



滨海地球关键带科学: 一个新兴的研究领域

刘丛强^{1*}, 宋照亮¹, 宋长春^{2,3}, 吴庆龙^{4,5,6}, 汪亚平⁷

1. 天津大学地球系统科学学院, 表层地球系统科学研究院, 天津 300072

2. 大连理工大学建设工程学院, 大连 116024

3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

4. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与流域水安全全国重点实验室, 南京 210008

5. 中国科学院大学中丹学院, 北京 100039

6. 中国科学院抚仙湖高原深水湖泊研究站, 澄江 652500

7. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

* 联系人, E-mail: liucongqiang@tju.edu.cn

2025-02-26 收稿, 2025-05-11 修回, 2025-05-27 接受, 2025-05-28 网络版发表

国家自然科学基金重大项目(42293262)和国家自然科学基金杰出青年科学基金(4225101)资助

摘要 滨海地球关键带位于滨海平原及海岸带, 受大陆-海洋-大气物理、化学、生物交互作用强烈影响, 作为陆地、海洋和大气相互作用的核心区域, 拥有极高的生态服务价值, 也是全球气候变化和人类活动影响最为敏感和脆弱的地带. 本文全面梳理了滨海地球关键带科学的起源与进展, 强调了其作为跨学科交叉新兴领域的重大意义. 文章首次对滨海地球关键带进行了明确定义, 指出其边界在垂直方向上从地下新鲜岩石顶部或地下含水层底部延伸至海岸植被冠层顶部, 水平方向上由多种地貌单元构成, 其结构演化受海平面变化、沉积物供应和人类活动等驱动. 目前, 滨海地区正面临海平面上升、海岸侵蚀、湿地退化和生物多样性丧失等严峻挑战, 而现有研究常局限于单一学科或局部问题, 缺乏系统整合. 本文提出滨海地球关键带科学的研究应聚焦于关键带结构、过程、功能和服务间的相互作用, 并确定了五大优先研究方向: 关键带结构时空演化机制、结构与过程耦合机理、生态功能与服务机制、滨海城市关键带科学以及生态系统恢复与综合管理. 通过多学科融合、长期观测与模型模拟, 构建“结构-过程-功能-服务”的理论框架, 以支撑滨海生态系统保护与可持续发展. 文章呼吁加强陆海统筹管理, 发展基于地球系统科学的综合研究范式, 为应对全球变化和实现滨海地区人地协调发展提供科学依据.

关键词 滨海地球关键带, 结构-过程耦合, 生态功能, 可持续发展和管理

滨海地区是位于滨海平原及海岸带, 受大陆-海洋-大气物理、化学、生物交互作用强烈影响的表层地球系统, 具有极高的生态服务价值, 在生物多样性、水质净化、容纳沉积物、固碳、储水消洪等方面发挥着不可替代的生态功能^[1,2]. 滨海地区是支撑人类生存发展最重要的地区, 同时也是受人类活动干扰和气候变化影响最严重和表现最为敏感和脆弱的生态系统^[3,4]. 在我国, 滨海地区占据全国土地面积的13%, 拥

有多类型滨海湿地和国家级保护区等重要自然生态资源, 承载着全国约50%的人口和70%的国内生产总值^[5], 是中国经济社会发展、生态文明建设相互交融最具典型、最具特色的地球关键带之一.

然而, 受气候变化和人类活动双重威胁, 滨海地区生态功能严重退化, 甚至局部丧失, 海平面上升、海岸带侵蚀、滨海湿地退化、土地盐碱化、生物多样性降低、富营养化和生产力下降等威胁了滨海生态系统的

引用格式: 刘丛强, 宋照亮, 宋长春, 等. 滨海地球关键带科学: 一个新兴的研究领域. 科学通报

Liu C-Q, Song Z, Song C, et al. The coastal Critical Zone sciences: an emerging research area (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/TB-2025-0201](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0201)

健康稳定,滨海地区可持续发展受到巨大的制约^[6]. 应对环境变化所追求的重大目标之一,是恢复和保护滨海生态系统并提升其生态服务功能,但目前研究多是基于单一学科、单一科学问题、单一地理或生态系统单元,缺乏多学科、多问题和整体滨海系统的综合多学科交叉融合研究,现有科学知识储备尚不足以支撑这一目标的实现. 恢复、保护、利用滨海生态系统服务功能需要滨海地球关键带科学以及表层地球系统科学理论的科学支撑.

滨海地球关键带是陆地-海洋-大气相互作用的区域,在水平方向上,呈现出河口三角洲、潮滩、滨海平原河流-湿地、滨海陆地、滨海城镇等多景观交互的强地表差异^[7]. 滨海地球关键带是动力活跃区,其结构形成及生态功能演化复杂,是研究发展地球关键带科学和滨海生态系统综合管理科学理论的重要区域^[8]. 滨海地球关键带的结构如何形成和演化,又如何提供维持生命繁衍的关键生态功能? 成为了滨海地球关键带科学的核心科学问题. 相关研究亟待阐明: (1) 滨海地球关键带结构及其空间格局的多时空尺度演变规律和驱动机制; (2) 滨海地球关键带结构-过程交互作用及其生态效应对全球变化的响应; (3) 滨海地球关键带过程-功能关系与生态服务功能提升机制三方面关键科学问题,系统形成滨海地球关键带“结构-过程-功能-服务”的理论和科技体系,解决滨海地球系统面临的科学难题,促进地球关键带科学研究的新发展,服务于国家滨海生态环境保护与恢复战略的实施.

1 地球关键带科学的形成与发展

1.1 地球关键带及其科学: 定义

地球关键带(Earth Critical Zone)是指从地下新鲜岩石或上层地下水活动空间底部到植被冠层顶部的空间,是岩石土壤、水、大气和生物相互作用和塑造地球表层形貌的区域^[9]. 表层地球系统(Surface-Earth System)和深层地球系统(Deep-Earth System)构成整体地球系统,主要由大气圈、水圈、表层岩石(±土壤)圈、生物圈和人类圈构成,各要素相互作用及其演变是维持表层地球系统各种功能的基础,对人类社会可持续发展起决定作用. 地球关键带中的物理、化学和生物过程支撑了地表生命的诞生和演化. 地球关键带科学是研究地球关键带结构、组成和演化以及提供维持生命关键功能和服务机制的科学^[9]. 地球关键带科学将组成

地球关键带各组分作为整体系统来研究,其核心价值在于系统思想和系统研究方法,是表层地球系统科学研究的重要组成部分或关键途径和突破口.

1.2 地球关键带科学的形成与发展

地球关键带科学已成为21世纪地球科学重点领域^[9,10],其发展大致可概括为以下两个阶段(图1).

第一阶段(2001~2019年)是地球关键带思想形成以及地球关键带观测站与观测网络建立阶段. 美国国家科学委员会于2001年首次正式提出地球关键带的概念、理念与方法. 美国国家科学基金会于2005年发布了《地球关键带探索的前沿》,呼吁发展地球关键带研究计划,并完善了地球关键带的概念以及前沿问题等. 2009年,欧盟委员会将流域土壤监测作为地球关键带长期观测的重点. 2012年,美国地质调查局将地球关键带列为核心科学体系的重要研究对象. 2017年,美国发布地球关键带科学研究白皮书,总结十多年来取得的成就,并梳理了未来十年亟待解决的科学问题^[11]. 同时,为实施地球关键带研究计划,地球关键带观测站得到了快速的建立与发展. 2007年,美国正式建立首批3个地球关键带观测站. 此后,美国、英国和德国等相继建立关键带观测站. 2015年,在中国国家自然科学基金委员会与英国自然环境研究理事会(NERC)联合项目资助下,对中国首批4个地球关键带开展了合作研究,其中部分已正式成为国家地球关键带野外观测研究站. 至2015年底,在全球范围内已建立约64个地球关键带观测站,并初步建立了全球地球关键带观测网络^[12].

第二阶段(2019年及以后)主要是地球关键带理论发展、观测网络完善与应用阶段. 该阶段主要致力于发展地球关键带演化理论框架,开发耦合结构和过程的关键带模型,并完善关键带观测网络,发展集成数据库和测量框架^[13,14]. 在此基础上,将地球关键带理念应用于土地利用变化和气候变化预测、城市水文与生态、滨海与河口环境、生态功能与服务价值评估等领域^[8,15,16]. 在此阶段,中国于2019年正式批准建立天津市“环渤海滨海地球关键带野外科学观测研究站”等第一批国家地球关键带野外科学观测研究站,将不同类型地球关键带的结构、功能与演化进行系统对比研究.

1.3 地球关键带科学的系统观、研究内容和方法

系统科学着重于对事物的整体性、相互关联、动

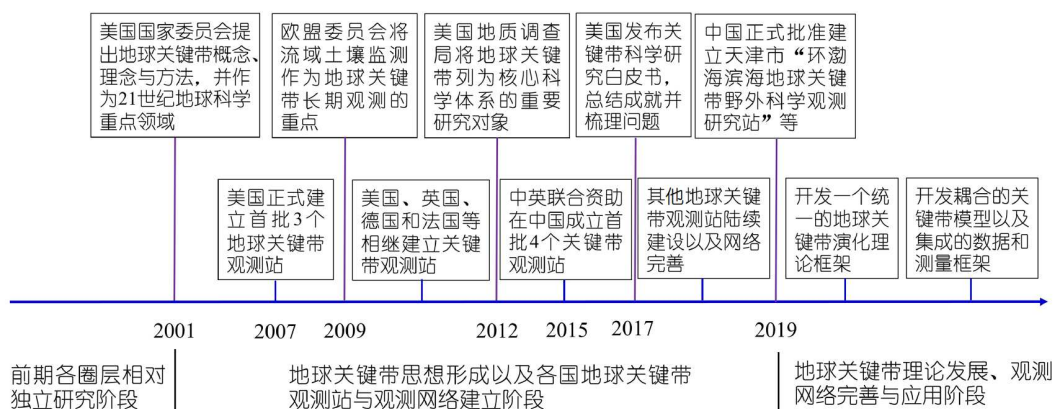


图1 地球关键带科学的形成与发展

Figure 1 Emergence and development of Earth's Critical Zone Science

态变化和层次结构的研究. 作为一种科学方法论, 系统观以解决复杂系统问题为目标, 以系统整体论为理论基础, 以系统方法论为核心, 形成了一种应用系统思维的范式, 具有显著的实践意义. 系统整体论强调, 系统中的各个要素既相互独立又相互作用, 这种关系构成了系统与环境相区分的边界. 在演化过程中, 系统会产生新的整体性质、功能、行为和规律, 这些往往不能仅通过分析单个要素的性质和行为来解释和预测^[17]. 系统科学的哲学观为我们提供了理解世界的新视角和方法, 它帮助我们更深入地把握事物的本质和规律, 有效处理复杂问题和现象, 在科学研究、社会管理、生态保护等多个领域都展现了重要的应用价值.

