

田伟, 董玉祥. 2023. 波浪—海滩—沙丘相互作用研究进展. 热带地理, 43 (9): 1665-1677.

Tian Wei, and Dong Yuxiang. 2023. Research Progress on Wave-Beach-Dune Interactions. *Tropical Geography*, 43 (9): 1665-1677.

波浪—海滩—沙丘相互作用研究进展

田伟¹, 董玉祥^{1,2}

(1. 中山大学地理科学与规划学院/广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275;

2. 广州新华学院 资源与城乡规划学院, 广州 510520)

摘要: 基于 Web of Science 数据库搜索关键词“波浪—海滩—沙丘相互作用”, 筛分出与主题紧密相关的文献近百篇并对其梳理与分析, 将研究阶段与理论模式进行划分, 厘清当前研究存在的问题与机遇。结果发现, 波浪—海滩—沙丘相互作用研究自 1980s 以来经历了理论提出、区域拓展、深入研究 3 个发展阶段。理论模式从单一的概念模式发展为不同尺度概念下的相互作用理论模式, 研究方法从单一的野外测绘和海图测深资料发展到野外实地观测、室内风洞试验、3S 技术与数值模拟相结合的综合研究方法; 研究区域, 从澳大利亚东南部海岸扩展到欧洲、北美洲、南美洲和亚洲等地海岸。同时, 波浪—海滩—沙丘相互作用研究中也存在一些尚未解决的问题: 针对不同区域的海岸沙丘动力地貌系统难以总结出一个具有普适性的理论模式; 微观尺度内, 已有的理论内容难以完全的揭示波浪、潮汐水动力与碎波带/海滩和风力与海滩—沙丘地貌之间的复杂相互作用机理; 中观尺度内, 整个碎波带、海滩与沙丘系统对风暴的响应与反馈机理还需要进一步观测与深入研究, 且建立事件尺度内的动力与地貌响应过程和中期地貌形态变化之间的联系还需要更长时期的实地观测与模型改进; 宏观尺度内, 海平面抬升引起海岸变化的预测模型需要多时空的实地观测数据支持与验证。未来可结合历史资料、实地观测数据、高分辨率遥感影像数据, 综合分析各环境要素与碎波带、海滩、沙丘地形地貌之间的动力过程与形态响应关系, 采用数值模拟技术揭示不同时空尺度的波浪—海滩—沙丘相互作用关系机理, 进一步完善波浪—海滩—沙丘相互作用理论内容。

关键词: 波浪; 海滩; 沙丘; 海岸风沙地貌; 风沙动力作用过程; 波浪作用过程

中图分类号: P737.1; P931.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2023)09-1665-13

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003729

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



海岸沙丘广泛发育于不同纬度的砂质海岸带, 是以波浪作用为主的海滩和以风力作用为主的海岸共同构成的复杂动力地貌系统, 系统各要素之间相互作用与反馈体现着陆—海—气三相交互作用 (Short et al., 1982; Sherman et al., 1993)。海岸沙丘的形成发育具有高度时空异质性, 不同区域海岸波浪—海滩—沙丘三相相互作用过程、程度与关系差异显著, 如即使同一海岸在暴露风况程度、海滩宽度、沉积物特征、植物种群类型与分布情况基本一致时, 仅波浪能沿岸微弱的变化也可引起海岸沙丘规模空间上显著差异, 故波浪—海滩—沙丘三相相互作用研究一直是海岸风沙地貌研究的重点与难点

(Short et al., 1982; Pye, 1983, 1990; Psuty, 1986, 1988; Sherman et al., 1993; Nielsen, 2004; Saye et al., 2005; Miot et al., 2010; Cohn et al., 2018; Moulton et al., 2021)。始于 20 世纪 80 年代, 波浪—海滩—沙丘相互作用研究大致可归结为理论提出、研究区域拓展、深入研究 3 个阶段, 其中早期提出包括波浪能—海滩/碎波带动力地貌状态—海岸沙丘动力地貌特征之间关系模式、海滩与沙丘沉积物收支平衡理论、综合海岸动力环境要素与海岸沙丘形成发育理论等概念模式 (Short et al., 1982; Psuty, 1986; Pye, 1990; Sherman et al., 1993); 之后研究区域不断拓展, 从澳大利亚东南部海岸、英国 Sefton 海岸扩展

收稿日期: 2022-06-16; **修回日期:** 2022-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目“中国海岸风蚀地貌的发育与演变”(41871006)

作者简介: 田伟 (1985—), 女, 天津人, 博士研究生, 研究方向为海岸风沙地貌, (E-mail) tianw9@mail2.sysu.edu.cn;

通信作者: 董玉祥 (1964—), 男, 河南西平人, 教授, 主要从事海岸风沙地貌和土地退化研究, (E-mail) eesdyx@mail.sysu.edu.cn。

到英国多处海岸、爱尔兰、法国、丹麦、西班牙、北美以及巴西和中国等区域海岸,通过具体实例研究验证已有理论模式 (Guillén et al., 1999; Aagaard et al., 2004; Saye et al., 2005; Anthony et al., 2006, 2009; Vespremeanu-Stroe et al., 2007a; Dan et al., 2009; Houser, 2009; Servera et al., 2009; Qi et al., 2010; 董玉祥, 2010; Miot et al., 2012); 近期波浪—海滩—沙丘相互作用机理研究不断深入,结合现代测量、数据处理及模拟技术,量化了事件尺度水动力作用过程和风沙动力作用过程,以及中长期尺度海滩—沙丘形态变化的联系,探索不同环境要素在海滩—沙丘地貌状态变化中的影响程度差异 (Anthony, 2013; Bauer et al., 2015; Zhang et al., 2015; Darke et al., 2016; Moore et al., 2016; Castelle et al., 2017; Walker et al., 2017; Cohn et al., 2018; Díez et al., 2018; Malvárez et al., 2019; Anthony et al., 2020; Costas et al., 2020; Moulton et al., 2021; He et al., 2022)。相比国际上波浪—海滩—沙丘相互作用理论模式、数据获取技术与分析方法、区域研究等方面的显著进展,国内相关案例研究较少,且理论模式难以全面的揭示不同区域海岸沙丘系统的三相相互作用机理。因此,本文从 Web of Science 数据库,搜索关键词“波浪—海滩—沙丘相互作用”,筛分出与主题紧密相关的文献近百篇,并对其进行梳理与分析,厘清当前研究存在的问题与机遇,为下一步探索与揭示中国的不同区域岸段的波浪—海

滩—沙丘相互作用关系提供科学依据。

1 波浪—海滩—沙丘相互作用理论模式

波浪—海滩—沙丘相互作用模式主要分析与海岸沙丘地貌形态相关的水动力作用过程、风沙运动过程、植被覆盖情况、沙源沉积物供给以及人类活动干扰之间的相互作用关系,揭示海岸沙丘地貌形态的时空变化规律 (Short et al., 1982; Pye, 1990; Sherman et al., 1993; Walker et al., 2017)。海岸地貌学家通过借鉴其他领域的定义与概念,引入到海岸沙丘的相关研究中。Sherman 等 (1993) 借鉴 Valentin (1952) 的“尺度”概念,将时空尺度内波浪—海滩—沙丘相互作用关系划分为微观尺度 (Microscale)、中观尺度 (Mesoscale) 与宏观尺度 (Macroscale) 3 类 (表 1)。Walker 等 (2017) 借鉴“尺度意识 (scale aware) (Schumm et al., 1965)”以及河流侵蚀循环理论,将海滩与沙丘地貌动力系统研究划分为空间上“点 (Plot)”尺度、“地貌 (Landform)”尺度和“景观 (Landscape)”尺度研究。以下将从微观、中观与宏观尺度分别阐述波浪—海滩—沙丘相互作用的理论内容。

1.1 微观尺度理论模式

微观尺度界定的时间范围是数小时—数天,空间范围是数毫米—数米。微观尺度内波浪—海滩—沙丘相互作用研究近岸带水动力、风动力、波浪侵蚀

表 1 微观、中观、宏观尺度波浪—海滩—沙丘相互作用模式与研究区域

Table 1 The model of wave-beach-dune interactions in micro-, meso-, macro- domains and related study areas

