

DOI: 10.5846/stxb202103080631

翟夏杰, 崔丽娟, 李伟, 赵欣胜, 张曼胤, 李春义, 窦志国. 湿地生态单元定义及其在湿地恢复中的应用. 生态学报, 2022, 42(19): 7752-7759.

Zhai X J, Cui L J, Li W, Zhao X S, Zhang M Y, Li C Y, Dou Z G. The definition of wetland biotope and its application in wetland restoration. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7752-7759.

湿地生态单元定义及其在湿地恢复中的应用

翟夏杰^{1,2,3}, 崔丽娟^{1,2,3,*}, 李 伟^{1,2,3}, 赵欣胜^{1,2,3}, 张曼胤^{1,2,3}, 李春义^{1,2,3}, 窦志国^{1,2,3}

1 中国林业科学研究院湿地研究所湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091

2 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091

3 北京汉石桥湿地生态系统国家定位观测研究站, 北京 101399

摘要:生态单元的概念在生态系统的环境保护和生物保护中被广泛应用。通过阐述湿地生态单元的定义、内涵和外延, 分析了湿地生态单元的特征, 介绍了湿地生态系统的内部生态单元、湿地“外援”生态单元和人工重建湿地生态单元等在湿地恢复中的应用案例, 并对湿地生态单元未来需要关注的研究方向进行了总结, 以为湿地保护与精细化管理提供理论基础和科学依据。

关键词:湿地; 生态单元; 湿地恢复; 人工湿地

The definition of wetland biotope and its application in wetland restoration

ZHAI Xiajie^{1,2,3}, CUI Lijuan^{1,2,3,*}, LI Wei^{1,2,3}, ZHAO Xinsheng^{1,2,3}, ZHANG Manyin^{1,2,3}, LI Chunyi^{1,2,3}, DOU Zhiguo^{1,2,3}

1 Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Beijing Hanshiqiao National Wetland Ecosystem Research Station, Beijing 101399, China

Abstract: The concept of biotope is widely used in ecological and biological protection. By expounding the definition, connotation and extension of the wetland biotope, this paper analyzed characteristics of the wetland biotope including hierarchy, diversity, and obviously ecological differentiation. We introduced some application cases of the internal biotope of the wetland ecosystem, the wetland “foreign aid” biotope and the artificial wetland biotope in wetland restoration. In addition, the authors summarized the research directions (such as coupling relationship between wetland biotope and biodiversity) which the wetland biotope needs to pay attention to in the future, in order to provide a theoretical and scientific basis for wetland protection and fine management.

Key Words: wetland; biotope; wetland restoration; constructed wetland

生态单元最初是指任何可以圈定的动植物可以生存的空间, 主要用于环境和野生生物保护, 之后发展到指在一个生态系统里可以划分的空间单位, 其中非生物因素铸造了该生活环境^[1]。也有学者认为是具有相同或相似环境条件的区域, 并且能够为特定的动植物群落提供的生存环境^[2]。随着生态学、景观生态学的发展

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0506200); 国家自然科学基金项目(42101308)

收稿日期: 2021-03-08; 网络出版日期: 2022-04-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lkyclj@126.com

展,生态单元被看作是一个特定尺度下环境条件一致的景观单元,例如一处开放的草地、林地、湿地、荒漠或者农田,它们的特点都是含有特殊的环境和特定的生物群落^[3-4]。在过去的研究中,生态单元多见于景观生态学,我国自然生态单元的划分以生态区划和大河流域为基础,其中生态区划是以协调生态保护与经济社会发展关系为目标,在充分认识区域生态系统结构、过程及生态服务功能空间分异规律基础上完成的^[5]。其中生态单元制图作为景观生态学研究方法之一,在自然保护和城乡规划中广泛应用于生物多样性和生境保护、土地利用规划和管理以及不同尺度景观规划和管理^[6-9],伴随着不同学科发展及交叉融合,生态单元的概念也扩展到村落生态单元^[10]、文化生态单元^[11]等方面。随着研究的深入,作为地球上的主要生态系统类型之一和山水林田湖草生命共同体的重要组成,湿地生态单元的划分逐步扩展到依据湿地生态系统的生态属性(如气候、地形地貌、水深、水质和生物指标等)完成^[12-13]。由于湿地是很多珍稀水禽的栖息地,加上其强大的生态净化作用,被称为“鸟类的乐园”和“地球之肾”,同时又向人类供给食物(水产品、禽畜产品、谷物)、减少感染细菌的风险^[14]、提供能源(水能、泥炭、薪柴)、原材料(芦苇、木材、药用植物)和休憩场所等多种生态系统服务,是人类赖以生存和持续发展的重要基础。研究湿地生态单元可以明晰湿地生态系统保护和修复中的分支环节与逻辑关系,有助于更好地恢复、修复和改良湿地生态系统结构,完善湿地生态系统过程,提升湿地生态系统服务。随着气候变化和人为活动的耦合干扰,湿地生态系统不断发展和演变,湿地生态单元的概念及其在湿地恢复中的作用研究并不多见,其深入理解将有助于充分认识湿地乃至区域生态系统的结构、过程和生态系统功能特征,为湿地资源的保护与合理利用提供科学依据。

