邦机构包括环境保护局、陆军工程兵团、鱼类与野生动物管理局、海洋及大气管理局、环境质量委员会、国家公园管理局、林业局、自然资源保护局,以及美国地质调查局等(马涛等, 2017)。《清洁水法》将湿地管理权赋予环境保护局和陆军工程兵团(Heimlich et al., 1998),前者组织开展湿地调查,主导或资助湿地研究及环保项目,通过环境教育培养公众对湿地的保护意识和

责任感;后者负责计划和实施湿地保护和修复项目,二者相互合作又相互制约。其余各部门通过管理其主要负责的自然资源领域配合工作。另由美国地质调查局通过对自然灾害、地质、资源、地理、环境、生物信息等方面的科学研究、监测、收集、分析、解释和传播,以及对湿地进行全国范围的长期监测和评估,提供数据和信息,为生态保护修复提供科学方案。

在美国湿地保护和修复的过程中,注重利益相关方之间的交流,满足不同利益相关方的诉求并制定出明确的管理目标,从湿地项目的规划实施到监测管理,都让利益相关方参与。多部门配合,综合协调管理,找到管理部门及利益相关方利益的平衡点,是美国湿地保护修复工作取得成功的关键,也是美国湿地治理的核心。

2.2 生态系统管理理念

生态系统管理理念是综合考虑到包括人类在内的整个生态系统,以实现环境资源的可持续发展与保持生态系统的弹性和生产力为目标,最终为人类长久发展提供所需服务的生态系统综合管理理念。这种理念改变了过去对于生态系统按要素分割的保护和修复模式(褚晓琳等, 2021),注重生态系统的整体性和各组成要素之间的关联性,运用地球系统科学,进行系统地规划管理是生态系统管理理念的关键思路。

一方面,美国大沼泽地的保护和修复规划中,应用生态系统管理理念,把修复目标定为整个大沼泽地湿地流域,进行整体的规划和部署,取得了良好的成效。美国大沼泽地流域中,卡卢沙奇河、奥基乔比湖、埃斯特罗湾是不同类型的水域,且相互依存。卡卢沙奇河会接收来自奥基乔比湖的水流,又会流向埃斯特罗湾,因此奥基乔比湖水质的变化会直接影响卡卢沙奇河,并间接影响埃斯特罗湾的水质环境(张立, 2010)。因此,在具体管理中,不能将它们分别视之、分割管理,而应注重它们之间的关联性,把它们作为一个整体加以综合管理。

但另一方面,CERP 的实施过程中并未将生态系统的要素考虑全面,未将海平面上升视为大沼泽地生态系统的重要影响因素,导致其生态修复工作面临困境。实际上,大沼泽地的景观对海平面上升特别敏感,因为其基岩为多孔的石灰岩,地势较低且靠近海洋,淡水-海水的水位差是影响上游海水-淡水

水文连通性和 P 元素运输的最重要因素(Shimelis et al., 2018)。目前,海平面高度在部分季节高于部分修建水渠中的淡水水位,已经影响到其雨洪水外泄,加速了海水入侵。据预测,海平面将在 2060 年上升 0.5 m,届时大沼泽地湿地将向内陆后退 15 km,淡水栖息地减少 25% ~ 30%(William et al., 2014),CERP 实施过程中修建的水渠及堤坝中的 80% 将无法起效。

2.3 基于自然的解决方案

基于自然的解决方案定义为,通过保护、可持续管理和修复自然或改善生态系统的行动,有效应对如气候变化、粮食和水安全、自然灾害等社会挑战,同时提供人类福祉和生物多样性效益(Cohen-Shacham et al., 2016),即以自然作为灵感和支撑,倡导使用自然修复手段,通过资源高效、适应性动态管理的方式,解决人类社会发展的的问题与挑战(Benyus et al., 2002)。

