

滨海湿地生物地貌学进展及在生态修复中的应用展望*

陈一宁¹ 陈鹭真² 蔡廷禄¹ 夏小明¹

(1. 自然资源部第二海洋研究所 杭州 310012; 2. 厦门大学 生态与环境学院 厦门 361005)

摘要 生物地貌学研究生物过程和地貌过程之间的双向交互作用, 是一门新兴的交叉学科。早期的生物地貌学关注陆地生态系统, 近期海岸带成为生物地貌学研究的热点地区, 尤其是滨海湿地(如盐沼、红树林)成为研究生物地貌学过程和机理的重要区域。本文回顾了生物地貌学研究的概念、历史发展和方法, 选取滨海湿地作为生物地貌学的主要研究对象, 并就其研究方向、重要因素以及核心机制展开综述。最后对生物地貌学在海岸带生态系统修复工作中的应用进行梳理, 分析了生物地貌学在红树林修复、滨海盐沼湿地修复和互花米草入侵防控上的应用展望。

关键词 生物地貌学; 生态修复; 盐沼湿地; 红树林

中图分类号 P737.1 **doi:** 10.11693/hyh20200300072

近年来, 随着地球关键带(Critical Zone)概念的提出, 地表-土壤圈-水圈-生物圈作为一个有机的整体联系起来, 几个圈层通过交互作用来推动系统演化。关键带所提出的几大圈层交互作用系统的概念目前已经成为国际海岸带研究的新热点(Lin, 2009; Richter *et al.*, 2009; 安培浚等, 2016)。近岸生物地貌学研究海岸带生物过程(生物圈)和沉积物-动力-地貌过程(土壤圈-水圈-地表)之间的双向交互作用(张乔民等, 2006; Murray *et al.*, 2008), 结合生物地貌学和关键带的概念来开展滨海湿地系统研究已成为国际上具有前瞻性的研究领域。

生物和地貌之间的相互作用研究已有很长的历史。我国先秦时期的著作《管子·地员》就已经记载了此类研究的相关内容。书中记载“凡草土之道, 各有穀造, 或高或下, 各有草土。叶下于鬱; 鬱下于苳(莞); 莞下于蒲; 蒲下于苇; 苇下于藿; 藿下于菱; 菱下于葑; 葑下于萧; 萧下于薛; 薛下于萑; 萑下于茅。”这段话描述了沼泽植物带状分布受到高程和水文影响的特征(夏纬瑛, 1981), 属于生物地貌学研究的范畴。生物地貌学领域最早发表的论文可以追溯到1881

年, 由达尔文发表的关于虫类活动影响腐殖土壤层形成过程的研究(Darwin, 1881)。生物地貌学(Biogeomorphology或者Ecogeomorphology)这个概念是由牛津大学H. A. Viles在1988年首次明确提出的, 研究范畴属于典型的地貌学和生物学交叉学科。传统的生物地貌学关注生物学和地貌学的交互作用过程, 特别是生物对地貌过程的改造作用以及地貌过程影响生物分布的问题(Viles, 1988; Parker *et al.*, 1996; Stallins, 2006)。从英文Biogeomorphology来看, 是在Geomorphology(地貌学)前面加入了一个限定词“Bio”, 因此, 传统生物地貌学的研究基本上以地貌学的研究方法为主, 生物学所起的作用较弱(Haussmann, 2011)。近年来, 有学者提出用生物地貌动力学(Biomorphodynamics)来更加精准地表述生物-地貌过程之间的双向交互作用(Murray *et al.*, 2008), 聚焦在生物和地貌过程之间的双向交互作用过程和反馈机制的分析, 即生物对地貌过程的影响机制以及地貌过程对生物甚至生态系统发育的反馈机制(Stallins, 2006; Murray *et al.*, 2008)。该类研究遵循“生物-动力沉积过程-地貌”这一从微观动力过程到宏观地貌体

* 国家自然科学基金, 41776096 号, 41476071 号。陈一宁, 副研究员, E-mail: yiningchen@sio.org.cn

收稿日期: 2020-03-13, 收修改稿日期: 2020-04-22

系的思路,通过双向反馈机理的研究,试图解析生态系统发育的关键物理过程和驱动力,使得生物学或者说生态学在生物地貌学的比重得到了很大的提高。

1 生物地貌学的研究方法

生物地貌学的研究方法结合了生态学和地貌学各自的特点。Richards(1996)曾经把研究方法论分为两大类:大样本研究和小样本研究。大样本研究着重纵向连接,即通过大样本发现规律并提高规律的可重复性;而小样本研究着重横向连接,即从具有代表性的小样本出发,开展针对可能相关的多个因素的同步观测和实验,通过分析和推理来寻求各个因素之间的连接机制。从方法论上来看,生物学(生态学)的研究方法和地貌学的研究方法属于两种不同的类型(Haussmann, 2011)。生物学(生态学)所采用的方法属于大样本研究,通常基于大量的重复观测数据,通过统计学假设检验和分析来获取结论。地貌学的研究更接近于小样本的研究方法论(Haussmann, 2011),主要基于多因素的观测和分析来达到对具体过程和机理的理解。到目前为止,这两种研究方法在生物地貌学领域的完美结合案例还非常有限。生物地貌学更多采用的是地貌学的方法(Haussmann, 2011),特别是现阶段所采用的生物地貌数值模拟工作,绝大多数以地貌学的理论作为基础(Fagherazzi *et al.*, 2004; Temmerman *et al.*, 2005; Horstman *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2016; Gong *et al.*, 2018)。

随着研究理念更新、观测手段的发展以及大数据概念的普及,大样本分析和小样本分析在生物地貌学领域内有望得到统一(图1)。观测手段的发展主要是基于更多参数、更多样本的同步获取,比如高分辨率和高光谱遥感技术的发展;大数据则是数据存储、传递和分析的手段。遥感影像不仅仅是大范围、大样本规律在平面上的体现,同时也能够反映部分动力过程(如波流交互作用, Zhang *et al.*, 2015)。因此,通过遥感影像的分析,不仅可以重复捕捉生态学的大样本规律,还能够联系地貌学的动力机制,在生物地貌学内部达到方法上的贯通。举例来说,随着高分辨率遥感影像的获取和积累,生物地貌学家通过下载多源、多时的遥感影像进行分析,利用大数据获取大尺度的生物学(生态学)规律。在此基础上,选择典型区域,进行关键动力过程和机制的观测或模拟,形成小样本分析,最终获取结论。这个结论具有普适性,不局限于所研究的小范围区域。

