

董玉祥,李志忠.近40年中国海岸风沙地貌研究回顾[J].中国沙漠,2022,42(1):12-22.

近40年中国海岸风沙地貌研究回顾

董玉祥^{1,2},李志忠³

(1.中山大学 地理科学与规划学院,广东 广州 510275;2.广州新华学院 资源与城乡规划学院,广东 广州 510520;

3.福建师范大学 地理科学学院/湿润亚热带生态地理过程省部共建教育部重点实验室,福建 福州 350007)

摘要: 基于20世纪80年代后中国海岸风沙地貌研究的主要发展,总结了包括海岸风沙地貌类型、发育模式、风沙运动、沉积特征、发育演变及海岸风沙防治等中国海岸风沙地貌研究的主要进展,并针对当前研究存在问题提出了包括海岸风蚀地貌调查、风沙地貌形态动力学机制、波浪-海滩-沙丘相互作用、风沙地貌发育演化与全球变化以及海岸风沙资源利用与防治等中国海岸风沙地貌的未来主要研究方向。

关键词: 中国; 海岸; 风沙地貌; 回顾

文章编号: 1000-694X(2022)01-012-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00182

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

新中国建立后中国风沙地貌学在风沙地貌类型、沙丘移动规律、风沙动力学和沙漠综合研究等方面取得了重大进展^[1-7],风沙地貌学已逐渐发展为一门独立的部门地貌学科^[8]。随着风沙地貌研究的发展尤其是改革开放后中国风沙地貌学进入快速发展阶段后,在前期海岸风沙地貌初步调查基础上^[9-16],国内20世纪80年代开始追踪国际前沿开拓了海岸风沙地貌的研究^[17-25],其中早期20世纪末前对中国主要海岸沙丘类型及其区域发育模式进行了较为深入的研究,进入新世纪后开始通过典型海岸沙丘表面风沙流及海岸沙丘移动与形态变化等的野外调查与观测探寻海岸沙丘发育的动力学过程,近年则在进一步探讨海岸风沙沉积环境演化过程同时从海岸风沙地貌形成于海、陆、气三相互影响的环境出发开展海岸风沙地貌、大气、波浪与海滩交互作用的综合研究。在近40年发展过程中,中国海岸风沙地貌研究取得了较为丰富的成果,为此主要从海岸风沙地貌类型、发育模式、风沙运动、沉积特征、发育演变及海岸风沙防治等方面总结中国海岸风沙地貌研究近40年的主要进展,并提出未来一定时期中国海岸风沙地貌研究的主要发展

方向。

1 海岸风沙地貌类型

1.1 主要类型

中国海岸风沙地貌类型多样、形态复杂,不同区域存在较大差异,再因类型划分方法的不同,存在有不同的海岸风沙地貌类型表述。例如,福建海岸,早期福建东南沿海一带的风沙地貌类型划分为沙丘、垄岗状沙丘、沙积平原、沙堆等^[12],台湾海峡西岸风沙地貌类型有沙积波状平原、沙堆、新月形沙丘、新月形沙丘链、沙垄和接触沙丘等^[26],长乐一带海岸的风沙地貌类型包括新月形沙丘、成组新月形沙丘、穹状沙丘、抛物线沙丘、线状沙丘、岸前沙丘、平行沙丘、新月形沙丘链、复合沙丘链、平沙地和沙坡地等类型^[27-28],另外福建海岸的风沙类型被简单概括为滨海平原上的风成沙丘、贴附于山丘坡上风沙和风成席状沙三类^[29];风沙地貌在台湾岛沿岸分布较多^[30-34],主要有风蚀地貌的风棱石和风积地貌的新月形沙丘、横向沙丘和纵向沙丘等^[35];华南沿海地区发育于海岸平原上的岸前沙丘、加积性横向沙丘和新月形沙丘、抛物线形沙丘、纵向沙丘和海岸沙席以及草丛沙丘等自海岸向陆地依次分

收稿日期:2021-05-08; 改回日期:2021-05-28

资助项目:国家自然科学基金项目(41871006,41771020)

