

DOI: 10.5846/stxb202005251328

修晨, 肖荣波, 陈三雄, 张晖. 国内外主要湾区生态系统特征、修复理论与技术模式. 生态学报, 2020, 40(23): 8377-8391.

Xiu C, Xiao R B, Chen S X, Zhang H. Ecosystem characteristics, theory and technology modes of ecological restoration in the main bay areas at domestic and abroad. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8377-8391.

国内外主要湾区生态系统特征、修复理论与技术模式

修 晨¹, 肖荣波^{2,*}, 陈三雄¹, 张 晖¹

¹ 仲恺农业工程学院 园艺园林学院, 广州 510225

² 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广州 510006

摘要:通过总结粤港澳大湾区、东京湾区和旧金山湾区等国内外主要湾区的生态系统特征、生态修复理论和实践研究进展,在辨析生态修复概念内涵的基础上,基于 Meta-Analysis 及综合分析方法,分析了生态系统退化机制及驱动因子,归纳总结湾区生态修复的主要理论基础、技术模式及案例。结果表明:(1)国内外三大主要湾区的生态系统特征为森林占比最高,其次是农田和草地占比,城镇占比第三。森林一般分布在湾区外围,城镇分布在湾区内核河口三角洲附近。(2)湾区生态修复理论包括以恢复生态学、景观生态学和复合生态系统生态学为基础的三种修复理论,生态修复的类别分为补救修复、改善修复、生态恢复和复垦等。(3)湾区生态修复技术模式包括主动修复、被动修复和重建等三类技术模式。在总结梳理生态修复理论和技术模式的基础上,结合当前国内生态修复存在问题,本文提出我国和广东省开展生态修复实践的建议和展望,以期对粤港澳大湾区生态修复提供一定的理论指导。

关键词:生态系统服务;生态系统格局;主动修复;被动修复;修复思路

Ecosystem characteristics, theory and technology modes of ecological restoration in the main bay areas at domestic and abroad

XIU Chen¹, XIAO Rongbo^{2,*}, CHEN Sanxiong¹, ZHANG Hui¹

¹ College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China

² School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract: Based on the research development of ecosystem characteristics, theory and technology modes in Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area, Tokyo bay Area and San Francisco Bay Area, this paper summarizes the emerging ecological problems in main bay areas at home and abroad and the mechanism and driving factors of ecosystem degradation. Using the methods of meta and comprehensive analysis, we clarify the concepts, connotations, theory, technology modes, and case studies of ecological restoration in bay areas. The results show that: (1) the ecosystem characteristics of three main bay areas reveal that forest ecosystem takes the highest percentage, followed by cropland or grassland ecosystem, and then urban ecosystem. Forest ecosystem is usually distributed in the surrounding of bay areas, while urban ecosystem is in the estuary delta area. (2) The theory of ecological restoration in bay areas mainly takes the principle of restoration ecology, landscape ecology and compound ecosystem ecology as the foundation. Four types of the ecological restoration are remediation, rehabilitation, restoration and reclamation. (3) Technology modes of ecological restoration in bay areas include three modes such as active restoration, passive restoration and creation. Finally, the recommendations and prospects of ecological restoration practice in China and Guangdong province are put forward, in order to provide theoretical guidance for the ecological restoration of Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area.

基金项目:广州市科学研究计划项目(201904010099);仲恺农业工程学院创新强校项目(KA2005408E2)

收稿日期:2020-05-25; **修订日期:**2020-09-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ecxiaorb@163.com

Key Words: ecosystem service; ecosystem pattern; active restoration; passive restoration; restoration thought

随着人类社会经济的快速发展,不断加剧的人类活动对地球的自然生态环境造成了巨大威胁,引发了森林、湿地、河流等生态系统结构失调与功能丧失,生物栖息地的破坏与生境破碎化,物种灭绝与生物多样性减少,生态系统服务功能削弱等问题,退化的生态系统进一步影响到人类自身的生存与发展。全球一半以上的人口居住在距海 60 km 的范围内,75%的千万人口规模的超大城市与 60%的经济总量分布在距海 100 km 范围内^[1]。湾区作为海陆交汇形成的特殊地理单元,具有人口密集、社会经济发达、城市化程度高等特点,面临自然生态系统退化的问题不断凸显。因此,对湾区退化生态系统开展修复,并恢复其提供的重要生态服务功能,对人类未来延续自身生存具有重要意义。

英国生态学会在 2006 年发表的《英国 100 个与咨政相关的生态学问题》中,“过去和现在的围栏捕鱼、铺设水底管道、移除砂粒层、片断化栖息地、筑坝等等河岸带工程将给河岸和河流内部的生物多样性带来什么后果?”“海岸、河口和河流等栖息地对于濒临灭绝的洄游鱼类种群有怎样重要的意义?”“怎样使可实施的大尺度生态恢复工程被优先考虑?”等科学问题^[2],提示和启发了开展生态修复所依托的理论基础和技术模式的重要性。当前,湾区生态修复大多聚焦于工程实践评价,缺少从生态系统特征入手,梳理归纳湾区生态修复的理论和模式。本文基于 Meta-Analysis 及综合分析方法,通过对国内外主要湾区生态系统特征、退化机制、以及开展生态修复所依托的理论和模式的分析,力图为我国及广东省开展粤港澳大湾区生态修复提供理论和技术支撑。

1 湾区生态系统特征

湾区具有特殊的生态格局特征,其中海湾是湾区的核心组成要素,河流连接了陆地和海洋,森林、山体、河湖、滨海湿地、海洋、海岛等相互依存,形成海陆一体的景观生态格局。从社会经济形态上,湾区往往是人类活动和居住的密集区,和经济物流发达区,一个围绕沿海口岸由江河相连的城市群、经济增长极,因此城镇和农田生态系统也占据重要的比例(图 1)。全球各地的湾区地理分布多样,空间差异大,但森林、草原、湿地等自然生态系统和城镇、农田等人工生态系统是湾区主要的生态系统类型。湾区生态系统在原材料供给、防风固沙、

洪水调蓄、土壤保持、固碳释氧、水源涵养、生物多样性保护和休闲游憩等方面为人类的生存和发展提供了多重生态系统服务。

国内外三大主要湾区粤港澳大湾区、东京湾区和旧金山湾区呈现出不同的生态系统格局特征(图 2,图 3),粤港澳大湾区是指 Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area,包括珠三角 9 市、香港和澳门;东京湾区是指 Tokyo Metropolitan Area,包括东京都、埼玉县、千叶县、神奈川县等一都三县;旧金山湾区是指 San Francisco Bay Area,包括旧金山市和周边 9 个县。在三大湾区主要生态系统类型中,森林是面积比例最高的生态系统类型,占比分别达到 56.8%,32.2%和 41.1%。其中,粤港澳大湾区森林生态系统比例最高,超过总面积的一半以上,东京湾和旧金山湾区占比分别约为总面积的三成和四成。农田是粤港澳大湾区和东京湾区占比第二的生态系统类型,分别达到 16.9%和 29.3%;而旧金山湾区占比第二的是草地生态系统,占总面积的 23.6%,其农田生态系统占比较小,仅为 8.6%。城镇生态系统在三大湾区的生态格局中占有重要的比例,占比分别达到了 15.2%,23.3%和 20.2%;相比之下,湿地生态系统在三大湾区生态格局中占比较小,分别为 8.8%,2.6%和 1.0%(图 3)。森林一般分布在湾区外围,城镇分布在湾区内核河口三角洲附近。湾区生态系统格局

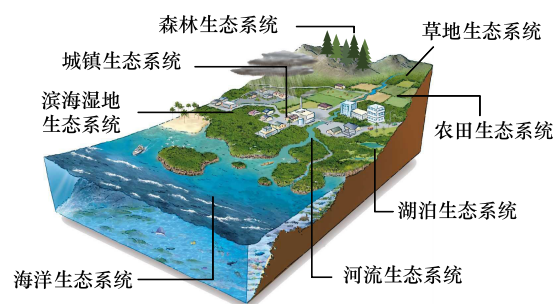


图 1 湾区主要生态系统类型立体剖面示意图(改编自^[3])

Fig.1 The three-dimensional profile of main ecosystem types in bay area (adapted from^[3])