1 湿地生态单元的概念

1.1 湿地生态单元的定义

湿地生态单元的定义依据湿地学和生态学的相关研究内容,原指任何可以圈定的湿地动植物可以生存的空间,或是在湿地生态系统里可以划分的空间单位,之后发展到指具有相同或相似环境条件的,并且能够为湿地动植物群落提供的生存环境区域^[1-4]。随着生态学、景观生态学的发展,生态单元被看作是一个特定尺度下环境条件一致的景观单元,例如一处开放的湿地、草地、林地、荒漠或者农田,它们的特点都是含有特殊的环境和特定的生物群落,是湿地学和生态学等学科的交叉领域。生态学是研究生物与环境关系的学科,而湿地是位于陆生生态系统和水生生态系统之间的过渡性地带,《国际湿地公约》中定义湿地包含天然或人工、常久或暂时之沼泽地、湿原、泥炭地或水域地带,带有静止或流动、或为淡水、半咸水或咸水水体,包括低潮时水深不超过 6 m 的水域^[15]。因此,湿地生态单元应是一定时间内存在于上述区域的,拥有湿地生物和环境属性,具有一定湿地结构和功能的单元。狭义的湿地生态单元是结合地形地貌、水文过程以及植物等生物群落形成(划分)的相对独立的生态区域;广义的湿地生态单元是湿地生态系统结构的部分组成或全部内容,是湿地生态系统物理、化学和生物过程和信息传递的媒介,同样是湿地功能产生、发展和发挥的基础。

湿地生态单元可分为三种类型。一是湿地环境单元,包括湿地(土壤)基质(如土壤团聚体^[16]、砾石和泥炭等)单元,湿地地形单元和湿地水环境单元等;二是湿地生物群落单元,依据研究对象的不同,包含湿地原生生物群落单元、湿地植物群落单元,湿地动物群落单元和湿地微生物群落单元;三是湿地环境及其生物耦合组成的系统单元,即湿地生态系统本身可作为集合生态系统^[17]或区域景观的生态单元。例如,小微湿地生态系统可提供湿地关键或濒危物种生境,作为湿地及相邻生态系统动物迁移过程中的“踏脚石”,提高动物在迁移中的存活率,也可为临近生态系统食物网中的消费者提供食物,提高生态系统营养级的复杂性^[18-19];我国南方流域内常分布有水塘与河流水系共同组成的多水塘湿地生态单元,在雨季可以收集雨水、生活及农业污水,开展渔业养殖;干旱季节可以作为水源用于农田灌溉,使得养分在农田生态系统中循环利用^[20]。

1.2 湿地生态单元的生态学特点

1.2.1 湿地生态单元的层次性是湿地生态系统结构和功能的基础

湿地生态单元在空间上具有层次性,其通过不同等级的分工可以提高湿地生态系统整体的适应能力,进

而保障湿地生态系统功能的正常发挥^[21]。以河流湿地为例,一般可划分为上、中、下游三个湿地生态单元,上、中、下游又可再分为若干支流。在特定时空尺度下,只有保障了黄河、长江等的上中下游不同层次生态单元各自的结构与功能,使流域格局完整性提高,才能维护整个流域的稳定性和健康发展。通常情况下,上游生态单元是水资源可持续供给的基础,应以水土保持、调蓄洪水为主,中游生态单元以人类居住和洪水调蓄为主,下游生态单元以人类聚居为主^[22-23]。

1.2.2 湿地生态单元具有多样性和相互支撑性

生态系统完整性是指生态系统具备区域自然生境应包含的全部本土生物多样性和生态学过程,其生态系统结构、功能和过程不受人类威胁和损害,生态系统处在自然变化范围之内并保持良性循环,且本地物种处在能够持续繁衍的种群水平上,湿地生态单元的多样性和相互支撑性维持了湿地生态系统的完整性^[24-25]。以青藏高原为例,其拥有全球代表性的生物和自然生态系统,不仅包括喜马拉雅山为代表的一系列海拔 6000—8850 m 的山峰,也是江河之源、亚洲水塔。神山圣湖、江河源头和湿草甸等湿地生态单元多样,湿地生态单元与周边环境存在着自然和人文交互影响,不同生态要素通过物质循环、能量流动和信息传递产生联系,进而形成湿地生态单元与外界环境之间的相互支撑性^[26]。再如青藏高原的众多山脉之间,发育有大小不等的山间盆地和纵形谷地,孕育了成群分布的湖泊,其面积占我国湖泊总面积的 50% 以上,是“亚洲水塔”的重要组成部分,星罗密布的湖泊成为高原湿地的重要组成部分^[27]。