尺度	理论模式	研究区域
微观	海滩沉积物供给与传输协同作用理论 (Houser, 2009)	Skallingen 海岸沙丘系统 (丹麦) (Anthony et al., 2006); 北海南部的法国海岸 (Anthony et al., 2009); Long Beach Peninsula Oysterville 海滩沙丘系统 (Cohn et al., 2018); Calvert Island West Beach 海滩沙丘系统 (Grilliot et al., 2019)
	波浪—碎波带/海滩地貌动力状态—沙丘动力地貌特征关系模式 (Short et al., 1982)	英格兰及威尔士五处海岸 (Saye et al., 2005); 澳大利亚东南部 Queensland 海岸 (Moulton et al., 2021); 巴西南部 Mocambique 海滩 (Miot et al., 2010); 中国福建南部海岸 (刘建辉 等, 2014)
中观	海滩/沙丘沉积物收支平衡理论 (Psuty, 1986, 1988, 1992; Sherman et al., 1993)	西部加利福尼亚州的 Humbolt Bay National Wildlife Refuge 海岸 (Rader et al., 2018); 加拿大 Princess Edward Island 海岸 (Walker et al., 2017); 多瑙河三角洲海岸 (Vespremeanu-Stroe et al., 2007a); 英国及新西兰部分海岸 (Pye, 1990)
	海岸前丘形态与风动力、海洋动力作用程度关系概念模式 (de Almeida et al., 2019; Pellón et al., 2019)	西班牙北部六处稳定状态海岸沙丘系统 (Pellón et al., 2019)
	海平面上升引起的海岸侵蚀后退模型 (仅考虑沉积物向海一侧传输) (Bruun Model) (Bruun, 1954; 1962)	北美、欧洲, 新西兰, 澳大利亚海岸 (Bruun, 1954; 1962)
宏观	海平面上升引起的海岸侵蚀后退模型 (仅考虑沉积物向陆传输) (RD-A Model) (Davidson-Arnott, 2005)	加拿大 Princess Edward Island 障壁岛海岸沙丘系统 (Walker et al., 2017)
	修正 Bruun 模型 (既考虑沉积物向海一侧传输, 也考虑沉积物向岸传输) (Rosati et al., 2013)	美国海岸 (Rosati et al., 2013)

海滩向海搬运沙源沉积物与海滩表面风沙流向岸传输沙源供给海岸沙丘的过程，亦是海滩与沙丘之间物质交换与能量耗散过程 (Sherman et al., 1993; Bauer et al., 1999)。海滩上风沙流向岸输沙能力不仅受到近岸带向海滩供给沙源量的影响，还受到海滩沙含水量、冰雪覆盖、盐壳、和圆木残骸等粗颗粒层的限制。因此 Houser (2009) 借鉴协同作用理论提出：当近岸沙坝向岸移动与碎波带合并为海滩提供沙源与海滩沙源沉积物被风携带向岸传输同步发生时，海岸沙丘建立且规模扩大；反之海岸沙丘遭受侵蚀破坏、规模减小。根据 Walker 等 (2017) 的“点 (Plot)”尺度概念，单个输沙事件是海滩地形、海滩面含水量、风向、波浪爬高、风速等各环境要素相互作用的结果，反映气流运动与风程、海滩表层沙含水量、海滩和沙丘地貌形态之间的作用与反馈。输沙活动的起始与中断以及输沙量变化反映各环境要素相互作用的时空变化，以及其对海滩-沙丘地貌蚀/积格局变化的控制作用。

1.2 中观尺度理论模式

中观尺度界定时间范围在数月—数年内，空间范围为数米—数千米。中观尺度研究月/年际周期内的水动力作用与风动力作用过程对海滩—沙丘地形地貌变化的作用与贡献，既需考虑平静天气条件下海滩与沙丘地形变化，也需研究极端天气状况下风暴与台风 (群) 对整个系统作用程度以及系统的响应与反馈 (Sherman et al., 1993)。从“Landform (地貌)”尺度看，海滩—沙丘地形地貌状态与系统的沉积物收支状况、海岸沙丘植被生长与覆盖程度、输沙事件和风暴作用效应与贡献密不可分 (Walker et al., 2017)。因此对其不同区域的海岸沙丘系统研究证实，它既是多年内潮波状况与海滩动力地貌状态和沙丘动力地貌状态的一一对应关系，

也是海滩与沙丘沉积物收支状态与海岸沙丘的体积规模变化关系，还反映水动力作用与风沙活动在整个系统达到稳定状态时所做出的相对贡献。

1) 波浪—碎波带/海滩—沙丘相互作用模式

Short 等 (1982) 基于澳大利亚南部海岸观测、调查和分析，总结波浪能高低与碎波带/海滩地貌动力状态与沙丘地貌动力特征之间的关系。波浪从深海传入到近海发生破波时，近岸带地形变化与海岸岬角地形引起波浪折射、衍射导致波浪能沿岸再分配；波浪与近岸带地形的相互作用与反馈决定碎波带/海滩的地貌动力状态，风动力与海滩地形相互作用与反馈决定了海岸沙丘体积规模与地貌形态 (表 2) (Short, 1978; Short et al., 1982)。波浪与碎波带/海滩—沙丘相互作用亦体现在碎波带与海滩和沙丘之间的沉积物交换，以及海岸前丘形态变化与植被盖度、植物种群丰富度之间的关系，而植物生长状况和种群数也受到波浪能高低与盐雾浓度的影响 (Short et al., 1982; Hesp, 1988)。

2) 海滩/沙丘沉积物收支平衡理论

海滩与沙丘之间的沉积物交换过程引起海滩—沙丘蚀积格局变化与相应的沙丘体积规模变化，在系统达到稳定状态时，海滩与沙丘沉积物收支动态平衡，因此海滩—沙丘沉积物收支状况反映地貌尺度内海滩与沙丘相互作用关系。Psuty (1986; 1988) 总结得出：海滩沉积物收支为正，海滩存储沙源空间增大且向海一侧扩张，则沙丘建立；海滩沉积物收支为负，海滩向内陆后退，沙丘被侵蚀形成陡坎；沙丘沉积物收支为负时，沙丘体积规模减小，反之沙丘体积增长、规模扩大。在河口三角洲、障壁岛和沙咀海岸，因河流输沙量年际变化或沿岸流传输沉积物作用引起的海滩与沙丘沉积物收支从近端 (河口) 向远端变化，相应的海岸沙丘规

表 2 澳大利亚南部海岸波浪—海滩—沙丘相互作用关系模式 (Short et al., 1982)

Table 2 The wave-beach-dune interaction models in southeastern of Australia (Short et al., 1982)

波浪高 度/m	海滩动力 地貌状态	海滩形态	海滩侵蚀 模式	海岸前丘边缘侵蚀程度	潜在 输沙率	海岸前丘规模/ 潜在破坏频率	海岸沙丘形态
>2.5	耗散型	与岸平行沙坝-低槽， 平缓宽阔	低频；波浪 增水	低频；沿岸方向形成连续沙丘侵蚀陡坎，冲刷侵蚀	高	大型海岸前丘/中等的 破坏频率	大型向陆 后退沙席
1~2.5	中间型	新月形沙坝；缓-中等 海滩坡度	侵蚀频率从 低到高变化， 裂流侵蚀	中频；在裂流带形成侵蚀陡坎 (间距 1 000 m)；裂流背部冲刷侵蚀	高-中	高-中等规模海岸前丘/ 中-高等的破坏频率	大型抛物线沙 丘、沙席
		新月形沙坝-滩尖角； 缓-中等海滩坡度		中频；在裂流带形成侵蚀陡坎 (间距： 500~1 000 m)；在裂流背部冲刷侵蚀	中	中等规模海岸前丘/高 频率的破坏	大型抛物线沙 丘、风蚀坑
		裂流；中-陡的海滩坡 度		中频；在裂流带形成侵蚀陡坎 (间距： <500 m)；在裂流背部冲刷侵蚀	中-低	中等-低规模海岸前丘/ 中-低破坏频率	不连续的风蚀 坑
<1	反射型	无沙坝狭窄的碎波带， 海滩坡度陡	高频；波浪 增水	高频；形成连续沙丘陡坎；在较低处 形成冲刷	低	小型海岸前丘/低破坏 频率	海岸前丘陡坎， 偶见风蚀坑

模随之变化 (Psuty, 1992)。后来, 该理论被 Sherman 等 (1993) 扩展为 9 种海滩/沙丘蚀积状态与海岸沙丘地貌形态对应关系, 其中的不确定海岸沙丘形态表明其可能有几种海岸沙丘 (表 3)。此外, Pye (1990) 基于澳大利亚北昆士兰海岸和英国 Sef-ton 海岸沙丘的研究, 总结得出 6 种沙丘形态与海滩/沙丘沉积物收支状态、风能、植被有效集沙能力之间的相互作用关系 (表 4)。

表 3 Sherman 和 Bauer 的中观尺度海滩—沙丘相互作用关系 (Sherman et al., 1993)

Table 3 Dynamics of beach and dune interactions in meso-scale (Sherman et al., 1993)

海滩沉积物收支	沙丘沉积物收支	海岸沙丘形态
正沉积状态	正沉积状态	海滩肩/沙丘脊
正沉积状态	稳定状态	不确定沙丘形态
正沉积状态	负沉积状态	风蚀坑/风蚀洼地
稳定状态	正沉积状态	沙丘原地加积
稳定状态	稳定状态	不确定沙丘形态
稳定状态	负沉积状态	风蚀坑/风蚀洼地
负沉积状态	正沉积状态	海岸沙丘加积且向岸迁移
负沉积状态	稳定状态	不确定沙丘形态
负沉积状态	负沉积状态	沙丘侵蚀和越浪侵蚀