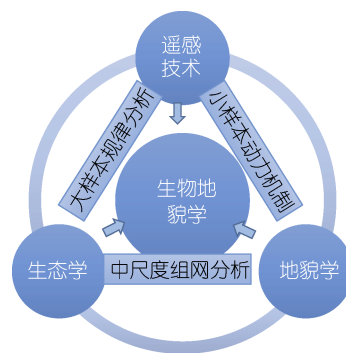


图1 生物地貌学的方法路线图

Fig.1 Framework of methodology in biogeomorphology

生物地貌学还可以通过建立中尺度的定位观测网,将大样本规律分析和小样本动力机制研究联系起来。生物地貌学的中尺度定位观测方法在湿地生态系统中有不少案例,如多地布设固定标志桩监测高程变化,用砖屑、长石粉等人工标记监测沉积物淤积速率(Woodroffe, 1992; Callaway *et al.*, 2013)。美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)在1995年建立的地表高程监测系统,并与人工标志层方法相结合形成地表高程-标志层监测系统(Surface Elevation Table-Marker Horizon, SET-MH)。这种中等分辨率的定位观测方法,近年来在美洲、太平洋地区的红树林和盐沼湿地中广为应用(Krauss *et al.*, 2014; Lovelock *et al.*, 2015)。该测定可以多年连续监测统一位点的高程变化率、淤积速率、计算浅层沉积物压实作用,精度达到毫米级别;若结合根区生长监测,还可获得植物根系生长对高程变化的贡献(Lynch *et al.*, 2015)。在多区域建立这种中尺度定位的观测站点,再通过多地监测网络的建立实现观测手段的升级。SET的监测网络可以在小样本尺度的机制研究和大样本规律分析之间建立桥梁,实现从地貌学作用机制、生物与环境作用过程,到大尺度生态格局的上推,凸显生物地貌学研究手段的优越性。例如, Lovelock *et al.*(2015)整合了印度-太平洋海岸带红树林各SET样点的监测数据、地形数据和水文站数据,进行了该区域红树林在未来海平面上升过程中的脆弱性分析。

2 滨海湿地生物地貌学的研究方向

早期生物地貌学研究主要集中在陆地系统,比如干旱半干旱地区植物对沙丘的固定作用、植物对流域沉积和侵蚀过程的改造作用以及植物对岸坡稳定性的影响等(Porporato *et al.*, 2002; Murray *et al.*,

2003, 2008)。Stine等(2011)收集了1939—2007年之间的地貌学教科书,发现尽管海岸带生物地貌学的研究在近年来才开始兴起,生物地貌学主题出现频率最高的是在海岸地貌学章节。事实上,由于植被和底栖动物的存在,使滨海湿地成为研究生物地貌学的一个重要场所(张乔民等, 2006)。大型植物在生物地貌研究中所起的作用尤为显著:它们的生长能显著改造沉积动力过程(Knutson *et al.*, 1982; 时钟, 1997; 李华等, 2007; Nepf, 2012; Horstman *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2016, 2018);反之,其生长和空间扩张速率也受到沉积速率、淹没时间、盐度等地貌学相关要素的制约(Huckle *et al.*, 2000; 陈鹭真等, 2005; Saintilan *et al.*, 2006; Ellison, 2008; Lovelock *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2018),形成一个具有正负反馈机制的系统(Viles *et al.*, 2008)。

从近年来的发展来看,滨海湿地生物地貌学在不同方向上取得了一定的突破和进展。主要研究方向包括以下四个方面:1)从传统的流域到近岸环境的生物地貌学知识转化和扩展,这个方面的研究进展可参考Nepf发表于2012年的综述(Nepf, 2012)。2)生物护岸功能的定量化研究。在欧洲, Moller等人结合现场观测、室内模拟和数模手段研究了风暴条件下的植物护岸作用(Möller *et al.*, 2014),是这方面研究的典型案例。3)生物地貌学在生态修复技术上的应用,比如荷兰北海沿岸滨海湿地的生态修复理论与应用研究(van de Koppel *et al.*, 2005; Balke *et al.*, 2011)。4)生物地貌学在滨海湿地碳埋藏研究中的应用,这类研究的主要热点区域在澳洲,生物地貌学过程被认为是研究碳埋藏过程不可缺失的环节(Lovelock *et al.*, 2015; Rogers *et al.*, 2019)。

3 滨海湿地生物地貌学的关键因素研究

高程变化是影响潮间带植物生长和演替的一个重要因素。它会引起淹没(inundation/waterlogging)时间/频率的变化。潮滩植物的生长状况受淹没时间的制约,过长或过短的淹没时间对植物的生长尤其不利(Howes *et al.*, 1986; Chen *et al.*, 2004, 2005)。由于对淹没时间的长期适应,不同潮滩植物稳定地生长在其最适高程范围内,进而形成潮间带植被的分带现象(Zonation)(Keddy, 2010)。一些群落演替早期的植物(如红树植物中的白骨壤、海桑),由于适应了较长时间的潮汐浸淹而分布在群落向海一侧;而群落演替后期的物种(如木榄和水椰),由于不适应长时间淹没

而分布在高程较高的陆向边缘。红树植物和盐沼植物的根系生长对于高程增加有很大贡献。植物根系支撑了根区土壤体积、根系生长可使沉积物的体积发生膨胀,使高程增加(Cahoon *et al.*, 2003)。在佛罗里达和巴西的红树林中,根系生长使高程以0.12—1.18cm/a的速度增加(McKee, 2011)。当植物死亡后,根系分解常常可导致土壤结构的塌陷、高程降低;例如洪都拉斯的一处红树林死亡后,潮滩高程以1.1cm/a的速度降低(Cahoon *et al.*, 2003)。

高程变化通常和潮滩的垂向淤积速率联系在一起。由于潮滩的植物能够吸收潮流和波浪的能量、促进沉积物的淤积,盐沼和红树林湿地的高程变化和植物的作用密不可分(Wolanski, 1995; 张乔民等, 1996, 1997; 王爱军等, 2005; Horstman *et al.*, 2015; Lovelock *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2018)。据统计,我国的潮间带每年大约有 2×10^9 吨的沉积物输入(杨世伦, 1990)。同时,在我国潮间带广泛分布的盐沼——米草属植物,能对波浪和潮流能量起到耗散作用,捕获大量的泥沙,对于加速盐沼的垂向沉积速率起到了促进作用(汪亚平等, 1998, 1999; 王爱军等, 2005)。我国盐沼的垂向淤积速率可以比欧美地区高出几倍甚至几十倍(杨世伦等, 1994, 2001; Chen *et al.*, 2018)。例如,在我国的苏北地区,米草盐沼的沉积速率达到了3.3cm/a(王爱军等, 2005),在福建省的米草和红树林交错区,潮间带的沉积速率也达到了1cm/a以上(Alongi *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2018)。在我国,已获得的红树林垂向淤积速率数据有限,淤积速率范围在几个毫米每年到几厘米每年之间(卢昌义等, 1988; 张乔民等, 1996, 1997; 刘涛等, 2017; Chen *et al.*, 2018),整体上比欧美或者澳洲略高。