1.2.3 不同湿地生态单元具有明显的生态分异规律

在多样的生态学尺度下,湿地生态单元由于地形、地貌、水文、土壤、气象和生物等生态要素的不同会引起自然分异,人为活动(如农牧业、工业生产活动的变更,人类居住地的变迁,以及文化、宗教活动等)同样会引起湿地生态单元的变化^[28]。例如,黄河尾间的频繁改道创造了不同的滨海湿地发育环境,黄河三角洲滨海湿地的古代区生态单元植被类型以盐生和旱中生草本植物为主;废弃和河口区生态单元以湿生和盐生草本植物为主。古代区生态单元的滩涂围垦(养殖池、滩地和盐田)和资源开发对滨海湿地影响最为显著;废弃区生态单元主要是海岸侵蚀、油田等工程建设;河口区生态单元主要受黄河水沙变化和造陆速率的影响^[29]。

2 湿地生态单元在湿地恢复中的应用案例

湿地生态系统因其重要的生态系统服务功能而受到人们逐渐重视^[30],然而湿地生态系统也是脆弱的生态敏感区,自然和人为因素的耦合作用导致湿地生态系统不断演变。随着气候变化和人类对其干预能力的提高,例如围垦、过度渔猎、污染等,严重削弱了湿地生态系统结构和功能的稳定,造成湿地生态系统退化,通过科学的方法和技术手段恢复、有效处理和解决湿地生态系统退化问题,恢复和重建已经受损的湿地生态系统原有结构和功能,为全人类面临的共同课题^[31-32]。但是全球范围内的湿地恢复工程(不论是人为主导的主动恢复还是被动的自然恢复^[33])的实施尚没有系统的理论指导,缺乏科学性,加上湿地生态系统的复杂性,湿地恢复和保护依旧任重道远^[34]。在这种背景下,湿地生态单元的构建及其应用在一定程度上可以为湿地恢复提供理论和技术支撑。

2.1 湿地生态系统内部生态单元的构建

湿地地形生态单元的构建:地形深刻影响了湿地生态单元的演变^[35]。自然界中的深水区地形主要特点是呈凹形分布,为满足湿地动物越冬以及湿地游禽栖息觅食,可深挖基底形成深水区,构建湿地坑塘生态单元,深度以湿地恢复区所在地最冷月份底层水体不结冰,并预留 0.5 m 深的流动水体为佳。滩涂湿地浅水生态单元的构建可通过对近水起伏的开阔地段进行局部微地形调整,削低过陡区,营造湿地水鸟适宜的开阔滩地。对一些池塘静水类型的湿地,在进行湿地浅滩地形恢复时,水面深度不应过浅,地形应适当改造,否则会因水分蒸发过多而引起水域面积减少,导致淹水浅滩部分裸露,造成沉水植被因缺水死亡^[36]。湿地地形生态单元的构建的优点是可以迅速形成不同的湿地环境以满足不同的生态功能需求,缺点是可能需要较大的人为扰动和经济成本。

湿地水环境生态单元的构建:湿地水环境生态单元是湿地生态系统必不可少的单元,也决定了湿地生态群落的演替^[37-38]。例如,在黄河口湿地含盐量较高的滩地,植被组成比较简单,翅碱蓬为优势群落。通过近10年分批次的生态补水工程使得通过引入淡水,进行人工冲盐、洗盐,构建低盐生态单元来降低土壤盐分,抑制翅碱蓬生长,促进芦苇生长,促使翅碱蓬群落向芦苇群落演替^[39]。湿地水环境生态单元的完成可以影响湿地环境的变化,进而影响湿地植被、底栖动物等群落演变,淡水等水资源可持续和科学利用是水环境生态单元应该关注的重点。

湿地生物链生态单元的构建:通过将滤食性湿地动物的本地种投入富营养化水域,滤食性湿地动物摄食蓝藻后,可改变水体的理化性质,抑制蓝藻生长,增加水体透明度,恢复适宜包括沉水植物在内的湿地植物生长的水体环境,使之与滤食性湿地动物形成良好的食物链关系,替代蓝藻进行水下光合作用,释放大量的溶解氧,吸收水中过多的氮、磷等富营养物质。随着湿地植被尤其是沉水植被的逐渐恢复,又为有益微生物、浮游动物、鱼类、水生昆虫和鸟类等湿地生物群落提供了适宜的栖息环境,从而恢复湿地生态系统的良性循环和自净能力^[40]。值得一提的是,湿地是生物入侵的主要生态系统类型之一,湿地生物链生态单元构建需严格监测和控制入侵生物的扩散。

2.2 湿地“外援”生态单元的构建

目前,湿地的退化和丧失成为全球范围内普遍存在的现象,完全依靠湿地自然恢复不仅需要湿地生态系统的结构相对完整或未遭受严重破坏而且需要较长一段时间,人类智慧的辅助也有非常重要的作用,我们将这类湿地生态单元的构建或引入称为湿地“外援”生态单元。