变化剧烈的区域通常集中在城镇、农田等人工生态系统的扩张区、森林、草地、湿地等自然生态系统的恢复区。

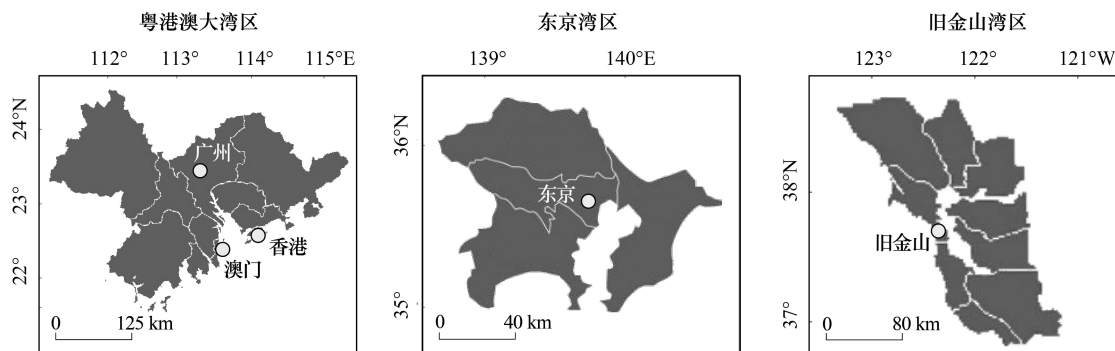


图2 国内外三大湾区地理位置和行政区划图

Fig.2 Locations and administrative divisions of three major bay areas in the world

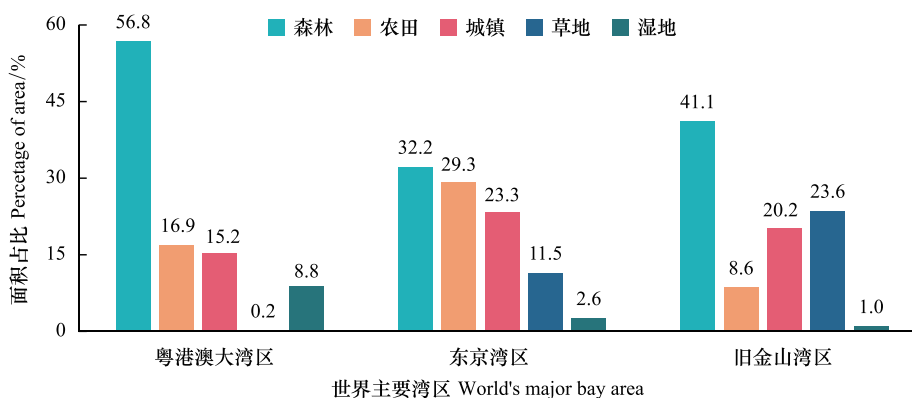


图3 国内外三大湾区生态系统格局特征

Fig.3 Characteristics of ecosystem pattern of three major bay areas in the world

国内外三大湾区的生态系统格局现状数据基准年分别为 2015 年、2011 和 2017 年;其中,粤港澳大湾区的格局结果为自有数据分析得出;东京湾区的数据引自日本地球环境所^[4],旧金山湾区的数据引自湾区开放空间委员会^[5]

2 湾区生态系统面临的问题及退化机制

2.1 湾区生态系统面临的问题

社会经济的长期快速发展对湾区生态系统透支较为严重,各类自然生态系统发生了不同程度的退化,城镇面积的扩张蚕食了农田和滨海湿地,生态资源和环境约束趋紧,生态环境压力日益增大,区域生态安全受到威胁。湾区生态系统退化主要表现为生态系统构成趋于单一、稳定性下降,生态系统服务功能削弱,生物多样性锐减和自然灾害频发,并面临着快速城市化导致人居环境恶化、流域水环境问题突出、自然岸线减少与滨海湿地退化、全球气候变化威胁等一系列严重的生态问题。

快速城市化导致人居环境恶化、流域水环境问题突出。城市的大规模开发和扩张集中在湾区近岸地区,三大湾区都具备很高的城市化程度,城市化率均超过 85%,东京湾区和旧金山湾区甚至达到了 94%和 96%,出现了千万人口规模的城镇区域(图 4)。快速城市化致使城镇生态系统调节服务功能不断降低,导致人居环境恶化,流域水环境问题和大气污染问题仍然突出。2018 年珠江口海域水质处于劣四类海水水质,湾区城市内河和深圳、东莞、揭阳等部分跨市区交界水体仍然受到严重污染^[11];大气区域污染仍处于高位,2018 年 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $28 \mu g/m^3$,高于东京湾和旧金山湾区,且尚未达到世界卫生组织第二阶段指导值

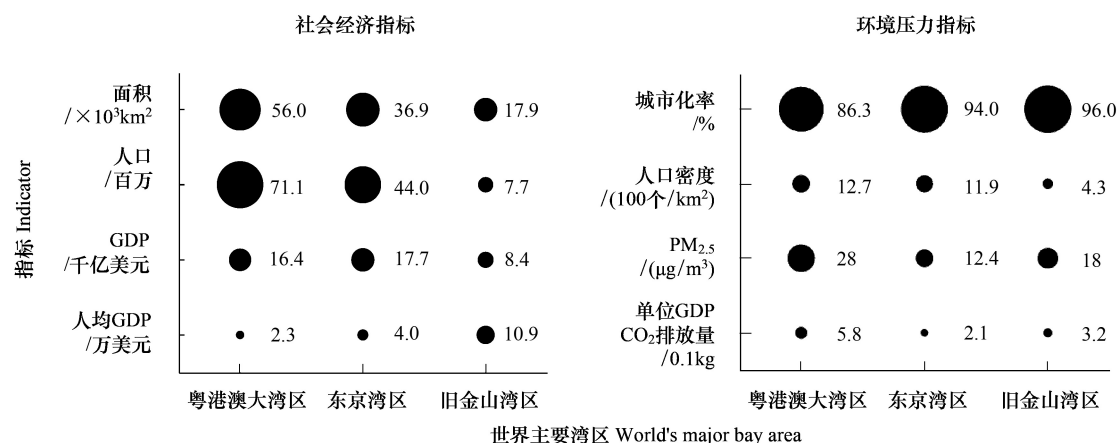


图4 国内外三大湾区社会经济和环境压力指标

Fig.4 Indicators of social-economic and environmental stress of three major bay areas in the world

国内外三大湾区的社会经济指标的数据基准年为2018年,数据引自^[6];环境压力指标中,城市化率、单位GDP二氧化碳排放量数据基准年为2015年,数据引自^[7],人口密度、 $\text{PM}_{2.5}$ 数据基准年为2018年,人口密度由社会经济指标计算得出, $\text{PM}_{2.5}$ 数据分别引自粤港澳珠三角区域空气监测网络、东京都环境局和旧金山湾区空气质量管理局^[8-10]

($25 \mu\text{g} / \text{m}^3$) (图4)。

湾区自然海岸线大幅减少,滨海湿地面积锐减。以粤港澳大湾区为例,自上世纪90年代以来,湾区沿岸城市为了缓解建设用地紧缺的问题而持续进行大规模的填海造地工程,沿海岸线格局发生了剧烈变化。粤港澳大湾区人工岸线加速增长成为主导岸线,自然岸线不断萎缩,所占比例由1990年的46.14%锐减到2017年的36.12%,逼近国家设定的35%的自然岸线保有率底线^[12-13]。大湾区红树林、滩涂和盐沼等滨海湿地面积呈明显下降趋势,其中红树林面积已从1986年17.58 km^2 减少到2005年9.19 km^2 ,减少了近50%,至2015年,粤港澳大湾区累计填海围海405.95 km^2 ,自然滨海湿地日渐萎缩、消失^[14-15]。

2.2 湾区生态系统退化机制

在一定时空背景下,由于自然、人为或者二者共同的干扰下,健康生态系统的结构破坏功能丧失,生态系统稳定性和恢复力削弱,生物多样性下降,这一过程被称为生态系统退化。外界干扰是生态系统发生退化的主要触发因子,一方面通过对个体生理、种群结构、群落丰富度稳定性的影响,最终引起生态系统结构的改变;另一方面干扰影响了生境条件,可直接或间接破坏环境和生态系统的组分,造成生态过程和生态链的断裂,导致生态系统的崩溃^[16]。

生态系统退化根据干扰影响程度的不同,主要分为三个阶段。退化前期,生态系统受损状态较轻,可通过提高生态系统管理进行修复;退化中期,生态系统已经受到较大破坏,生态功能削弱,开展生态修复需要实施植被调节;退化后期,生态系统受到严重破坏,生态功能丧失,开展生态修复需要改造生境条件(图7)。景观尺度上,退化同样大致分为三个阶段,开展修复分别需要提高残留生境的管理、需要生境调控和替换、以及需要改造景观尺度的外部环境等措施(图7)。