地球关键带的概念代表了系统科学理念, 其科学被公认为一个重要的、开创性的新科学领域. 地球关键带是由表层岩石土壤圈、水圈、大气圈和生物圈相互作用而构成的不可分割的整体, 强调了地球关键带构成要素的整体性、组织结构性、功能自主性以及层次有序性, 对其结构、过程、功能变化的研究具有典型的系统科学属性. 地球关键带科学研究的内容主要涉及以下几方面: (1) 地球关键带组成、结构及其演化; (2) 地球关键带物质迁移转化、循环及其区域和全球变化效应; (3) 地球关键带的生态功能和服务机制; (4) 地球关键带过程的模型模拟. 在结构方面, 主要利用传统剖面 and 钻井调查以及探地雷达和震波成像等地球物理观测技术揭示不同关键带的结构变异^[18]; 在过程方面, 主要通过监测水、气体、土壤和沉积物等物质的变化, 结合模型模拟等手段, 研究地球关键带碳、氮、磷和硅等物质循环过程和能量传递与演化及其对

全球变化的响应与反馈, 并预测地球关键带过程的未来变化^[19]; 在功能和服务方面, 通过质量平衡计算以及建立关键带功能与服务测度指标体系等方法, 研究地球关键带固碳等的功能及其潜力, 评估地球关键带能够提供的服务产品和惠益.

当今全球气候变化、环境污染和生态系统退化等全球变化问题日益凸显, 给人类社会可持续发展带来了严峻挑战^[20,21]. 为应对各种全球变化的挑战, 需要利用系统科学的思维和方法来研究全球变化的发生过程机理、减缓和应对全球变化的策略和原理, 因此, 地球关键带科学作为表层地球系统科学研究的重要形式在全球变化机理和应对策略研究方面将发挥重要作用.

2 滨海可持续发展面临的挑战与相关科学研究

2.1 滨海可持续发展面临的挑战

在强烈的人类活动和全球环境变化胁迫下, 一些滨海地区可持续发展面临资源与农业、气候与环境以及生态安全等多种挑战(表1)^[7,22~24]. 在资源与农业方面, 人工海岸线代替自然海岸线、次生盐渍化以及湿地萎缩与淹没的问题较为突出^[23]. 在气候与环境方面, 气候变化和海平面上升导致海水入侵、海岸带侵蚀、加重风暴潮和洪涝危害以及滨海生态系统损失, 而滨海农业工业污染导致滨海化学与生物污染、富营养化和生态系统生产力下降等. 比如由于低海拔、低洼地形和城镇化程度高等特征, 滨海地区相对于其他地区更易遭受风暴潮和洪涝等灾害的影响^[22,25]. 在生态安

表 1 滨海可持续发展面临的主要挑战及成因

Table 1 Major challenges and causes for sustainable development in coastal areas

问题类型	主要问题	问题成因	文献来源
资源与农业	人工岸线代替自然岸线	城镇化与工程建设	[30]
	次生盐渍化	地下水超采与海水入侵	[5]
	湿地萎缩与淹没	人为开发与气候变化	[23]
气候与环境	海水入侵	气候与人类活动共同作用	[31]
	海岸带侵蚀	海平面上升、陆源泥沙供给减小	[32]
	风暴潮危害	海平面上升	[25]
	洪涝与干旱	气候与土地利用变化	[22]
	化学与生物污染	污染物排放	[33]
	酸化	养分及污染物排放	[27]
	富营养化与低氧	养分及污染物排放	[27]
	生物多样性减少	外来种入侵与人为活动	[26]
生态安全	生物入侵	引种与船舶运输	[28]
	藻类暴发	营养盐输入	[34]

全方面,主要是人为引种与船舶运输等带来以及生物多样性减少、生物入侵和有害藻类暴发等问题^[26-28]。特别是富营养化-藻华-缺氧-酸化-生态系统退化的链式反应是滨海生态系统最为严重的问题之一^[29]。总体上,滨海系统演化以及跨界面耦合过程与机理,尤其是滨海结构与服务功能演变、陆-海-气跨界面物质循环以及经济社会与生态互馈,是滨海可持续发展必须解决的核心科学问题。

2.2 滨海地质灾害与地质地貌科学研究与发展

滨海地区是地质灾害频发、地貌环境最为敏感脆弱的区域。我国滨海区域地势较低,滨海地质地貌和地质灾害存在明显南北差异。杭州湾北部以滨海平原为主,其地质灾害主要表现为地面沉降和盐水入侵等;南部则以山地丘陵为主,区域地质灾害主要表现为崩塌、滑坡等^[35]。滨海地区其他常见的地质灾害还包括地震、火山、地裂缝、岸线侵蚀、港口淤积和风暴潮等^[36]。人们已经针对不同地质灾害种类建立了独具特色的多种调查和研究方法。

海底活动沙波、水下陡坎、浅层气等潜在地质灾害研究,主要依赖于综合物探调查,结合钻孔取样,基于岩相古地理和现代沉积学分析开展评估。地面沉降监测主要采用大地水准测量和地下水动态监测等。盐水入侵、水环境污染和海岸侵蚀等则需综合现场调查、遥感监测和数值模拟技术。

从滨海地质灾害成因看,地震和火山灾害主要受

内动力地质作用控制^[36],岸线侵蚀、盐水入侵等则主要受外力地质作用控制^[37],地下水污染和河床采砂变形等主要由于人类活动引起,属人为地质灾害^[38]。同类地质灾害在不同时空尺度上的致灾原因可能不同。以我国环渤海和长江河口等地较为严重盐水入侵为例,在空间尺度上,盐水入侵可能由快速的海平面上升和/或局地地面沉降导致;在时间尺度上,可能与短时间尺度的风暴潮、径流减小或长时间尺度的构造运动等紧密相关^[39]。在全球变暖背景下,海平面上升叠加天文大潮和风暴引起的滨海洪水灾害频率和强度均呈增加趋势^[40],盐水入侵对滨海生态环境的影响将愈发严重。此外,在流域工程导致的河流输沙量锐减背景下,河口海岸区域还面临严重的海岸侵蚀问题^[41]。综上所述,我国滨海地质地貌和灾害类型多样,需综合多学科手段,加强滨海地质地貌和地质灾害发展规律研究,以应对全球气候变化带来的挑战。

2.3 滨海环境科学研究与发展

滨海地区因人类活动活跃而常导致水土污染环境,其中重金属和有机污染物污染尤其普遍。滨海沉积物中的监测显示,全球滨海的重金属污染主要包括铜、锌、铬、镉、铅、砷和汞等。全球滨海汞污染的76%(1000 Mg)来源于河流输入^[42]。近年来的检测数据显示中国近海主要的重金属污染在持续增加,重金属对生物个体的毒理学研究开展很多,但是极其缺乏对生物群落和生态系统影响的长期综合研究。持久性有

机污染物是滨海地区另外一类污染物质,其全球尺度调查主要集中在中国和欧洲的近海,污染水平也是这两个地区的滨海系统污染较重^[43]。

滨海环境科学重点研究滨海地区水土资源保护以及典型污染物分布、迁移转化过程、环境风险及其控制与修复等方面^[24,44]。当前滨海环境科学研究的核心问题主要有:(1)滨海湿地水土等资源保护与污染控制^[45];(2)滨海典型和新兴污染物分布、迁移、风险评价与管理^[44];(3)滨海典型污染事故对区域环境影响的模拟与预测^[46];(4)滨海城市化的热环境污染、环境风险分析与评价^[47];(5)滨海能源与资源开采的环境效应^[48];(6)海平面上升与河口海岸环境变化^[23,49];(7)滨海湿地固碳和温室气体排放机制以及负碳排放技术^[50,51];(8)海岸带陆海交互作用及其环境效应^[52];(9)陆海统筹与海岸带可持续发展^[5,24]。

2.4 滨海气候变化科学研究与发展

气候变化是当今全人类面临的共同挑战,特别是滨海区域对气候变化的响应最为敏感。全球变暖引发的海平面上升对滨海区域产生巨大影响。最后一次全球尺度海退—海侵旋回发生于末次盛冰期以来,我国海岸整体经历了末次冰消期海侵和中全新世~1850年的海岸进积(海退)以及随后的海岸退化(海侵)三个阶段^[53]。随着岸线的后迁,滨海湿地的空间分布随之快速变迁。

工业革命以来,化石燃料的燃烧导致的二氧化碳等温室气体的排放急剧增加,导致全球变暖与海平面上升。据政府间气候变化专门委员会第二工作组第六次评估报告,近期(202~2040年)全球气温较工业化前(1850~1900年)升高幅度将达到1.5°C。同时,重要气候事件对滨海区域的影响也具有其独特性。比如,气候冷事件期间,内陆主要表现为干旱,而滨海则为水涝灾害^[54]。全球变暖和海平面上升背景下,频率和强度均呈增大趋势的极端天气事件甚至会对滨海生态系统产生毁灭性影响^[55]。

目前滨海气候风险加剧,未来中国滨海城市社会经济损失风险评估研究愈显重要^[56]。滨海虽然受气候威胁最为严重,但也是可能对气候变化产生显著影响的地区。滨海生态系统仅占海洋面积的0.5%,但却是海洋最大的碳汇,全球潮汐沼泽1 m土壤有机碳库达1.44 PgC^[57],而且盐沼湿地植物有助于提高土壤有机碳库^[58]。尤其是红树林、海草床和盐沼具有极高的固碳

效率。滨海生态系统的碳汇能力,可以缓解大气CO₂浓度升高和全球气候变暖的威胁^[59]。

2.5 滨海生态科学研究与发展

气候变化和人类活动导致不同类型的滨海生态系统的结构和功能出现受损和退化。过去50年,中国温带滨海湿地减少53%,红树林湿地减少73%^[60]。过去40年江苏3020.67 km²的湿地退化,占滨海湿地总面积的42.74%^[61]。揭示气候变化和人类活动对生物个体、群落、生态系统及其服务的影响成为滨海生态学研究的重点^[43,62]。

气候变化对海洋生物生理产生强烈影响^[63]。气候变化对滨海生物群落结构及其分布也产生重大影响^[64]。一方面,随着气候变暖,低纬度地区的生物逐渐向着高纬度地区扩展,例如红树林正在取代温带盐沼、热带海草正在扩张并取代温带海草,导致温带热带化和极地温带化^[65];另外一方面,对于那些有限耐热性的热带物种,气候暖化导致生物灭绝、群落崩溃和生物多样性下降^[66]。气候变换可以显著促进有害藻类水华的暴发,增加极端气候事件和风暴潮风险,引发系列生态环境问题,降低滨海生态系统的生态服务功能^[67]。