例如,滨海地区由于排污、围垦、城市建设等活动导致滨海湿地植物分布面积逐渐减少,生态系统退化严重,植被生长的底质修复是滨海湿地恢复与重建中的基础。现有方法多通过改造地形方式进行植被种植恢复,效果不明显,植物成活率低。本团队开发了一种提高滨海湿地植物种植成活率的植物种植生态单元(专利号:ZL 2020 2 0659639.1)。其包括支架、通孔、槽壁、弹性开关膜、槽底(图1)。槽底设置有若干个用于透水的通孔,每个通孔上设置有可完全覆盖所述通孔使通孔不透水的弹性开关膜。此外,还包括用于隔离滨海湿地基质与槽底的隔离层,为可透水的多孔结构。隔离层厚度为1.5—2.5 cm,材料选自聚酯纤维、植物纤维或聚丙烯纤维,植物纤维选自麻纤维、棕榈纤维、或秸秆纤维。在埋设生态槽前铺装粒径3.0—5.0 cm的沸石,以为槽底弹性开关膜在降水后水流向下运动时可顺利打开;之后埋设生态槽使其上沿露出地表面层的高度为2—3 cm,防止表层土积水时深入到槽内,减少槽外土壤中含盐水分影响槽内,植物在生态槽埋设坑内设置好后,在生态槽内装填滨海湿地基质,以完成埋设。控制实验结果表明,该生态单元显著提高了植物在滨海土壤中的成活率。

此外,可利用湿地本身及周围植物的枯枝落叶、石块等为湿地鸟类、昆虫、小型动物等搭建“本杰士堆”(英译为Benjeshecken,20世纪80年代左右,德国从事动物园园林管理的赫尔曼·本杰士和海因里希·本杰士兄弟基于荒野生存观念和自然演替规律的一项发明)。一方面它可为湿地动物等提供躲避、栖息的空间,有助于退化生物群落的再生,另一方面对湿地动植物栖息地的连通性有促进作用(图2)。“本杰士堆”是根据湿地实际情况构建成具有不同结构和功能的,满足一定湿地生物生活需要的微型湿地生态单元。湿地“外

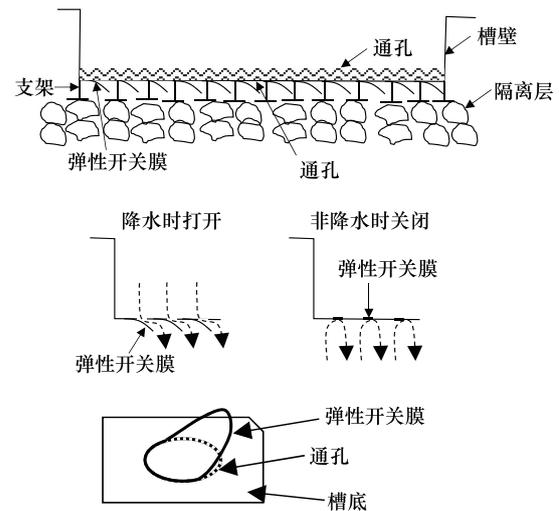


图1 湿地“外援”生态单元——滨海湿地植物种植槽

Fig. 1 Wetland “foreign aid” biotope—coastal wetland plant planting trough

援”生态单元因退化程度、恢复目标等的不同具有多样性,但均应在生态学原理的基础上科学配置。

2.3 人工重建或新建湿地生态系统单元

随着对湿地功能的深入认识以及天然湿地的不断退化和巨大的恢复成本^[41],人们开始模拟自然湿地的结构与功能重建或新建湿地,其中人工湿地是重建或新建湿地生态单元范例,可持续的人工湿地生态单元一直是湿地恢复工作的重要目标之一^[42]。人工湿地是一种由人工建造和监督控制的,与天然湿地类似的生态系统,国内外学者大都将人工湿地看作用于水质改善功能的工程化湿地^[43-44]。它充分利用了基质-水体-生物这个复合生态系统的物理、化学和生物的三重协同作用来实现对污水的净化^[45-46]。根据污水在湿地床中流动的方式,人工湿地主要分为表面流人工湿地和潜流式人工湿地,其中潜流式人工湿地可进一步分为水平潜流和垂直流^[47]。表流湿地相比潜流湿地布水系统的动力要求较小,植物的更替较容易,较少出现堵塞,后续维护管理的要求较低^[48],潜流湿地则具有耐低温、卫生等优点。

在表流湿地生态单元的构建中主要通过污染物的自然沉降、湿地植物茎叶的拦截和吸收、填料的吸附过滤,以及湿地微生物的吸收分解来去除水中污染物^[49]。表流湿地生态单元下层进行防渗铺装防止污水下渗污染地下水,并填充砂土、壤土和砾石等材料作为基质种植挺水植物、沉水植物,总体坡度保持在 1% 左右。表流湿地生态单元分为三种技术与组合模式:“砂土+挺水植物”模式;“砂土+砾石+沉水植物”模式;“砂土+砾石+壤土+挺水植物”模式(图 3)。