3) 海岸前丘与海洋动力、风沙动力作用程度关系模式

为了定量判别稳定状态的海岸前丘地貌形态与海洋动力、风沙动力作用程度的关系, Pellón 等基于西班牙北部的六处海岸前丘坡脚位置、体积规模、输沙势和年平均总水位高度 (等于天文潮汐水位+风暴涌浪水位+波浪爬高水位) 相关性分析, 提出海岸前丘位置与规模取决于海洋动力与风沙动力作用的相对权重概念模式 (Pellón et al., 2019; de Almeida et al., 2019)。当海洋动力作用较弱时, 波浪作用难以到达沙丘坡脚, 海岸前丘可持续地向海一侧前进, 其规模受控于输沙势; 随着沙丘不断向海扩张, 海滩所能提供的沙源量逐渐减少, 沙丘增长趋势变缓直至因风程有限规模不再增长, 海岸前丘最终所处的位置由“自我调整的风程”决定。在海

洋动力作用强的海岸, 波浪侵蚀作用强, 海岸前丘位置由年平均总水位线决定; 当海滩宽度大于临界风程时, 前丘体积规模增长至稳定状态, 其规模与输沙势成正比; 当海滩宽度小于风沙流达到饱和所需的临界风程时, 海岸前丘规模取决于受风程限制的输沙量 (Pellón et al., 2019)。

1.3 宏观尺度理论模式

宏观尺度界定时间范围: 数十年至百年甚至千年; 空间范围: 百公里至千公里。百年至千年时间尺度海平面上升不可逆转。海平面上升引起海岸线与沙丘向内陆后退, 破坏沿岸沉积物收支平衡, 最终控制海滩—沙丘系统长期演化 (Sherman et al., 1993)。另外, 河流携带入海泥沙沉积物减少、构造运动、地面沉降引起相对海平面抬升, 导致海岸线后退和海滩—沙丘侵蚀程度增加 (Walker et al., 2017)。经典 Bruun 模型认为, 海平面上升导致海滩侵蚀, 海滩沉积物被向海的回流带到离岸带沉积, 并未考虑海滩与沙丘之间的沉积物交换作用 (Brun, 1954; 1962)。RD-A 模型认为, 海平面抬升导致海岸前丘被侵蚀下切形成陡坎, 侵蚀的沉积物被搬运并堆积在潮下带与近岸带, 之后在风沙流向岸搬运作用下被带回陡坎前缘, 陡坎恢复沙丘高度增加且沙丘向陆一侧移动 (Davidson-Arnott, 2005)。最近, 基于海平面上升引起越浪侵蚀、沉积物向岸传输、海滩与沙丘沉积物交换的证据, Rosati 等 (2013) 对 Bruun 模型进行修正, 能够较全面地预测海平面抬升引起的沉积物向岸传输与向海传输 2 种情况下, 海滩横剖面的变化趋势。

2 波浪—海滩—沙丘相互作用的研究方法

2.1 微观尺度三相相互作用关系的研究方法

波浪—海滩—沙丘相互作用研究方法包括野外观测、室内实验、遥感影像解译与分析 and 数值模拟。波浪特征参数 (表 5) 可通过野外波浪浮标记

表 4 海滩/沙丘沉积物收支状态、风况条件、植被集沙能力与海岸沙丘形态关系 (Pye, 1990)

Table 4 Models of beach/dune sediment budget, wind climate, vegetation trap sand and coastal dune morphology (Pye, 1990)

海滩/沙丘沉积物收支状态	风况条件	植被集沙能力	海岸沙丘形态
海滩沉积物收支为正	风能相对较低	无	滩肩/沿岸堤、海岸平原
海滩沉积物收支为正	风能相对较高	有效的植被集沙	与海岸线平行的海岸前丘
海滩沉积物收支为负	中等风能	不连续植被覆盖	一排排锥形圆丘和锥形风蚀坑、抛物线沙丘
海滩沉积物收支平衡	各种风况	有效的植被集沙	单一的高大海岸前丘在原地增长
海滩沉积物收支为负 (轻微)	各种风况	植被被破坏	一系列的风蚀坑和小型后退式抛物线沙丘
无充足沙源	风能高	植被被破坏	向内陆后退式沙席

表5 微观、中观、宏观尺度波浪—海滩—沙丘相互作用研究所需要的参数

Table 5 The parameters for wave-beach-dune interactions in micro, meso, and macro scale domains

尺度	微观尺度(数小时到数天)	中观尺度(数月到数年)	宏观尺度(数十年至百年甚至更长)
波浪特征参数	有效波高、波浪周期、最大波高、波向、波向频率	有效波高、波浪周期、最大波高、波向、波向频率(数月到数年统计值)	有效波高、波浪周期、最大波高、波浪方向, ENSO/La Nina 事件相位表征参数 MEI、PDO、NOI, 北大西洋涛动指数 NAO, 英国西风带天气类型指数 Lamb
潮汐特征参数	大潮高度、小潮高度、最大潮差、最小潮差, 潮汐类型	平均潮差、最大潮差, 潮汐类型	平均潮差、最大潮差, 潮汐类型
风暴特征参数	风暴强度等级、一次风暴引起的波浪爬高、风暴持时	风暴强度等级、频率、每次风暴的持时, 每次风暴引起的波浪爬高, 风暴事件引起的海滩与沙丘系统的侵蚀等级	百年内风暴频率、风暴强度
风况参数	风速、风方向、最大风速、风向频率、输沙势	风速、风向(数月到数年统计值), 最大风速、风向频率, 输沙势	百年内风况(风速、风向)及其变化
近岸带/碎波带特征参数	沉积物颗粒尺寸, 近岸带/碎波带坡度、宽度	沉积物颗粒尺寸, 近岸带/碎波带坡度、宽度	海平面变化引起的近岸带/碎波地形变化(坡度、宽度、水下沙坝移动距离)
海滩形态特征参数	潮间带宽度/坡度、沉积物颗粒尺寸, 潮上带宽度/坡度、颗粒尺寸、沉积物颗粒含水量	潮间带宽度/坡度、沉积物颗粒尺寸, 潮上带宽度/坡度、沉积物颗粒尺寸, 海滩移动性、潮上带颗粒沉积物含水量、潮上带冬季是否有冰雪覆盖以及持续的时间、有无植被覆盖、植物种群变化、植被高度变化以及覆盖度变化(数月到十年), 海滩沉积物收支状况, 是否存在人工养滩工程	百年内海岸线前进/后退速率, 海滩蚀积状态及其变化
海岸前丘形态规模参数	海岸前丘高度、迎风坡坡度、海岸前丘迎风坡与背风坡沉积物颗粒尺寸、海岸前丘体积规模、海岸前丘有无植被覆盖、海岸前丘前部是否发育锥形沙丘、海岸前丘上部是否发育风蚀坑	海岸前丘高度、迎风坡坡度、海岸前丘迎风坡与背风坡沉积物颗粒尺寸、海岸前丘体积规模、海岸前丘植被覆盖度及其变化(数月到十年)、植物种群数、植物高度、锥形沙丘与风蚀坑规模、海岸前丘沉积物收支状况以及年际变化	海岸前丘形态演化特征(体积规模变化、高度变化、向内陆后退/向海前进, 移动距离与移动速率), 微地貌(风蚀坑、锥形前丘)的出现与消亡

注: MEI=Multivariate ENSO/La Nina Index, 恩索指数; PDO=Pacific Decadal Oscillation, 太平洋十年涛动; NOI=Northern Oscillation Index, 北方涛动指数; NAO=North Atlantic Oscillation, 北大西洋涛动指数。

录与电磁洋流计 (Inter Ocean S4) 监测获取, 还可通过目视观测波浪高度、破波个数用于判别波浪能高低; 水下沉积物采集可通过水下取样器 (Van Veen grab sampler)、水下旌式集沙仪和网式集沙仪捕获 (U. S. Army, 1984; U. S. Army Corps Of Engineers, 2003; Moulton et al., 2021)。潮汐特征主要来自野外验潮站和水文站 (Nielsen, 2004; Saye et al., 2005; van Puijenbroek et al., 2017; Grilliot et al., 2019)。类似的, 海滩上气象状况可通过建立微气象站布设风速仪、水分计、气压计、温度计、湿度计、水位计实时监测风况、海滩面含水量、大气压强、温度、湿度与海滩地下水位, 还可布置集沙仪 (圆柱状、立式与轻便式) 捕获风沙流输沙量 (Arens, 1996; Vespremeanu-Stroce, 2007a; Anthony et al., 2009; Sherman et al., 2014; Walker et al., 2017; He et al., 2022)。水下近岸带与碎波带地形可采用测绘棒、回声定位技术与水准仪协同测绘, 潮上带海滩与沙丘地形可采用水准仪、全站仪、RT-KGPS、LIDAR、无人机、激光扫描仪针对布设的横向剖面样线进行测绘 (Saye et al., 2005; Labuz,