针对湾区陆海一体的生态景观特点,对湾区的陆地生态系统(森林、草原、山体、农田、城市)和水生生态系统(河流、湖泊、沼泽、海岸带、海洋)为对象,比较分析湾区不同生态系统发生退化的主要驱动力(图5)。引发退化的自然干扰驱动力包括全球气候变化(气候变暖导致的森林火灾、干旱、海平面上升等)、病虫害、台风风暴、地震、泥石流滑坡、洪水、外来物种入侵等^[17-19]。而人为干扰是当前生态系统退化的主要驱动因素,包括自然资源过度获取^[20](砍伐森林采挖植物、过度放牧捕捞、采矿、开采油气资源)、土地利用改变^[21](毁林开荒、围湖造田、填海造地)、城市化扩张^[22](自然空间锐减、港口建设、建设用地扩张)和污染排放^[23](使用农药化肥、生活和工业污染)等。

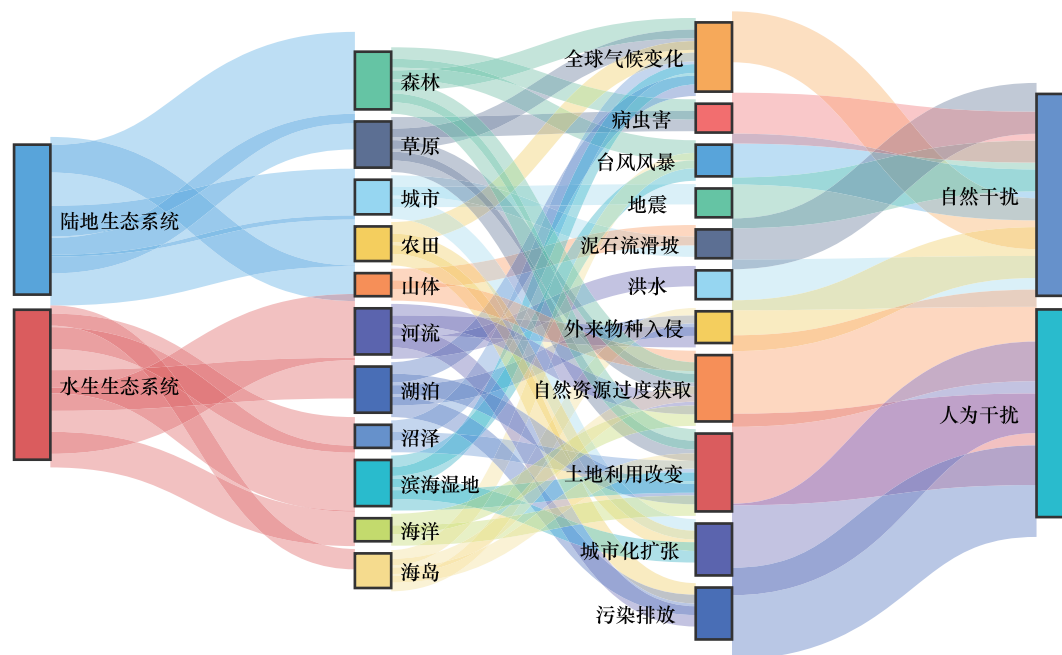


图5 湾区生态系统类型及其退化驱动因子

Fig.5 Different ecosystem types in bay area and the driving factors of their degradation

3 湾区生态修复的理论思路

3.1 湾区生态修复的概念解析

3.1.1 生态修复的概念

生态修复是指为协助已退化、损害或彻底破坏的生态系统而进行的恢复、重建和改善的过程^[24]。在更广阔的视角下,生态修复的范围可延伸至景观尺度,协助受损的景观恢复其结构和功能的过程。生态修复使退化的生态系统处于恢复的轨道上,围绕物种组成、群落结构、生态功能、生境适宜性、与周边景观的连通性等方面,使退化生态系统回归其适应外界变化和物种持续演化的轨迹,并以提升生态系统稳定性和可持续性为目标^[25]。湾区生态修复关注的是在湾区海陆一体的景观格局中,协助受损或退化的森林、湿地、河湖、城市、海岸带、海洋等生态系统而进行的恢复、重建和改善的过程。

3.1.2 生态修复的类别

生态修复是众多修复性活动的统称,其最终目的都是遵循生态学原理和规律,使退化或受损的生态系统回归到一种稳定、健康、可持续的发展状态。按照自然演替的生态学规律,将从受损或退化生态系统被停止干扰,到最终修复到原初的生态系统状态的过程,视为一个“理想修复过程”。按照理想修复的不同阶段和特征,生态修复主要包括补救修复、改善修复、生态恢复以及复垦等几个类别(图6)。

补救修复是指在受损或退化生态系统开展修复的初期,实施的纠正错误、补救修复的行动。这一阶段主要以人的主动治理作用为主,重点关注修复的具体技术领域。例如采用物理、化学和生物等方法去除土壤或水体中的化学污染物、改变或调控环境的水文条件等^[26]。

改善修复是指在理想修复阶段的中期,以恢复生态系统的功能为主要目的行动。这一阶段侧重将人的主动治理行为与自然的能动性相结合起来,改善修复不是以修复生物多样性和生态系统完整性为目标,而是重点修复与人类需求密切相关的生态系统功能和恢复生态系统服务^[24,27]。

生态恢复是指在理想修复阶段的后期,以使受损生态系统完全恢复到原初状态的行动。这一阶段强调恢复过程中充分发挥生态系统的自组织和自调节能力,即依靠生态系统自身的力量,促使已受损生态系统恢复

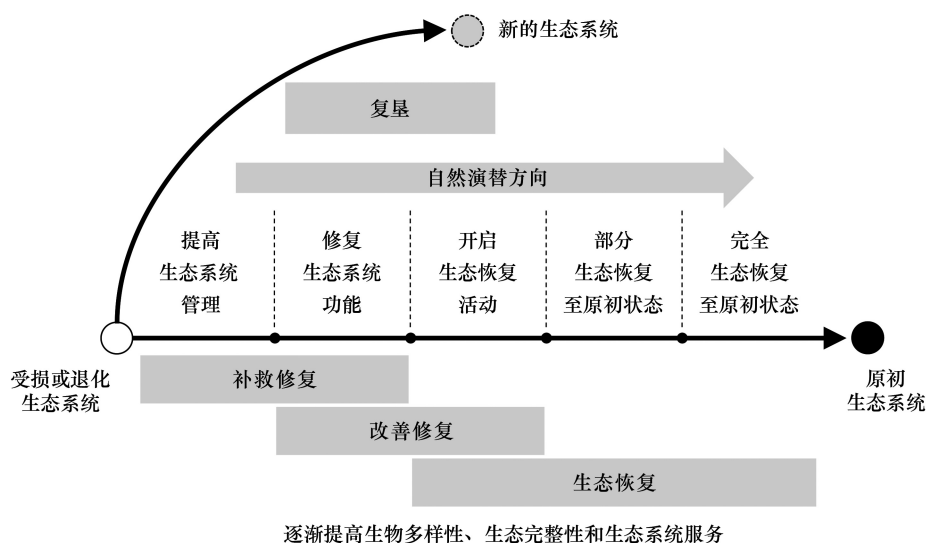


图 6 生态修复的过程阶段和不同类别 (改编自^[24,28])

Fig.6 Process stages and different types of ecological restoration (Adapted from^[24,28])

为未受损时的原初状态,恢复其生物多样性和生态系统完整性^[28]。

复垦一般指的是由于退化生态系统受损极为严重,需要以人工干预为主导力量,重建和替代原有生态平衡的新的生态系统的行动。这是一种人为地重建生态系统的过程,新的生态系统往往与受损前的生态系统完全不同^[24]。如矿山生态修复过程中的填充矿坑、覆盖露天矿土、平整土地、栽种植被等土地复垦工程。

3.2 湾区生态修复理论

生态修复是建立在恢复生态学的理论基础上所进行的实践,其核心理论观点来源于恢复生态学^[25]。随着湾区退化生态系统修复研究和实践的深入,针对湾区地理景观特点,景观生态学、复合生态系统生态学也成为湾区生态修复重要的理论基础来源。