图 2 常见的“本杰士堆”类型(摘自 natur-instinkte.de 网站)

Fig.2 A common type of benjeshecken (from the website of natur-instinkte.de)

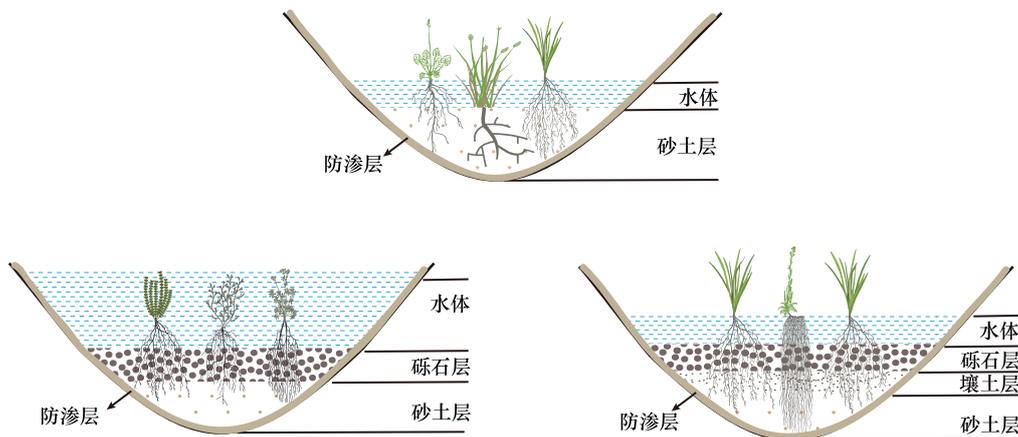


图 3 三种表流湿地生态单元技术模式

Fig.3 Three technical models of surface flow wetland biotope

潜流湿地生态单元主要通过利用填料表面生长的生物膜、丰富的植物根系及表层填料的吸收和截留等作用,去除污水中的污染物。潜流湿地生态单元下层铺设防渗膜,并填充砂土、砾石作为基质,种植挺水植物,潜流湿地底面坡度要保持在 4% 左右(图 4)。有研究表明,潜流湿地的亚单元(初始单元、中间单元和末端单元)对总氮、总磷和化学需氧量的去污效率会有显著不同^[50-51]。

人工浮岛湿地生态单元也是人工湿地的一种类型,由漂浮在水面上的浮力基础设施和湿生植被组成,多为植物、粗泥炭、浮石、珍珠岩、土壤、浮垫等的组合,可以应用在自然湿地恢复中,主要的设计参数包括植被组成与结构(一般情况下多植物组合的去污效果要优于单一植物^[52])、植被覆盖率、生长介质、深度和获得浮力

的方法等。植物分蘖节以上部分主要生长并保持在水位之上,而根水中向下延伸,依据水位高低形成一个庞大的根系组织,植被以水培方式生长,从水中直接吸收养分,广泛而密集的根系的发展对于人工浮岛湿地生态单元的功能表现至关重要;生物膜附着在根和根茎上,随着物理和生化过程的发生,通过生物合成、沉降(由根系引起,是磷元素去除的主要途径)和生物膜代谢来去除湿地污染物^[53]。

值得一提的是,上述人工湿地生态单元还不足以模拟自然湿地,随着研究的深入,人工构建的包括物理-生物模拟系统、自动调控系统、监测分析系统、中央控制系统等湿地生态系统的近自然模拟装置(中宇宙),在控制一定的物理、化学要素和生境条件前提下,可在小尺度湿地微宇宙装置和大尺度野外湿地生态系统之间的开展相关的湿地生态学研究^[54]。由于湿地生态系统包含了湿地生物与湿地环境两部分,并且产生了十分复杂的物理、化学和生物学过程,湿地中宇宙生态单元研究仍旧需要不断探索。

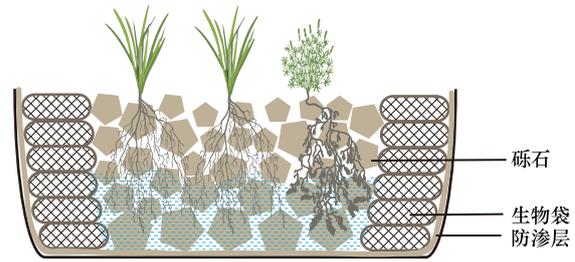


图 4 潜流湿地生态单元构建技术原理图

Fig.4 Build technical schematic of the subsurface wetland biotope

3 湿地生态单元的研究展望

湿地生态单元不仅是湿地生态系统完整性的重要支撑,也是区域景观格局的重要组成部分。伴随着全球气候变化等环境问题和人类生产生活活动的耦合作用,湿地生态单元的研究将在退化湿地恢复、湿地保护和区域可持续发展等方面的科学性和精准性上发挥重要作用。未来,湿地生态单元的研究内容将主要聚焦在以下几个方面。