2016; Walker et al., 2017)。此外, 在海滩与沙丘高处安装延时摄像机, 拍摄潮汐周期内的波浪所到达的具体位置, 实时监测海滩面浸湿与干燥过程, 为分析判断海滩有效风程提供依据 (Walker et al., 2017)。

沙源沉积物物理特征主要通过室内粒度实验与含水量实验获得, 并采用 Folk 等 (1957) 的粒度参数分级标准分析。根据实测深水波浪、潮汐与风况数据和近岸带水下地形, 借助于 Delft3D 与 SWAN 模型模拟波浪在碎波带—海滩的传输与耗散过程, 预测沿岸流、波生流传输沉积物和水下地形演变 (Saye et al., 2005; Bayram et al., 2007; Miot et al., 2012; Moulton et al., 2021)。针对风暴时难以获取深水波特征参数的情况, 可利用总水位作为代用指标并划分风暴等级, 在 XBEACH 模型中模拟水动力作用过程, 并计算水下传输沙源量 (Roelvink et al., 2019)。风沙流输沙过程模拟基于风速、风向与沉积物粒径, 采用 Fryberger 等 (1979) 方法计算输沙势 DP (Drift Potential)、总输沙势 RDP (Resultant Drift Potential)、输沙势合力方向 RDD (Resul-

tant Drift Direction)。值得注意的是,数值模拟计算的风动力传输沙源量往往比实际观测值大,是近年来研究人员尝试通过野外监测结果修正模型的重要关注点 (Delgado-Fernandez et al., 2009; Delgado-Fernandez, 2011; Walker et al., 2017)。

2.2 中观尺度三相相互作用关系的研究方法

中观尺度研究所需要的参数 (见表5) 源于数月—数年内监测数据的统计分析值,多次极端风暴事件对较长时间内地貌形态变化的影响具有累加效应,因此还需要详细记录台风、风暴 (群) 事件的强度、频率、持时以及它们对系统的影响程度。Guillén 等 (1999) 提出采用波浪—涌浪参数 $A = (H_{mo} \times t^{\frac{1}{2}})$ 和风暴—涌浪参数 $B = (SL \times t^{\frac{1}{2}})$, 其中: H_{mo} 代表有效波浪高度; SL 代表风暴事件时平均海平面高度; t 是风暴持时,用于分析风暴累计效应对海岸蚀/积状态的影响。2次调查期间累积的风暴—涌浪参数时空分布与海岸前丘坡脚位置具有很好的相关性,表明每年的海岸蚀积变化量与风暴累积效应直接相关。当波浪高度无法获取时,往往采用水位数据作为代用指标,根据高水位超过平均水位发生的概率划分风暴强度等级做进一步分析 (Sallenger, 2000; van Puijenbroek et al., 2017; Gril-liot et al., 2019)。

因仪器的可操作性和天气状况限制,中长期尺度测量近岸带、碎波带向海滩与沙丘提供沙源供给量难以实现,更多的通过数值模拟获取破波参数并计算传输沉积物量 (Bayram et al., 2007; Héquette et al., 2008; Miot et al., 2010; Roelvink et al., 2019; Moulton et al., 2021)。碎波带/海滩地貌动力状态是基于模拟的破波参数和半经验公式计算 SSP (Surf-Scaling Parameter)、SSim (Surf Similarity Parameter), 结合相对潮汐范围 RTR (Relative Tide Range) 划分碎波带/海滩地貌动力类型 (Dean, 1973; Guza et al., 1975; Wright et al., 1984; Gerhard et al., 1993; Emilia et al., 2013; Malvárez et al., 2019)。基于月/季/年际地形测绘调查获取不同时段的地形横剖面线,得出海滩供给沙丘沉积物量和海滩与沙丘体积规模变化量,统计分析海滩宽度及其变化 (标准差)、海岸线变化 (变异系数) 和海岸线变化率与海滩稳定性 (Short et al., 1982; Nielsen, 2004; Vespremeanu-Stroe et al., 2007a; Miot et al., 2010; Walker et al., 2017; Moulton et al., 2021)。此外,采用计算流体力学 CFD (Computational Flow Dynamics)

的方法计算气流经过不同状态 (坡度、宽度) 海滩,所受到的干扰程度与搬运沉积物量,验证了耗散型、中间型、反射形海滩对气流干扰程度由小变大,风沙流输沙能力由大到小的理论。因其能准确地分析气流与地形之间相互作用,被广泛地应用在海滩、风蚀坑气流动力学研究中 (Smyth et al., 2016, 2019; Delgado-Fernandez et al., 2018)。

2.3 宏观尺度三相相互作用关系的研究方法

宏观尺度内气候变化主要表现在北大西洋涛动与太平洋海温异常引起的西风带天气类型变化和 ENSO/La Niña 事件,反映事件发生的相位参数 (见表5) 可从美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) (Rader et al., 2018) 和英国气象研究中心网站直接下载 (Pye et al., 2008)。美国地质调查局开发的数字海岸线分析系统 DSAS (The Digital Shoreline Analysis System) 可解译历史卫星影像,将海岸线数字化并计算海岸线位置变化-端点速率 EPR (End Point Rate)。通过对海岸线变化、与气候异常事件发生导致的波高突变、潮汐范围、潮汐频率、海岸前丘侵蚀/加积率变化和相位参数 (太平洋 10 年涛动 PDO 与恩索指数 MEI 或西风带天气类型变化指数 Lamb、北大西洋涛动指数 NAO) 时空相关性分析,揭示海平面抬升引起海岸前丘侵蚀/加积时空变化机理 (Vespremeanu-Stroe et al., 2007b; Pye et al., 2008; Rader et al., 2018; Aagaard et al., 2019)。

随着模拟平台的不断发展与改进,数值模拟技术也被应用在陆—海相互作用研究中。Zhang 等 (2012; 2015) 通过 1D 水—陆界面过程模型和海滩植被与风沙流相互作用过程的元胞自动机模型耦合,模拟 50 年内海—陆相互作用过程,预测海岸前丘形成发育与形态演变。此外, Durán 等 (2013) 采用数值模拟的方法预测在植被与沙丘形态相互作用达到动态平衡时,海岸前丘演变趋势以及所能达到的最大高度; Davidson-Arnott 等 (2018) 则根据海岸前丘沉积物收支平衡状况,预测未来数百年内海岸前丘所能达到的最大规模。

3 波浪—海滩—沙丘相互作用区域研究

已有在世界各地海岸开展的研究显示,不同时空尺度内波浪—海滩—沙丘相互作用的方式以及相应的控制因素存在显著的区域差异。

3.1 不同区域的微观尺度相互作用方式和控制因素

研究者在荷兰 Schiermonnikoog、Groote Keeten、Noordwijkerhout 海岸 (Svasek et al., 1974; Arens et al., 1995; Arens, 1996)、英国 Benone Strand 海滩 (Jackson et al., 1997)、美国 New Jersey 的 Wildwood 海滩 (Jackson et al., 2015)、丹麦 Skallingen 障壁岛海岸 (Nielsen, 2004)、西班牙 Cabopino 海岸 (Malvárez et al., 2019)、法国北部海岸 (Héquette et al., 2008; Anthony et al., 2009)、中国福建平潭岛海岸做了相关的波浪—海滩—沙丘相互作用关系研究 (何岩雨等, 2018a; He et al., 2022), 结果证实不同海岸区域环境背景特征差异明显, 近岸波浪能向岸传输耗散过程与海滩上风沙流运动模式时空变化显著。大潮汐与波浪共同作用的法国北海海岸, 波浪向岸输沙沉积物量明显低于潮汐流沿岸输沙量。与之不同的微潮汐 Skallingen 障壁岛海岸和西班牙 Cabopino 海岸, 低波浪能难以带来大量的近岸沙源沉积物供给海滩与沙丘, 海滩与沙丘的沙源沉积物来源往往靠风暴引起高波浪将沉积物传输到滨面, 同时水下沙坝向岸移动与碎波带合并所提供 (Nielsen, 2004; Malvárez et al., 2019)。海岸沙丘加积不仅与沙源供给紧密相关, 也与海滩上的风沙流传输模式相关 (Svasek et al., 1974; Davidson-Arnott and Law, 1990; Arens et al., 1995; Arens, 1996; Jackson et al., 1997)。Jackson 等 (2015) 根据风速和沙源区环境条件不同, 提出风沙流穿过湿沙表面的 5 种运动模式, 该理论被何岩雨等 (2018b) 在福建平潭海滩试验研究所证实。此外, 平潭大潮汐范围海岸, 海滩输沙能力反映潮汐旋回、海滩上的滩肩沙坝-低地 (低槽) 微地形引起风程变化、风速变化、海滩面地下水位波动引起的海滩沙干燥与湿化过程之间的相互作用 (Anthony et al., 2009; He et al., 2022)。在潮汐涨落周期内, 存在风沙流输沙窗口期, 即输沙起动—停滞周期性变化, 滩面斑块状与舌状沙区随潮水涨落不断重复着“形成—发展—打破—消失—再形成和再发展”的循环过程。