与垂向淤积速率相关的一个重要过程是植物对波浪和潮流能量的耗散作用。植物对沉积动力过程的影响主要是改变底床的摩擦力和降低紊动能,特别是植物冠层在边界层内对紊动能耗散作用(Knutson *et al.*, 1982; Shi *et al.*, 1995; Wolanski, 1995; Furukawa *et al.*, 1997; Struve *et al.*, 2003; Neumeier *et al.*, 2006; Nepf, 2012),导致沉积物容易在植物带内发生沉降。同时,植物也可以通过直接捕获沉积物以及通过根系来提高沉积物的临界起动值来进一步促进沉积物的沉降(Chen *et al.*, 2012, 2018),影响地貌过程。从整体上来看,滨海湿地内的大型植物通过“高程-淹没时间”这一关键通路达到了植物影响地貌过程和地貌过程反馈到植物生长的双向交互作用,是

生物地貌学研究的典型案例。

4 滨海湿地生物地貌学的核心机制研究

滨海湿地生物地貌学的核心问题在于阐明生物和地貌动力过程之间的双向反馈机制,即生物对沉积动力地貌过程的影响机制以及沉积动力条件和地貌过程对生物发育的反馈机制(Murray *et al.*, 2008)。从生物影响地貌的过程来看,可以分成‘稳定’与‘不

稳定’两类(Viles *et al.*, 2008, 表1),使系统趋于稳定的过程(如植物减少侵蚀)往往形成地貌系统内的负反馈机制,而使得系统趋于不稳定的过程(如沉积物导致植物被淹埋)则形成正反馈机制(Viles *et al.*, 2008)。反过来,地貌过程也对生物具有‘稳定’与‘不稳定’两种影响(表1),同样也会形成生态系统内的正负反馈机制(Viles *et al.*, 2008)。这些正负反馈机制共同决定系统的演化方向以及系统对外部条件变化的响应方式。

表 1 生物和地貌过程之间的相互影响(Viles *et al.*, 2008)
Tab.1 The interactions between biota and geomorphology (Viles *et al.*, 2008)

	稳定	不稳定
生物对地貌过程的影响	植物生长减少侵蚀	掘穴动物引起侵蚀
	表层微生物膜减少侵蚀	动物扰动表层微生物膜引起侵蚀
	植物生长提高沉积	河狸筑坝扰动流域系统
	大型树木碎屑减少流域洪峰影响并提高沉积	大型树木碎屑加强流域洪峰
地貌过程对生物的影响	动物放牧增加植物覆盖率并减少侵蚀	动物放牧增加侵蚀
	风化产物为生物膜的生长提供养分	风化引起生物膜的破裂
	沉积物为植物提供生长场所	沉积物导致植物被掩埋
	沉积物为掘穴生物提供活动场所	沉积物的运动破坏动物洞穴

在生物地貌学的动态变化中,高程和植被分布是一个典型的双向反馈过程。植物生长引起根区膨胀、地上生物量增加可促进淤积,最终导致高程的增加;这使得更多适宜该高程生长的植物聚集生长而进一步抬升高程。当高程增加到一定阶段已经超过某一物种(例如,先锋物种白骨壤)的潮汐淹没时间的上限,它将由于淹没时间过短而死亡;而另一种适宜生长在更短淹没时间的物种(例如,演替后期的秋茄)将取代它。这是一个正向演替的过程。海平面上升、风暴潮和人工砍伐这些自然和人为干扰,通过影响植被生长和生存,进而改变地貌过程(Kirwan *et al.*, 2012;

Rogers *et al.*, 2019)。

生物和地貌之间双向反馈作用的另一个典型的案例就是盐沼植物斑块的发育过程。盐沼先锋区位于地势较低的潮滩上(图2a),淹没时间长,潮波作用强,导植物生长的环境胁迫力很强,只能由先锋植物(如米草属植物、海三棱藨草和盐角草)占据,并形成小丛斑块状盐沼,最终发育成片盐沼(图2b)其次,植物斑块在盐沼后续的群落竞争和演替中也会发挥重要作用,比如说外来植物往往在原有植物群落中形成斑块,通过斑块的扩张与原有植物群落发生竞争(图2c)。



图 2 盐沼发育的几种状态

Fig.2 Saltmarsh development on the south bank of the Hangzhou Bay

注: a: 海三棱藨草斑块形成了先锋区; b: 连续分布的海三棱藨草; c: 外来种(互花米草)的斑块出现在海三棱藨草之中; 以上照片均摄自杭州湾南岸庵东浅滩

通过现场观测、植物移植实验、水槽观测和数值模拟等手段,研究人员发现盐沼先锋区内的植物斑

块变化受到正负两种反馈机制的控制: 1)从斑块内部的尺度来说,植物通过消波缓流使得局地的沉积速

率增强, 形成拱形的地貌斑块, 植物的淹没时间变短, 沉积物营养盐供给增加, 从而促进了植物的生长, 而植物的生长又会进一步改变沉积动力条件和沉积速率来创造更适于植物生长的条件, 这是盐沼斑块演化的正反馈机制; 2) 从斑块间的尺度来看, 由于植物斑块的高程比斑块间的光滩高, 潮流流速会在植物斑块间被加强, 从而侵蚀斑块间的光滩, 这个侵蚀过程通过地形对流的反馈作用进一步加强, 延长了斑块间光滩的淹没时间, 不利于植物在斑块间的生长, 形成一种负反馈机制来限制植物斑块的扩张(van de Koppel *et al.*, 2005; van Hulzen *et al.*, 2007; van Wesenbeeck, 2007; Bouma *et al.*, 2009; Vandenbruwaene *et al.*, 2011)。斑块区的演化取决于正负反馈机制最终形成的平衡态, 影响反馈机制的因素有植物的密度、斑块大小以及斑块间的距离等(Bouma *et al.*, 2009; Vandenbruwaene *et al.*, 2011)。

但是, 目前大多数的“潮间带植物斑块-动力地貌”之间的双向反馈作用研究, 主要集中于欧洲, 如荷兰的西海岸等地, 这些地区和中国的海岸带具有很大的差别。Milliman等(2011)曾经比较过全球范围内的河流入海沉积物的通量。结果表明, 亚洲东南部的入海河流, 如黄河、长江、珠江和湄公河等河流的入海沉积物总量约为30%的全球总量, 而欧洲的沉积物入海通量则非常低, 仅为6%左右。因此, 研究高沉积物输入背景下的潮滩地貌生物学, 并与低沉积物输入的海岸进行比较, 是我国生物地貌学领域发展的重大机遇。

5 滨海湿地生物地貌学在生态修复上的应用展望

国际生态修复协会近期出版了生态修复技术指南的第二修订本, 指出生态修复的整体思路为: 人为去除限制或者破坏原有生态系统发展的因子, 使得生态系统得以回归到原来的发展轨道(Gann *et al.*, 2019)。生态修复核心技术有以下几类(“4Re”): 1) 恢复(Recovery), 即主要依靠生态系统本身的自然恢复力得到恢复; 2) 修复(Restoration), 即对原有受到破坏或者发生退化的生态系统进行修复; 3) 替换(Replacement), 即利用另外一种生态系统来代替原有的、但是已经不可恢复的生态系统; 4) 重建(Reconstruction), 即选择合适的区域进行生态系统的人工重建。从整体上来看, 主要通过改变物理环境条件(如水文、地形、沉积物性质), 依靠生态系统自身的恢复能力, 利用物理过程和生