作者简介:董玉祥(1964—),男,河南西平人,教授,主要从事海岸风沙地貌研究。E-mail: eesdyx@mail.sysu.edu.cn

布^[36],其中广东海南琼雷地区的风沙地貌类型有包括风蚀穴、风蚀墩台等的风蚀地貌和包括流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘的风成堆积地貌^[37],海南岛东北部海岸沙丘主要类型有海岸前丘、加积性横向沙丘、新月形沙丘、抛物线沙丘、纵向沙丘、沙席和草丛沙丘^[38];山东半岛海岸的风成沙丘类型有新月形沙丘、片状风成沙丘或沙地等^[39],其中烟台附近海岸风沙地貌类型主要是链状风积沙丘、滨岸沙丘、丘间席状沙地和下伏基岩沙丘^[40];黄海与渤海海岸风沙地貌类型被划分为海岸沙丘和海岸沙地两类^[41],其中海岸沙丘根据沙丘形态、结构和动态划分为7个形态类型、4种动态类型,海岸沙地根据地表起伏和活动程度等划分为3个形态类型、3种动态类型等,主要包括抛物线沙丘、新月形沙丘、横向沙脊、新月形沙垄、纵向沙垄、斜向沙脊、冢形沙丘、平坦风成砂席、起伏风成沙地和倾斜风成沙地等,同时渤海海岸秦皇岛市附近的海岸沙丘按形态分为岸前沙丘、沿岸主沙丘链、斜向沙丘链和平坦沙席等4种类型^[42]。不过,上述研究主要关注海岸风积地貌——海岸沙丘的类型,对风棱石、风蚀坑等海岸风蚀地貌类型的研究较少^[24-25,35,37,43-44]。

1.2 分类体系

由于海岸风沙地貌类型的多样性、复杂性和区域性,不同学者从不同区域、不同角度进行了海岸风沙地貌类型的划分,国内外提出不同的海岸风沙地貌类型分类系统^[19,45-46]。概括中国海岸风沙地貌的类型,就其形态而言主要有雏形前丘、新月形前丘、草灌丛沙丘、横向前丘脊、横向沙脊、抛物线沙丘、斜向沙脊、新月形沙丘、爬坡沙丘、影子沙丘、海岸沙席、风蚀残丘、风蚀坑等,上述类型可依据海岸风沙地貌类型在发育位置、成因、稳定性与形态特征等方面的差异将其分别归入岸前沙丘与后岸沙丘2大类、初始沙丘与稳定型沙丘和非稳定型沙丘3亚类以及13个3级形态类型的海岸风沙地貌类型体系之中^[47]。

2 海岸风沙地貌发育模式

2.1 发育模式

海岸风沙地貌是海、陆、气三相交互作用影响下发育的特殊地貌,由于海岸带自然环境的空间异质性,不同地区的海岸风沙地貌发育并无统一

模式^[47-48]。

在华南热带亚热带地区地势较为平坦且空间较为开阔的海岸,风沙地貌发育典型,海岸沙丘类型较多,例如海南岛东北部海岸风沙地貌的发育是海滩沙在向岸风的作用下,通常以海岸前丘为跳板向陆输沙,以加积性横向沙丘、新月形沙丘、抛物线形沙丘和纵向沙丘为主体构成沿海岸分布的高大沙丘带,在沙丘带的后缘随风力减弱形成沙席^[17-19,36,38,49];在福建长乐海岸^[50-51],海岸风沙地貌的发育表现为海滩沙在向岸盛行风的作用下,以紧邻海滩后缘的雏形沙丘或岸前沙丘为跳板向陆输沙,以横向沙丘及沙丘链、圆形椭圆形沙丘、抛物线形沙丘和U形沙丘为主体构成沿岸分布的沙丘带,在沙丘带后缘随着风力减弱和沙源减少形成平沙地(海岸沙席)。但在华南基岩海岸的岬湾附近^[19],在向岸风作用下常形成前丘脊、滩脊阶地(沙席)和爬坡沙丘或沙坡,一般海岸线走向与主风向垂直时风的有效力最大,海滩沙不易停积于滨后而直接吹入内陆,致使前丘缺失或不发育,在滩脊之后发育较大的新月形沙丘和抛物线沙丘;当海岸线走向与主风向交角小于45°时,海岸前丘发育,并在其后形成以加积性横向沙丘、抛物线沙丘和纵向沙丘为主体的高大沙丘带,后缘为沙席;当海岸线走向与主风向交角大于45°时,由于风的有效力较小,风沿岸输送海滩沙形成多道沙堤并在其后形成大面积的沙丘。