基西米河是美国大沼泽地流域的一条重要河流,河道自然蜿蜒,适宜各种水生生物生存。出于防洪排涝的需要,基西米河在 20 世纪 60 年代进行了渠化,将蜿蜒的自然河道逐渐改造成一条近似直线的人工河道,流域生态环境因此遭到严重破坏,两岸原有的大片河滩沼泽湿地因缺水而迅速消失,水质恶化,各种鱼类和水禽也因为生存环境的破坏而渐渐减少、消失。对于基西米河的生态系统修复措施主要采取了改变上游水库的运用方式、修建拦河坝、拆除被渠化的河道等(吴保生等, 2005),来恢复其自然的水文条件(夏朋等, 2011)。2001 年 6 月,河流的连通性恢复,引起河流两岸栖息地发生重大物理、化学和生物变化,溶解氧水平提高,宽叶林沼泽栖息地重建,水禽和水鸟可以充分利用洪泛区湿地生存繁殖。

3 中国湿地保护修复工作的不足

中国是世界上湿地类型齐全、数量丰富的国家之一,湿地面积 $23.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,居亚洲第一,世界第四位(刘柏年, 2008)。改革开放后,由于不合理利用和破坏,湿地面积急剧缩减。近 20 年来,中国政府开始支持和促进湿地保护和修复。2000 年,由国家林业局牵头,国土资源部、农业部、水利部等国务院 17 个部门共同参加的《中国湿地保护行动计划》开始实施,成为中国实施湿地保护、管理和可持续利用的

行动指南。2003 年,国家林业局牵头组织,采用 3S(遥感、地理信息系统、全球定位系统)技术对湿地进行首次全国湿地资源调查。2016 年,中国发布了《湿地保护修复制度方案》,强调严格保护并修复湿地,有效遏制了其进一步减少(王瑞卿等, 2022)。2022 年 6 月,中国首部《湿地保护法》开始实施,立足湿地生态系统的整体性保护修复,确立了湿地保护管理顶层设计的“四梁八柱”,用法治方式为湿地保护修复工作“保驾护航”,推动湿地保护高质量发展(王瑞卿等, 2022)。

通过持续不断加强湿地保护修复,中国湿地保护取得显著成效。相比 2016 年,中国 2020 年新增湿地面积 $0.20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。然而,与美国湿地保护与修复工作相比,中国湿地保护修复工作在运用地球系统科学理论方面还任重道远,仍然存在一些问题。

3.1 管理机制待完善

首先是管理部门协调合作待加强。由于湿地生态系统的资源复合性,与美国湿地保护修复工作一样,中国湿地保护修复工作中,同一块湿地往往由多个部门同时管理,由林业部门主导协调工作(陈在妮等, 2008; 廖琴, 2021)。例如,对于湿地自然保护区,保护区内的水资源由水利部门管理,水鸟由林业部门管理,环境污染由环保部门管理。由于部门众多,部门间协调性不足,在湿地保护修复的管理工作中,难以达到良好的管理效果。

其次是制度机制有待完善。目前中国湿地保护主要依靠自然保护区建设等来实现,在实际工作中主要采取地方申报—管理部门审批的方式,缺少全国层面在地球系统科学指导下的综合统筹(白洁等, 2012)。一些生态地位重要、生态功能典型、生物多样性丰富的湿地没有纳入保护范围。以察汗淖尔湿地为例,其 1/3 水面位于河北省,2/3 位于内蒙古,河北省部分湿地设立了河北尚义察汗淖尔国家湿地公园,而位于内蒙古的另外 2/3 部分未被纳入国家湿地公园范围,同一片湿地的保护和管理标准不统一。

3.2 生态系统管理理念运用不足

首先是系统性认识不足。近年来,尽管地球系统科学的概念深入人心,但在实际工作中运用不足,存在对于山水林田湖草沙生命共同体的内在机理和规律认识不够,对各自然生态要素中间的联系考虑不足,“水-土-气-生”多界面过程与反馈机制分析不够深入等一系列问题,导致部分地区湿地生态修复

工作中出现生态问题“摁下葫芦起了瓢”的现象。

其次是整体性认识有限。一些地方政府缺乏区域乃至国家尺度上生态系统修复的理念,工程项目对生态系统的整体性认识不足,未站在国土尺度上整体谋划修复工作,将国家批复的山山水林田湖草沙生态保护修复工程分隔为若干个生态系统相关度不高的项目实施,未解决区域间生态系统破碎性和孤岛现象。