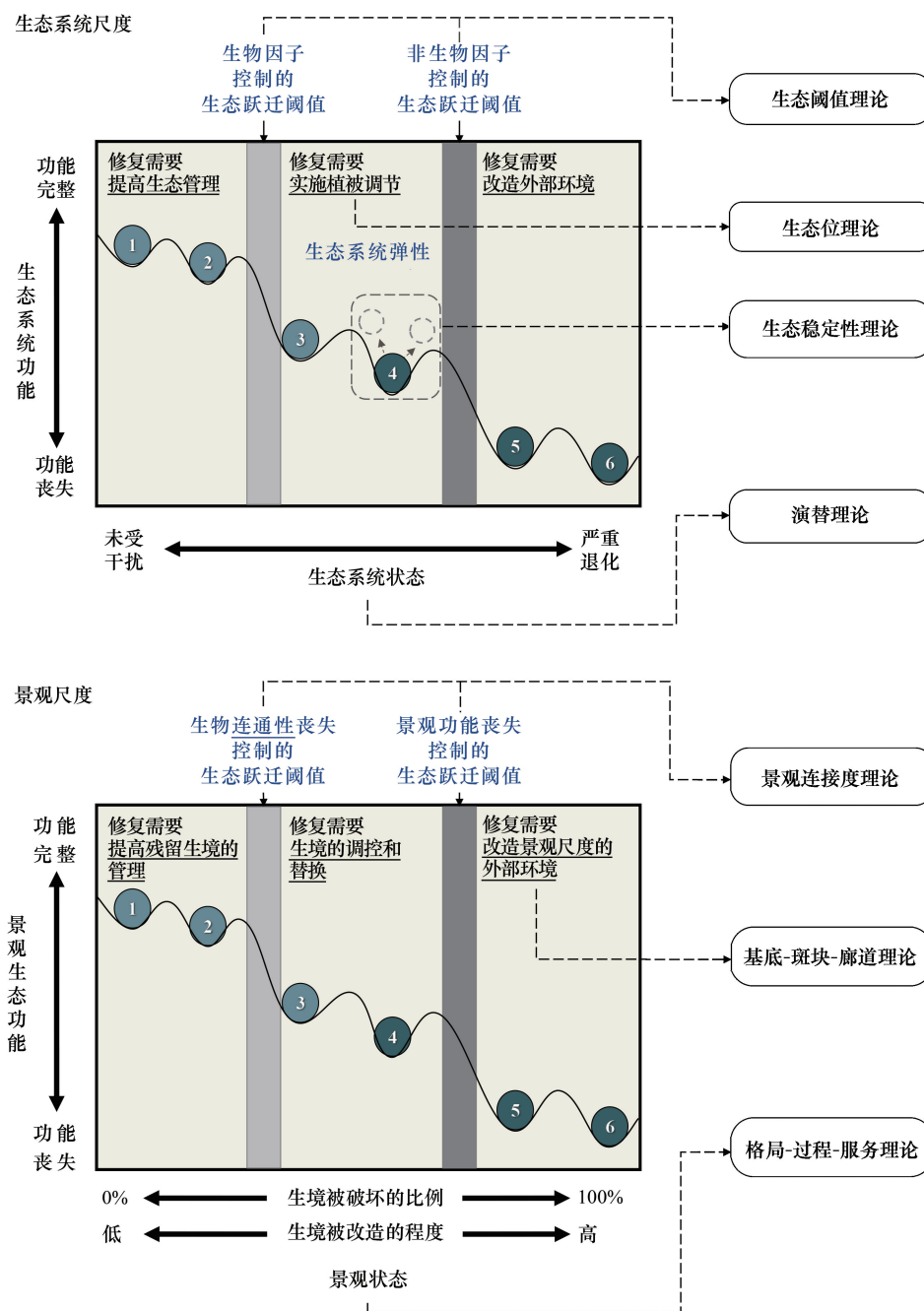
3.2.1 以恢复生态学为基础的修复理论

(1) 演替理论

演替是指在群落发展变化过程中,随着时间的推移,由低级到高级,由简单到复杂,一个阶段接着一个阶段,一个群落代替另一个群落的自然演变现象。演替反映了生物群落与环境相互作用而引发生境变化的过程,在更高尺度上则反映了生态系统类型(阶段)的动态演变。自然演替的方向是有一定规律的,生态系统发生退化后,通过合理判断当前退化状态在该生态系统演替中的阶段,减少外界干扰压力并采取一定的人为操作调控,协助其沿着正向演替方向进入生态恢复的轨道,并缩短恢复时间^[31](图 7)。演替理论为人类对退化生态系统开展生态修复提供了有力指导,被广泛用于湾区的退化或受损森林、草原、湿地、海岸带的生态修复过程。

(2) 生态系统稳定性理论

生态系统通过对外界干扰胁迫产生负反馈,使自身保持或恢复结构和功能相对稳定,这一保持自身平衡状态的特性称为生态系统稳定性。生态系统的自我调节能力是有一定范围的,这与生态系统的恢复力密切相关。恢复力又称生态系统弹性,是指生态系统遭受干扰破坏后恢复到原初状态的能力。Holling 用茶杯和小球形象地解释生态系统恢复力的机制^[32]:茶杯宽度和深度代表生态系统恢复力的范围,小球的位置代表了生态系统状态;干扰压力下小球左右滑动,最终恢复到原初位置(图 7)。此外,提高群落生物多样性和复杂性也有助于提高生态系统稳定性^[33]。生态系统稳定性理论为了解湾区生态修复过程不同阶段的特征和开展针对性措施等方面提供指导。

图7 生态系统退化和修复的过程的概念模型图(改编自^[28-30])Fig.7 Simplified conceptual model for ecosystem degradation and ecological restoration (Adapted from^[28-30])

生态系统尺度的退化和修复过程:数字圆球代表在不同阶段的生态系统状态,1代表未受损的、功能完整的生态系统,6代表严重退化、功能丧失的生态系统;景观尺度的退化和修复过程:数字圆球代表在不同阶段的景观状态,1代表生境未受破坏或改造的、功能完整的景观,6代表生境被严重破坏或被改造程度很高、功能丧失的景观

(3) 生态阈值理论

干扰的强度和频度决定了生态系统退化的方向和进程,当胁迫压力所引起的生物或非生物因素变化超过了一定的阈值范围,生态系统状态就会发生跃迁,进入了下一个退化程度阶段,这种阈值范围即生态阈值^[34-35]。根据发生跃迁强度的不同,生态阈值可分为生态阈值点和生态阈值带。生态阈值点是指生态系统受到环境变化后所引发的迅速而剧烈的转变,而生态阈值带指的是生态系统从一种状态逐渐转换为另一种状

态的过程。生态系统尺度上的退化过程中,往往存在两个生态跃迁阈值,退化初期由生物因子控制的和退化后期由环境因子控制的生态跃迁(图7)。在景观尺度上,退化过程同样存在跃迁阈值,包括由于景观连通性丧失导致的生态跃迁,以及因景观功能丧失引发的生态跃迁^[29](图7)。生态阈值理论广泛用于生态修复过程中设定生态修复目标、界定修复阶段等方面。

(4)生态位理论

生态位是指一个种群在生态系统中,在时间、空间上所占据的位置及其与相关种群之间的功能关系与作用。不同的物种如果在同一生态系统中且具有相同的生态位,则会形成激烈竞争而不利于各自种群的发展,甚至造成其中一方的衰亡(图7)。生态修复面临的最大挑战之一是创建或重组能够抵抗外来物种入侵的植物群落。群落中如果具有相似生物性状的物种占据了生态位,则外来入侵物种很难建立稳定种群^[36]。因此,湾区退化生态系统的恢复与重建,特别是构建高物种多样性的复合生态系统(如复合农林生态系统、滨海湿地生态系统),应考虑构建群落中各物种的生态位,避免引进生态位相同的物种,避免或者减少种群间的竞争,实现物种间共存,维持生态系统的长期稳定。

3.2.2 以景观生态学为基础的修复理论

(1)“基质-斑块-廊道”与景观连接度理论

景观生态学理论和方法在生态修复实践过程中可以提供有效的指导,其中的核心概念如“基质-斑块-廊道”、生态系统间相互作用、斑块镶嵌与连通性等都同退化生态系统的恢复有着密切的关系^[37](图7)。景观是一个由不同生态系统组成的异质性陆地区域(包含湖泊、河道、湿地等),景观要素分成三种类型:斑块、廊道与基质。其中斑块的镶嵌分布和廊道的渗透功能所形成的空间异质性格局,使得不同斑块生境之间的物种产生交流、生态系统之间的功能交互,成为退化生态系统修复的重要景观驱动机制。这一规律通过考虑生境破碎化、整体土地利用方式和斑块的景观连接度等方面,进一步丰富生态修复方案和实践^[38]。