3.2 不同区域的中观尺度相互作用方式和控制因素

研究者在澳大利亚 Younghusband 海岸 (Short et al., 1982; Hesp, 1988; Moulton et al., 2021)、巴西东南部 Mocambique 海岸 (Miot et al., 2010; 2012)、南非 Alexandria 海岸 (Illenberger et al., 1988)、多

瑙河三角洲流域 Sfântu Gheorghe 海滩 (Vespremeanu-Stroe et al., 2007a)、Skallingen 障壁岛 (Nielsen, 2004)、西班牙 Cabopino 海岸 (Malvárez et al., 2019)、英国五处海岸 (Saye et al., 2005)、加拿大的 Prince Edward Island 海岸 (Walker et al., 2017)、British Columbia 的 Vancouver 岛 Wickaninnish 沙丘 (Ollerhead et al., 2013)、Carlvert 海滩 (Grilliot et al., 2019)、美国的墨西哥湾海岸 (Houser, 2009; Houser et al., 2015; Houser et al., 2018)、Long Beach 岛的 Oysterville 海滩 (Cohn et al., 2018; Dietz et al., 2022)、Humboldt Bay National Wildlife Refuge (HBNW) 海岸 (Rader et al., 2018) 和中国福建沿岸 (刘建辉等, 2014), 进行中观尺度的波浪—海滩—沙丘相互作用研究, 证实不同区域海岸的波候、风况、潮汐范围与周期对海滩与沙丘形态的塑造作用因其所处的气候带与地域不同而差异明显。澳大利亚 Younghusband 海岸、巴西东南部 Mocambique 海岸同属于典型的微潮汐波浪起主导作用的海岸, 三者相互作用表现为波浪能高低与海滩-沙丘动力地貌状态关系, 但决定海滩与沙丘形态空间变化的环境要素有所不同 (Miot et al., 2010; Moulton et al., 2021)。英国多处海岸为中—大潮汐范围环境, 其海岸前丘蚀积状态仅与天文潮大潮线到平均海岸线之间的海滩地形形态直接相关 (Saye et al., 2005)。尽管同处于微—中潮汐作用范围的海岸, 因其所处气候带差异, 其海滩加积与沙丘建立规模增长发生的季节亦不同步, 且因其气相环境条件变化而表现出更高的时空不同步变化 (Nielsen, 2004; Vespremeanu-Stroe et al., 2007a; Walker et al., 2017; Cohn et al., 2018; Malvárez et al., 2019)。中国福建沿岸海滩-沙丘相互作用关系表明, 海滩的沉积状态与海滩-沙丘系统内部的相互作用, 在某种程度上决定了海滩与沙丘动力地貌关系 (刘建辉等, 2014)。此外, 即使是同一海岸带, 在多个环境要素相同的情况下, 单一变量如海岸线方向、波浪能、植被覆盖程度沿岸微小的变化亦可引起海滩与沙丘地貌形态空间显著差异 (Short et al., 1982; Miot et al., 2010; 2012; Moulton et al., 2021)。

同时, 世界上多处海岸受到风暴或风暴与天文潮大潮叠加的影响, 风暴登陆可以改变波浪方向与周期并产生波浪增水, 相应的总水位增高对海滩与沙丘产生更大程度侵蚀。英国 Sefton 海岸, 由大西洋低压风暴导致风速、波浪能与涌浪高度突变, 一次风暴就可侵蚀大量海岸沙源沉积物并引起沙源沿

岸重分布,但从长期尺度看,对其海岸沙丘系统干扰相对较小(Pye et al., 2016)。北美墨西哥湾的多处障壁岛经常遭受风暴(群)登陆,海滩与沙丘受到的侵蚀程度被划分为冲刷、冲蚀、越浪侵蚀与漫滩4个等级,风暴后海滩—沙丘系统恢复与风暴强度、频率、最初的风暴前海滩动力地貌状态、海岸沙丘形态规模、远岸带的水下地形、近岸带沙源向岸传输到滨面补充给碎波带等多个因素相关(Sallenger, 2000; Houser et al., 2015, 2018)。夏季台风(群)登陆中国福建平潭海岸后,不同类型海岸沙丘遭受侵蚀的部位与侵蚀程度有所差异,但台风过后的1年内,海岸沙丘形态基本恢复,而北美的障壁岛沙丘被风暴侵蚀后恢复需要数年(Houser, 2009; 董玉祥等, 2016; 杨林等, 2017, 2020)。

3.3 不同区域的宏观尺度相互作用方式和控制因素

宏观尺度内,全球海平面上升和区域构造地质背景对海岸线进退与沙丘形成演变具有控制作用(Sherman et al., 1993; Davidson-Arnott, 2005; Rosati et al., 2013; Walker et al., 2017)。区域地质背景方面,西班牙Mallorca岛的Alcudia Bay海岸沙地分布整体上呈三角形,处于东南部山脊、东部大海、西部Alcudia通道构造框架下,沙源难以跨过西部屏障被携带到内陆。西部Alcudia通道呈南—北延伸,有利于盛行风北风携带沙源向岸传输,形成主轴N-S的抛物线沙丘,南部的Sacanova区域受到Alcudia Peninsula岬角的遮蔽影响和盛行北风作用,沙丘长轴与东北风方向一致(Servera et al., 2009)。

海岸线进退方面,北大西洋涛动指数NAO和10年太平洋涛动PDO时域变化对海岸沙丘形态演变与蚀积率变化具有一定指示作用,但它们之间相关程度因海岸沙丘所处环境背景不同而有所差异。多瑙河三角洲海岸线变化由北大西洋涛动指数(NAO)控制的风暴强度与频率引起海平面变化所决定(Vespremeanu-Stroe et al., 2007b)。然而Sef-ton大潮海岸,海岸前丘蚀积率空间变化受到月球交点潮汐周期导致的潮汐范围与频率变化影响,同时也与西风带天气类型指数Lamb浮动有关,与NAO指数仅中等相关,但受离岸带地形与近岸带地形改变的影响更大(Pye et al., 2008)。丹麦的Skal-ligen海岸沙丘遭受越浪侵蚀后形成沉积扇,其长期形态变化与NAO变化之间相关性中等(Aagaard et al., 2019)。厄尔尼诺年太平洋东北侧海平面水温增

加,大气环流模式减弱,引起加利福尼亚海岸水位增加,海岸线后退和海滩—海岸前丘受到更强烈侵蚀,证实海岸线变化和海岸前丘蚀积状态与异常气候事件(ENSO/La Nina)发生的指示因子PDO和MEI具有相关性(Rader et al., 2018)。此外,随着海岸带地形地貌复杂性增加,气候变化引起海岸线进退与海岸沙丘长期演变趋势的复杂性相应的增加(Walker et al., 2017)。

4 问题与展望

4.1 存在的问题

由前文所述可知,波浪—海滩—沙丘相互作用研究在不同尺度内的理论模式不断改进、研究区域不断扩展、尺度之间的联系逐渐被建立,不同外动力条件及环境要素在三相相互作用影响程度也被深入研究,同时也存在一些悬而未决的问题。不同时空尺度内的波浪、潮汐、风暴、风力对碎波带—海滩—沙丘的动力作用过程与形态响应具有高度时空异质性,难以总结出一个具有普适性的理论模式。微观尺度内,海滩面风沙流输沙过程和气流穿过海岸前丘的过程观测研究案例已有很多,但将其与波浪、潮汐和风暴动力特征相联系的实地观测研究还较少;进一步的海滩上风沙流输沙过程因为受到沙源供给、海滩表层粗颗粒层、降雨、风程、海滩微地形和海滩面含水层波动等诸多因素的影响,但各环境要素之间的相互作用机理尚不完全清晰(董玉祥, 2010; 何岩雨等, 2018a, 2018b; 张绍云等, 2019; He et al., 2022)。中观尺度内,风暴对海滩—沙丘地形地貌作用与其响应研究较多以海滩、沙丘单独对风暴的响应进行调查,而整个系统对风暴的响应与反馈机理还需进一步深入探究;建立短期事件尺度与中期海滩—沙丘地貌形态变化之间的联系也需要更多详细的实地观测,更需要找到合适的海岸沙丘系统,解析同一段海岸诸多环境要素相近时,某一个环境变量对海滩与沙丘地貌形态空间变化所发挥的作用。尽管关于全球气候变化引起的海平面抬升对海岸沙丘系统造成侵蚀的认识已达成共识,但目前的研究大多通过模型预测,缺乏长期的监测调查数据验证。与国外研究现状相比,中国海岸的波浪—海滩—沙丘相互作用研究程度相对较低,亟待进一步深入研究。