首先,生物多样性是生态系统功能最受关注的内容之一^[55],湿地生物多样性的维持和净化功能同样是湿地生态单元的重要属性。湿地生态单元属性的时空演变和生物多样性变化(包括互花米草入侵生态单元与地带性植被生态单元的互作等)^[56-57]、水质净化的关系将是湿地生态单元未来研究的重点方向。

其次,目前的湿地生态单元的定量识别与分类方法及体系构建^[58-59]并不完善,湿地生态单元的准确定量识别与科学构建其分类体系是退化湿地生态系统精准恢复的前提。同时湿地生态单元又是区域景观的重要组成部分,通过湿地生态单元的脆弱性分析,阐明热点湿地生态单元的脆弱原因并制定缓解措施,可以扭转过去景观空间规划的负面影响^[60],降低或减缓湿地的退化程度。

发现局域尺度上的敏感或关键湿地生态单元的演变规律同样值得重视^[61-62],只有科学掌握湿地生态单元的演变规律或生态系统属性的演变阈值^[63],才能更好的恢复退化湿地。例如,北美的研究表明,狼对生态工程师——河狸的捕食显著影响了池塘等湿地生态单元的构建^[64];自然和人为耦合作用下的放牧活动影响了湿地植被单元的多样性和异质性^[65]。此外,湿地生态单元在生物与环境保护中的重要性评价^[66];从宏观视角解决多学科交叉的生态学问题^[67-68],如湿地生态单元与相邻湿地、草地、森林、农田、沙漠、城市等生态单元的耦合作用、相互影响和人地关系等^[69]均是湿地生态单元研究需要深入开展研究的领域。

致谢:北京生命科学研究所王建华博士帮助写作,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Udvardy M F D. Notes on the ecological concepts of habitat, biotope and niche. *Ecology*, 1959, 40(4): 725-728.
- [2] Sukopp H, Weiler S. Biotope mapping and nature conservation strategies in urban areas of the Federal Republic of Germany. *Landscape and Urban Planning*, 1988, 15(1/2): 39-58.
- [3] Löfvenhaft K, Björn C, Ihse M. Biotope patterns in urban areas: a conceptual model integrating biodiversity issues in spatial planning. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58(2/4): 223-240.
- [4] 邱玲. 生态单元和社会单元制图在城市绿地规划中的应用. 重庆: 重庆大学出版社, 2019.