(2)“格局-过程-服务”理论

“景观格局、生态过程、生态系统服务”之间的耦合关系,是当前地理学和生态学研究的前沿,强调生态系统空间格局、生态系统内物质、能量、信息的流动和生态过程之间的相互作用关系^[39-40](图7)。近年来,生态系统服务逐渐成为生态修复的焦点^[41],生态修复的过程改变了生态系统格局与过程,对生态系统服务的供给和发挥具有重要影响。湾区作为社会经济发展核心区和人口聚集区,更加关注生态修复后生态系统服务的提升以及人类福祉的裨益。“格局-过程-服务”理论在退化生态系统的修复和生态系统管理领域日趋成熟,通过与流域生态过程的紧密结合,逐渐应用于河岸带、滨海湿地等湾区生态系统的修复与生态系统管理等应用实践活动中^[40,42-43]。

3.2.3 以复合生态系统生态学为基础的修复理论

当前的生态系统退化过程很大程度上源于人类活动的负面干扰,导致生态系统可提供的各类生态系统服务削弱或丧失,人类福祉受损。生态系统功能是维持生态系统服务的基础,因此生态修复应始终聚焦提升生态系统服务这一现实目标展开。大型生态修复工程通常属于一个复杂的社会-生态系统中的一部分,对受损生态系统进行修复,不仅要基于生态系统结构和功能的恢复,同时也与利益相关者、周围社会经济和政策制度等密切相关^[44]。因此,如果要想实现生态修复成效的可持续性,恢复改善生态系统的各项服务功能,需要在“社会-经济-自然复合生态系统”的框架下^[45],参与设计和指导生态修复工程,最终实现人与生态系统协调共生,社会目标和生物目标的协同(图7)。因此,以人地关系理论为代表的系统理论,在湾区的大型生态工程中得到越来越多的关注。

3.3 湾区生态修复基本思路

湾区生态修复基本思路包括修复规划与设计、修复工程实施、生态监测与评估和修复实施后管理维护等四个阶段。(1)在修复规划与设计阶段,重点工作包括利益相关者各方合作、对受损生态系统现状的评估、识别参考生态系统、设定生态修复目标和方案、开展安全性评估等;(2)在修复工程实施阶段,应正确运用修复

方法,并做好应对预期外情况的预案响应;(3)在生态监测与评估阶段,做好观测监测和记录,定期评估分析进展,针对出现的新状况并适时调整方案;(4)在修复实施后管理维护阶段,做好持续的管理和维护,对关键指标进行必要监控,对数据进行参考分析和比较。

4 湾区生态修复的技术模式

4.1 生态修复技术

在不同退化生态系统类型(如森林、矿山、湿地、湖泊、河流、滨海湿地、海洋)的生态修复过程中,由于在退化阶段、退化程度和生态修复目标等方面存在差异,因此采用的修复技术也各有不同。按照生态系统结构和功能的角度,主要包括非生物或环境因素的修复技术和生物因素的修复技术。

4.1.1 环境因素的修复技术

环境因子恢复技术主要包括水体修复技术^[46](如控制污染、去除富营养化、换水、积水、排涝和灌溉技术、无公害产品开发与生产技术、土地优化利用与覆盖技术、物理处理技术、化学处理技术、生物处理技术、氧化塘技术等)、土壤修复技术^[47](如农耕制度和方式的改变、绿肥与有机肥施用技术、改良土壤、固土、水土侵蚀控制、污染物土壤生物自净技术、施加抑制剂技术、移土客土技术、废弃物的资源化利用技术等)和大气污染修复技术^[48](如吸附污染物微小颗粒、生物吸附和化学吸附等)。

4.1.2 生物因素的修复技术

生物系统的恢复技术包括物种^[49](物种的引入、品种改良、植物快速繁殖、植物的搭配、植物的种植、林分改造等)、种群^[50](就地保护技术、易地保护技术、自然保护区技术、种群规模、年龄结构、密度、性比例等调控技术、种群行为控制技术)、群落^[51](林灌草搭配技术、群落组建技术、生态位优化配置技术、林分改造技术、原生与次生快速演替技术、水生与旱生演替技术等)、生态系统^[52](国土资源评价与规划技术、生态评价与规划技术、RS-GIS-GPS 辅助技术、生态工程技术、景观制图技术、生态系统构建技术等)。

4.2 湾区生态修复技术模式

生态修复技术方案是多种修复技术的有机组合,在开展实际生态修复实践时,应在生态学原理的支持下,综合运用生物、物理、化学修复等手段,结合生态工程等适当的人工技术措施辅助,形成因地制宜、达到最佳效果的修复技术模式。

以世界主要湾区名称和生态修复(ecological restoration / remediation / rehabilitation / reclamation)为主题词在 Web of Science 上检索 2010—2020 年的发表文献,按照相关度从高到低,选取了国内外主要湾区开展生态修复研究和实践的 42 篇文献^[43,53-93],并基于 Meta-Analysis 方法,分析和总结了国内外湾区开展生态修复的主要生态系统类型以及三类修复技术模式。其中,国内外湾区在开展生态修复的生态系统类型分布既有共性也有差异性。主要湾区生态修复活动多集中于滨海湿地、城市和河流,其次是森林、湖泊和矿山等类型。中国的粤港澳大湾区除了城市和滨海湿地为最多的生态系统类型之外,同时森林和矿山的修复也有较多的分布;日本的东京湾区、美国的佛罗里达湾区、切萨皮克湾区比较重视河流和滨海湿地的生态修复。在修复技术模式上,国内外主要湾区采用的修复技术模式大多以主动修复模式为主,被动修复和重建模式为辅(图 8)。

4.2.1 被动修复

被动恢复是指不依靠人工干预或者最小化的人工干预,主要通过消除导致生态系统退化或破坏的影响因素,并在自然条件下将退化生态系统恢复到健康状态,一般适用于退化或受损程度相对较低的生态修复^[94]。受损生态系统具备较强的自然恢复能力,现有的生物群落在停止引起生态退化的人类活动(如过度捕捞、放牧,破坏本土植被等)后逐步恢复;通过加强与周边生境斑块的景观连接后,动物种群会恢复,植物群落可通过种子自然散播逐步恢复。当前国际上热门的基于自然的解决方案,再野化,河流重新自然化等修复理念,均属于广义的被动修复模式。其中,基于自然的解决方案是一种受自然启发、支撑并利用自然力量与规律生态修复模式,最终实现经济、社会和生态效益的共赢,在国内外湾区的生态修复实践中越来越受到关注^[95]。

国家	主要湾区	修复生态系统类型						修复技术模式		
		森林	矿山	河流	湖泊	城市	滨海湿地	主动修复	被动修复	重建
中国	粤港澳大湾区									
	杭州湾区									
日本	东京湾区									
美国	旧金山湾区									
	佛罗里达湾区									
	切萨皮克湾区									
澳大利亚	悉尼湾区									

图 8 国内外主要湾区生态修复的生态系统类型与技术模式分布图

Fig.8 Ecosystem types and technology modes of ecological restoration in main bay areas in the world

修复生态系统类型中,白色色块-红色色块代表了文献数量从 0—5,文献数量越多色块约趋近红色,越少趋近白色;修复技术模式中,白色色块-蓝色色块代表了文献数量从 0—10,文献数量越多色块约趋近蓝色,越少趋近白色

与主动修复相比,被动修复虽然耗时较长,但是在特定退化阶段的生态系统修复中具有更好的效果。捷克生态恢复学者通过比较采用主动修复和被动修复的矿山生态系统修复研究,发现近期人工恢复(主动修复)比自然恢复(被动修复)恢复快,但远期自然恢复区生物多样性和植被盖度更高,自然演替的效果也强于人工恢复区^[96]。

4.2.2 主动修复

主动修复是指以人为工程技术措施占据主导,通过人类的控制和干预,以恢复或改善受损生态系统结构和过程或使其加速进入群落演替轨道上的技术模式。一般适用于退化程度较高的生态系统修复,如矿山复垦、受损严重的河岸带、滨海湿地等。受损生态系统具备一定的自然恢复能力,不仅要消除引起退化的人为干扰,还需进一步积极生物干预(控制外来入侵物种和重新引入本土物种)或非生物干预(污染修复、恢复动物生境廊道、栖息地环境营造)措施以修复生物或非生物损伤。此外,由于很多受损生态系统类型的自然恢复通常需要数年或更长的时间,社会公众压力因素会干预或加速修复过程,这也是城市的受损或退化区域通常采用主动修复技术模式的原因^[97]。例如在开展河岸带生态修复的过程中,管理人员采取主动修复策略,使用多种技术来干预以促进修复,包括恢复洪水侵袭之前的地形地貌或者河道、重新种植河岸带植物、调控河流水文以控制洪水频次等^[28,98]。主动修复模式通过人为干预使得退化过程得到有效遏制,在较短的时间内恢复生态系统结构和功能,但后期维持修复效果需要较多的管理和投入。