人类活动对滨海系统的影响主要体现在围垦、过度捕捞和污染等多个方面。滨海围垦和海岸线的开发利用直接导致滨海湿地的面积减少、景观破碎化、水文连通性下降、生物联系减弱,进而影响滨海湿地的服务功能。如受围垦影响,环渤海湿地的生境支持功能退化、生物多样性下降、水质净化功能减弱、碳汇能力下降等^[68,69]。过度捕捞导致的近海渔业资源退化已经成为一个全球性的问题,例如在东亚地区近海的过度捕捞导致了一些重要的经济鱼类的个体小型化、资源量锐减等^[70]。受陆地氮磷的过度输入等影响,近海水体的富营养化和藻类水华的暴发成为全球生态环境问题之一,其中以东亚、西欧和东北美洲较为严重,中国的一些近海水域甚至出现了大面积的缺氧区域和海底荒漠,严重破坏了滨海生态系统的结构与功能^[43]。

人类活动引起的各类环境胁迫往往是和气候变化叠加影响滨海生物和生态系统的。近期的研究表明^[67],局域尺度上的人类活动与气候变化之间具有交互影响:滨海生态系统对气候变化引起的胁迫响应可以被人类活动引发的环境变化所调节,反之亦然;局域尺度人类活动可以直接影响气候变化引起的胁迫因素。但气候变化与人类活动之间对滨海生态系统的影响更多显示

出协同影响^[71]。过度捕鱼和城市化等人类活动加剧了滨海生态系统的脆弱性, 到2100年如果不采取有效的应对措施, 滨海生态系统海平面上升风险将提高10倍^[3]。近期和未来的一个研究重点就是要揭示局域尺度人类活动如何影响滨海生态系统对气候变化的响应与反馈, 提升对气候变化背景下滨海系统演变的可预测性, 并为局域和区域尺度滨海生态系统保护提供科学依据^[62]。

2.6 滨海生态系统的综合管理与可持续发展

滨海生态系统的综合管理对于滨海地区的可持续发展至关重要。目前较为流行的一种综合管理方法就是基于生态系统的管理(ecosystem-based management, EBM)^[72], 它考虑了包括人类在内的整个生态系统以及不同部门的累积影响。其重点是维护生态系统服务和功能, 并基于生态系统管理人类活动。例如, 通过沿海地区的空间规划, 对多用途区域进行空间明确管理, 可使管理人员保护对生态系统功能和服务提供最为关键的区域。EBM提供了考虑到人类活动累积影响的稳健管理策略^[73]。但是EBM通常考虑生态系统中的生态因素、过程和压力源, 如能源、气候、栖息地恢复等。尽管环境可持续性和社会经济因素包含在EBM框架之中, 但营养等污染物在其应用中并未得到考虑。目前建立的仅侧重于污染控制的法律框架在气候变化的情况下可能无法很好地发挥作用。因此, 未来有必要评估营养物质等的生态影响, 并考虑其在气候变化下的累积影响^[43]。

陆海统筹的管理对于滨海生态系统保护与可持续发展也极为重要。自2015年以来, 海岸带陆海相互作用(LOICZ)项目被纳入“未来地球海岸”的未来地球计划, 该项目将其研究领域扩展到理解海岸带全球环境变化的驱动因素和社会环境影响。该计划将深入了解未来气候变化如何影响陆地向滨海系统输入的物质及其效应^[74]。“未来地球海岸”项目面临的巨大挑战是制定一个框架, 在该框架内可以分析和解决可持续发展的制约因素, 以便在可持续发展目标的背景下加以考虑。参与滨海生态系统保护、利用和管理不同机构和群体需要共同合作、共同进行可持续的海洋和沿海规划。此外, 平衡各个方面对海岸管理的要求, 以实现可持续发展目标也是一个重要挑战^[43]。

从地球系统科学的角度来看, 沿海地区是人类活动的许多产品和信息的集聚地, 单独考虑局域或者区

域尺度上的陆地与海洋相互作用及其调控和管理, 并不能有效保护滨海生态系统, 可能需要深入了解更大范围的陆海相互作用, 并在此基础上开展综合管理。但是该领域的研究和管理实践还很匮乏, 亟待深入研究。

3 滨海地球关键带及其科学

3.1 滨海地球关键带及其科学: 定义

滨海地球关键带位于滨海平原及海岸带, 是大气-陆地-海洋物理、化学和生物相互作用的区域, 在垂向上从新鲜岩石或上层地下水活动空间底部到植被冠层顶部的空间, 对于湿地水域地球关键带的上部, 可以理解为水-气作用空间上部, 是岩石、土壤、水、大气和生物相互作用和塑造地球表层形貌及支持生命系统的重要区域; 在滨海区域水平方向上, 呈现出河口三角洲、潮滩(红树林、盐沼和光滩)、滨海平原河流-湿地、滨海陆地、滨海城镇等多景观交互的强地表差异地带(对应五种不同类型的地球关键带)(图2)。滨海地球关键带是承接了地球上陆地与海洋两大系统类型的过渡地带, 兼备陆地生态系统和海洋生态系统的特征, 阐明滨海关键带结构-过程的演变对生态系统服务的影响机理及其生态服务功能提升机制, 对构筑陆地与海洋之间的重要生态屏障具有重要意义。滨海地球关键带是与人类生存和发展关系最为密切的地球关键带, 具有极高的生态服务价值, 是支撑人类社会发展的关键地区, 同时也是全球生态敏感和脆弱区^[7,15,75]。在长期的地质演化、气候、潮汐和人类社会发展的内外应力驱动下, 关键带的垂向和水平方向结构发生深刻演变, 影响水、物质和能量的循环过程, 共同决定了关键带生态系统的服务功能。滨海地球关键带物理过程、化学过程、生物过程和地质过程交织耦合, 影响因素众多, 发育过程与演变机制极为复杂。应从地球系统科学角度, 全面理解滨海地球关键带结构、格局的时空演变规律, 聚焦垂直结构演变序列和水平结构多样性程度, 精确解析滨海地球关键带“相状态转换”的事件序列, 为明确滨海地球关键带物质和能量交换过程、提升服务功能等提供基础构架, 丰富和发展地球关键带理论体系。滨海地球关键带科学是一个新兴多学科交叉研究领域, 是解决滨海地球系统科学难题的重要科学。滨海地球关键带理论有助于应对滨海可持续发展面临的挑战, 通过滨海地球关键带的系统研究可深入解析气候变化和人类活动影响下滨海生态系统结构

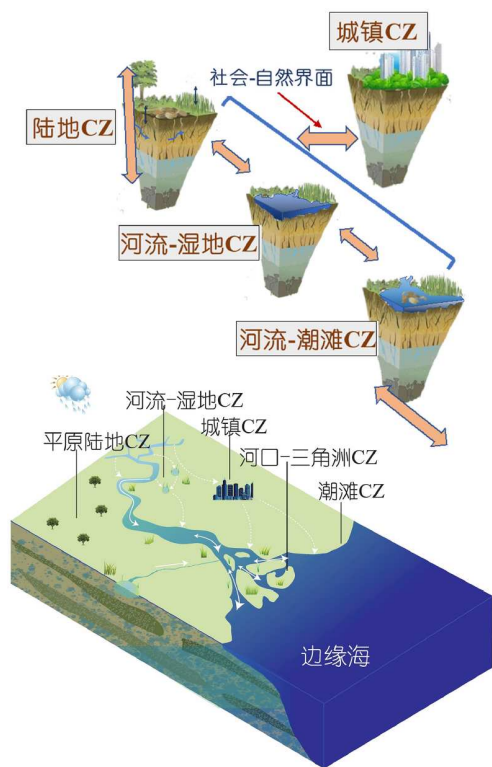


图2 滨海地球关键带结构类型及其空间格局示意图。CZ: 关键带; 河流-湿地CZ: 滨海河流与湿地关键带; 城镇CZ: 滨海城镇关键带; 陆地CZ: 滨海冲(洪)积平原关键带; 河口-潮汐CZ: 河口-三角洲潮汐关键带和潮汐关键带

Figure 2 Schematic diagram of structural types and spatial patterns in the coastal critical zone. River-Wetland CZ: Coastal River and Wetland Critical Zone; Coastal Urban CZ: Coastal Urban Critical Zone; Coastal Plain Terrain CZ: Coastal Plain Terrain Critical Zone; Estuary and Tidal Flat CZ: Estuary Delta Critical Zone and Tidal Flat Critical Zone

和功能变化机制,探索滨海生态系统系统提升对策,服务于滨海社会-生态系统可持续健康发展。然而,正如Liu等人^[15]所述,滨海系统是被地球关键带科学研究所重视不够或忽视了的生态系统,有关地球关键带观测研究站布局几乎空缺,很少有从地球关键带理论和研究方法对滨海生态系统过程、功能和服务开展系统性研究。未来还需要以系统科学哲学的系统观、基本原理和规律理论为指导,以圈层相互作用过程和物质循环研究为核心的地球关键带科学研究理论和方法为途径,将滨海表层地质系统、生态系统以及社会系统构成的表层地球系统作为研究对象,从研究系统结构及其演变的自然和人为驱动机制出发,进一步研究探索系统结构如何控制系统的物理、化学和生物过程以及系统过程与功能的关系,认识过程-功能实现最大生态服务价值的机制,推动滨海地球关键带科学理论进步,

并服务滨海生态系统的科学管理和可持续利用模式构建。特别是将滨海陆地-海洋-大气交互区作为由不同生态系统、地质地理系统以及社会系统构成的表层地球系统,突出系统的整体性、关联性、非线性和生命性,用地球关键带科学研究理论和方法研究结构、过程和生态功能极为复杂的滨海表层地球系统,将提升生态系统结构-过程-功能理论,并为建立和完善滨海地球关键带科学理论做出重要贡献。

3.2 滨海地形地貌与滨海地球关键带结构类型变化

海陆边界在长时间海平面波动及短时间尺度潮汐和波浪产生周期性水位涨落影响下,始终处于动态变化之中,加之地下水和海水之间也存在着多圈层物质交换,造成滨海地球关键带的结构和时空分布格局不断变化。滨海地球关键带的地面高程、沉积物组成^[76]、水沙动力和植被覆盖等一系列要素均有显著的自陆向海过渡特征,决定了其生态服务功能具有显著地带特征^[77]。从空间分布看,滨海地球关键带包含与海陆变迁相关的多样地貌类型、地貌单元^[78],如淤泥质潮滩(盐沼与光滩)、沙滩、基岩海岸、河口三角洲、滨海冲(洪)积平原、河流湿地、滨海城镇化陆域等,形成滨海地球关键带五大类型的格局(图2)。

滨海地球关键带内组分和要素的多时间尺度(千年、百年和年代际)变化模式记录表明,滨海地球关键带对环境变化异常敏感,海平面变化、人类活动、极端气候事件、沉积物供应变化和海洋动力过程之间的相互作用在滨海地球关键带体系中有良好保存记录^[79]。因此,基于沉积相和岩相古地理分析,可恢复地层中保存的海平面变化、气候变化和沉积环境演化等信息,这就为基于过程-产物关系(沉积记录反演与数值模拟正演相结合的研究方法)恢复和重建岸线变迁—海岸地貌类型演化-主导沉积动力变化过程^[80,81],进而定量辨识气候变化和人类活动对滨海地球关键带结构的影响及其驱动机制提供了绝佳契机。此外,滨海地球关键带是地球五大圈层交汇处,是海陆交互作用强烈的特殊地带,也是地球关键带系统中各个界面要素相互渗透、相互作用的典型区域。区域内物理过程、化学过程、生物过程和地质过程交织耦合,影响因素众多,发育过程与演变机制极为复杂^[71]。