- [5] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武. 从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展. 生态学报, 2017, 37(23): 7761-7768.
- [6] 高天, 邱玲, 陈存根. 生态单元制图在国外自然保护和城乡规划中的发展与应用. 自然资源学报, 2010, 25(6): 978-989.
- [7] 郭葳, 苏伟忠, 陈维肖, 陈爽, 杨桂山. 基于自然生态单元的中国城乡建设用地空间格局特征分析. 长江流域资源与环境, 2017, 26(7): 1011-1021.
- [8] Planchuelo G, Kowarik I, Von Der Lippe M. Plant traits, biotopes and urbanization dynamics explain the survival of endangered urban plant populations. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(8): 1581-1592.
- [9] 邱玲, 朱玲, 王家磊, 高天. 基于生态单元制图的宝鸡市城区生物多样性保护规划研究. 生态学报, 2020, 40(1): 170-180.
- [10] 黄华, 张晨, 肖大威. 试论村落生态单元景观要素的形态模式. 中国园林, 2016, 32(8): 71-74.
- [11] 董晓峰, 陈春宇, 朱宽樊. 名人故居文化生态系统的保护利用研究——以北京市总布胡同梁林故居一带为例. 中国园林, 2014, 30(4): 75-78.
- [12] 黄毅熠, 吝涛, 胡灯进, 薛雄志, 张国钦. 小尺度海域空间评价单元划分技术研究——以福建省东山湾为例. 生态学报, 2021, 41(2): 707-716.
- [13] 郭云, 梁晨, 李晓文. 基于系统保护规划的黄河流域湿地优先保护格局. 应用生态学报, 2018, 29(9): 3024-3032.
- [14] Lamb J B, Van De Water J A J M, Bourne D G, Altier C, Hein M Y, Fiorenza E A, Abu N, Jompa J, Harvell C D. Seagrass ecosystems reduce exposure to bacterial pathogens of humans, fishes, and invertebrates. *Science*, 2017, 355(6326): 731-733.
- [15] Finlayson C M. Ramsar convention typology of wetlands//Finlayson C M, Everard M, Irvine K, McInnes R J, Middleton B A, Van Dam A A, Davidson N C, eds. *The Wetland Book I: Structure and Function, Management, and Methods*. Dordrecht: Springer, 2018: 1529-1532.
- [16] 魏守才, 谢文军, 夏江宝, 梁爱珍. 盐渍化条件下土壤团聚体及其有机碳研究进展. 应用生态学报, 2021, 32(1): 369-376.
- [17] 杨海乐, 陈家宽. 集合生态系统研究 15 年回顾与展望. 生态学报, 2018, 38(13): 4537-4555.
- [18] Planchuelo G, Von Der Lippe M, Kowarik I. Untangling the role of urban ecosystems as habitats for endangered plant species. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189: 320-334.
- [19] 崔丽娟, 雷茵茵, 张曼胤, 李伟. 小微湿地研究综述: 定义、类型及生态系统服务. 生态学报, 2021, 41(5): 2077-2085.
- [20] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 肖笃宁, 赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [21] 张小飞, 彭建, 王仰麟, 吴文斌, 杨鹏, 刘焱序, 宋治清, 薛怡珍. 全球变化背景下景观生态适应性特征. 地理科学进展, 2017, 36(9): 1167-1175.
- [22] 高吉喜. 区域生态学核心理论探究. 科学通报, 2018, 63(8): 693-700.
- [23] 高吉喜. 区域生态学基本理论探索. 中国环境科学, 2013, 33(7): 1252-1262.
- [24] Woodley S. Monitoring and measuring ecosystem integrity in Canadian national parks//Woodley S, Kay J, Francis G, eds. *Ecological Integrity and the Management of Ecosystems*. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [25] 邓冉, 邵怀勇, 黄宝荣, 张丛林, 周中仁, 樊杰. 青藏高原生态系统完整性远程评价与国家公园群建设时序研究. 生态学报, 2021, 41(3): 847-860.
- [26] 虞虎, 钟林生, 樊杰. 青藏高原国家公园群地域功能与结构研究. 生态学报, 2021, 41(3): 823-832.
- [27] 朱立平, 张国庆, 杨瑞敏, 刘翀, 阳坤, 乔宝晋, 韩博平. 青藏高原最近 40 年湖泊变化的主要表现与发展趋势. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1254-1263.
- [28] 李边疆. 土地利用与生态环境关系研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [29] 刘志杰. 黄河三角洲滨海湿地环境区域分异及演化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [30] Costanza R, De Groot R, Sutton P, Van Der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [31] Galatowitsch S M. Natural and anthropogenic drivers of wetland change//Finlayson C M, Milton G R, Prentice R C, Davidson N C, eds. *The Wetland Book II: Distribution, Description, and Conservation*. Dordrecht: Springer, 2018: 359-367.
- [32] Xu W H, Fan X Y, Ma J G, Pimm S L, Kong L Q, Zeng Y, Li X S, Xiao Y, Zheng H, Liu J G, Wu B F, An L, Zhang L, Wang X K, Ouyang Z Y. Hidden loss of wetlands in China. *Current Biology*, 2019, 29(18): 3065-3071.e2.
- [33] 李晓文, 李梦迪, 梁晨, 诸葛海锦. 湿地恢复若干问题探讨. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1257-1269.
- [34] Zedler J B. Progress in wetland restoration ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(10): 402-407.
- [35] 侯明行, 刘红玉, 张华兵, 王聪, 谭清梅. 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响. 生态学报, 2013, 33(12): 3765-3773.
- [36] 崔丽娟, 赵欣胜, 李伟, 张曼胤, 李胜男, 王义飞, 张岩. 湿地地形恢复研究概述. 世界林业研究, 2011, 24(2): 15-19.
- [37] 宋炎炎, 张奇, 姜三元, 郭玉银. 鄱阳湖湿地地下水埋深及其与典型植被群落分布的关系. 应用生态学报, 2021, 32(1): 123-133.
- [38] Liu Q, Liu J L, Liu H F, Liang L Q, Cai Y P, Wang X, Li C H. Vegetation dynamics under water-level fluctuations: implications for wetland restoration. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124418.
- [39] 裴俊, 杨薇, 王文燕. 淡水恢复工程对黄河三角洲湿地生态系统服务的影响. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2018, 54(1): 104-112.
- [40] 崔丽娟, 宋洪涛, 赵欣胜. 湿地生物链与湿地恢复研究. 世界林业研究, 2011, 24(3): 6-10.
- [41] Cheng F Y, Van Meter K J, Byrnes D K, Basu N B. Maximizing US nitrate removal through wetland protection and restoration. *Nature*, 2020, 588(7839): 625-630.
- [42] Byeon C W, Nam B E. An assessment of the ecological functions of a sustainable structured wetland biotope (SSB). *Ecological Engineering*, 2020, 145: 105723.
- [43] Coban O, Kusch P, Kappelmeyer U, Spott O, Martienssen M, Jetten M S M, Knoeller K. Nitrogen transforming community in a horizontal