4.2 展望

基于目前波浪—海滩—沙丘相互作用研究现状,针对中国的波浪—海滩—沙丘相互作用研究不

足, 需要从以下几个方面深入探索。

微观尺度内, 全面监测与调查波浪、潮汐环境要素与气象要素, 结合高精度的测深地形数据与海滩—沙丘横向剖面地形, 现场观测海滩—沙丘风沙流运动模式, 采用先进数值模型模拟水动力与风动力作用过程, 综合分析各环境要素与碎波带、海滩、沙丘地形相互作用方式与作用程度, 为中观尺度研究提供依据。

中观尺度内, 定期重复(月、季、年)观测水下近岸带、碎波带、海滩地形与潮上带海滩—沙丘地形地貌, 并且在极端事件发生前后(如风暴、大潮汐、风暴与天文潮耦合)进行野外观测碎波带、海滩、沙丘地形地貌变化。记录极端事件发生的频率与强度, 研究事件对海滩与沙丘系统造成的影响及其系统反馈程度。结合事件尺度内水、风动力对系统作用过程、作用效应与非极端事件时的气相、海相环境下碎波带、海滩、沙丘地形地貌变化情况, 探索中观尺度的波浪—海滩—沙丘相互作用关系与机理。

宏观尺度内, 基于微观尺度与中观尺度的三相相互作用关系研究, 了解海岸区域构造地质背景, 对波候、潮汐与风况长期监测, 获取平均海平面高度、总水位高度和海岸沉积物收支盈亏变化情况。结合多时空高分辨率的遥感影像解译海岸线位置, 并计算年/十年/百年际海岸线的变化率, 分析气候变化引起海平面上升导致的海岸线后退与海岸沙丘向陆移动率和形态变化之间的关系。

总之, 波浪—海滩—沙丘相互作用研究需在微观、中观与宏观尺度框架下进行, 进而建立不同尺度间相互作用的联系, 为全面深入揭示海岸沙丘形成发展及其演变规律提供依据。

致谢:感谢课题组的张绍云、符淑宜、符晶晶和邱星在撰写论文初稿时给予的讨论。感谢审稿人与编辑提出的建设性修改建议与评论。

参考文献 (References):

Aagaard T J, and Kroon A. 2019. Decadal Behaviour of a Washover Fan, Skallingen Denmark. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44 (9): 1755-1768.

Aagaard T J, Nielsen J, Jensen S G, and Friderichsen J. 2004. Longshore Sediment Transport and Coastal Erosion at Skallingen, Denmark. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 104 (1): 5-14.

Anthony E J. 2013. Storms, Shoreface Morphodynamics, Sand Supply, and the Accretion and Erosion of Coastal Dune Barriers in the

Southern North Sea. *Geomorphology*, 199: 8-21.

Anthony Edward J, Ruz Marie-Hélène, and VanhéeStéphane. 2009. Aeolian Sand Transport over Complex Intertidal Bar-Trough Beach Topography. *Geomorphology*, 105 (1): 95-105.

Anthony Edward J, Vanhee Stéphane, and Ruz Marie-Hélène. 2006. Short-Term Beach-Dune Sand Budgets on the North Sea Coast of France: Sand Supply from Shoreface to Dunes, and the Role of Wind and Fetch. *Geomorphology*, 81(3): 316-329.

Anthony Edward J, and Aagaard Troels. 2020. The Lower Shoreface: Morphodynamics and Sediment Connectivity with the Upper Shoreface and Beach. *Earth-Science Reviews*, 210 (C3): 103334.

Arens S M, Van Kaam-Peters H M E, and Van Boxel J H. 1995. Air Flow over Foredunes and Implications for Sand Transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(4): 315-332.

Arens S M. 1996. Rates of Aeolian Transport on a Beach in a Temperate Humid Climate. *Geomorphology*, 17(1): 3-18.

Bauer Bernard O, Hesp Patrick A, Walker Ian J, and Davidson-Arnott Robin G D. 2015. Sediment Transport (Dis)Continuity across a Beach-Dune Profile during an Offshore Wind Event. *Geomorphology*, 245: 135-148.

Bauer B O, and Sherman D J. 1999. Coastal Dune Dynamics: Problems and Prospects. In: Goudie A S, Livingston Ian, and Stokes Stephen. *Aeolian Environments: Sediments and Landforms*. Wiley: Chichester, 71-104.

Bayram Atilla, Larson Magnus, and Hanson Hans. 2007. A New Formula for the Total Longshore Sediment Transport Rate. *Coastal Engineering*, 54 (9): 700-710.

Brunn P. 1954. Coast Erosion and the Development on Beach Profile. Washington D C: Beach Erosion Board Technical Memorandum 44. US Army Corps of Engineers, 79.

Brunn P. 1962. Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88 (1): 117-130.

Castelle Bruno, Bujan Stéphane, Ferreira Sophie, and Dodet Guillaume. 2017. Foredune Morphological Changes and Beach Recovery from the Extreme 2013/2014 Winter at a High-Energy Sandy Coast. *Marine Geology*, 385: 41-55.

Cohn Nicholas, Ruggiero Peter, de Vries Sierd, and Kaminsky George M. 2018. New Insights on Coastal Foredune Growth: The Relative Contributions of Marine and Aeolian Processes. *Geophysical Research Letters*, 45 (10): 4965-4973.

Costas Susana, de Sousa Luisa Bon, Kombiadou Katerina, Ferreira Óscar, and Plomaritis Theocharis A. 2020. Exploring Foredune Growth Capacity in a Coarse Sandy Beach. *Geomorphology*, 371: 107435.

Dan Sebastian, Stive Marcel J F, Walstra Dirk-Jan R, and Panin Nicolae. 2009. Wave Climate, Coastal Sediment Budget and Shoreline Changes for the Danube Delta. *Marine Geology*, 262 (1): 39-49.

Darke Ian B, Walker Ian J, and Hesp Patrick A. 2016. Beach-Dune Sediment Budgets and Dune Morphodynamics Following Coastal Dune Restoration, Wickaninnish Dunes, Canada. *Earth Surface*