3.3 滨海地球关键带科学与其他学科的关系

滨海地球关键带为滨海地质圈(水圈+岩石土壤圈

+大气圈)和滨海生物圈相互作用构成的整体系统,其动力学研究涉及滨海地质科学、生态科学、环境科学和地理科学的学科理论和研究方法。滨海地球关键带科学是以海岸带不同类型地球关键带结构、过程、功能和服务的综合系统研究。作为一个综合交叉学科,所研究的对象既包含海岸地质地貌、河流水系与气候水文特征、海岸堆积与侵蚀等有关的自然科学,也包含土地利用规划、滨海城市发展、海岸带围垦利用等有关滨海社会-生态系统的综合管理的社会以及人文科学。主要目标是揭示滨海关键带结构-过程-功能之间的物理、化学和生物机制,结合社会人文科学的理论和方法,多尺度解析和区分自然胁迫和人为引起的变化,从系统科学角度认识滨海地球关键带的生态功能和服务,探索可持续发展路径,实现滨海社会-生态系统的可持续发展。在地球系统科学的理论框架下开展滨海社会-生态系统科学研究,实现滨海地球系统的可持续性治理和管理(图3)。地球关键带科学是我们从不同学科研究理解滨海表层地球系统动力学及其与可持续发展的关系的重要科学,对我们系统性理解滨海生态系统结构、过程及其功能与服务之间的关系极为重要。

尽管大量研究从不同学科角度探讨了滨海地区地质构造、地貌演化、水文过程、生物地球化学循环过程以及生态系统服务功能,但基于地球系统科学理念对滨海关键带复杂结构演变与多要素、多过程之间的内在作用关系的研究却很少,也缺乏对结构-过程如何协同影响生态系统功能和服务质量的系统研究,导致难以准确评估气候变化和人类活动背景下滨海关键带结构-过程演化规律及其生态环境效应,难以为滨海地区生态系统服务的协同提升与保护提供充分的科学依据。应对当前滨海可持续发展面临的挑战,实现滨海生态环境的保护、恢复和可持续利用需要从滨海地球关键带科学和其他相关学科理论出发,系统研究理解保护、恢复和提升滨海地球关键带的结构稳定性、功能与服务价值的科学原理。当前国内外滨海生态环境的保护、恢复和利用过程中仍存在很多问题和不足,其主要原因是我们未能从多学科、多要素、多过程、多尺度和系统整体性变化理解滨海表层地球系统的动力学特征,对滨海地质-生态系统以及滨海社会-生态系统科学规律缺乏系统认识,致使对滨海生态系统的综合管理成效不高^[7]。因此,要实现滨海系统的综合管理和可持续发展,需要基于地球关键带科学原理综合考虑滨海结构、过程、功能、服务与演化及其对全球变

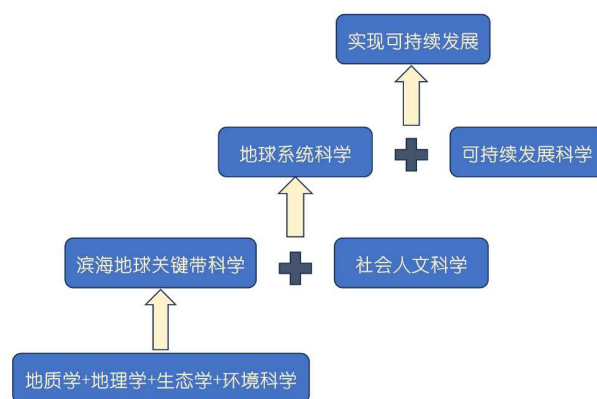


图3 滨海可持续发展研究相关学科。图中可持续性发展科学是指通过研究社会-生态系统人-地耦合核心科学问题、探索可持续发展路径实现可持续发展的科学

Figure 3 Disciplines related to coastal sustainable development research. In the figure, sustainability science refers to the discipline that achieves sustainable development by studying the core scientific issues of coupled human-environment systems and exploring pathways toward sustainability

化的响应和影响,整合地质、地理、资源、生物、生态、环境、灾害、经济、信息和管理等多学科知识,发展滨海地球系统科学和可持续发展科学。

4 滨海地球关键带科学的优先研究方向

深入认知滨海地球关键带生态系统演变和功能退化机制,明确其发生、发展的关键过程及反馈效应,恢复并提升其生态服务功能是滨海地球关键带研究需解决的重大问题。未来应基于地质、地理和生态等多学科交叉融合开展以下五方面研究,且按优先级排序分别为:滨海地球关键带结构及其时空变化规律、关键带结构与过程耦合机制、关键带过程和生态功能与服务、滨海城市地球关键带科学和滨海地球关键带科学与滨海生态系统恢复、保护与可持续性管理,具体如下所述。

4.1 滨海地球关键带结构及其时空变化规律

在全球变暖、海平面上升的背景下,滨海地球关键带的演变趋势已成为研究焦点。前人多关注地质历史时期及轨道-千年尺度的古海面变化与海岸系统响应^[55]。近年来,海面上升的驱动机理、滨海地球关键带组分的响应和恢复已取得较大进展^[82,83],但在定量解读多过程耦合、关键带演化的物理机制等方面仍有待深入。系统探明不同类型滨海地球关键带结构演化机

制, 提高定量化研究水平, 是滨海地球关键带未来研究的重要方向。

中全新世以来, 海面上升速率减缓, 全球海平面变化速率从8 ka的约6 mm/a减缓到6 ka的约1 mm/a^[84]。多种河口三角洲快速建造, 滨海地球关键带地貌显著变迁, 形成了多样化的地貌类型和相应的沉积记录^[80]。钻孔资料显示, 冰消期海侵以来随着岸线后迁, 滨海区域也随岸线向陆迁移, 如1.2万年以来环渤海滨海区域是随着岸线向陆迁移而迁移的(图4)。探索全新世以来滨海湿地空间展布及其时间序列的演变, 可为滨海湿地的存续与全球变暖、海平面变化之间建立联系。因此, 基于岩相古地理方法重建全新世以来渤海湿地的空间格局变化, 可为未来海平面上升情境下滨海湿地变迁预测奠定基础。

人类世以来, 人类活动逐渐主导了海岸带演变, 是滨海地球关键带变化最重要的营力之一^[85], 如人类活动在流域建坝严重削减了滨海的沉积物来源、大型海岸工程建设直接改变滨海地貌形态^[86]和动力地貌过程^[76]。在人类活动与气候变化的共同作用下, 近20年来全球滨海湿地净损失4000 km², 其中我国占20%以上^[37]。以环渤海为例, 滨海地球关键带被大量人工改造^[87]。其中, 渤海湾的人工开发利用程度最高, 局部自

然岸线几近消失^[88]。在辽东湾北部, 85%的滨海自然湿地经围垦转化为人工湿地或非湿地^[89]。此外, 滦河三角洲的潟湖-沙坝海岸显著蚀退, 侵蚀岸线高达近90%, 局部岸线后退速率最大可达30 m a⁻¹^[90]。可见, 在人类活动的影响下, 滨海地球关键带区域的自然岸线、天然湿地锐减, 局部岸段蚀退严重, 生态环境呈恶化趋势, 亟待深入开展全新世以来滨海地球关键带各要素多时空尺度的耦合过程与机理研究, 结合海岸地貌动力学和海洋数值模拟方法, 厘清滨海地球关键带结构、格局演变过程与趋势。

4.2 滨海地球关键带结构与过程耦合机制

滨海地球关键带呈现出河口三角洲、潮滩、滨海河流-湿地和滨海城镇等多景观交互的结构和动态多变的水文生物地球化学循环特征。揭示滨海地球关键带结构-过程之间耦合机制, 量化滨海地球关键带多圈层物质通量及其演变的驱动机制, 需要融合多学科知识, 进行多尺度监测、多过程耦合和多方法解析。

认知地球关键带结构与水文过程互作关系是理解水资源分配、生物地球化学过程及景观格局演化的关键^[10,12]。现有研究综合运用了野外监测、同位素示踪和模型模拟等方法^[91]探究了滨海地区水资源分布、水

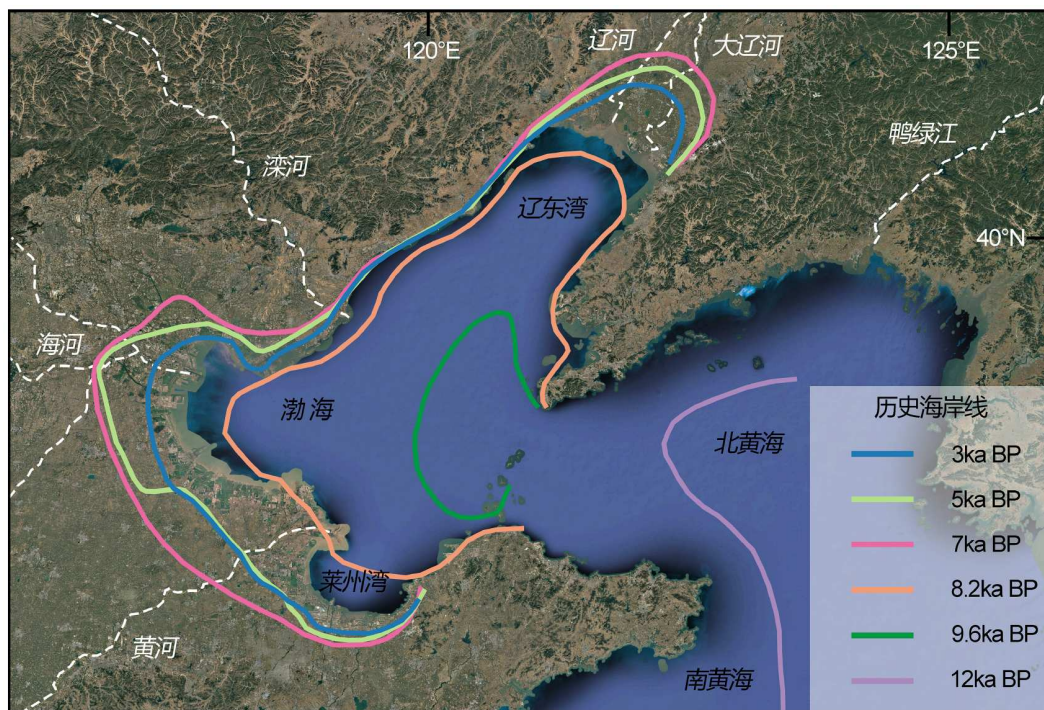


图4 全新世以来渤海海岸线变迁(修改自文献^[53])