- subsurface-flow constructed wetland. *Water Research*, 2015, 74: 203-212.
- [44] Zhuang L L, Yang T, Zhang J, Li X Z. The configuration, purification effect and mechanism of intensified constructed wetland for wastewater treatment from the aspect of nitrogen removal; a review. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122086.
- [45] 曹笑笑, 吕宪国, 张仲胜, 邹元春, 孙广智. 人工湿地设计研究进展. *湿地科学*, 2013, 11(1): 121-128.
- [46] Li W, Cui L J, Zhang Y Q, Cai Z J, Zhang M Y, Xu W G, Zhao X S, Lei Y R, Pan X, Li J, Dou Z G. Using a Backpropagation artificial neural network to predict nutrient removal in tidal flow constructed wetlands. *Water*, 2018, 10(1): 83.
- [47] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/3): 48-65.
- [48] 张云慧, 朱伟, 董婵. 利用生物膜强化表流湿地处理农村生活污水的试验. *湖泊科学*, 2012, 24(6): 838-842.
- [49] Cui L J, Li W, Zhou J, Zhang Y, Zhang M Y, Lei Y R, Kang X M, Zhao X S, Pan X. Influence of substrate depth and particle size on phosphorus removal in a surface flow constructed wetland. *Water Science & Technology*, 2017, 75(10): 2291-2298.
- [50] 王庆海, 段留生, 武菊英, 阳娟. 北京地区人工湿地植物活力及污染物去除能力. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1131-1137.
- [51] 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳. 低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试. *环境科学*, 2020, 41(12): 5509-5517.
- [52] 张泽西, 刘佳凯, 张振明, 张明祥. 种植不同植物及其组合的人工浮岛对水中氮、磷的去除效果比较. *湿地科学*, 2018, 16(2): 273-278.
- [53] Pavlineri N, Skoulikidis N T, Tsihrintzis V A. Constructed floating wetlands: a review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308: 1120-1132.
- [54] 王佳文, 何萍, 徐杰, 丁森. 水生生态系统中宇宙发展现状. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 1129-1140.
- [55] Poggiato G, Münkemüller T, Bystrova D, Arbel J, Clark J S, Thuiller W. On the Interpretations of Joint Modeling in Community Ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2021, 36(5): 391-401.
- [56] Dimitrakopoulos P G, Schmid B. Biodiversity effects increase linearly with biotope space. *Ecology Letters*, 2004, 7(7): 574-583.
- [57] 解雪峰, 孙晓敏, 吴涛, 蒋国俊, 濮励杰, 项琦. 互花米草入侵对滨海湿地生态系统的影响研究进展. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2119-2128.
- [58] Buhl-Mortensen P, Dolan M F J, Ross R E, Gonzalez-Mirelis G, Buhl-Mortensen L, Bjarnadóttir L R, Albretsen J. Classification and mapping of benthic biotopes in arctic and sub-arctic Norwegian waters. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 271.
- [59] Watson S C L, Preston J, Beaumont N J, Watson G J. Assessing the natural capital value of water quality and climate regulation in temperate marine systems using a EUNIS biotope classification approach. *Science of the total Environment*, 2020, 744: 140688.
- [60] Weißhuhn P. Indexing the vulnerability of biotopes to landscape changes. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 316-327.
- [61] Skaloš J, Richter P, Keken Z. Changes and trajectories of wetlands in the lowland landscape of the Czech Republic. *Ecological Engineering*, 2017, 108: 435-445.
- [62] Buda J, Łokas E, Pietryka M, Richter D, Magowski W, Iakovenko N S, Porazinska D L, Budzik T, Grabiec M, Grzesiak J, Klimaszyk P, Gaca P, Zawierucha K. Biotope and biocenosis of cryoconite hole ecosystems on Ecology Glacier in the maritime Antarctic. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138112.
- [63] Dakos V, Matthews B, Hendry A P, Levine J, Loeuille N, Norberg J, Nosil P, Scheffer M, De Meester L. Ecosystem tipping points in an evolving world. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(3): 355-362.
- [64] Gable T D, Johnson-Bice S M, Homkes A T, Windels S K, Bump J K. Outsized effect of predation: wolves alter wetland creation and recolonization by killing ecosystem engineers. *Science Advances*, 2020, 6(46): eabc5439.
- [65] Michaels J, Batzer E, Harrison S, Eviner V T. Grazing affects vegetation diversity and heterogeneity in California vernal pools. *Ecology*, 2021, 102(4): e03295.
- [66] Gastauer M, Trein L, Meira-Neto J A A, Schumacher W. Evaluation of biotope's importance for biotic resource protection by the Bonner Approach. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 193-200.
- [67] Dodds W K, Rose K C, Fei S L, Chandra S. Macrosystems revisited: challenges and successes in a new subdiscipline of ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2021, 19(1): 4-10.
- [68] Tromboni F, Liu J G, Ziaco E, Breshears D D, Thompson K L, Dodds W K, Dahlin K M, Larue E A, Thorp J H, Viña A, Laguë M M, Maasri A, Yang H B, Chandra S, Fei S L. Macrosystems as metacoupled human and natural systems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2021, 19(1): 20-29.
- [69] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64-69.