物过程的耦合来恢复湿地环境, 这也正是生物地貌学的研究内容(Field, 1999; Brooke *et al.*, 1999; Colenutt, 2001; Lewis, 2005; Rupp-Armstrong *et al.*, 2007; Walles *et al.*, 2019)。近年来, 在全球海平面变化背景下, 红树林、盐沼和海草床生态系统的修复被认为是重要的应对手段(Nellemann *et al.*, 2009), 也是生态修复工作的重点。在我国, 红树林和盐沼分布范围较广, 两者具有重要的生态服务价值以及海岸防护能力, 因此这两类滨海湿地的修复、重建和恢复在我国具有较好的效益。

从已有的生态修复实践来看, 滨海湿地生态修复工程至少需要经历六个不同的阶段(图3), 在不同的阶段, 不同的主体会发挥不同的作用。生态修复工程的第一阶段往往是相关管理部门、利益相关者提出需求, 多学科的科学家参与讨论, 提出生态修复需求。在第二阶段, 需要制定生态修复的具体目标, 即解决类似于“种什么”的问题, 在这个阶段, 往往生态学家能利用专业知识起到主导作用, 其他学科以及管理者提供辅助。在第三个阶段, 需要解决环境条件的问题, 寻找生态修复过程中关键性的环境参数, 即回答类似“种哪里”的问题。回答这一问题需要知道生物和环境之间的交互作用, 针对潮间带的特殊环境, 生物地貌学家的研究往往在这个阶段发挥重要作用。在第四个阶段, 需要通过现场试验与评估来确定生态修复的具体技术方案, 回答类似于“怎么种”这类问题, 需要生态学家和生物地貌学家的合作。最后两个阶段为具体的施工阶段和施工后续监测阶段, 一般由施工单位负责。从滨海湿地生态修复的流程来看, 最核心的问题是回答‘What’、‘Where’、‘How’这三个经典问题, 即第二到第四阶段。生态系统修复或者重建的成功率取决于生物驱动因子(eco-engineer)和关键环境因素之间的耦合程度, 这正是生物地貌学的研究内容。在后续章节, 我们将分析典型滨海湿地生态系统内进展。

5.1 红树林生态系统修复

红树林的生态修复历史可以追溯到1928年(Watson, 1928)。到目前为止, 世界上最大规模的红树林生态修复项目应该是孟加拉国林业部于1966年开始实施的孟加拉西南部海岸红树林造林工程, 该工程到1993年为止, 合计造林面积为1200km²(Saenger *et al.*, 1993)。经过多年的评估, 该区域种植的红树林最终的存活率为50%(Blasco *et al.*, 2001)。2000—2018年间, 我国进行了大规模红树林造林, 但成活率仅为



图3 滨海湿地生态修复流程图

Fig.3 The flow chart for ecological restorations

33%(范航清等, 2018)。事实上, 尽管红树林的生态修复工作在全球很多地区都开展过, 但是根据Lewis(2005)的回顾性评估, 大多数的红树林生态修复项目最终失败或者没有达到预期目标, 因为大多数的生态修复项目采用的手段是单纯种植红树林, 而忽视了红树林的自然恢复机制, 特别是红树林生长和水文、地貌等物理过程之间的交互作用。许多早期的红树林修复项目最终红树林成活率低于20%, 或者成本具有不合理性 (Sanyal, 1998; de Leon *et al.*, 1999)。国内外红树林生态修复的经验均发现: 幼苗的定植能力和淹没时间是修复成功与否两个关键因素 (林鹏, 2003; Lewis, 2005)。事实上, 幼苗(胚轴)的扩散和定植与水动力过程密切相关, 而淹没时间和动力地貌过程密不可分(Balke *et al.*, 2011, 2013; Hu *et al.*, 2015)。Lewis等(1997)根据红树林修复实践工作总结过红树林成功修复的五大原则, 最主要的思想就是红树林的生态修复必须了解自然条件下红树林发育的机制以及和沉积、动力、地貌过程之间的交互作用, 寻找适宜红树林生长的宜林地, 这正是生物地貌学研究的内容。

目前, 我国已经开展了一系列红树林生态系统修复实践; 而修复手段依然是以造林技术为核心, 选择合适的潮滩环境进行红树林的种植来恢复生态系统(彭逸生等, 2008)。我国红树林的生态修复工作可以追溯到20世纪80年代, 主要的实践区域为海南省和两广地区(廖宝文等, 1990; 范航清等, 2018)。从多年的红树林修复工作实践中, 已经发现了红树林成功定植与环境参数之间的重要相关性, 如潮滩高程(淹没时间)、盐度、水动力强度等(陈建华, 1986; 卢

昌义等, 1990; 陈鹭真等, 2006; 范航清等, 2018)。

为了探索红树林幼苗成活率和物理环境参数之间的关系, 近年来, 高精度的SET组网观测、高分辨率声学流速剖面观测以及基于光学的垂向浊度剖面观测开始应用于我国的人工红树林区生物地貌学观测(Fu *et al.*, 2018; Chang *et al.*, 2019, 2020), 试图从更加精细化的角度来解析红树林修复与沉积动力过程之间的相关性、判断适宜红树林幼苗定植生长的生物地貌关键参数。这些新的技术和新的观测, 会对生态修复工作产生重要的影响。

5.2 盐沼生态系统修复

从盐沼的生态修复工作来看, 荷兰是典型的利用盐沼植物促淤来获得土地增长的国家, 其盐沼重建和修复工作可以追溯到100年前(Blumenthal, 1966), 因此荷兰的科学家在生物地貌学的应用研究上走在世界的前列。目前荷兰开展的生态修复工作与生物地貌学的发展密不可分: 利用植物斑块生长和动力地貌过程的正负反馈机制来揭示盐沼先锋区的发育机制 (van Wesenbeeck, 2007; Bouma *et al.*, 2009; Vandenbruwaene *et al.*, 2011)在Perkpolder潮滩开展了盐沼重建工作; 利用空间自组织理论来阐释滨海湿地的发育过程和基本规律(Rietkerk *et al.*, 2008; Weerman *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2014), 该技术已经被应用在我国长江口的湿地修复中(曹浩冰等, 2016); 利用“机会窗口理论(Windows of Opportunity Theory)”来解释盐沼和红树林重建过程中的关键问题和转换状态(Balke *et al.*, 2011, 2013; Hu *et al.*, 2015; Cao *et al.*, 2018), 这一理论在印尼的红树林修复和我国长江口的盐沼重建中得到检验(Cao *et al.*, 2018)。