Figure 4 Changes in the Bohai Sea coastline since the Holocene (modified from Ref. ^[53])

循环及地表水-地下水交互的时空变化规律及其驱动机制^[92]以及海水入侵和潮汐运动等过程如何影响地形地貌演化、水盐和植被格局演变等^[93]。但只有少数研究解析了沉积物厚度和组成等关键带结构特征对水分传输的影响^[93]。亟待加强滨海地球关键带结构与水文过程演变相互作用的机理研究,揭示滨海地区不同类型关键带结构-水文水动力过程之间的互馈机制。

滨海地区关键带结构与生物地球化学过程互馈作用非常显著。一方面,滨海地球关键带垂向圈层结构及其空间格局直接影响碳、氮、磷、硫等生源要素时空分布、循环与转化^[94];另一方面,生物地球化学过程也塑造滨海地球关键带结构和组成^[95]。现有研究结合野外监测、同位素标记和高分辨质谱等方法^[96]研究了关键带结构对元素循环与转化的影响^[97],以及水文水动力对元素迁移转化的影响^[98]。此外,岸线硬化等人为活动对关键带结构及物质迁移转化过程的影响研究也较多^[99]。然而,仅有少量研究探讨了元素过程对关键带结构的影响,特别是营养物质输入和外来物种入侵引起的生物地球化学过程改变如何影响滨海湿地的结构和稳定性^[100]。因此,关键带结构与生物地球化学过程之间互馈机理还缺乏系统研究。

模型是量化生源要素迁移转化和多圈层通量演变的重要手段。现有的地球系统模型,如CCSM,已被广泛用于模拟全球和区域尺度水文-生物地球化学过程^[101],但对于地形等关键带下垫面结构类型的描述相对欠缺。与之相对,流域水文-生物地球化学模型,如BioRT-Flux-PIHM,能够模拟流域尺度物质在陆-气间的垂向交换和陆-水间的水平传输^[102],但难以直接用于相对开放且受潮汐作用强烈的滨海地区。近年来发展的陆-海界面水动力水质模型,如变密度过渡带模型(SUTRA),广泛应用于陆-海界面的物质交互过程研究^[95],但对垂向物质交互刻画不够。因此,需要开发针对滨海地区的水文-生物地球化学耦合模型,评估滨海地球关键带结构及水文-生物地球化学过程对气候变化和人类活动的响应。

综上所述,应优先研究不同类型滨海地球关键带的水文和生物地球化学过程,揭示关键带结构(包括垂向结构及其空间分布格局)变化对水体时空分布格局及水文过程的影响,阐明关键带结构对生源要素赋存及界面过程、物质循环转化的控制机理,探究主要环境梯度、人为活动和全球变化对关键带结构及其影响的水文-生物地球化学过程的驱动机制,构建关键带结

构-过程之间耦合关系模型,对滨海地球关键带水文-生物地球化学循环进行模拟与预估。

4.3 滨海地球关键带过程和生态功能与服务

滨海地球关键带的水、物质、能量循环以及生态过程在应对气候变化和人类活动的影响时,表现出极高的敏感性、脆弱性和不稳定性。其固有的自然过程和属性正在经历剧烈的变化^[7]。滨海关键带是一个包含多圈层、多景观、多界面和多元素的复合生态系统。水文和生物地球化学循环过程的改变,会进一步影响滨海地球关键带生态系统的演变以及生态功能的维系和服务质量。在不断变化的环境中,关键带的物理、化学和生物过程如何协同作用,影响滨海地球关键带的物质循环、能量流动和信息传递的生态功能,以及如何可持续地为人类提供支持、调节和文化等高质量的生态服务,目前还缺乏系统的研究,迫切需要揭示全球变化下滨海关键生态功能的演变及其对生态服务质量的影响。因此,应优先研究滨海地球关键带系统界面(水-土-生物-大气)的水文、生物过程、碳氮磷硫等多元素耦合循环等关键生态过程对气候变化和人类活动的响应机理及相互作用关系;研究河口三角洲、潮滩、滨海平原河流-湿地等关键生物地球化学过程对生物多样性、氮磷污染物净化、碳源/汇等功能演变的影响机理,明确滨海地球关键带的生态功能稳定性维持机制。

滨海地球关键带是海-陆交互作用交界区,为人类提供包括涵养水源、水质净化、生物多样性维持、固碳释氧、海岸保护、休闲娱乐等丰富多样的生态功能与服务^[103]。受生态系统类型与交互作用高度复杂、基础数据缺乏与方法手段等制约,滨海地球关键带是目前生态系统服务研究领域缺失的重要对象与区域。目前,针对滨海湿地生态系统服务研究对象主要以红树林和滨海湿地为主^[103],侧重探讨滨海湿地的单一生态系统服务(如固碳、水质净化、水鸟生物多样性等)的形成过程与机理^[104],缺乏对区域内其他生态系统类型的生态功能与服务的研究;在区域尺度上,现有研究主要集中在生态系统服务价值评估^[105,106]、驱动土地利用变化、气候变化、海平面上升等的机制分析方面^[107,108]。针对滨海地球关键带生态系统服务结构变化、过程对生态系统功能和服务的物质质量和价值量形成的机制以及人类活动和气候变化对重要生态系统服务的影响过程与机制缺乏系统研究,导致其重要的生态系统服务的形成过程与机制不清,因此亟需系统地

开展对滨海地球关键带不同类型生态系统服务形成过程与机理的集成研究,揭示关键带结构-过程与功能对滨海生态系统服务的形成过程及权衡关系的影响机制,开展重要生态系统服务协同提升的多目标优化与决策研究,探索生态服务综合提升的科学原理和技术路径,形成滨海地球关键带“过程-功能-服务”的理论和技術体系。

4.4 滨海城市地球关键带科学

全球沿海地区是城市人口最为集中的区域,也是人类重塑地球关键带结构和过程最为显著的区域^[109]。滨海地区城市(镇)化扩张凸显了河道快速变迁、湿地面积萎缩、水环境恶化以及洪涝灾害等问题^[5,110,111]。城镇化改变了滨海地球关键带垂向和水平方向结构及地表各圈层间的相互作用,形成了独具特色的水文和元素循环过程^[112]。滨海地区城镇化过程中,侵占湿地、耕地、林地、水域和其他生态地类,对生态服务价值和碳储量保持造成不利影响。美国东海岸和墨西哥湾由于人口增长导致的湿地损失达 $15\text{m}^2/\text{人}$ ^[113]。意大利东北部亚德里亚海岸滨海湿地由于受包括城市扩张、农业及旅游业发展及海平面上升等影响,保护区外的滨海湿地减少了21.6%,且岛屿湿地面临海平面上升的严重威胁,部分区域高达56%的湿地被海水侵蚀^[114]。厦门市急剧增加的建设用地主要来源于滨海带滩涂的填埋,导致水源涵养、废物处理等生态系统服务功能弱化^[115]。随着城市化与工业化的快速发展,珠江三角洲地区人口和产业活动集聚,围垦养殖、交通建设、产业发展等人类活动引发了大规模的围填海活动,导致滨海湿地大面积减少,滨海水体污染等生态环境问题突出^[116]。滨海城镇化还破坏了生物栖息地,导致生物多样性丧失,滨海湿地恢复可改善水文连通性和栖息地连通性^[117]。已有研究探讨了城镇化对水文过程、生态结构及元素迁移转化的影响^[118],阐述了地面硬化、基础设施修建、景观改造、资源利用和废物排放等行为对水文路径、生物群落、营养物质输移和转化等的影响^[119],揭示了水体污染、城市“热岛效应”及水体富营养化等生态环境问题的驱动机制^[110]。尽管如此,城镇地球关键带研究还处于起步阶段,2020年美国地球关键带观测网启动第一个城市地区关键带项目,研究城镇化进程对水文变化及物质输送的影响,但目前尚缺乏城镇化过程影响滨海地球关键带结构和物质循环过程耦合作用的系统研究^[120]。

4.5 滨海地球关键带科学与滨海生态系统恢复、保护与可持续性管理

滨海生态系统恢复、保护与管理应以地球关键带科学理论为基础,以区域陆海统筹为单元进行规划,制定科学的、可行的保护与修复方案措施,形成具有滨海生态系统保护与修复范式。未来研究重点包括以下几个方面。

(1) 发展精准的滨海系统观测、分析和研究方法与技术。需要关注滨海生态系统关键要素的观测理论和技术创新,发展遥感信息科学技术在宏观尺度的滨海系统观测中的应用,突破一些关键要素的精准和连续观测的技术障碍,提升未来滨海生态感知的精确度,对关键生态过程实施长期定位观测,并在数据标准化、数据集成、大数据分析、机器学习等方向开展研究,为揭示滨海生态系统演变规律提供技术保障,为滨海湿地保护、恢复和可持续性管理提供基础数据。

(2) 强化滨海生态系统动态演化格局和预测。从生物和环境等多种指标交互作用为切入点,多手段开展传统生态指标、敏感生物指标、多样性指标和环境DNA指标等研究,定量刻画多尺度滨海生态系统结构、功能与弹性变化。重点开展不同时空尺度下湖泊生态系统突变过程,特征和规律研究,定量刻画湖泊生态系统弹性变化;阐明滨海生态系统突变对多重驱动要素长期相互作用的响应及反馈机制,定量区分气候变化和人类活动对滨海生态系统变化的贡献;重建人类世以来滨海生态系统服务动态变化轨迹,整合不同时间与空间尺度上获得的研究结果,建立涵盖了复杂生态系统过程的精准预测模型,基于模型模拟未来增温和人类活动增强背景下滨海生态系统及其服务的变化。

(3) 拓展滨海生态系统服务相关学科的交叉研究。拓展传统滨海生态系统生态学、地理学和环境科学的深度融合与交叉,加深滨海生态系统过程和功能的研究。研发定量表征滨海生态系统服务的综合指标体系,发展滨海生态系统服务评估方法;揭示滨海生态系统格局-过程-功能-服务的内在机理、空间分异特征、演变规律、权衡与溢出效应及优化调控路径,揭示区域社会和生态系统互馈机制,提出具有区域特色的滨海生态系统人-地耦合系统演化理论;构建滨海生态系统服务综合评价与预测的平台,发展生态安全保障关键技术,研究生态系统服务协同提升对策。

(4) 深化滨海生态系统修复与综合管理研究。加强

局域尺度的修复向着强景观尺度修复的转变和陆海统筹下滨海生态系统保护与修复,重点加强以下研究:景观尺度的滨海生态系统生态廊道识别和保护网络构建;湿地等退化生态系统的水系再自然化和水文连通;以乡土动植物和微生物为主的生物群落的恢复或者重构;生态系统生境异质性提升和生态容量扩增;食物网结构优化与复杂度提升;群落内部的互作网络和集合群落之间的互作网络连接度提升,增强恢复生态系统的复杂性、稳定性和弹性及其恢复力.通过学科交叉,研发智慧滨海生态系统构建的技术体系,支撑滨海生态系统恢复和基于生态系统的海岸带综合管理.