多摩川河是日本东京湾区的一条主要河流,流经神奈川县、东京都等城市,全长 136 km,流域面积约 1249 km²。作为一条典型的城市群区域河流,在 20 世纪 50 年代以来的快速城市化过程中,由于河流上游建造水坝,水量调控、采挖河床砾石等持续的人类活动干扰,河流生态系统健康受到严重影响,导致河床裸露、外来植物形成优势群落^[99-100]。开展生态修复的是多摩川河中游河段,修复工程目标是恢复河流生态健康,恢复乡土植物群落。由于河床沉积物的缺失,如果采用自然恢复的话可能需要上百年的时间,因此该工程采用主动修复模式,通过人工增宽和增加沉积物以恢复砾石河床。此外,为了对濒危乡土植物 *Aster kantoensis* 的进行有效保护和恢复,人工地方式去除了细颗粒泥沙及外来入侵物种 *Robinia pseudoacacia* 已有群落。通过生态修复,濒危乡土草本植物 *Aster kantoensis* 和砾石洪泛平原特有昆虫 *Eusphingonotus japonicus* 的种群数量在较短的时

间内恢复了。

4.2.3 重建

重建是指人为地在受损生境中重建生态系统,替代原有生态平衡的新的生态系统的修复模式。受损生态系统的自然恢复能力已基本丧失,开展生态修复不仅需要消除所有可能引发退化的生物与非生物因素,还需要重新引入其所有或大部分本地生物群落以重建适应本地特征的生态系统。新的生态系统往往区别于受损前的生态系统,这一模式通常在湾区常见于湿地生态系统的生态修复过程。湿地的重建需要选取生态重建的地点、提供合适的外部环境条件(包括水文、土壤、气候等条件)、重建生物群落和后期管理等^[101-102]。云南异龙湖的湿地生态修复工程采用重建修复模式,通过筛选适宜的湿地物种,建成以湿生乔木和水生植物复合生态结构的湖滨湿地,实现了植被盖度 60%以上、生物多样性较高等多个修复目标^[103]。

5 展望

世界正在进入一个生态修复时代,湾区是开展退化生态系统和景观生态修复的重要区域。开展湾区生态修复应建立在多学科知识的理论基础上,使用可衡量的指标对明确的修复目标进行评估,在生态系统的完整性、稳定性和可持续性生态学原理指导下,参考本地生态系统并考虑环境变化因素,科学制定生态修复方案。因地制宜,采用适合的技术手段支持和优化生态系统修复过程,实现生态系统从结构到功能的修复,从而改善个人、社区和国家层面的人类福祉,实现不同层次的生态服务效益。

回顾国内外湾区生态修复的理论与技术模式,对照全国及广东省开展的生态修复项目,今后应围绕“理论、思维和管理”关注以下三个方面:

(1) 湾区生态修复应重视生态学理论指导,改变重工程、轻生态,重短期工程技术措施、忽略长期自然演变规律的弊端;应依托自然科学知识,利用自然科学规律,科学开展不同类型、不同阶段的生态修复实践活动。

(2) 湾区生态修复应树立系统思维,以区域生态功能恢复为目标。大规模的生态修复会产生累积价值,应多维度看待生态修复的生态、社会和经济价值。在修复受损自然生态系统的同时,也修复了因生态系统损坏而导致的人与自然、人与人之间关系的损害。

(3) 湾区生态修复应构建“规划设计-过程实施-监测评估-修复维护”全生命周期的管理机制。重视对生态修复过程中监测数据的获取、生态修复效果的定量评价和修复的可持续性管理等方面。

参考文献(References):

- [1] Nicholls R J, Wong P P, Burkett V R, Codignotto J O, Hay J E, McLean R F, Ragoonaden S, Woodroffe C D. Coastal systems and low-lying areas//Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, Van der Linden P J, Hanson C E, eds. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 315-356.
- [2] Sutherland W J, Armstrong-Brown S, Armsworth P R, Tom B, Brickland J, Campbell C D, Chamberlain D E, Cooke A I, Dulvy N K, Dusic N R, Fitton M, Freckleton R P, Godfray H C J, Grout N, Harvey H J, Hedley C, Hopkins J J, Kift N B, Kirby J, Kunin W E, Macdonald D W, Marker B, Naura M, Neale A R, Oliver T, Osborn D, Pullin A S, Shardlow M E A, Showler D A, Smith P L, Smithers R J, Solandt J L, Spencer J, Spray C J, Thomas C D, Thompson J, Webb S E, Yalden D W, Watkinson A R. The identification of 100 ecological questions of high policy relevance in the UK. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(4): 617-627.
- [3] Pôle-relais Zones Humides. Les services écosystémiques de la mangrove. [2020-04-10]. <https://www.pole-tropical.org/zones-humides-doutre-mer/services-ecosystemiques/>.
- [4] National Institute for Environmental Studies, Japan. Connecting green bonds to sustainable urban development. [2020-04-10]. <https://www.cger.nies.go.jp/gcp/workshop-on-practice-and-research-in-urban-sustainability-assessment.html>.
- [5] Bay Area Open Space Council. The conservation lands network 2.0 Report. [2020-04-10]. <https://www.bayarealands.org/maps-data/>.
- [6] The Government of Hong Kong SAR. Hong Kong's role in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. [2020-04-20]. <https://www.bayarea.gov.hk/en/symposium/index.html>.
- [7] Wang M X, Zhao H H, Cui J X, Fan D, Lv B, Wang G, Li Z H, Zhou G J. Evaluating green development level of nine cities within the Pearl