长江口是我国滨海盐沼开展修复工作的典型区域。崇明东滩、南汇东滩等地已经开展了滨海盐沼生态系统修复工作, 主要的技术手段包括利用围堰后淹水来进行外来物种互花米草的防治、本地种的移植和种植(袁琳等, 2008; Li *et al*, 2014; 胡忠健等, 2016; 陶燕东等, 2018)。长江口的盐沼修复过程中开展了很多与生物地貌学相关的研究, 比如植物扩散格局及机制的研究(曹浩冰等, 2016), 潮间带生物空间自组织规律的研究(Liu *et al*, 2016), 以及沉积物扰动对互花米草幼苗定植的影响(Cao *et al*, 2018)等, 这些研究是生物地貌学在生态修复工作中的典型应用, 为生态修复工作提供了很好的基础理论。值得注意的是, 我国的近岸水体具有高悬沙浓度的特点, 特别是长江口-杭州湾一带, 潮间带的细颗粒沉积物输入量高, 在借鉴国际上相关经验的同时, 需要建立适合我国潮间带盐沼环境特征的生态修复方法。

5.3 我国生态修复中互花米草入侵问题

我国于1979年引种了互花米草。到了20世纪90年代初期, 互花米草在淤泥质海岸开始快速蔓延。目前, 互花米草在我国东部沿岸占据了潮间带上部高潮位附近的大部分滩涂, 面积达到546km²(刘明月, 2018), 对原生盐沼生态系统产生了重要的影响, 也对海岸带管理工作提出了挑战。杭州湾是我国沿海互花米草盐沼环境-生态的地域性转折点(高抒等, 2014)。杭州湾以北, 全新世基底位置高, 潮间带宽度大、坡度小, 互花米草盐沼只占据潮间带的较小部分, 在海岸防护和生态系统功能上主要起正面作用; 杭州湾以南, 全新世基底高程低, 潮间带宽度小, 潮滩主要形成于海湾之内, 互花米草的扩展挤占了潮间带其他生物的生存空间, 因而有生态上的负面作用(高抒等, 2014)。互花米草和盐沼本地种、互花米草和红树林之间的竞争关系是近期生态学研究的一个热点(林鹏, 2001; 陈中义等, 2005; 张宜辉等, 2008; Zhang *et al*, 2012)。

长江口和杭州湾的盐沼是研究互花米草和盐沼本地种(以海三棱藨草为代表)的热点区域。长江口和杭州湾南岸的原生盐沼典型断面从海向陆依次分布光滩-海三棱藨草滩-芦苇滩, 但是20世纪90年代以后互花米草开始入侵, 和本地盐沼种之间产生了空间竞争(陈中义等, 2005; 李加林, 2008; Cui *et al*, 2020; Huang *et al*, 2020)。从空间格局动态变化来看, 互花米草和本地种之间的竞争结果与高程(或淹没时间)有关。崇明东滩的野外幼苗移植实验, 发现互花米草在

潮滩不同部位具有不同的竞争力, 其中沉积动力地貌过程起到了非常重要的作用(肖德荣等, 2012; Cui *et al*, 2020)。Huang等(2020)利用高分辨率遥感影像对杭州湾南岸的互花米草和海三棱藨草时空分布进行了分析, 发现在天然盐沼滩存在两种竞争模式: 盐沼上部互花米草竞争占优, 但是在盐沼前缘高程较低的滩面, 互花米草呈带状平行于等深线分布, 不具备竞争优势。以上研究说明外来物种和本地物种之间的竞争结果取决于外部非生物条件, 如沉积动力过程, 这些新的进展可应用于未来的外来物种防控工作中。

我国互花米草和红树林之间的交错区范围较广。Zhang等(2012)通过对漳江口红树林-互花米草交错区的长期生态学观测, 发现从流域到河口口门处这一盐度梯度变化很大的区域内, 在某些区域互花米草无法入侵红树林, 比如高悬沙浓度的最大浑浊带。李屹等(2017)通过遥感影像也对最大浑浊带所在区域的红树林、互花米草扩张规律进行了长时间序列的研究, 发现从较大的时空尺度来看, 互花米草没有入侵红树林。同时, 他们发现红树林能够形成平行于等深线的向外扩张, 在有潮沟的区域, 扩张速度加快, 提示两者之间的竞争和沉积动力地貌过程有关。Chen等(2016, 2018)通过对漳江口最大浑浊带内红树林-互花米草交错区边界上沉积动力地貌过程的观测, 发现红树林和互花米草对于沉积动力地貌过程的调节机制具有显著的差异性, 这可能是红树林-互花米草竞争过程中的一个重要物理机制。

因此, 从生物地貌学视角去切入潮间带物种竞争的研究, 从目前来看还具有很大的可拓展空间。事实上, 生物地貌学可以作为一个工具去解析潮间带生物竞争之间的物理机制, 即不同物种对于物理环境胁迫的不同响应方式和强度, 其中的关键在于不同物种对沉积物垂向通量的调节机制和强度不同, 最终造成空间竞争能力的差异性。更进一步, 生物地貌学的基础机制可以作为地貌学数值模拟的输入条件并构建反馈机制, 用于预测生态系统的空间分布变化。

6 总结与展望

1) 生物地貌学关注生物-地貌过程的双向交互作用过程和机理, 尽管其起源可以追溯到1881年, 但是这门学科正式确立于1988年, 是一门新兴的交叉学科。从生物地貌学的研究进展来看, 早期的研究集中于陆地系统, 滨海湿地生态系统(盐沼、红树林等)

具备生物-地貌交互作用显著的特征,是目前生物地貌学一个重要研究对象。

2) 经典的生态学通常采用大样本分析统计的方法进行研究,而地貌学通常采用选择典型区域,进行小样本的动力学多参数观测。生物地貌学则是将地貌学的动力过程引入到生态学大样本分析规律之中,试图从物理环境的角度来解释生物或者生态问题。在生物地貌学的研究方法系统化过程中,遥感技术可以扮演非常重要的角色,因为遥感影像不仅能捕捉大样本下的基本规律,同时还能反映动力学的特征。同时,通过建立标准观测网,可以解决大样本和小样本研究之间的衔接问题。

3) 滨海湿地生物地貌学目前主要聚焦于关键影响因素和核心反馈机制的研究。潮间带生物生长和高程、淹没时间之间的交互作用是生物地貌学研究的重要通路。目前的研究更多关注大型植物,底栖动物的研究有待进一步加强。

4) 在生态系统修复工作中,生物地貌学的理论具有较好的应用前景,因为生态系统修复的触发条件是物理环境和生物之间形成反馈,而生物地貌学正是针对物理环境-生物生长之间的反馈机制所做的研究。生物地貌学的研究为我国湿地生态修复工作提供了一个新的思路和方法,但是针对我国潮间带环境特征,发展高悬沙浓度、快速淤积等条件下的生物地貌学,需要开展专门的研究。