3.3 基于自然的解决方案理解不够

首先是景观化倾向明显。目前,国内生态修复相关实践中,对于现有景观因地制宜、设计再造的工程较少,尚未做到遵循自然生态系统的整体性、系统性、动态性及内在规律,景观化、花园化的倾向较明显,木屋、观光木道、生态堤岸的建设比比皆是,大搞景观工程的建设。有的地区把生态修复项目交由园林景观设计单位实施,过度追求景观形象,将波斯菊、美丽月见草等外来入侵物种列入采购目录,虽然景观效果好,但大面积种植将压缩本地物种生存空间。原本只需根据当地水土地质条件,科学植树种草就可以促进自然修复的项目,变成了投资大的开发工程。

其次是工程修复手段占比较大。长江生态修复建设过程中,有少数地区理念出现偏差,将生态修复简化为搞工程。一些地区在长江岸线整治修复中,采用工程措施保证城镇安全、修建滨江景观带是合适的,但在库岸生态相对稳定的区域,部分生态修复项目动辄开挖、铺设钢筋水泥,会严重破坏原有生态。

3.4 调查监测体系待加强

中国于 2003 年和 2013 年进行了 2 次全国湿地资源调查,生态环境部等相关部门、中国科学院等科研院所及地方相关省份也积极开展湿地调查监测工作,为湿地保护修复发挥了重要支撑作用。但对标新时代生态文明建设的新任务、新要求,中国湿地调查监测体系仍存在标准不统一、机构不健全、投入不充分、高新技术应用不够等突出问题,缺乏湿地调查监测的数据信息共享机制和共享平台,无法有效开展全国湿地生态状况变化动态监测评价,导致湿地破坏监管相对滞后,影响了湿地管控成效。如黑龙江省建立了全国最大的湿地自然保护地体系,但由于投入不足,监测能力还十分薄弱,半数自然保护区没有独立管理机构,专业技术人员缺乏,科研监测不能正常开展。

4 美国的做法和经验给中国的启示

中国履行《湿地公约》30 年来,构建了保护制度体系,出台了《湿地保护法》,以 4% 的湿地,满足了世界 1/5 人口对湿地的多种需求,是全球湿地保护和合理利用的积极践行者。2022 年,中国当选《湿地公约》常委会主席,对中国的湿地保护事业发展提出了更高的要求。美国的湿地保护工作在部门协调、指导理论、管理理念等方面运用地球系统科学的经验给中国带来了多方面的启示,本文以中国典型的湿地——黄河流域为例进行进一步讨论。

(1) 进一步加强管理机构与机制建设

黄河流域是中国重要的经济带,流经 9 省区 71 个市(张万益等, 2022),流域总面积达 795000 km²,对其进行流域治理,需要从全国层面进行统筹规划。一方面,全面贯彻实施《湿地保护法》,制定湿地面积总量管控目标方案及湿地保护修复标准规范等配套制度,强化各部门之间的联合、协作与沟通,推动建立湿地保护部门协作机制,提升湿地管理能力。另一方面,打破基于行政区划的传统管理模式,以生态系统或一级流域为单元,设立黄河流域湿地保护修复十年计划进行国家层面的统筹和协调,下设若干工程进行具体实施。

(2) 以地球系统科学为指导理论

一方面,湿地生态修复的过程中重视流域的整体性。黄河流域生态问题的根源是用水量超过水资源的承载能力:上游受气候变化和过度放牧影响,水源涵养能力降低;中游矿产资源开发扰动与水土污染叠加,水资源刚性约束增大,水土保持任务更加艰巨;下游防洪、湿地萎缩与生物多样性减少并存,三角洲生态系统与生物多样性受损。黄河流域的湿地保护修复工作需要以地球系统科学为指导,进行整体保护、系统修复和综合治理。针对流域上中下游的不同生态问题开展保护修复“组合拳”。

另一方面,从地质学大背景的视角深入挖掘影响湿地生态系统的根本性因素。汲取大沼泽地生态修复过程中未考虑海平面上升因素的教训,加强生态地质调查研究,关注地层岩性、地质构造、水文地质条件在不同程度对生态系统的影响和制约,从生态问题形成、演化的全视角来探究其内部机理,提出地球系统科学的解决方案。