在北方温带暖温带地区,一般是海滩沙在向岸风的作用下在岸前形成低矮的沙丘脊,并沿着岸线向更远的陆地方向形成加积性横向沙丘,如新月形沙丘、抛物线沙丘、灌丛沙丘和海岸沙席等,其中在渤海和黄海海岸的风沙地貌发育被总结为3种模式^[41]:在沙源丰富的开阔平原海岸,以冀东滦河口—洋河口海岸平原为代表,海岸平原广阔、地势较为平坦,海岸带风速自海向陆逐渐减小,在向岸风作用下海滩沙被吹到岸前堆积成岸前沙丘,大风期间岸前沙丘受侵蚀风成沙向陆搬运,自海向陆依次发育有岸前沙丘带→加积性横向沙脊→斜向沙脊→灌丛沙丘带→平坦风成沙席等海岸风沙地貌类型;在沙源丰富的开阔台地海岸和海湾小平原海岸,以山东半岛西北台地海岸、辽东半岛熊岳—归州平原海岸等为代表,一般地形较开阔、风速较大,在向岸风作用下海滩沙被吹送到岸前堆积成岸前

沙丘,大风时岸前沙丘受侵蚀沙物质向陆搬运中受地势影响在台地或小平原前缘带堆积成规模大小不一的沙丘带,其中越过沙丘带的风成沙在向陆侧的平地上堆积成平坦的风成沙席,形成自海向陆依次是岸前沙丘→纵向沙垄或抛物线沙丘或灌丛沙丘起伏的风成沙地→大沙丘或沙丘链→平坦的风成沙席的海岸沙丘发育模式;在岬湾沙滩海岸,海湾平原狭窄甚至山丘临海,海岸带风力较强但至山丘前会遇阻减速,向岸风将海滩沙吹至岸上形成岸前沙丘后,再向陆形成中等规模的沙丘、沙垄或起伏的风成沙地,并往往在山前地带堆积成高大的沙丘或沙丘链,超过大沙丘带的风沙则在山丘向海坡上形成山坡风成沙地,海岸风沙地貌发育呈现为自海向陆依次是岸前沙丘带→纵向沙垄或小型沙丘等起伏的风成沙地→高大的抛物线沙丘或沙丘链→倾斜的山坡风成沙地的模式。

2.2 形成原因

中国海岸风沙地貌的发育深受气候、水文、植被、地形等多要素变化的复杂影响,不同区域往往凸显出不同的影响与作用。例如,福建东南沿海龙海、漳浦一带的海岸沙丘的发育与区域岩石、新构造运动、地貌、气候、水文、植被、土壤和动物等自然因素都有着密切的关系,其中气候、地貌和新构造运动3个因素是主要的^[12];山东半岛风成沙丘的发育是海滩沙经风动力再搬运而形成的,除丰富沙源和一定风力条件外,下垫面的地形变化也是形成的必要条件^[39];滦河三角洲北部沙丘海岸则是在干冷气候条件下海、陆相互作用下形成的,海岸沙丘的发育条件包括海岸带具有丰富的沙质沉积物、干寒或半干燥气候下有强劲恒定的海风作用以及平坦的海岸坡度和中等潮差从而可形成宽广的海滩,这样落潮时宽广海滩上风力不断吹扬海滩沙向岸堆积形成各类海岸沙丘^[52-53],其中由风况决定的输沙势方向、大小及其变化基本控制着区域内海岸沙丘分布的基本格局^[54];黄、渤海海岸风沙地貌发育模式的研究结果表明^[41],海岸风沙地貌的发育主要受风场、沙源和地貌背景因素的作用,气候干旱多风、沙源丰富、地形开阔平坦的地区往往风沙地貌发育类型齐全、形态典型且规模较大,在福建海岸的研究也有类似结论^[29,51,55];同时,海岸风沙地貌发育过程中人类活动的重要影响也受到关注^[26,56],主要的人类活动有破坏地表覆被的农业开发、建房、工业

开发、筑路、林木砍伐、休闲与旅游开发、放牧、军事用地和采沙等。总体而言,中国海岸风沙地貌的发育与降水量的关系并不明显,而主要取决于风况、沙源及地形空间^[17,19,49],强大的风力是海岸风沙活动的动力,丰富的沙源是形成风沙地貌的物质基础,平坦开阔的空间则是风沙地貌发育的重要条件,气候干旱、风力强劲、沙源丰富、地势平坦、空间开阔的海岸最为有利于海岸风沙地貌的发育,因此中国大规模海岸沙丘多形成发育于一些有丰富沙源的河流入海口旁侧,如河北滦河口以北昌黎海岸、福建闽江入海口以南的长乐海岸等就是中国海岸沙丘规模最大、形态最典型的分布区域,由此形成了中国海岸风沙地貌分布范围广泛但规模较小且分布零散、分布地形多样但河口地区分布较集中、区域特征显著且类型与规模差异较大等特点^[17,47]。