参 考 文 献

- 王爱军,高 抒,贾建军等,2005. 江苏王港盐沼的现代沉积速率. 地理学报, 60(1): 61—70
- 卢昌义,林 鹏,1990. 秋茄红树林的造林技术及其生态学原理. 厦门大学学报(自然科学版), 29(6): 694—698
- 卢昌义,郑逢中,林 鹏,1988. 九龙江口秋茄红树林群落的凋落物量研究. 厦门大学学报(自然科学版), 27(4): 459—463
- 刘 涛,刘 莹,乐远福,2017. 红树林湿地沉积速率对于气候变化的响应. 热带海洋学报, 36(2): 40—47
- 刘明月,2018. 中国滨海湿地互花米草入侵遥感监测及变化分析. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所)博士学位论文
- 安培凌,张志强,王立伟,2016. 地球关键带的研究进展. 地球科学进展, 31(12): 1228—1234
- 李 屹,陈一宁,李 炎,2017. 红树林与互花米草盐沼交界区空间格局变化规律的遥感分析. 海洋通报, 36(3): 348—360
- 李 华,杨世伦,2007. 潮间带盐沼植物对海岸沉积动力过程影响的研究进展. 地球科学进展, 22(6): 583—591
- 李加林,2008. 杭州湾南岸互花米草潮滩底质粒度及其分布特征. 海洋科学, 32(8): 53—57
- 杨世伦,1990. 中国淤泥质海岸的发育特点. 华东师范大学学报(自然科学版), (4): 85—91
- 杨世伦,时 钟,赵庆英,2001. 长江口潮沼植物对动力沉积过程的影响. 海洋学报, 23(4): 75—80
- 杨世伦,陈吉余,1994. 试论植物在潮滩发育演变中的作用. 海洋与湖沼, 25(6): 631—635
- 时 钟,1997. 海岸盐沼植物单向恒定水流流速剖面. 泥沙研究, (3): 82—88
- 肖德荣,田 昆,2012. 上海崇明东滩外来物种互花米草实生苗扩散格局研究. 西南林业大学学报, 32(4): 56—60
- 汪亚平,张忍顺,1999. 江苏盐港盐沼风车河潮沟地貌与动力演化. 海洋科学集刊, (41): 40—50
- 汪亚平,张忍顺,高 抒,1998. 论盐沼-潮沟系统的地貌动力响应. 科学通报, 43(21): 2315—2320
- 张乔民,于红兵,陈欣树等,1997. 红树林生长带与潮汐水位关系的研究. 生态学报, 17(3): 258—265
- 张乔民,施 祺,余克服等,2006. 华南热带海岸生物地貌过程. 第四纪研究, 26(3): 449—455
- 张乔民,温孝胜,宋朝景等,1996. 红树林潮滩沉积速率测量与研究. 热带海洋, 15(4): 57—62
- 张宜辉,王文卿,2008. 入侵植物互花米草和红树植物的相对竞争能力. 见: 第五届中国青年生态学工作者学术研讨会论文集. 广州: 广东省科学技术协会科技交流部
- 陈中义,李 博,陈家宽,2005. 互花米草与海三棱藨草的生长特征和相对竞争能力. 生物多样性, 13(2): 130—136
- 陈建华,1986. 红树林人工造林经验初报. 钦州林业科技, (2): 22—27
- 陈鹭真,王文卿,林 鹏,2005. 潮汐淹水时间对秋茄幼苗生长的影响. 海洋学报, 27(2): 141—147
- 范航清,莫竹承,2018. 广西红树林恢复历史、成效及经验教训. 广西科学, 25(4): 363—371, 387
- 林 鹏,2001. 中国红树林研究进展. 厦门大学学报(自然科学版), 40(2): 592—603
- 林 鹏,2003. 中国红树林湿地与生态工程的几个问题. 中国工程科学, 5(6): 33—38
- 胡忠健,马 强,曹浩冰等,2016. 长江口滨海湿地原生海三棱藨草种群恢复的实验研究. 生态科学, 35(5): 1—7
- 袁 琳,张利权,肖德荣等,2008. 刈割与水位调节集成技术控制互花米草(*Spartina alterniflora*). 生态学报, 28(11): 5723—5730
- 夏玮玮,1981. 管子地员篇校释. 北京: 农业出版社
- 高 抒,杜永芬,谢文静等,2014. 苏沪浙闽海岸互花米草盐沼的环境-生态动力过程研究进展. 中国科学: 地球科学, 44(11): 2339—2357
- 陶燕东,钟胜财,厉成伟等,2018. 南汇东滩湿地海三棱藨草的生态修复效果研究. 海洋湖沼通报, (5): 40—49
- 彭逸生,周炎武,陈桂珠,2008. 红树林湿地恢复研究进展. 生态学报, 28(2): 786—797
- 廖宝文,郑松发,陈玉军等,1990. 红树林湿地恢复技术的研究进展. 生态科学, 24(1): 61—65
- Alongi D M, Pfitzner J, Trott L A *et al*, 2005. Rapid sediment accumulation and microbial mineralization in forests of the mangrove *Kandelia candel* in the Jiulongjiang Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63(4): 605—618
- Balke T, Bouma T J, Horstman E M *et al*, 2011. Windows of opportunity: thresholds to mangrove seedling establishment