(3) 贯彻基于自然的解决方案理念

黄河流域生态问题的根在人类活动,其湿地保

护修复工作需更加注意科学方法(郭迟辉等, 2023), 贯彻基于自然的解决方案理念, 降低生态修复工程化、景观化程度, 充分利用湿地生态系统提供的供给、调节、支持和文化服务功能, 应对其面临的一系列重大威胁。学习借鉴美国湿地保护修复中通过调整供水规划、优化水资源配置、模仿自然的水流过程改善大沼泽地水文条件和过程的经验, 结合黄河流域湿地生态系统的实际情况, 采取封育保护、小流域水土流失综合整治、地下水超采综合治理等一系列措施, 从根本上改善湿地生态系统健康状况。

(4) 建设全国湿地监测网络

围绕黄河流域湿地生态系统, 在湿地保护修复的过程中, 进行实时监测, 及时评价湿地生态系统的健康状况, 预警生态风险, 动态调整修复决策。建立健全湿地生态系统自然资源“一张图”, 将生态修复信息化、智慧化, 融合物种 AI 识别、物联网、卫星遥感、网格化管理等关键技术, 建设生态系统实时监测平台, 为生态修复工程效果的综合评价提供实时监测预警, 为生态修复科学决策的适应性调整提供基础数据。

(5) 形成统一的湿地生态系统调查监测数据库

通过对黄河流域湿地生态系统开展的生态地质调查和长期实时监测, 积累大量的基础数据, 并将其整合, 建立持续更新的湿地生态系统基础信息数据库。根据调查监测数据定期编辑监测报告, 评价修复结果, 并根据监测评估结果及时调整生态系统保护修复措施, 建立综合调查、实时监测、及时预警、动态调整的湿地生态修复工作模式。

5 结 语

(1) 近几十年来, 美国在地球系统科学指导下形成了一套调查-修复-监测-预警全链条的湿地保护修复模式, 建立了多部门分工协作机制, 将生态系统管理和基于自然的解决方案理念贯穿始终, 值得中国学习和借鉴。

(2) 中国湿地保护修复存在管理机制待完善、生态系统管理理念运用不足、基于自然的解决方案理解不够、调查监测体系待加强的问题, 在运用地球系统科学理论方面仍任重道远。

(3) 进一步加强管理机构与机制建设, 以地球系统科学为指导理论, 贯彻基于自然的解决方案理念, 建设全国湿地监测网络, 形成统一的湿地生态系统调查监测数据库, 是中国进一步完善湿地保护修复工作的重要抓手。