5 总结

(1) 滨海地区是受大陆-海洋-大气交互作用影响的表层地球系统,为世界众多人口的社会和经济活动提供了丰富的生态服务.同时,该区域也是生态脆弱和敏感区域,受气候和人类活动的双重影响出现环境污染、生态服务功能退化和生物多样性明显减少,直接威胁着人类社会的可持续发展.由于至今仍然缺乏对滨海地区生态、环境和综合管理问题的多时空尺度、多过程和多要素的系统综合研究,限制了人们对滨海生态系统功能的恢复、提升机制和保护原理的系统认

识,致使滨海生态系统服务功能恢复、提升和保护的综合管理成效不高.

(2) 滨海地区是由滨海地质、生态和社会系统共同构成的表层地球系统,对滨海生态系统的功能恢复、保护和可持续管理尤其需要对气候变化和人类活动影响下的滨海地质和生态耦合系统动力学规律的认识.滨海地球关键带科学是研究滨海地质-生态系统动力学规律和滨海地球关键带结构、过程、生态功能极其提升机制的科学,将在滨海生态系统恢复、保护和综合管理中发挥重要作用.

(3) 滨海地球关键带科学聚焦表层地球系统层圈相互作用的物理、化学和生物过程和界面物质传输通量变化及其与生态功能和服务关系的研究,是地质学、地理学和生态学等多学科交叉融合对关键带动力学进行多时空尺度和多元素耦合的系统科学研究,是研究认识滨海生态系统功能恢复和提升机制的重要科学.但是,滨海是一个地质、地理、生态空间结构及其时间演化上尤其复杂的区域,其地球关键带结构、过程和功能在不同时空尺度上极其复杂,当前需要系统研究建立滨海地球关键带科学研究理论和方法,优先开展关键带结构时空演化机制等五大研究方向,从而完善滨海地球关键带科学理论体系.

参考文献

- Latour B, Weibel P. Critical Zones: The Science and Politics of Landing on Earth. Massachusetts: MIT Press, 2020
- Ouyang Z Y, Xu W H, Xiao Y, et al. Pattern, Quality, Services, and Evolution of Chinese Ecosystems (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [欧阳志云, 徐卫华, 肖焱, 等. 中国生态系统格局、质量、服务与演变. 北京: 科学出版社, 2017]
- Murray N J, Phinn S R, DeWitt M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 2019, 565: 222–225
- Thorne K M, MacDonald G M, Chavez F P, et al. Significant challenges to the sustainability of the California coast considering climate change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2024, 121: e2310077121
- Luo Y M. Sustainability associated coastal eco-environmental problems and coastal science development in China (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2016, 31: 1133–1142 [骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展. 中国科学院院刊, 2016, 31: 1133–1142]
- Dai Y, Yang S, Zhao D, et al. Coastal phytoplankton blooms expand and intensify in the 21st century. *Nature*, 2023, 615: 280–284
- Lang Y C, Ding H, Han X K, et al. Ecosystem protection and restoration science in coastal wetlands from the perspective of earth system science (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2022, 36: 376–382 [郎赞超, 丁虎, 韩晓昆, 等. 地球系统科学观下的滨海湿地生态系统保护和恢复科学. 中国科学基金, 2022, 36: 376–382]
- Xiong G, Zhu X, Liu M, et al. Nitrogen cycle pattern variations during seawater-groundwater-river interactions enhance the nitrogen availability in the coastal earth critical zone. *J Hydrol*, 2023, 624: 129932
- National Research Council (NRC). Basic Research Opportunities in Earth Science. Washington DC: National Academy Press, 2001
- Zhang G L, Zhu Y G, Shao M A. Understanding sustainability of soil and water resources in a critical zone perspective (in Chinese). *Sci Sin Terrae*, 2019, 49: 1945–1947 [张甘霖, 朱永官, 邵明安. 地球关键带过程与水土资源可持续利用的机理. 中国科学: 地球科学, 2019, 49: 1945–1947]
- Sullivan P L, Wymore A, McDowell W H. New Opportunities for Critical Zone Science. In: 2017 CZO Arlington Meeting White Booklet, 2017
- Brantley S L, Eissenstat D M, Marshall J A, et al. Reviews and syntheses: on the roles trees play in building and plumbing the critical zone. *Biogeosciences*, 2017, 14: 5115–5142

- 13 Naylor L A, Dungait J A J, Zheng Y, et al. Achieving sustainable earth futures in the anthropocene by including local communities in critical zone science. *Earths Future*, 2023, 11: e2022EF003448
- 14 Singha K, Sullivan P L, Billings S A, et al. Expanding the spatial reach and human impacts of critical zone science. *Earths Future*, 2024, 12: e2023EF003971
- 15 Liu M, Hou L, Yang Y, et al. The case for a critical zone science approach to research on estuarine and coastal wetlands in the Anthropocene. *Estuaries Coasts*, 2021, 44: 911–920
- 16 Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. Soil security: from Earth's critical zone to ecosystem services (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2015, 70: 1859–1869 [朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务. *地理学报*, 2015, 70: 1859–1869]
- 17 Wei H S, Zeng G P. System Theory-Philosophy of Systems Science (in Chinese). Beijing: World Publishing Corporation, 2009 [魏宏森, 曾国屏. 系统论-系统科学哲学. 北京: 中国出版集团世界图书出版公司, 2009]
- 18 Wu H, Song X, Liu F, et al. Geophysical and geochemical characterization reveals topography controls on critical zone structure in a low hilly region. *Earth Surf Processes Landf*, 2022, 47: 2796–2810
- 19 Chorover J, Kretschmar R, Garcia-Pichel F, et al. Soil biogeochemical processes within the critical zone. *Elements*, 2007, 3: 321–326
- 20 Lade S J, Steffen W, de Vries W, et al. Human impacts on planetary boundaries amplified by Earth system interactions. *Nat Sustain*, 2019, 3: 119–128
- 21 Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347: 1259855
- 22 Nicholls R J, Lincke D, Hinkel J, et al. A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nat Clim Chang*, 2021, 11: 338–342
- 23 Saintilan N, Kovalenko K E, Guntenspergen G, et al. Constraints on the adjustment of tidal marshes to accelerating sea level rise. *Science*, 2022, 377: 523–527
- 24 Tessler Z D, Vörösmarty C J, Grossberg M, et al. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world. *Science*, 2015, 349: 638–643
- 25 Pickering M D, Horsburgh K J, Blundell J R, et al. The impact of future sea-level rise on the global tides. *Cont Shelf Res*, 2017, 142: 50–68
- 26 Cloern J E, Abreu P C, Carstensen J, et al. Human activities and climate variability drive fast-paced change across the world's estuarine-coastal ecosystems. *Glob Change Biol*, 2016, 22: 513–529
- 27 Kessouri F, McWilliams J C, Bianchi D, et al. Coastal eutrophication drives acidification, oxygen loss, and ecosystem change in a major oceanic upwelling system. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118: e2018856118
- 28 Ren J, Chen J, Xu C, et al. An invasive species erodes the performance of coastal wetland protected areas. *Sci Adv*, 2021, 7: eabi8943
- 29 Doney S C. The growing human footprint on coastal and open-ocean biogeochemistry. *Science*, 2010, 328: 1512–1516
- 30 Xu C Y, Pu L J, Zhu M. Effect of reclamation activity on coastal ecological environment: progress and perspectives (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2018, 38: 1148–1162 [徐彩瑶, 濮励杰, 朱明. 沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展. *生态学报*, 2018, 38: 1148–1162]
- 31 DeConto R M, Pollard D, Alley R B, et al. The Paris Climate Agreement and future sea-level rise from Antarctica. *Nature*, 2021, 593: 83–89
- 32 Vousdoukas M I, Ranasinghe R, Mentaschi L, et al. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nat Clim Chang*, 2020, 10: 260–263
- 33 Mohamed Nor N H, Obbard J P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems. *Mar Pollution Bull*, 2014, 79: 278–283
- 34 Hunter-Cevera K R, Neubert M G, Olson R J, et al. Physiological and ecological drivers of early spring blooms of a coastal phytoplankter. *Science*, 2016, 354: 326–329
- 35 Li X R. Differentiation characteristics of geological environment and its genetic relation to geological hazards in the littoral areas (in Chinese). *Geol Prospect*, 2000, 36: 64–66 [李相然. 滨海城市地区地质环境分异特色及与地质灾害的成生联系. *地质与勘探*, 2000, 36: 64–66]
- 36 Wang S J, Lan X H, Liu X Q, et al. Summary on characteristics of main geological hazard factors in China Coast (in Chinese). *Chin J Geol Hazard Control*, 2006, 17: 102–109 [王圣洁, 蓝先洪, 刘锡清, 等. 我国海岸带灾害地质因素发育基本特征. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17: 102–109]
- 37 Murray N J, Worthington T A, Bunting P, et al. High-resolution mapping of losses and gains of Earth's tidal wetlands. *Science*, 2022, 376: 744–749
- 38 Du G Y, Sun Z Y. Research of artificial geologic disasters of coast belt in east bank of LaiZhou Bay, BoHai Bay (in Chinese). *J Geol Hazards Environ*, 2005, 16: 225–230 [杜国云, 孙祝友. 渤海湾莱州湾东岸海岸带人为地质灾害研究. *地质灾害与环境保护*, 2005, 16: 225–230]
- 39 Li S Q. Properties and classification of coastal geological hazards (in Chinese). *Mar Geol Lett*, 1996, 14: 1–3 [李绍全. 海岸带地质灾害的属性及分类. *海洋地质动态*, 1996, 14: 1–3]
- 40 Cai R S, Tan H J. Impacts and risks of accelerating sea level rise on low lying islands, coasts and communities (in Chinese). *Clim Change Res*, 2020, 16: 163–171 [蔡榕硕, 谭红建. 海平面加速上升对低海拔岛屿、沿海地区及社会的影响和风险. *气候变化研究进展*, 2020, 16: 163–171]
- 41 Wang Y P, Jia J J, Yang Y, et al. Fundamental scientific issues for the Changjiang River delta associated with the new blueprint of future