- on tidal flats. *Marine Ecology Progress Series*, 440: 1—9
- Balke, T, Webb, E L, van den Elzen, E *et al*, 2013. Seedling establishment in a dynamic sedimentary environment: a conceptual framework using mangroves. *Journal of Applied Ecology*, 50: 740—747
- Blasco F, Aizpuru M, Gers C, 2001. Depletion of the mangroves of continental Asia. *Wetlands Ecology and Management*, 9(3): 255—266
- Blumenthal K P, 1966. Some aspects of land reclamation in the Netherlands. *Proceedings of Tenth International Conference on Coastal Engineering*, Tokyo, Japan: 1331—1359
- Bouma T J, Friedrichs M, van Wesenbeeck B K *et al*, 2009. Density-dependent linkage of scale-dependent feedbacks: A flume study on the intertidal macrophyte *Spartina anglica*. *Oikos*, 118(2): 260—268
- Brooke J, Landin M, Meakins N *et al*, 1999. The restoration of vegetation on saltmarshes. *Environment Agency R&D Technical Report EA-RD-TR-W—208*, 109
- Cahoon D R, Hensel P, Rybczyk J *et al*, 2003. Mass tree mortality leads to mangrove peat collapse at Bay Islands, Honduras after Hurricane Mitch. *Journal of Ecology*, 91(6): 1093—1105
- Callaway J C, Cahoon D R, Lynch J C, 2013. The surface elevation table: marker horizon method for measuring wetland accretion and elevation dynamic. In: DeLaune R D, Reddy K R, Richardson C J *et al* eds. *Methods in Biogeochemistry of Wetlands*. Madison, WI: Soil Science Society of America, 901—917
- Cao H B, Zhu Z C, Balke T *et al*, 2018. Effects of sediment disturbance regimes on *Spartina* seedling establishment: implications for salt marsh creation and restoration. *Limnology and Oceanography*, 63(2): 647—659
- Chang Y, Chen Y N, Li Y, 2019. Flow modification associated with mangrove trees in a macro-tidal flat, Southern China. *Acta Oceanologica Sinica*, 38(2): 1—10
- Chang Y, Chen Y N, Wang Y P, 2020. Field measurements of tidal flows affected by mangrove seedlings in a restored mangrove swamp, Southern China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 235: 106561
- Chen L Z, Wang W Q, Lin P, 2004. Influence of waterlogging time on the growth of *Kandelia candel* seedlings. *Acta Oceanologica Sinica*, 23(1): 149—158
- Chen L Z, Wang W Q, Lin P, 2005. Photosynthetic and physiological responses of *Kandelia candel* L. Druce seedlings to duration of tidal immersion in artificial seawater. *Environmental and Experimental Botany*, 54(3): 256—266
- Chen Y N, Li Y, Cai T L *et al*, 2016. A comparison of biohydrodynamic interaction within mangrove and saltmarsh boundaries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(13): 1967—1979
- Chen Y N, Li Y, Thompson C *et al*, 2018. Differential sediment trapping abilities of mangrove and saltmarsh vegetation in a subtropical estuary. *Geomorphology*, 318: 270—282
- Chen Y N, Thompson C E L, Collins M B, 2012. Saltmarsh creek bank stability: Biostabilisation and consolidation with depth. *Continental Shelf Research*, 35: 64—74
- Colenutt A, 2001. Saltmarsh management techniques: A review. New Forest District Council Coast Protection Group
- Cui L F, Yuan L, Ge Z M *et al*, 2020. The impacts of biotic and abiotic interaction on the spatial pattern of salt marshes in the Yangtze Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 238: 106717
- Darwin C, 1881. *The Formation of Vegetable Mould, through the Action of Worms, with Observations on their Habits*. London: John Murray
- de Leon T O D, White A T, 1999. Mangrove rehabilitation in the Philippines. In: Streever W ed. *An International Perspective on Wetland Rehabilitation*. Dordrecht: Springer, 37—42
- Ellison J C, 2008. Long-term retrospection on mangrove development using sediment cores and pollen analysis: A review. *Aquatic Botany*, 89(2): 93—104
- Fagherazzi S, Marani M, Blum L K, 2004. *The Ecogeomorphology of Tidal Marshes*. Coastal and Estuarine Studies. Washington, DC: American Geophysical Union
- Field C D, 1999. Rehabilitation of mangrove ecosystems: an overview. *Marine Pollution Bulletin*, 37(8—12): 383—392
- Fu H, Wang W, Ma W, *et al*, 2018. Differential in surface elevation change across mangrove forests in the intertidal zone. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 207: 2033—208
- Furukawa K, Wolanski E, Mueller H, 1997. Currents and sediment transport in mangrove forests. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44(3): 301—310
- Gann G D, McDonald T, Walder B *et al*, 2019. *International principles and standards for the practice of ecological restoration*. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1): S1—S46
- Gong Z, Zhao K, Zhang C K *et al*, 2018. The role of bank collapse on tidal creek ontogeny: A novel process-based model for bank retreat. *Geomorphology*, 311: 13—26
- Hausmann N S, 2011. *Biogeomorphology: understanding different research approaches*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(1): 136—138
- Horstman E M, Dohmen-Janssen C M, Bouma T J *et al*, 2015. Tidal-scale flow routing and sedimentation in mangrove forests: combining field data and numerical modelling. *Geomorphology*, 228: 244—262
- Howes B L, Dacey J W H, Goehring D D, 1986. Factors controlling the growth form of *Spartina alterniflora*: Feedbacks between above-ground production, sediment oxidation, nitrogen and salinity. *The Journal of Ecology*, 74(3): 881—898
- Hu Z, Van Belzen J, van der Wal D *et al*, 2015. Windows of opportunity for salt marsh vegetation establishment on bare tidal flats: The importance of temporal and spatial variability in hydrodynamic forcing. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(7): 1450—1469
- Huang S L, Chen Y N, Li Y, 2020. Spatial dynamic patterns of saltmarsh vegetation in southern Hangzhou Bay: Exotic and native species. *Water Science and Engineering*, 13(1): 34—44
- Huckle J M, Potter J A, Marrs R H, 2000. Influence of

- environmental factors on the growth and interactions between salt marsh plants: Effects of salinity, sediment and waterlogging. *Journal of Ecology*, 88(3): 492—505
- Keddy P A, 2010. *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press
- Kirwan M L, Mudd S M, 2012. Response of salt-marsh carbon accumulation to climate change. *Nature*, 489(7417): 550—553
- Knutson P L, Broch R A, Seelig W N *et al*, 1982. Wave damping in *Spartina alterniflora* marshes. *Wetlands*, 2(1): 87—104
- Krauss K W, McKee K L, Lovelock C E *et al*, 2014. How mangrove forests adjust to rising sea level. *New Phytologist*, 202(1): 19—34
- Lewis R R, 2005. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. *Ecological Engineering*, 24(4): 403—418
- Lewis R R, Marshall M J, 1997. Principles of successful restoration of shrimp Aquaculture ponds back to mangrove forests. In: Programa/Resumes de Marcuba'97. Cuba: Palacio de Convenciones de La Habana
- Li X Z, Ren L J, Liu Y *et al*, 2014. The impact of the change in vegetation structure on the ecological functions of salt marshes: the example of the Yangtze Estuary. *Regional Environmental Change*, 14(2): 623—632
- Lin H S, 2009. Earth's Critical Zone and hydrogeology: concepts, characteristics, and advances. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(2): 3417—3481
- Liu Q X, Herman P M J, Mooij W M *et al*, 2014. Pattern formation at multiple spatial scales drives the resilience of mussel bed ecosystems. *Nature Communications*, 5(1): 5234
- Liu Q X, Rietkerk M, Herman P M J *et al*, 2016. Phase separation driven by density-dependent movement: a novel mechanism for ecological patterns. *Physics of Life Reviews*, 19: 107—121
- Lovelock C E, Cahoon D R, Friess D A *et al*, 2015. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise. *Nature*, 526(7574): 559—563
- Lynch J C, Hensel P, Cahoon D R, 2015. The surface elevation table and marker horizon technique: A protocol for monitoring wetland elevation dynamics. Fort Collins, Colorado: National Park Service
- McKee K L, 2011. Biophysical controls on accretion and elevation change in Caribbean mangrove ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91(4): 475—483
- Milliman J D, Farnsworth K L, 2011. *River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press
- Möller I, Kudella M, Rupprecht F *et al*, 2014. Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. *Nature Geoscience*, 7(10): 727—731
- Murray A B, Paola C, 2003. Modelling the effect of vegetation on channel pattern in bedload rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(2): 131—143
- Murray A B, Knaapen M A F, Tal M *et al*, 2008. Biomorphodynamics: physical-biological feedbacks that shape landscapes. *Water Resources Research*, 44(11): W11301
- Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M *et al*, 2009. *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, 78
- Nepf H M, 2012. Flow and transport in regions with aquatic vegetation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 44(1): 123—142
- Neumeier U, Amos C L, 2006. The influence of vegetation on turbulence and flow velocities in European salt-marshes. *Sedimentology*, 53(2): 259—277
- Parker K C, Bendix J, 1996. Landscape-scale geomorphic influences on vegetation patterns in four environments. *Physical Geography*, 17(2): 113—141
- Porporato A, Rodriguez-Iturbe I, 2002. Ecohydrology - A challenging multidisciplinary research perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 47(5): 811—821
- Richards K, 1996. Samples and cases: Generalisation and explanation in geomorphology. In: Rhoads B L, Thorn C E eds. *Scientific Nature of Geomorphology: Proceedings of the 27th Binghamton Symposium in Geomorphology*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 171—190
- Richter D Jr, Mobley M L, 2009. Monitoring earth's critical zone. *Science*, 326(5956): 1067—1068
- Rietkerk M, van de Koppel J, 2008. Regular pattern formation in real ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(3): 169—175
- Rogers K, Kelleway J J, Saintilan N *et al*, 2019. Wetland carbon storage controlled by millennial-scale variation in relative sea-level rise. *Nature*, 567(7746): 91—95
- Rupp-Armstrong S, Nicholls R J, 2007. Coastal and Estuarine Retreat: A comparison of the application of managed realignment in England and Germany. *Journal of Coastal Research*, 23(6): 1418—1430
- Saenger P, Siddiqi N A, 1993. Land from the sea: the mangrove afforestation program of Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 20(1): 23—39
- Saintilan N, Rogers K, 2006. Coastal wetland elevation trends in Southeastern Australia. In: Gilman E ed. *Proceedings of the Symposium on Mangrove Responses to Relative Sea-Level Rise and Other Climate Change Effects*. Honolulu, USA: Western Pacific Regional Fishery Management Council, 42—54
- Sanyal P, 1998. Rehabilitation of degraded mangrove forests of the Sunderbans of India. In: *Program of the International Workshop on Rehabilitation of Degraded Coastal Systems*. Phuket, Thailand: Phuket Marine Biological Center
- Shi Z, Pethick J S, Pye K, 1995. Flow structure in and above the various heights of a saltmarsh canopy: a laboratory flume study. *Journal of Coastal Research*, 11(4): 1204—1209
- Stallins J A, 2006. Geomorphology and ecology: unifying themes for complex systems in biogeomorphology. *Geomorphology*, 77(3—4): 207—216
- Stine M, Butler D, 2011. A content analysis of biogeomorphology within geomorphology textbooks. *Geomorphology*, 125(2): 336—342. 10.1016/j.geomorph.2010.09.003