- River Delta, China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 315-323.
- [8] 粤港澳大湾区区域空气监测网络. 粤港澳大湾区区域空气监测网络 2018 年监测结果报告 (简体版). [2020-04-20]. http://gdee.gd.gov.cn/kqjc/content/post_2725979.html.
- [9] Tokyo Metropolitan Government. Air quality monitoring report 2018 of Tokyo Metropolitan area. [2020-04-20]. https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/data/publications/air/300200a20180301163730638.files/2018_taikisokutei.pdf.
- [10] Bay Area Air Quality Management District. 2018 annual bay area air quality summary. [2020-04-20]. <https://www.baaqmd.gov/about-air-quality/air-quality-summaries>.
- [11] 广东省生态环境厅. 2018 年度广东省生态环境状况公报. [2020-04-20]. http://gdee.gd.gov.cn/xwfb4199/content/post_2498588.html.
- [12] 胡平, 郑兆勇, 吴玲玲, 黄毅. 海岸线生态产品价值怎样实现? ——聚焦粤港澳大湾区海洋经济高质量发展. *中国自然资源报*, (2020-03-23) [2020-04-10]. http://www.mnr.gov.cn/dt/hy/202003/t20200323_2502578.html.
- [13] 刘旭拢, 邓孺孺, 许剑辉, 宫清华. 近 40 年来珠江河口区海岸线时空变化特征及驱动力分析. *地球信息科学学报*, 2017, 19(10): 1336-1345.
- [14] 李婧, 王爱军, 李团结. 近 20 年来珠江三角洲滨海湿地景观的变化特征. *海洋科学进展*, 2011, 29(2): 170-178.
- [15] 赵蒙蒙, 寇杰锋, 杨静, 赵文静. 粤港澳大湾区海岸带生态安全问题与保护建议. *环境保护*, 2019, 47(23): 29-34.
- [16] MacDougall A S, McCann K S, Gellner G, Turkington R. Diversity loss with persistent human disturbance increases vulnerability to ecosystem collapse. *Nature*, 2013, 494(7435): 86-89.
- [17] Michener W K, Blood E R, Bildstein K L, Brinson M M, Gardner L R. Climate change, hurricanes and tropical storms, and rising sea level in coastal wetlands. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 770-801.
- [18] Flannigan M D, Stocks B J, Wotton B M. Climate change and forest fires. *Science of the Total Environment*, 2000, 262(3): 221-229.
- [19] Dodson E K, Fiedler C E. Impacts of restoration treatments on alien plant invasion in *Pinus ponderosa* forests, Montana, USA. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(5): 887-897.
- [20] Acharya A K, Kafle N. Land degradation issues in Nepal and its management through agroforestry. *Journal of Agriculture and Environment*, 2009, 10: 133-143.
- [21] Yang H F, Mu S J, Li J L. Effects of ecological restoration projects on land use and land cover change and its influences on territorial NPP in Xinjiang, China. *CATENA*, 2014, 115: 85-95.
- [22] Zhou H J, Shi P J, Wang J A, Yu D, Gao L. Rapid urbanization and implications for river ecological services restoration: case study in Shenzhen, China. *Journal of Urban Planning and Development*, 2011, 137(2): 121-132.
- [23] Escarré J, Lefebvre C, Raboyeau S, Dossantos A, Gruber W, Marel J C C, Frérot H, Noret N, Mahieu S, Collin C, Van Oort F. Heavy metal concentration survey in soils and plants of the Les Malines mining district (Southern France): implications for soil restoration. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 216(1/4): 485-504.
- [24] Gann G D, McDonald T, Walder B, Aronson J, Nelson C R, Jonson J, Hallett J G, Eisenberg C, Guariguata M R, Liu J G, Hua F Y, Echeverría C, Gonzales E, Shaw N, Decler K, Dixon K W. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 2019, 27(S1): S1-S46.
- [25] Clewell A F, Aronson J. *Ecological Restoration: Principles, Values, and Structure of an Emerging Profession*. Washington: Island Press, 2013.
- [26] Wilcox D A, Whillans T H. Techniques for restoration of disturbed coastal wetlands of the Great Lakes. *Wetlands*, 1999, 19(4): 835-857.
- [27] Keenleyside K, Dudley N, Cairns S, Hall C, Stolton S. *Ecological restoration for protected areas: principles, guidelines and best practices*. Gland: The World Conservation Union (IUCN), 2012: 120.
- [28] Perrow M R, Davy A J. *Handbook of Ecological Restoration: Volume 1: Principles of Restoration*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [29] Hobbs R J, Harris J A. Restoration ecology: repairing the earth's ecosystems in the new millennium. *Restoration Ecology*, 2001, 9(2): 239-246.
- [30] Chazdon R L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 2008, 320(5882): 1458-1460.
- [31] Walker L R, Walker J, Hobbs R J. *Linking Restoration and Ecological Succession*. New York: Springer, 2007.
- [32] Holling C S. Engineering resilience versus ecological resilience//Schulze P C, ed. *Engineering within Ecological Constraints*. Washington: National Academy Press, 1996: 32.
- [33] Loreau M, De Mazancourt C. Biodiversity and ecosystem stability: a synthesis of underlying mechanisms. *Ecology Letters*, 2013, 16(S1): 106-115.
- [34] Sasaki T, Furukawa T, Iwasaki Y, Seto M, Mori A S. Perspectives for ecosystem management based on ecosystem resilience and ecological thresholds against multiple and stochastic disturbances. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 395-408.
- [35] Bestelmeyer B T. Threshold concepts and their use in rangeland management and restoration: the good, the bad, and the insidious. *Restoration Ecology*, 2006, 14(3): 325-329.

- [36] Funk J L, Cleland E E, Suding K N, Zavaleta E S. Restoration through reassembly: plant traits and invasion resistance. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(12): 695-703.
- [37] Bell S S, Fonseca M S, Motten L B. Linking restoration and landscape ecology. *Restoration Ecology*, 1997, 5(4): 318-323.
- [38] McRae B H, Hall S A, Beier P, Theobald D M. Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits. *PLoS One*, 2012, 7(12): e52604.
- [39] Jones K B, Zurlini G, Kienast F, Petrosillo I, Edwards T, Wade T G, Li B L, Zaccarelli N. Informing landscape planning and design for sustaining ecosystem services from existing spatial patterns and knowledge. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 1175-1192.
- [40] Larsen L G, Harvey J W. Modeling of hydroecological feedbacks predicts distinct classes of landscape pattern, process, and restoration potential in shallow aquatic ecosystems. *Geomorphology*, 2011, 126(3/4): 279-296.
- [41] Benayas J M R, Newton A C, Diaz A, Bullock J M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science*, 2009, 325(5944): 1121-1124.
- [42] Minello T J, Rozas L P. Nekton in gulf coast wetlands: fine - scale distributions, landscape patterns, and restoration implications. *Ecological Applications*, 2002, 12(2): 441-455.
- [43] Ren H, Wu X M, Ning T Z, Huang G, Wang J, Jian S G, Lu H F. Wetland changes and mangrove restoration planning in Shenzhen Bay, Southern China. *Landscape and Ecological Engineering*, 2011, 7(2): 241-250.
- [44] Nilsson C, Aradóttir Á L. Ecological and social aspects of ecological restoration: new challenges and opportunities for northern regions. *Ecology and Society*, 2013, 18(4): 35.
- [45] 马世骏, 王如松. 社会—经济—自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [46] Mishra A, Clark J H. *Green Materials for Sustainable Water Remediation and Treatment*. Cambridge: RSC Publishing, 2013.
- [47] Hyman M, Dupont R R. *Groundwater and Soil Remediation: Process Design and Cost Estimating of Proven Technologies*. Reston: ASCE Press, 2001.
- [48] Wang L K, Pereira N C, Hung Y T. *Air Pollution Control Engineering*. Totowa: Humana Press, 2004.
- [49] Bainbridge D A, Fidelibus M, MacAller R. Techniques for plant establishment in arid ecosystems. *Ecological Restoration*, 1995, 13(2): 190-197.
- [50] Heywood V H, Iriondo J M. Plant conservation: old problems, new perspectives. *Biological Conservation*, 2003, 113(3): 321-335.
- [51] Young T P, Petersen D A, Clary J J. The ecology of restoration: historical links, emerging issues and unexplored realms. *Ecology Letters*, 2005, 8(6): 662-673.
- [52] 欧阳志云, 郑华, 高吉喜, 黄宝荣. 区域生态环境质量评价与生态功能区划. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [53] Bergstrom J C, Loomis J B. Economic valuation of river restoration: an analysis of the valuation literature and its uses in decision-making. *Water Resources and Economics*, 2017, 17: 9-19.
- [54] Brew D S, Williams P B. Predicting the impact of large-scale tidal wetland restoration on morphodynamics and habitat evolution in south San Francisco Bay, California. *Journal of Coastal Research*, 2010, 26(5): 912-924.
- [55] Calder R S D, Shi C J, Mason S A, Olander L P, Borsuk M E. Forecasting ecosystem services to guide coastal wetland rehabilitation decisions. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 101007.
- [56] Chen W Y. Environmental externalities of urban river pollution and restoration: a hedonic analysis in Guangzhou (China). *Landscape and Urban Planning*, 2017, 157: 170-179.
- [57] Chen X C, Huang Y Y, Yang H L, Pan L P, Perry D C, Xu P, Tang J W, You W H, He X Y, Wen Q. Restoring wetlands outside of the seawalls and to provide clean water habitat. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137788.
- [58] Cheng S, McBride J R. Restoration of the urban forests of Tokyo and Hiroshima following World War II//Tidball K G, Krasny M E, eds. *Greening in the Red Zone*. Dordrecht: Springer, 2014: 225-248.
- [59] Dwyer P G, Knight J M, Dale P E R. Planning development to reduce mosquito hazard in coastal peri-urban areas: case studies in NSW, Australia//Maheshwari B, Singh V P, Thoradeniya B, eds. *Balanced Urban Development: Options and Strategies for Liveable Cities*. Cham: Springer, 2016: 555-574.
- [60] Filoso S, Smith S M C, Williams M R, Palmer M A. The efficacy of constructed stream-wetland complexes at reducing the flux of suspended solids to Chesapeake Bay. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(15): 8986-8994.
- [61] Foxgrover A C, Marvin-DiPasquale M, Jaffe B E, Fregoso T A. Slough evolution and legacy mercury remobilization induced by wetland restoration in South San Francisco Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 220: 1-12.
- [62] Furukawa K. Case studies for urban wetlands restoration and management in Japan. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 81: 97-102.
- [63] Gift D M, Groffman P M, Kaushal S S, Mayer P M. Denitrification potential, root biomass, and organic matter in degraded and restored urban riparian zones. *Restoration Ecology*, 2010, 18(1): 113-120.