References

- Bai J, Ma J, Xu J L, et al. 2012. Current status and optimization strategies of wetland conservation and management in China[J]. *World Forestry Research*, 25(4): 58–62 (in Chinese with English abstract).
- Benyus J M. 2002. Biomimicry: Innovation inspired by Nature (2nd ed)[M]. Raleigh: HarperCollins: 20–50.
- Chen Z N, Huang C Y, Wu S J, et al. 2008. Pilot study on eco-environmental water requirement of Lahu wetland and protective countermeasure[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 14(11): 918–920 (in Chinese with English abstract).
- Chu X L, Xu C F. 2021. On marine ecosystem-Based integrated management with the example of Everglades restoration programme of USA[J]. *Ocean Development and Management*, 3: 25–32 (in Chinese with English abstract).
- Cohen-Shacham E, Janzen C, Maginnis S. 2016. Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges[M]. Gland: International Union for Conservation of Nature: 3–10.
- Department for Wildlife and Forest Plants Protection, the Ministry of Forestry. 1994. Guidelines for wetland conservation and rational utilization[M]. Beijing: China Forestry Publishing House: 147–160 (in Chinese).
- Dessu S B, Price R M, Troxler T G, et al. 2018. Effects of sea-level rise and freshwater management on long-term water levels and water quality in the Florida Coastal Everglade[J]. *Journal of Environmental Management*, 211: 164–178.
- Doren R F, Trexler J C, Gottlieb A D, et al. 2009. Ecological indicators for system-wide assessment of the greater Everglades ecosystem restoration program[J]. *Ecological Indicators*, 9: 2–16.
- Guo C H, Zhang M S, Wang Y, et al. 2023. Ecological restoration of China's territorial space in Yulin section of the Yellow River Basin through nature-based solutions[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(10): 1745–1756 (in Chinese with English abstract).
- Harvey J W, Gregory B N, Larsen L G. 2008. Field flume experiments resolve feedback processes governing historic formation, recent degradation, and restoration of the Everglades ridge and slough landscape[R].
- Heimlich R E. 1998. Wetlands and agriculture: Private interests and public benefits[M]. Washington, D C, Department of Agriculture: 1–20.
- Ingebritsen S E, Mcvay C, Glaz B, et al. 1999. Florida Everglades: Subsidence threatens agriculture and complicates ecosystem restoration[C]//Galloway D, Jones D R, Ingebritsen S E. Land subsidence in the United States. Denver U.S. Geological Survey: 95–106.
- Lang Y C, Ding H, Han X K, et al. 2022. Ecosystem protection and restoration science in coastal wetlands from the perspective of Earth system science[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 36(3): 376–382 (in Chinese with English abstract).
- Larsen L G, Harvey J W, Crimaldi J P. 2007. A delicate balance: Ecohydrological feedbacks governing landscape morphology in a lotic peatland[J]. *Ecological Monographs*, 77(4): 591–614.