3 海岸风沙过程观测

风沙运动过程观测是解析海岸风沙地貌形态-动力发育机理的重要途径和手段,早期受限于观测仪器等,对国内海岸风沙运动过程研究较少^[16,57-58],但近20年来在海岸起沙风速、风沙流结构、沙丘移动与形态变化等方面开展了一定的观测研究。

3.1 海岸起沙风速与风沙流结构

福建闽江口南岸、厦门岛东北海岸的风沙运动观测结果表明^[58-59],受海岸环境因素影响同等条件下海岸沙粒起动风速明显大于内陆沙漠沙,海岸的起沙风速 $6.0-7.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,海岸风沙流的输沙率明显小于内陆沙漠沙,后期相关风洞模拟实验也有类似结果^[60-61]。

中国海岸风沙流结构的野外观测集中在福建长乐海岸和河北昌黎海岸等海岸风沙地貌典型分布区域。在福建长乐海岸,早期对近地表12 cm高度气流层内风沙流结构的观测结果表明海岸风沙流的结构特征与内陆沙漠基本相似^[58],风沙流中沙粒在4 cm以下气流层中的搬运量占搬运总量的70%以上,随风速和输沙量增加5 cm以下气流层中搬运量趋于减少、5 cm以上气流层中搬运沙量趋于增加,海岸沙丘迎风坡风沙流的高程与含沙量对数尺度之间具有良好的线性关系;后期进一步对长乐东部海岸不同地貌单元和海岸沙丘不同类型与部位的观测结果表明^[62],不同地貌单元、沙丘部位的风沙流结构呈现出不同的特征,如海滩后缘的风沙几

乎100%集中在0—30 cm高度内,流动沙丘顶部90%沙粒搬运量分布在0—30 cm高度内,但固定沙丘顶部集中于15 cm高度内,同时不同粒径沙粒在风沙流中的垂直分布亦不相同。河北昌黎海岸不同沙丘类型及其不同部位的风沙流野外观测和风洞试验结果表明^[63-71],海岸沙丘表面风沙流结构模式基本表现为在0—40 cm高程内气流搬运的沙尘物质浓度或质量随高度递减并符合指数分布,但随距离地表高度增加二者关系模式会有所变化,同时海岸沙丘表面风沙流中不同粒径沙粒输沙量的垂向分布特征并不一致,尤其是在海岸沙丘表面不同部位风沙流中不同粒径沙粒的垂向分布也存在一定差异,另外随风速或总输沙量变化海岸沙丘表面的风沙流结构随之发生变化,且不同高度的风沙流结构模式、不同粒径沙粒的垂向分布模式对风速或总输沙量变化的响应亦并非完全一致。

3.2 海岸沙丘移动

海岸沙丘移动过程中埋没耕地、道路和村庄会对当地的生产和生活造成严重危害,沙丘的移动速度是其重要指征,海南岛文昌北部曾有沙丘每年移动18.0 m的报道^[37],1992年4月到1995年7月对广西北海大冠沙海岸实地观测结果表明沙丘每年移动达12.64 m^[72]。目前,国内对海岸沙丘移动速率实测较多的是河北昌黎海岸,但不同观测结果存在差异。1991年10月至1994年4月的观测结果表明^[73],海岸沙丘在向陆风的作用下不断向陆移动,期间自然海岸沙丘的向陆坡角移动11.10 m、顶部移动10.80 m,自然海岸沙丘整体移动速度为1.0—2.0 m·a⁻¹;2004年10月至2007年10月GPS-RTK实测数据及沙丘陆侧丘间洼地植被覆被变化和相关资料的分析结果表明^[74-75],昌黎黄金海岸沙丘总体移动方向由海向陆,但沙丘不同分段和部位的迁移距离不等且沙丘移动速度逐渐变缓,观测期间沙丘移动速度由3.04 m·a⁻¹减小到2.07 m·a⁻¹,但海岸横向沙脊脊线、坡脚线的最大移动幅度可达8.7 m和14.3 m;2006—2008年对河北昌黎黄金海岸典型海岸新月形沙丘和横向沙脊移动的测量结果表明^[76-78],海岸沙丘移动总体呈现出缓慢、向陆、往复式前进的特征,但不同沙丘类型及沙丘不同部位的移动速度不同,如海岸横向沙脊是底部基本稳定下脊顶在夏秋季向海东移、冬春季向陆西移的往复变化中向陆西移,观测期间海岸横向沙脊脊顶和背风