- [64] Golet G H, Brown D L, Carlson M, Gardali T, Henderson A, Holl K D, Howell C A, Holyoak M, Hunt J W, Kondolf G M, Larsen E W, Luster R A, McClain C, Nelson C, Paine S, Rainey W, Rubin Z, Shilling F, Silveira J G, Swagerty H, Williams N M, Wood D M. Successes, failures and suggested future directions for ecosystem restoration of the middle Sacramento River, California. *San Francisco Estuary and Watershed Science*, 2013, 11(3): 1-29.
- [65] Goodall H, Cadzow A. The people's national park: working-class environmental campaigns on Sydney's Georges River, 1950-67. *Labour History*, 2010, (99): 17-36.
- [66] Greening H, Janicki A, Sherwood E T, Pribble R, Johansson J O R. Ecosystem responses to long-term nutrient management in an urban estuary: Tampa Bay, Florida, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 151: A1-A16.
- [67] Hermosilla J J, Tamura Y, Okazaki D, Hoshino Y, Moteki M, Kohno H. Seasonal pattern and community structure of fishes in the shallow tidal creek of Obitsu-gawa River Estuary of inner Tokyo Bay, central Japan. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 2012, 5(5): 337-355.
- [68] Kendrot S R. Restoration through eradication: protecting Chesapeake Bay marshlands from invasive nutria (*Myocastor coypus*)//Island Invasives: Eradication and Management. *Proceedings of the International Conference on Island Invasives*. Switzerland: IUCN, 2011: 313-319.
- [69] Lipcius R N, Burke R P. Successful recruitment, survival and long-term persistence of eastern oyster and hooked mussel on a subtidal, artificial restoration reef system in Chesapeake Bay. *PLoS One*, 2018, 13(10): e0204329.
- [70] Diao L W, Meng W Q. Application of ecological restoration and sustainable design concept in Hong Kong Wetland Park. *Journal of Landscape Research*, 2014, 6(3/4): 45-49.
- [71] Lu S G, Bai S Q. Contamination and potential mobility assessment of heavy metals in urban soils of Hangzhou, China: relationship with different land uses. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(7): 1481-1490.
- [72] Luo T Q. Ecological restoration of the west lake in Hangzhou, China. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 2019, 7(1): 31-49.
- [73] Mo M. Herpetofaunal community of the constructed Lime Kiln Bay Wetland, south Sydney, New South Wales. *The Victorian Naturalist*, 2015, 132(3): 64-72.
- [74] Nishihiro J, Nishihiro M A, Washitani I. Restoration of wetland vegetation using soil seed banks: lessons from a project in Lake Kasumigaura, Japan. *Landscape and Ecological Engineering*, 2006, 2(2): 171-176.
- [75] Ohmura T, Arai Y, Kondo T, Hosokawa Y. Utilization of adaptive management technique for restoration of large-scale tidal flat in Tokyo bay// *Proceedings of ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Shanghai: ASME, 2010: 1-9.
- [76] O'Meara J, Darcovich K. Twelve years on: ecological restoration and rehabilitation at Sydney Olympic Park. *Ecological Management & Restoration*, 2015, 16(1): 14-28.
- [77] Orzetti L L, Jones R C, Murphy R F. Stream condition in Piedmont streams with restored riparian buffers in the Chesapeake Bay Watershed. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 46(3): 473-485.
- [78] Russell M, Greening H. Estimating benefits in a recovering estuary: Tampa Bay, Florida. *Estuaries and Coasts*, 2015, 38(S1): 9-18.
- [79] Sandoval E, Price R M, Whitman D, Melesse A M. Long-term (11 years) study of water balance, flushing times and water chemistry of a coastal wetland undergoing restoration, Everglades, Florida, USA. *CATENA*, 2016, 144: 74-83.
- [80] Shao X X, Sheng X C, Wu M, Wu H, Ning X. Methane production potential and emission at different water levels in the restored reed wetland of Hangzhou Bay. *PLoS One*, 2017, 12(10): e0185709.
- [81] Statton J, Dixon K W, Hovey R K, Kendrick G A. A comparative assessment of approaches and outcomes for seagrass revegetation in Shark Bay and Florida Bay. *Marine and Freshwater Research*, 2012, 63(11): 984-993.
- [82] Tanaka N, Demise T, Ishii M, Shoji Y, Nakaoka M. Genetic structure and gene flow of eelgrass *Zostera marina* populations in Tokyo Bay, Japan: implications for their restoration. *Marine Biology*, 2011, 158(4): 871-882.
- [83] Tokunaga K, Sugino H, Nomura H, Michida Y. Norms and the willingness to pay for coastal ecosystem restoration: a case of the Tokyo Bay intertidal flats. *Ecological Economics*, 2020, 169: 106423.
- [84] Vergés A, Campbell A H, Wood G, Kajlich L, Eger A M, Cruz D, Langley M, Bolton D, Coleman M A, Turpin J, Crawford M, Coombes N, Camilleri A, Steinberg P D, Marzinelli E M. Operation crayweed: ecological and sociocultural aspects of restoring Sydney's underwater forests. *Ecological Management & Restoration*, 2020, 21(2): 74-85.
- [85] Williams M R, Bhatt G, Filoso S, Yactayo G. Stream restoration performance and its contribution to the Chesapeake Bay TMDL: Challenges posed by climate change in urban areas. *Estuaries and Coasts*, 2017, 40(5): 1227-1246.
- [86] Wright I A, Davies P J, Findlay S J, Jonasson O J. A new type of water pollution: concrete drainage infrastructure and geochemical contamination of urban waters. *Marine and Freshwater Research*, 2011, 62(12): 1355-1361.

- [87] Yu H L, Li S Y, Wang A H, Kuang Y W, Wang F G, Xing F W. Accumulation of Heavy Metals and As in the Fern *Blechnum orientale* L. from Guangdong Province, Southern China. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2020, 231(7): 342.
- [88] Zhang Q, Han R C, Zou F S. Effects of artificial afforestation and successional stage on a lowland forest bird community in southern China. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(11): 1738-1749.
- [89] Zhou L Y, Li Z L, Liu W, Liu S H, Zhang L M, Zhong L Y, Luo X M, Liang H. Restoration of rare earth mine areas: organic amendments and phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(21): 17151-17160.
- [90] 彭辉武, 郑松发, 朱宏伟. 珠海市淇澳岛红树林恢复的实践. *湿地科学*, 2011, 9(1): 97-100.
- [91] 吴中奎, 邱小常, 张修峰, 刘正文, 唐雅丽. 富营养化浅水湖泊生态修复中背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)对水质改善的影响. *湖泊科学*, 2018, 30(6): 1610-1615.
- [92] 徐华林, 彭逸生, 葛仙梅, 李适宇, 管东生, 陈桂珠. 基于红树林种植的滨海湿地恢复效果研究. *湿地科学与管理*, 2012, 8(3): 36-40.
- [93] 张晓红, 宋肖锋, 蔡国强, 李世玉, 沈小红, 蔡建海. 生态修复综合技术在杭州虾龙圩河的应用. *环境工程学报*, 2012, 6(12): 4535-4542.
- [94] McIver J, Starr L. Restoration of degraded lands in the interior Columbia River basin: passive vs. active approaches. *Forest Ecology and Management*, 2001, 153(1/3): 15-28.
- [95] Keesstra S, Nunes J, Novara A, Finger D, Avelar D, Kalantari Z, Cerdà A. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2018, 610-611: 997-1009.
- [96] Hodačová D, Prach K. Spoil heaps from brown coal mining: technical reclamation versus spontaneous revegetation. *Restoration Ecology*, 2003, 11(3): 385-391.
- [97] Holl K D, Aide T M. When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(10): 1558-1563.
- [98] Van Andel J, Aronson J. *Restoration Ecology: the New Frontier*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012.
- [99] Shimatani Y. Restoration of river channel morphology at the Nagata Area in the Tama River. *Ecology and Civil Engineering*, 2003, 5(2): 233-240.
- [100] Kuramoto N, Takenaka A, Washitani I, Inoue K. A conservation biology of *Aster kantoensis* growing along the Tama River. *Journal of Japanese Institute of Landscape Architecture*, 1992, 55(5): 199-204.
- [101] Kentula M E. Perspectives on setting success criteria for wetland restoration. *Ecological Engineering*, 2000, 15(3/4): 199-209.
- [102] National Research Council. *Compensating for Wetland Losses Under the Clean Water Act*. Washington: The National Academies Press, 2001.
- [103] 陈静, 刘梅, 卿小燕, 王开有, 孔德平, 范亦农, 李杰, 周启超. 异龙湖退塘还湖区基底修复技术工程应用研究. *环境科学与技术*, 2014, 37(S2): 432-436.