- Struve J, Falconer R A, Wu Y, 2003. Influence of model mangrove trees on the hydrodynamics in a flume. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58(1): 163—171
- Temmerman S, Bouma T J, Govers G *et al*, 2005. Impact of vegetation on flow routing and sedimentation patterns: three-dimensional modeling for a tidal marsh. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 110(F4): F04019
- van de Koppel J, Rietkerk M, Dankers N *et al*, 2005. Scale-dependent feedback and regular spatial patterns in young mussel beds. *The American Naturalist*, 165(3): E66—E77
- van Hulzen J B, van Soelen J, Bouma T J, 2007. Morphological variation and habitat modification are strongly correlated for the autogenic ecosystem engineer *Spartina anglica* (common cordgrass). *Estuaries and Coasts*, 30(1): 3—11
- van Wesenbeeck B K, 2007. Thresholds and shifts: consequences of habitat modification in salt-marsh pioneer zones. Doctor Dissertation of University of Groningen and Netherlands Institute for Ecology (NIOO-KNAW)
- Vandenbruwaene W, Temmerman S, Bouma T J *et al*, 2011. Flow interaction with dynamic vegetation patches: Implications for biogeomorphic evolution of a tidal landscape. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 116(F1): F01008
- Viles H A, 1988. *Biogeomorphology*. Oxford: Basil Blackwell
- Viles H A, Naylor L A, Carter N E A *et al*, 2008. Biogeomorphological disturbance regimes: progress in linking ecological and geomorphological systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(9): 1419—1435
- Walles B, Brummelhuis E, van der Pool J *et al*, 2019. Development of benthos and birds in an intertidal area created for coastal defence (Scheldt estuary, the Netherlands). Yerseke: Wageningen University & Research
- Watson J G, 1928. *Mangrove Forests of the Malay Peninsula*. Malayan Forest Records No. 6. Singapore: Fraser and Neave Ltd.
- Weerman E J, Van Belzen J, Rietkerk M *et al*, 2012. Changes in diatom patch-size distribution and degradation in a spatially self-organized intertidal mudflat ecosystem. *Ecology*, 93(3): 608—618
- Wolanski E, 1995. Transport of sediment in mangrove swamps. *Hydrobiologia*, 295(1—3): 31—42
- Woodroffe C, 1992. Mangrove sediments and geomorphology. In: Robertson A I, Alongi D M eds. *Tropical Mangrove Ecosystems*. Washington, DC: American Geophysical Union
- Zhang H G, Lou X L, Li Y *et al*, 2015. Whitecap features induced by submarine sand waves in stereo optical imagery. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 120(9): 6225—6233
- Zhang Y H, Huang G M, Wang W Q *et al*, 2012. Interactions between mangroves and exotic *Spartina* in an anthropogenically disturbed estuary in southern China. *Ecology*, 93(3): 588—597
- Zhou Z, Ye Q H, Coco G, 2016. A one-dimensional biomorphodynamic model of tidal flats: Sediment sorting, marsh distribution, and carbon accumulation under sea level rise. *Advances in Water Resources*, 93: 288—302

ADVANCES IN BIOGEOMORPHOLOGY IN COASTAL WETLANDS AND ITS APPLICATION IN ECOLOGICAL RESTORATION

CHEN Yi-Ning¹, CHEN Lu-Zhen², CAI Ting-Lu¹, XIA Xiao-Ming¹

(1. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 2. School of Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract Biogeomorphology, a recently developed multidisciplinary study field, tends to focus on some aspects of two-way linkages between biological (ecological) and geomorphological processes. Previous works focused on biophysical feedbacks in terrestrial environments. However, coastal regions recently have become a hotspot for biogeomorphological studies. In particular, coastal wetlands, such as saltmarshes and mangroves, provide ideal places for this type of studies. The aim of this contribution is to provide the state-of-the art for biogeomorphological studies based on a literature review in the light of coastal wetlands. The review starts with a brief introduction of the history of biogeomorphology. Some key concepts and definitions are described to form the base of the overall knowledge. A gap between large-number statistical study by ecologists and small-number case studies by geomorphologist was discussed and a framework of methodology to bridge this gap was proposed. The main advances in biogeomorphology studies were summarized along with key elements and mechanisms controlling the development and succession of intertidal ecosystems. Ecological restoration practices in three typical coastal wetlands, including mangroves, coastal saltmarshes, and the invasion of *Spartina*, were explicitly deliberated, as the application extension and knowledge transfer of biogeomorphology. The last part presents an overall summary and the perspectives in the field of biogeomorphology.

Key words biogeomorphology; ecological restoration; saltmarsh; mangrove