- development: overview and prospect (in Chinese). *Mar Sci*, 2019, 43: 2–12 [汪亚平, 贾建军, 杨阳, 等. 长江三角洲蓝图重绘的基础科学问题: 进展与未来研究. *海洋科学*, 2019, 43: 2–12]
- 42 Liu M, Zhang Q, Maavara T, et al. Rivers as the largest source of mercury to coastal oceans worldwide. *Nat Geosci*, 2021, 14: 672–677
 - 43 Lu Y, Yuan J, Lu X, et al. Major threats of pollution and climate change to global coastal ecosystems and enhanced management for sustainability. *Environ Pollut*, 2018, 239: 670–680
 - 44 Barletta M, Lima A R A, Costa M F. Distribution, sources and consequences of nutrients, persistent organic pollutants, metals and microplastics in South American estuaries. *Sci Total Environ*, 2019, 651: 1199–1218
 - 45 Maure E R, Terauchi G, Ishizaka J, et al. Globally consistent assessment of coastal eutrophication. *Nat Commun*, 2021, 12: 6142
 - 46 Li Y, Liang K, Lou H J, et al. Modeling of impact of petrochemical pollution accident on regional water environment in a coastal zone (in Chinese). *S-to-N Water Transf Water Sci Technol*, 2016, 14: 48–54 [李颖, 梁康, 娄华君, 等. 滨海地区石化污染事故对区域水环境影响的模拟. *南水北调与水利科技*, 2016, 14: 48–54]
 - 47 Liu Q, Zhao S T. Ecological risk assessment of coastal city in the process of urbanization based on the balanced score card (in Chinese). *Environ Prot Sci*, 2017, 43: 100–106 [刘强, 赵少亭. 基于Balanced Score Card的滨海城市化生态风险评价. *环境保护科学*, 2017, 43: 100–106]
 - 48 Yin P, Lin L J, Chen B, et al. Coastal zone geo-resources and geo-environment in China (in Chinese). *Geol China*, 2017, 44: 842–856 [印萍, 林良俊, 陈斌, 等. 中国海岸带地质资源与环境评价研究. *中国地质*, 2017, 44: 842–856]
 - 49 Scanes E, Scanes P R, Ross P M. Climate change rapidly warms and acidifies Australian estuaries. *Nat Commun*, 2020, 11: 1803
 - 50 Chen X, Li M, Zhang Z. Climate change challenges coastal blue carbon restoration in China. *J Environ Manage*, 2025, 373: 123502
 - 51 Rogers K, Kelleway J J, Saintilan N, et al. Wetland carbon storage controlled by millennial-scale variation in relative sea-level rise. *Nature*, 2019, 567: 91–95
 - 52 Zhang T, Liu H, Lu Y, et al. Impact of climate change on coastal ecosystem and outdoor activities: a comparative analysis among four largest coastline covering countries. *Environ Res*, 2024, 250: 118405
 - 53 Xue C, Qin Y, Ye S, et al. Evolution of Holocene ebb-tidal clinoform off the Shandong Peninsula on East China Sea shelf. *Earth-Sci Rev*, 2018, 177: 478–496
 - 54 Wu W X, Zheng H B, Hou M, et al. The 5.5 cal ka BP climate event, population growth, circumscription and the emergence of the earliest complex societies in China. *Sci China Earth Sci*, 2018, 61: 134–148
 - 55 Wang S, Ge J, Kilbourne K H, et al. Numerical simulation of mid-Holocene tidal regime and storm-tide inundation in the south Yangtze coastal plain, East China. *Mar Geol*, 2020, 423: 106134
 - 56 Cai R S, Xu W H. Risk of socio-economic losses from floods in China's coastal cities (in Chinese). *China Popul Resour Environ*, 2022, 32: 174–184 [蔡榕硕, 许伟宏. 未来中国滨海城市海岸洪水灾害的社会经济损失风险. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32: 174–184]
 - 57 Maxwell T L, Spalding M D, Friess D A, et al. Soil carbon in the world's tidal marshes. *Nat Commun*, 2024, 15: 10265
 - 58 Liu Z, Fagherazzi S, He Q, et al. A global meta-analysis on the drivers of salt marsh planting success and implications for ecosystem services. *Nat Commun*, 2024, 15: 3643
 - 59 Mao Q Y, Zhou C H, Xu X, et al. Preliminary analysis of C sequestration potential of blue carbon ecosystems on Chinese coastal zone (in Chinese). *Sci Sin-Vitae*, 2016, 46: 475–486 [周晨昊, 毛覃愉, 徐晓, 等. 中国海岸带蓝碳生态系统碳汇潜力的初步分析. *中国科学: 生命科学*, 2016, 46: 475–486]
 - 60 Paulson Institute, Lao Niu Foundation. Main Findings and Recommendations for Coastal Wetland Conservation Blueprint Project in China, 2015. <https://www.paulsoninstitute.org/wp-content/uploads/2015/10/Conclusions-and-Recommendations-Coastal-Blueprint-Project-2015October.pdf>
 - 61 Cui L, Li G, Liao H, et al. Remote sensing of coastal wetland degradation using the landscape directional succession model. *Remote Sens*, 2022, 14: 5273
 - 62 He Q, Silliman B R. Climate change, human impacts, and coastal ecosystems in the Anthropocene. *Curr Biol*, 2019, 29: R1021–R1035
 - 63 Gobler C J, Hattenrath-Lehmann T K, Doherty O M, et al. Reply to Dees et al.: ocean warming promotes species-specific increases in the cellular growth rates of harmful algal blooms. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: E9765–E9766
 - 64 Donnelly J P, Bertness M D. Rapid shoreward encroachment of salt marsh cordgrass in response to accelerated sea-level rise. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98: 14218–14223
 - 65 Fossheim M, Primicerio R, Johannesen E, et al. Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic. *Nat Clim Change*, 2015, 5: 673–677
 - 66 Thomson J A, Burkholder D A, Heithaus M R, et al. Extreme temperatures, foundation species, and abrupt ecosystem change: an example from an iconic seagrass ecosystem. *Glob Change Biol*, 2015, 21: 1463–1474
 - 67 Paerl H W, Scott J T. Throwing fuel on the fire: synergistic effects of excessive nitrogen inputs and global warming on harmful algal blooms. *Environ Sci Technol*, 2010, 44: 7756–7758
 - 68 Sun X, Li Y, Zhu X, et al. Integrative assessment and management implications on ecosystem services loss of coastal wetlands due to reclamation.

- J Cleaner Prod*, 2017, 163: S101–S112
- 69 Wei F, Han G X, Zhang J P, et al. Evolution of coastal wetlands under the influence of sea reclamation in Bohai Rim during (in Chinese). *Chin J Ecol*, 2018, 37: 1527–1537 [魏帆, 韩广轩, 张金萍, 等. 1985–2015年围填海活动影响下的环渤海滨海湿地演变特征. *生态学杂志*, 2018, 37: 1527–1537]
 - 70 Cui B, He Q, Gu B, et al. China's coastal wetlands: understanding environmental changes and human impacts for management and conservation. *Wetlands*, 2016, 36: 1–9
 - 71 Li S L, Wang H Y, Yan Z F, et al. Research progresses in processes and eco-environmental effects of Earth's Critical Zone (in Chinese). *Bull Miner Petrol Geochim*, 2024, 43: 1–15 [李思亮, 王浩阳, 晏智锋, 等. 地球关键带过程和生态环境效应研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 2024, 4: 1–15]
 - 72 Yuan J J, Lü Y L, He G Z. Sustainable development goals for oceans and marine and coastal ecosystem-based management (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 8139–8147 [苑晶晶, 吕永龙, 贺桂珍. 海洋可持续发展目标与海洋和滨海生态系统管理. *生态学报*, 2017, 37: 8139–8147]
 - 73 Curtin R, Prellezo R. Understanding marine ecosystem based management: a literature review. *Mar Policy*, 2010, 34: 821–830
 - 74 Ramesh R, Chen Z, Cummins V, et al. Land–Ocean Interactions in the Coastal Zone: past, present & future. *Anthropocene*, 2015, 12: 85–98
 - 75 Wang D, Gu C, Temmerman S, et al. Coastal marsh vulnerability to sea-level rise is exacerbated by plant species invasion. *Glob Change Biol*, 2025, 31: e70058
 - 76 Wang J, Gao W, Xu S, et al. Evaluation of the combined risk of sea level rise, land subsidence, and storm surges on the coastal areas of Shanghai, China. *Clim Change*, 2012, 115: 537–558
 - 77 Tong C, Li J L, Ye M Y, et al. The effects of landscape pattern change on ecosystem services value in the coastal zone of the East China Sea (in Chinese). *J Zhejiang Univ-Sci*, 2020, 47: 492–506, 520 [童晨, 李加林, 叶梦姚, 等. 东海区海岸带景观格局变化对生态系统服务价值的影响. *浙江大学学报(理学版)*, 2020, 47: 492–506, 520]
 - 78 Wang Y, Zhu D K. Coastal Geomorphology (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 1994 [王颖, 朱大奎. 海岸地貌学. 北京: 高等教育出版社, 1994]
 - 79 Mudd S M, Howell S M, Morris J T. Impact of dynamic feedbacks between sedimentation, sea-level rise, and biomass production on near-surface marsh stratigraphy and carbon accumulation. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2009, 82: 377–389
 - 80 Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves. *Mar Geol*, 2014, 352: 268–294
 - 81 Wang H. Barrier-island-and-lagoon characterized land formation in the Bohai Bay and its enlightenment to sustainability of coastal development (in Chinese). *North China Geol*, 2022, 45: 1–17 [王宏. 渤海湾障壁岛-潟湖型成陆过程及对今后海岸带可持续发展的启示——纪念天津地质调查中心第四纪地质调查与研究转入海岸带方向40年. *华北地质*, 2022, 45: 1–17]
 - 82 Nicholls R J, Tol R S J. Impacts and responses to sea-level rise: a global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century. *Phil Trans R Soc A*, 2006, 364: 1073–1095
 - 83 Pfeffer W T, Harper J T, O'Neel S. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-Century sea-level rise. *Science*, 2008, 321: 1340–1343
 - 84 Creel R C, Austermann J, Kopp R E, et al. Global mean sea level likely higher than present during the holocene. *Nat Commun*, 2024, 15: 10731
 - 85 Wu X, Wang H, Bi N, et al. Climate and human battle for dominance over the Yellow River's sediment discharge: from the Mid-Holocene to the Anthropocene. *Mar Geol*, 2020, 425: 106188
 - 86 Yang H F, Li B C, Yang S L, et al. Impacts of large projects on the sediment dynamics and evolution of the Hengsha Shoal in the Yangtze Delta. *Ocean Eng*, 2022, 261: 112030
 - 87 Sun W F. Research on the shoreline change of Laizhou Bay from 1978 to 2009 (in Chinese). Master Degree. Qingdao: The First Institute of Oceanography, MNR, 2010 [孙伟富. 1978–2009年莱州湾海岸线变迁研究. 硕士学位论文. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2010]
 - 88 Li Y, Zhang H, Chen X, et al. Distribution of heavy metals in soils of the Yellow River Delta: concentrations in different soil horizons and source identification. *J Soils Sediments*, 2014, 14: 1158–1168
 - 89 Lin H S, Chen B Q, Xu D W, et al. Assessment of coastal wetland ecosystem health based on the press-state-response model: a case study on Liaohe delta (in Chinese). *J Oceanogr Taiwan Strait*, 2012, 31: 420–428, 447 [林和山, 陈本清, 许德伟, 等. 基于PSR模型的滨海湿地生态系统健康评价——以辽河三角洲滨海湿地为例. *台湾海峡*, 2012, 31: 420–428, 447]
 - 90 Liu X J, Xing R R, Qiu R F, et al. The stability evaluation of lagoon-barrier coastline, Luanhe delta (in Chinese). *Mar Environ Res*, 2020, 39: 426–431 [刘修锦, 邢容容, 邱若峰, 等. 滦河三角洲典型潟湖-沙坝海岸线稳定性评价. *海洋环境科学*, 2020, 39: 426–431]
 - 91 Moffett K B, Gorelick S M, McLaren R G, et al. Salt marsh ecohydrological zonation due to heterogeneous vegetation–groundwater–surface water interactions. *Water Resour Res*, 2012, 48: 2011WR010874
 - 92 Fan W, Zhang G X, Li R R. Review of groundwater-surface water interactions in wetland (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2012, 27: 413–423 [范伟, 章光新, 李然然. 湿地地表水-地下水交互作用的研究综述. *地球科学进展*, 2012, 27: 413–423]
 - 93 Gao Y, Liu J Y, Zhang T T, et al. The effects of coastal estuary wetland ecosystems on global climate change (in Chinese). *Environ Sustain Dev*, 2016, 41: 16–19 [高宇, 刘鉴毅, 张婷婷, 等. 滨海河口湿地生态系统对全球气候变化的影响. *环境与可持续发展*, 2016, 41: 16–19]