- Processes and Landforms*, 41(10): 1370-1385.
- Davidson-Arnott R G D. 2005. Conceptual Model of the Effects of Sea Level Rise on Sandy Coasts. *Journal of Coastal Research*, 21 (6): 1166-1172.
- Davidson-Arnott R, and Law M N. 1990. Seasonal Patterns and Controls on Sediment Supply to Coastal Foredunes, Long Point, Lake Erie. In: Nordstorm K, Psuty N, and Curter R. *Coastal Dunes: Form and Process*. Chichester: John Wiley & Sons, 177-200.
- Davidson-Arnott Robin, Hesp Patrick, Ollerhead Jeff, Walker Ian, Bauer Bernard, Delgado-Fernandez Irene, and Smyth Thomas. 2018. Sediment Budget Controls on Foredune Height: Comparing Simulation Model Results with Field Data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(9): 1798-1810.
- de Almeida L R, González M, and Medina R. 2019. Morphometric Characterization of Foredunes along the Coast of Northern Spain. *Geomorphology*, 338 (1): 68-78.
- Dean R. 1973. Heuristic Models of Sand Transport in the Surf Zone. Sydney: Institution of Engineers, Australia.
- Delgado-Fernandez I. 2011. Meso-Scale Modelling of Aeolian Sediment Input to Coastal Dunes. *Geomorphology*, 130 (3): 230-243.
- Delgado-Fernandez I, Davidson-Arnott R G D, and Ollerhead J. 2009. Application of a Remote Sensing Technique to the Study of Coastal Dunes. *Journal of Coastal Research*, 25: 1160-1167.
- Delgado-Fernandez Irene, Smyth Thomas A G, Jackson Derek W T, Smith Alexander B, and Davidson-Arnott Robin G D. 2018. Event-Scale Dynamics of a Parabolic Dune and Its Relevance for Mesoscale Evolution. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(11): 3084-3100.
- Diez Jorge, Cohn Nicholas, Kaminsky George M, Medina Raúl, and Ruggiero Peter. 2018. Spatial and Temporal Variability of Dissipative Dry Beach Profiles in the Pacific Northwest, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, 34(3): 510-523.
- Dietz Marianne E, Liu Kam-biu, Blanchette Thomas A, Ryu Junhyung, and Yao Qiang. 2022. Linking Backbarrier Lacustrine Stratigraphy with Spatial Dynamics of Shoreline Retreat in a Rapidly Subsiding Region of the Mississippi River Delta. *Geomorphology*, 397: 108008.
- 董玉祥. 2010. 波浪-海滩-沙丘相互作用模式研究述评. 中国沙漠, 30 (4): 796-800. [Dong Yuxiang. 2010. Progress and Prospect of Research on the Surfzone-Beach-Dune Interaction Models. *Journal of Desert Research*, 30(4): 796-800.]
- 董玉祥, 黄德全, 张雪琴. 2016. 海岸爬坡沙丘形态对台风响应——以2014年“麦德姆”台风为例. 中国沙漠, 36 (4): 865-870. [Dong Yuxiang, Huang Dequan, and Zhang Xueqin. 2016. Observation of Morphological Responses of a Coastal Climbing Dune to Typhoon. *Journal of Desert Research*, 36(4): 865-870.]
- Durán O, and Moore L J. 2013. Vegetation Controls on the Maximum Size of Coastal Dunes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (43): 17217-17222.
- Emilia Guisado, Gonzalo C M, and Fatima Navas. 2013. Morphodynamic Environments of the Coasta Del Sol, Spain. *Journal of Coastal Research*, 65 (s1): 500-505.
- Fryberger S G, and Dean G. 1979. Dune Forms Wind Regime. In: Edmin D Mckee. *A Study of Global Sand Seas*. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 137-169.
- Folk R L, and Ward W C. 1957. Brazos River Bar: A Study in Significance of Grain Size Parameter. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1): 3-26.
- Gerhard M, and Andrew D S. 1993. The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model. *Journal of Coastal Research*, 9(3): 785-800.
- Grilliot M J, Walker I J, and Bauer B O. 2019. The Role of Large Woody Debris in Beach-Dune Interaction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124 (12): 2854-2876.
- Guillén J, Stive M J F, and Capobianco M. 1999. Shoreline Evolution of the Holland Coast on a Decadal Scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24 (6): 517-536.
- Guza R T, and Inman D L. 1975. Edge Waves and Beach Cusps. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 80 (21): 2997-3012.
- He Yanyu, Liu Jianhui, Cai Feng, Li Bailiang, Qi Hongshuai, and Zhao Shaohua. 2022. Aeolian Sand Transport Influenced by Tide and Beach Face Morphology. *Geomorphology*, 396 (1): 107987.
- Héquette Arnaud, Hemdane Yacine, and Anthony Edward J. 2008. Sediment Transport under Wave and Current Combined Flows on a Tide-Dominated Shoreface, Northern Coast of France. *Marine Geology*, 249 (3/4): 226-242.
- Hesp P. 1988. Surfzone, Beach and Foredune Interactions on the Australian Southeast Coast. *Journal of Coastal Research*, 3 (13): 15-25.
- 何岩雨, 刘建辉, 蔡锋, 李柏良, 王立辉, 周昌懋. 2018a. 潮汐作用下的海滩风沙运动若干特征研究——以福建平潭岛远垵澳海滩为例. 海洋学报, 40 (9): 90-102. [He Yanyu, Liu Jianhui, Cai Feng, Li Bailiang, Wang Lihui, and Zhou Zhengmao. 2018. Several Characteristics of Beach Aeolian Sand Transport Influenced by Tide: A Case Study in the Yuandangao Beach, Pingtan Island, Fujian Province. *Haiyang Xuebao*, 40(9): 90-102.]
- 何岩雨, 刘建辉, 蔡锋, 李柏良, 王立辉, 宁清钱. 2018b. 潮汐作用下的风沙运动过程研究进展. 中国沙漠, 38 (3): 455-463. [He Yanyu, Liu Jianhui, Cai Feng, Li Bailiang, Wang Lihui, and Ning Qingqian. 2018. Progress of Research on Aeolian Sediment Transport Influenced by Tide. *Journal of Desert Research*, 38(3): 455-463.]
- Houser C. 2009. Synchronization of Transport and Supply in Beach-Dune Interaction. *Progress in Physical Geography*, 33 (6): 733-746.
- Houser Chris, Wernette Phil, Rentschlar Elizabeth, Jones Hannah, Hammond Brianna, and Trimble Sarah. 2015. Post-Storm Beach and Dune Recovery: Implications for Barrier Island Resilience. *Geomorphology*, 234: 54-63.

- Houser Chris, Wernette Phil, Rentschlar Elizabeth, Jones Hannah, Hammond Brianna, and Trimble Sarah. 2018. Scale-Dependent Behavior of the Foredune: Implications for Barrier Island Response to Storms and Sea-Level Rise. *Geomorphology*, 303: 362-374.
- Illenberger W K, and Rust I C. 1988. A Sand Budget for the Alexandria Coastal Dunefield, South Africa. *Sedimentology*, 35 (3): 513-521.
- Jackson D W T, and Cooper J A G. 1997. Beach Fetch Distance and Aeolian Sediment Transport. *Sedimentology*, 46 (3): 517-522.
- Jackson N L, and Nordstrom K F. 2015. Effects of Time-Dependent Moisture Content of Surface Sediments on Aeolian Transport Rates across a Beach, Wildwood, New Jersey, U. S. A. *Earth Surface Processes & Landforms*, 22 (7): 611-621.
- Łabuz T A. 2016. A Review of Field Methods to Survey Coastal Dunes Experience Based on Research from South Baltic Coast. *Journal of Coastal Conservation*, 20 (2): 175-190.
- 刘建辉, 蔡锋, 戚洪帅, 雷刚, 苏贤泽. 2014. 福建沿岸海滩—沙丘系统地貌变化特征及关系模式. 海洋地质与第四纪地质, 34 (1): 45-56. [Liu Jianhui, Cai Feng, Qi Hongshuai, Lei Gang, and Su Xianze. 2014. Geomorphologic Features of the Beach-Dune System along Fujian Coast. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(1): 45-56.]
- Malvárez Gonzalo, Navas Fatima, Guisado-Pintado Emilia, Jackson D W T. 2019. Morphodynamic Interactions of Continental Shelf, Beach and Dunes: The Cabopino Dune System in Southern Mediterranean Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44 (8): 1647-1658.
- Miot Da Silva G, and Hesp P. 2010. Coastline Orientation, Aeolian Sediment Transport and Foredune and Dunefield Dynamics of Moçambique Beach, Southern Brazil. *Geomorphology*, 120 (3): 258-278.
- Miot Da Silva Graziela, Siadat Mousavi Seyed Mostafa, and Jose Felix. 2012. *Marine Geology*, 323/325: 29-46.
- Moore L, Durán Orenco, and Ruggiero Peter. 2016. Vegetation Control Allows Auto Cyclic Formation of Multiple Dunes on Prograding Coasts. *Geology*, 44: G377781.
- Moulton Martim A B, Hesp Patrick A, Miot Da Silva Graziela, Keane Robert, and Fernandez Guilherme B. 2021. Surfzone-Beach-Dune Interactions along a Variable Low Wave Energy Dissipative Beach. *Marine Geology*, 435 (9): 106438.
- Nielsen D. 2004. Sediment Supply from Shoreface to Dunes: Linking Sediment Transport Measurements and Long-Term Morphological Evolution. *Geomorphology*, 60 (1/2): 205-224.
- Ollerhead Jeff, Davidson-Arnott Robin, Walker Ian J, and Mathew Sojan. 2013. Annual to Decadal Morphodynamics of the Foredune System at Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38 (3): 284-298.
- Pellón E, Almeida Lrd, González M, and Medina R. 2019. Relationship between Foredune Profile Morphology and Aeolian and Marine Dynamics: A Wave Driven Sediment Transport and Beach-Dune Dynamics in a Headland Bay Beach Conceptual Model. *Geomorphology*, 351: 106984.
- Psuty N P. 1986. A Dune/Beach Interaction Model and Dune Management. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 4 (1): 11-15.
- Psuty N P. 1988. Sediment Budget and Dune/Beach Interaction. *Journal of Coastal Research*, Dune/Beach Interaction (Special Issue3): 1-4.
- Psuty N P. 1992. Spatial Variation in Coastal Foredune Development. In: Carter R W G, Curtis T G F, and Sheehy-Skeffington M J. *Coastal Dunes: Geomorphology, Ecology and Management for Conservaton*. Rotterda: Balkema, 3-13.
- Pye K. 1983. Dune Formation on the Humid Tropical Sector of the North Queensland Coast, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8(4): 371-381.
- Pye K. 1990. Physical and Human Influences on Coastal Dune Development between the Ribble and Mersey Estuaries, Northwest England. In: Nordstorm K, Psuty N, and Curter R. *Coastal Dunes: Form and Process*. Chichester: John Wiley & Sons, 339-360.
- Pye K, and Blott S J. 2008. Decadal-Scale Variation in Dune Erosion and Accretion Rates: An Investigation of the Significance of Changing Storm Tide Frequency and Magnitude on the Sefton Coast, UK. *Geomorphology*, 102(3): 652-666.
- Pye K, and Blott S J. 2016. Assessment of Beach and Dune Erosion and Accretion Using LiDAR: Impact of the Stormy 2013-14 Winter and Longer Term Trends on the Sefton Coast, UK. *Geomorphology*, 266: 146-167.
- Qi Hongshuai, Cai Feng, Lei Gang, Cao Huimei, and Shi Fengyan. 2010. The Response of Three Main Beach Types to Tropical Storms in South China. *Marine Geology*, 275 (1): 244-254.
- Rader Alana M, Pickart Andrea J, Walker Ian J, Hesp Patrick A, and Bauer Bernard O. 2018. Foredune Morphodynamics and Sediment Budgets at Seasonal to Decadal Scales: Humboldt Bay National Wildlife Refuge, California, USA. *Geomorphology*, 318: 69-87.
- Roelvink D, and Costas S. 2019. Coupling Nearshore and Aeolian Processes: XBeach and Duna Process-Based Models. *Environmental Modelling & Software*, 115: 98-112.
- Rosati J D, Dean R G, and Walton T L. 2013. The Modified Bruun Rule Extended for Landward Transport. *Marine Geology*, 340: 71-81.
- Sallenger H. 2000. Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research*, 16(3): 890-895.
- Saye S E, van der Wal D, Pye K, and Blott S J. 2005. Beach-Dune Morphological Relationships and Erosion/Accretion: An Investigation at Five Sites in England and Wales Using LIDAR Data. *Geomorphology*, 72 (1): 128-155.
- Schumm S A, and Lichty R W. 1965. Time, Space, and Causality in Geomorphology. *American Journal of Science*, 263 (2): 110.
- Servera Jaume, Gelabert Bernadí, and Rodríguez-Perea Antonio. 2009. Development and Setting of the Alcudia Bay Beach-Dune System