- Larsen L G, Harvey J W. 2011. Modeling of hydroecological feedbacks predicts distinct classes of landscape pattern, process, and restoration potential in shallow aquatic ecosystems[J]. *Geomorphology*, 126: 279–296.
- Liao Q. 2021. Research on countermeasures of wetland protection and restoration in China[J]. *South China Agriculture*, 15(24): 205–206 (in Chinese).
- Liu B N. 2008. The Pantanal—the world's largest wetland[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 8: 62–63 (in Chinese).
- Ma T, Shao H Y. 2017. Theoretical progress and practical experiences of coastal wetlands management in other countries[J]. *Wetland Science & Management*, 13(1): 61–64 (in Chinese with English abstract).
- O' Connell M J. 2003. Detecting, measuring and reversing changes to wetlands[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 11(6): 397–401.
- Orem W, Fitz H C, Krabbenhoft D, et al. 2014. Modeling sulfate transport and distribution and methylmercury production associated with aquifer storage and recovery implementation in the Everglades protection area[J]. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 3/4: 33–46.
- Patino E, Conrads P, Swain E, et al. 2018. Everglades Depth Estimation Network (EDEN)—A decade of serving hydrologic information to scientists and resource managers (ver. 1.1, January 2018) [R]. Reston: U. S. Geological Survey Fact Sheet, 10: 2017–3069.
- Shimelis B D, René M P, Tiffany G T, et al. 2018. Effects of sea-level rise and freshwater management on long-term water levels and water quality in the Florida Coastal Everglade[J]. *Journal of Environmental Management*, 211: 164–178.
- Song Y Y, Ying T, Yao Z G, et al. 2013. Evolution of wetland conservation policy in developed countries[J]. *Environmental Science and Management*, 38(5): 160–165 (in Chinese with English abstract).
- Telis P A. 2006. The Everglades Depth Estimation Network (EDEN) for support of ecological and biological assessments[R]. Reston: U. S. Geological Survey Fact Sheet, 10: 2006–3087.
- Wang R Q, Zhang M X, Wu H T, et al. 2022. Analysis on wetland definition and classification of the Wetland Conservation Law of the People's Republic of China[J]. *Wetland Science*, 20(3): 404–412 (in Chinese with English abstract).
- Wang X. 2000. Legal system of wetland protection in USA[J]. *World Environment*, 3: 27–29 (in Chinese with English abstract).
- Westbrooks R G, Eplee R E. 2011. Early detection and rapid response[C]//Simberloff D, Rejmanek M. *Encyclopedia of Biological Invasions*. Berkeley: University of California Press: 169–177.
- Wu B S, Chen H G, Ma J M. 2005. Review of the ecosystem restoration of Kissimmee River in USA[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 36(4): 473–477 (in Chinese with English abstract).
- Xia P, Liu Q. 2011. Experience and inspiration of water ecosystem protection and restoration abroad[J]. *Water Resources Development Research*, 6: 72–78 (in Chinese).
- Xiao X W, Yu X B, Pan M Q. 2012. Implementation and implications of everglade wetland restoration plan in Southern Florida, USA[J]. *Wetland Science & Management*, 9(8): 31–35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L. 2010. Research and management of the Everglades ecosystem in Florida, USA[J]. *Wetland Science & Management*, 6(2): 64–65 (in Chinese).
- Zhang L. 2013. Florida ecological engineering Model 3: wetland-Everglades ecological restoration area[J]. *Wetland Science & Management*, 9(3): 42–43 (in Chinese).
- Zhang W Y, Wang F X, Song Z F. 2022. The key to ecological protection in the Yellow River—Earth system science[J]. *Journal of Hebei Geo University*, 45(2): 23–26 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白洁, 马静, 徐基良, 等. 2012. 我国湿地保护管理现状与优化对策[J]. *世界林业研究*, 25(4): 58–62.
- 陈在妮, 黄川友, 吴双江, 等. 2008. 浅析拉鲁湿地生态环境需水量及保护对策[J]. *水利科技与经济*, 14(11): 918–920.
- 褚晓琳, 许春风. 2021. 基于生态系统的海洋综合管理研究——以美国大沼泽湿地项目为例[J]. *海洋开发与管理*, 3: 25–32.
- 郭迟辉, 张茂省, 王尧, 等. 2023. 基于自然解决方案的黄河中游国土空间生态修复——以陕西榆林国土空间生态修复为例[J]. *地质通报*, 42(10): 1745–1756.
- 郎赞超, 丁虎, 韩晓昆, 等. 2022. 地球系统科学观下的滨海湿地生态系统保护和恢复科学[J]. *中国科学基金*, 36(3): 376–382.
- 廖琴. 2021. 我国湿地保护和修复对策探究[J]. *南方农业*, 15(24): 205–206.
- 刘柏年. 2008. 潘塔纳尔——世界最大湿地[J]. *环境保护与循环经济*, 8: 62–63.
- 林业部野生动物和森林植物保护司. 1994. 湿地保护与合理利用指南[M]. 北京: 中国林业出版社: 147–160.
- 马涛, 邵欢瑜. 2017. 国外滨海湿地管理的理论进展和实践经验[J]. *湿地科学与管理*, 13(1): 61–64.
- 宋圆圆, 营婷, 姚志刚, 等. 2013. 国际湿地保护政策及形式的演变研究[J]. *环境科学与管理*, 38(5): 160–165.
- 王瑞卿, 张明祥, 武海涛, 等. 2022. 从《中华人民共和国湿地保护法》解析湿地定义与分类[J]. *湿地科学*, 20(3): 404–412.
- 王相. 2000. 美国湿地的法律保护[J]. *世界环境*, 3: 27–29.
- 吴保生, 陈红刚, 马吉明. 2005. 美国基西米河生态修复工程的经验[J]. *水利学报*, 36(4): 473–477.
- 夏朋, 刘蓓. 2011. 国外水生态系统保护与修复的经验及启示[J]. *水利发展研究*, 6: 72–78.
- 肖协文, 于秀波, 潘明麒. 2012. 美国南佛罗里达大沼泽地湿地恢复规划、实施及启示[J]. *湿地科学管理*, 9(8): 31–35.
- 张立. 2010. 美国佛罗里达大沼泽生态系统的研究与管理[J]. *湿地科学与管理*, 6(2): 64–65.
- 张立. 2013. 美国佛罗里达生态工程典范之三: 湿地——大沼泽生态恢复区[J]. *湿地科学与管理*, 9(3): 42–43.
- 张万益, 王凤翔, 宋泽峰. 2022. 地球系统科学是开启黄河流域生态保护的钥匙[J]. *河北地质大学学报*, 45(2): 23–26.