- 94 Liu M, Hou L, Yang Y, et al. Correction to: the case for a critical zone science approach to research on estuarine and coastal wetlands in the Anthropocene. *Estuaries Coasts*, 2021, 44: 1193
- 95 Sawyer A H, Michael H A, Schroth A W. From soil to sea: the role of groundwater in coastal critical zone processes. *WIREs Water*, 2016, 3: 706–726
- 96 Chu M F, Xiao X T, Ding Y, et al. Sediment organic matter sources and carbon stock associated with a mangrove reserve in Danzhou Bay, Hainan, China (in Chinese). *Mar Sci*, 2021, 45: 22–31 [褚梦凡, 肖晓彤, 丁杨, 等. 海南儋州湾红树林区沉积有机质来源及碳储量. *海洋科学*, 2021, 45: 22–31]
- 97 Han G X, Wang F M, Ma J, et al. Blue carbon sink function, formation mechanism and sequestration potential of coastal salt marshes (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2022, 46: 373–382 [韩广轩, 王法明, 马俊, 等. 滨海盐沼湿地蓝色碳汇功能、形成机制及其增汇潜力. *植物生态学报*, 2022, 46: 373–382]
- 98 Tong C, Wang W Q, Zeng C S, et al. Methane (CH₄) emission from a tidal marsh in the Min River estuary, southeast China. *J Environ Sci Health Part A*, 2010, 45: 506–516
- 99 Chen Y W, Han G X, Zhao M L, et al. Modeling impacts of changes in water level on net ecosystem CO₂ exchange in a coastal wetland of the yellow river delta based on dndc model (in Chinese). *Ecol Environ Sci*, 2021, 30: 254–263 [陈雅文, 韩广轩, 赵明亮, 等. 基于DNDC模型评估水位变化对滨海湿地净生态系统CO₂交换的影响. *生态环境学报*, 2021, 30: 254–263]
- 100 Deegan L A, Johnson D S, Warren R S, et al. Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss. *Nature*, 2012, 490: 388–392
- 101 Liu C M, Dou Q C. Method of evapotranspiration estimation in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC)(in Chinese). *Adv Water Sci*, 1992, 3: 255–263 [刘昌明, 窦清晨. 土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算. *水科学进展*, 1992, 3: 255–263]
- 102 Zhi W, Shi Y, Wen H, et al. BioRT-Flux-PIHM v1.0: a biogeochemical reactive transport model at the watershed scale. *Geosci Model Dev*, 2022, 15: 315–333
- 103 Lique C, Piroddi C, Drakou E G, et al. Current status and future prospects for the assessment of marine and coastal ecosystem services: a systematic review. *PLoS One*, 2013, 8: e67737
- 104 Gedan K B, Kirwan M L, Wolanski E, et al. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Clim Change*, 2011, 106: 7–29
- 105 Sun B, Cui L, Li W, et al. A meta-analysis of coastal wetland ecosystem services in Liaoning Province, China. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2018, 200: 349–358
- 106 Cui L J, Kang X M, Zhang M Y. Ecosystem Function and Service Evaluation on Coastal Wetlands in China (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2019 [崔丽娟, 康晓明, 张曼胤, 中国滨海湿地生态系统功能及服务评价. 北京: 中国林业出版社, 2019]
- 107 Kelleway J J, Cavanaugh K, Rogers K, et al. Review of the ecosystem service implications of mangrove encroachment into salt marshes. *Glob Change Biol*, 2017, 23: 3967–3983
- 108 Liu C, Liu G, Yang Q, et al. Emergy-based evaluation of world coastal ecosystem services. *Water Res*, 2021, 204: 117656
- 109 Wang Y, Nanekharan Y A. GIS-based fuzzy logic technique for mapping landslide susceptibility analyzing in a coastal soft rock zone. *Nat Hazards*, 2024, 120: 10889–10921
- 110 Townend I, Fletcher C, Knappen M, et al. A review of salt marsh dynamics. *Water & Environ J*, 2011, 25: 477–488
- 111 Ying C, Liu Y, Li J, et al. Evolution and influencing factors of coastal resilience in the East China Sea. *Sci Total Environ*, 2024, 944: 173841
- 112 Kaushal S S, McDowell W H, Wollheim W M. Tracking evolution of urban biogeochemical cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2014, 121: 1–21
- 113 Zou Z, Huang C, Lang M W, et al. Hotspots of wetland loss to impervious surfaces in the conterminous United States. *Sci Total Environ*, 2024, 948: 174787
- 114 Wang J, Wu Z F, Chen J S. Evolving and monitoring of the factors affecting the coastal wetlands in Italy (in Chinese). *Ecol Environ*, 2021, 30: 242–253 [王璉, 吴志峰, 陈劲松. 意大利东北部滨海湿地演变及其影响因素监测分析, *生态环境学报* 2021, 30: 242–253]
- 115 Zhang T H, Ye T, Xu S, et al. Evolution of land use pattern and its impact on the value of ecosystem services in cities (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2018, 38: 72–7581 [张天海, 田野, 徐舒, 等. 滨海城市土地利用格局演变及对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2018, 38: 7572–7581]
- 116 Li J X, Wang J, Du Y H, et al. The characteristics of coastal wetland changes in the Pearl River Delta under rapid urbanization (in Chinese). *Wetlands Sci*, 2019, 17: 267–276 [李婧贤, 王钧, 杜依杭, 等. 快速城市化背景下珠江三角洲滨海湿地变化特征, *湿地*, 2019, 17: 267–276]
- 117 Karstens S, Dorow M, Bochet R, et al. Stepping stones along urban coastlines—improving habitat connectivity for aquatic fauna with constructed floating wetlands. *Wetlands*, 2022, 42: 76
- 118 Chen X, Wang J, Liu J, et al. Unveiling riverine N₂O dynamics along urbanization gradients by integrating hydrological, biogeochemical and microbial processes. *Water Res*, 2025, 268: 122620
- 119 Kaye J, Groffman P, Grimm N, et al. A distinct urban biogeochemistry? *Trends Ecol Evol*, 2006, 21: 192–199
- 120 Lee S Y, Dunn R J K, Young R A, et al. Impact of urbanization on coastal wetland structure and function. *Austral Ecol*, 2006, 31: 149–163

Summary for “滨海地球关键带科学: 一个新兴的研究领域”

The coastal Critical Zone sciences: an emerging research area

Cong-Qiang Liu^{1*}, Zhaoliang Song¹, Changchun Song^{2,3}, Qinglong Wu^{4,5,6} & Yaping Wang⁷

¹ Institute of Surface-Earth System Science, School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

³ Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

⁴ Key Laboratory of Lake and Watershed, Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

⁵ Sino-Danish Centre for Science and Education, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

⁶ Fuxianhu Research Station for Plateau Deep Lake Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Chengjiang 652500, China

⁷ School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

* Corresponding author, E-mail: liucongqiang@tju.edu.cn

The coastal Earth Critical Zone (CECZ), located in coastal plains and nearshore regions, is a complex and dynamic ecological interface shaped by interacting physical, chemical, and biological processes across land, ocean, and atmosphere. These interactions occur across multiple spatial and temporal scales, from molecular-level biogeochemical reactions in sediment porewater to large-scale oceanic and atmospheric circulation patterns. This CECZ exhibits an exceptionally high level of ecological functions, including primary production, nutrient cycling, and habitat provision, which in turn supports essential services like fisheries, water purification, and carbon storage. However, it also ranks among the most sensitive regions to both climate change and human disturbances. This paper systematically traces the origin and evolution of CECZ science, emphasizing its emergence as a critical frontier of interdisciplinary research. Previous research efforts were largely discipline-specific, ranging from coastal geomorphology to marine ecology and hydrology. Recent development of advanced methods, such as isotope ratio mass spectrometry, remote sensing, and numerical modeling, has increasingly facilitated integrated and system-level investigations. This transition has been crucial for understanding the complex feedback mechanisms and cascading effects that govern the evolution of the CECZ, highlighting the need for collaborative research across geological, biological, chemical, and physical sciences. For the first time, this study offers a precise spatial definition of the CECZ. Vertically, its boundaries extend from the lower limit of significant biological and chemical activities (i.e., the top of the subsurface fresh rock or the base of the aquifer system), to the upper reaches of the coastal vegetation canopy, where energy, water, and gas exchange with the atmosphere is most intense. Horizontally, it encompasses a diverse range of geomorphological units, including beaches, estuaries, salt marshes, and coastal cliffs. The structural evolution of CECZ is driven by a combination of natural and anthropogenic factors. Currently, the coastal region is grappling with a series of severe challenges, including accelerating sea-level rise, progressive coastal erosion, widespread wetland degradation, and rapid biodiversity loss. Despite significant research efforts, existing studies remain fragmented and often confined to single disciplines or localized issues, thus limiting our understanding of the complex and interconnected processes within the CECZ. This paper posits that the core of CECZ science lies in elucidating the intricate relationships among its structure, processes, functions, and services. Based on this new concept, five prioritized research directions are proposed: (i) the spatiotemporal evolution of the CECZ structure and its mechanisms; (ii) the coupling mechanisms between structure and processes; (iii) the mechanisms underlying ecological functions and services; (iv) the unique challenges and opportunities of coastal urbanization; and (v) ecosystem restoration and integrated management. To advance these research priorities, a new “Structure-Process-Function-Service” theoretical framework is proposed through multidisciplinary integration, long-term observational networks, and model-data fusion. It further calls for enhanced land-sea integrated governance and the development of Earth system science-based research paradigms, providing scientific foundations for addressing global changes and achieving human-environment synergies in coastal regions.

coastal Earth Critical Zone, critical zone structure-process coupling, ecological functions, sustainable development and management

doi: [10.1360/TB-2025-0201](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0201)