- (Mallorca, Spain). *Geomorphology*, 110 (3): 172-181.
- Sherman D J, and Bauer B O. 1993. Dynamics of Beach-Dune Systems. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 17 (4): 413-447.
- Sherman D J, Swann C, and Barron J D. 2014. A High-Efficiency, Low-Cost Aeolian Sand Trap. *Aeolian Research*, 13: 31-34.
- Short A D. 1978. Wave Power and Beach-Stages: A Global Model. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference* (2) : 1144-1162.
- Short A D, and Hesp P A. 1982. Wave, Beach and Dune Interactions in Southeastern Australia. *Marine Geology*, 48 (3): 259-284.
- Smyth Thomas A G, Hesp Patrick A, Walker Ian J, Waskiewicz Thad, Gares Paul A, and Smith Alexander B. 2019. Topographic Change and Numerically Modelled Near Surface Wind Flow in a Bowl Blowout. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44 (10): 1988-1999.
- Smyth T, and Hesp P. 2016. Numerical Modelling of Turbulent Flow Structures in a Trough Blowout. *Journal of Coastal Research*, 75: 328-332.
- Svasek J N, and Terwindt J H J. 1974. Measurements of Sand Transport by Wind on a Natural Beach. *Sedimentology*, 21(2): 311-322.
- U. S. Army, CECW-EW, 2003. *Coastal Engineering Manual*. Washington D C: Corps of Engineers Internet Publishing Group, EM 1110-2-1100.
- U.S. Army, Coastal Engineering Research Center (CERC). 1984. *Shore Protection Manual*. 4th Edition. Washington D C: Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Volume 1, 608.
- Valentin H. 1952. *Die Kusten der Erde*. Petermanns Geografisches Mitteilug Ergänzungsheft H 246. Gotha: Justus Perthes, 118.
- van Puijenbroek Marinka E B, Limpens Juul, de Groot Alma V, Riksen Michel J P M, Gleichman Maurits, Slim Pieter A, van Dobben Han F, and Berendse Frank. 2017. Embryo Dune Development Drivers: Beach Morphology, Growing Season Precipitation, and Storms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 (11): 1733-1744.
- Vespremeanu-Stroe A, and Preoteasa L. 2007a. Beach-Dune Interactions on the Dry-Temperate Danube Delta Coast. *Geomorphology*, 86 (3): 267-282.
- Vespremeanu-Stroe Alfred, Constantinescu Stefan, Tatui Florin, and Giosan Liviu. 2007b. Multi-Decadal Evolution and North Atlantic Oscillation Influences on the Dynamics of the Danube Delta Shoreline. *Journal of Coastal Research*, SI50: 157-162.
- Walker I J, Davidson-Arnott Robin, Bauer B O, Hesp P A, Delgado-Fernandez I, Ollerhead J, and Smyth Tag. 2017. Scale-Dependent Perspectives on the Geomorphology and Evolution of Beach-Dune systems. *Earth-Science Reviews*, 171 (4): S0012825217302052.
- Wright L D, and Short A D. 1984. Morphodynamic Variability of Surf Zones and Beaches: A Synthesis. *Marine Geology*, 56 (1): 93-118.
- 杨林, 董玉祥, 黄德全, 张雪琴, 杜建会. 2017. 海岸沙席形态及近表层沉积物粒度对台风的响应. *地理科学*, 37 (8): 1243-1250. [Yang Lin, Dong Yuxiang, Huang Dequan, Zhang Xueqin, and Du Jianhui. 2017. Morphology and Grain Size of the Near Surface Sediment over Coastal Sand Sheet Response to Typhoon. *Scientia Geographica Sinica*, 37(8): 1243-1250.]
- 杨林, 董玉祥, 黄德全. 2020. 台风群后海岸爬坡沙丘形态变化特征. *中国沙漠*, 40 (2): 1-8. [Yang Lin, Dong Yuxiang, and Huang Dequan. 2020. Morphological Change of Coastal Climbing Dunes in Pingtan Island of China after typhoon Group. *Journal of Desert Research*, 40(2): 1-8.]
- Zhang Wenyan, Schneider Ralf, and Harff Jan. 2012. A Multi-Scale Hybrid Long-Term Morphodynamics Model for Wave-Dominated Coasts. *Geomorphology*, 149/150: 49-61.
- Zhang Wenyan, Schneider Ralf, Kolb Jakob, Teichmann Tim, Dudzinska-Nowak Joanna, Harff Jan and Hanebuth Till J J. 2015. Land-Sea Interaction and Morphogenesis of Coastal Foredunes: A Modeling Case Study from the Southern Baltic Sea coast. *Coastal Engineering*, 99: 148-166.
- 张绍云, 董玉祥. 2019. 海岸沙地风蚀坑形态-动力学研究进展. *地球科学进展*, 34 (10): 1028-1037. [Zhang Shaoyun, and Dong Yuxiang. 2019. Research Progress on Morphodynamics of Coastal Sandy Blowout. *Advances in Earth Science*, 34(10): 1028-1037.]

作者贡献声明:

田 伟:负责文献梳理、论文撰写与修改;

董玉祥:负责论文的整体框架、论文撰写与修改。

Research Progress on Wave-Beach-Dune Interactions

Tian Wei¹, and Dong Yuxiang^{1,2}

(1. School of Geography and Planning, Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-Simulation, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. School of Resources and Planning, Xinhua College of Guangzhou, Guangzhou 510520, China)

Abstract: Searching the key words 'wave-beach-dune interactions' in Web of Science, nearly 100 domestical and overseas publications since the 1980s have been analyzed and reviewed. This study summarizes major advances at different temporal-spatial scales. The issues of integration between them are clarified by sorting the conceptual models and categorizing development stages. Additionally, research opportunities and challenges are identified. Studies on wave-beach-dune interactions have been initiated since 1980s and developed through the following three stages: theory proposed and improved, expansion of study areas, and in-depth exploration. The conceptual models have been developed from simple to reliable models across a range of micro-, meso-, and macro-scales. Studies were initially conducted by taking advantage of only field survey and bathymetry maps. Nowadays, collaborated technology and methods have been applied in studying coastal landforms through in-situ field monitoring, wind tunnel trial, 3S technologies, and numerical simulation. Study areas extended and expanded from southeast Australian coasts to Europe, South and North America, and Asian coasts. Although plenty of relevant reports have been published, some issues exist. Owing to their highly temporal-spatial heterogeneity, it is difficult to find a universal conceptual model for the worldwide coastal dune systems. At the micro-scale, as the complex process of wave-tide hydrological and aeolian dynamic imposed on surfzone-beach-dune and limitation of monitoring data utility, the existing theoretical model cannot completely reveal the mechanism of the terrestrial-marine interface and beach-dune landform response and feedback to wind dynamics. At the mesoscale, many mechanisms of dune response to storm surges have been proposed, but few are from the perspective of the surfzone-beach-dune as a whole system. More case studies based on observation are needed, which will benefit in-depth exploration. Furthermore, more long-term monitoring and refined models are required to build the bridge between fundamental process-response dynamics (events scale) and medium-long-term landforms topography changes and evolution. At the macroscale, given the alongshore sediment transport and supply, sea level rise rate, and landward and seaward sediment transport, prediction models of coastal geomorphological changes induced by sea level rise should be tested and supported by multi-temporal-spatial observation and monitoring data. Future studies will continue collaborating the historical reports and site monitoring techniques with high-resolution images interpretation to comprehensively understand the relationships between dynamic-response process and landforms geomorphology evolution by integration of environmental variables and surfzone, beach, and dune landforms investigation. The numerical simulation will reveal the mechanisms of wave-beach-dune interactions across micro-, meso-, and macro-scales and redefine theoretical concepts.

Keywords: wave; beach; dune; coastal aeolian landforms; aeolian sediment transport process; wave hydrodynamic process