坡坡脚的年均最大移距分别是1.83 m和0.16 m,同期新月形沙丘则是沙丘整体向陆位移且移动速度相对较快,新月形沙丘的背风坡坡脚年均向陆移动2.80 m。

3.3 海岸沙丘形态变化

海岸沙丘移动研究中,对海岸沙丘的形态变化也进行了同步观测。河北昌黎海岸1991年10月至1994年4月的观测结果表明^[73],观测期间自然海岸沙丘高度从18.77 m增加到22.95 m,自然沙丘横断面面积由1 736.7 m²扩大到1 861.7 m²,但对比观测的两个受人类活动影响的滑沙沙丘的横断面面积一个减少、一个稍有增加,反映出人为活动的可能影响与作用。2004年10月至2007年10月的观测表明^[74-75],昌黎海岸沙丘典型地段的沙丘高度逐年降低、坡度减小,沙丘高度降低7.62 m,向海坡坡度平均减小7.96°,背海坡坡度平均减小0.94°。2006—2008年昌黎海岸新月形沙丘和横向沙脊横断面的测量结果表明^[76-78],横向沙脊脊顶高程夏秋季降低、冬春季升高但观测期间脊顶高程降低了1.58 m,横向沙脊3个观测剖面的断面面积期间则分别增加了0.47%、0.79%和0.69%,其形态变化具有沙丘高度逐渐降低且季节性明显的特征;同期新月形沙丘的形态变化则具有随季节增减变化中高度、宽度、长度、断面面积与体积增加的加积特征,观测期间新月形沙丘高度增高1.01 m,沙丘底部长度与宽度增长了2.30 m和9.51 m,新月形沙丘底部范围面积和3个横断面平均面积扩大了2 236.14 m²和117.82 m²,同期沙丘体积增加了46 830.0 m³。近期2008年以来翡翠岛沙丘动态变化的研究表明^[79],区内翡翠岛气象观测站沿岸沙丘整体增高了1.5—1.8 m,沙丘向海坡度和背海坡度平均增幅为20°—30°,沙丘高度变化与重冰期相关。

另外,近期将海岸风沙地貌与大气、波浪、海滩联系起来进行综合研究中^[21,24,80],开展了福建平潭岛海岸前丘、爬坡沙丘、海岸沙席和横向沙丘等海岸沙丘对台风响应的形态变化研究^[81-85],结果表明台风登陆前后海岸沙丘的形态变化较大,但同一海岸沙丘、不同类型海岸沙丘在不同强度台风前后的形态变化差异明显,说明台风在不同类型海岸沙丘形态变化中的作用不一。

4 海岸风沙沉积特征

风沙沉积作为风沙地貌发育演化的基础一直是海岸风沙地貌的重要研究内容,近40年来集中于海岸风成沙沉积结构、风成沙石英表面结构特征及沉积构造等方面的研究,其中尤以海岸风成沙的粒度特征研究为多。

4.1 海岸风沙沉积结构

在中国风沙地貌分布的主要海岸,大多基于粒度分析数据进行了海岸风沙沉积结构的分析,但存在一定的区域差异,如滦河以北海岸沙丘沉积以中细砂为主、平均粒径 $1.5\sim 1.8\Phi$ 、标准偏差 $0.4\sim 0.5$ 、分选优良且各类沙丘以及同一沙丘不同部位的粒度差异并不明显^[86];秦皇岛市海岸风成沙以中细砂组成为主,分选极好,具有微弱负偏态和双跃移特征^[42,87];福建海岸现代风成沙粒度偏大且含一定量的砾石^[29];福建长乐东部沿岸风成沙主要为细砂,分选好,偏度多为近对称,峰态窄到很窄^[88-89];福建平潭岛海岸风成沙的主要为中砂,分选较好,偏度多近于对称,峰态窄,以跳跃组分为主^[90];海南岛东北部海岸沙丘沙主要为中细砂,分选好或较好,偏度为近对称和负偏,其组成近似于海滩沙^[17,49]。因此,一般把海岸风成沙的粒度特征总结为主要粒级是中、细砂,以细砂为主,分选好或较好,偏度多数为正偏,峰态为微弱负偏态,且出现双峰或多峰^[17-19,42,91-93]。但是,总体而言由于中国海岸沙丘沙一般受风力吹扬搬运距离较短,故海岸风成沙除有典型的风成特征外还一定程度上继承了海滩沙的特点,海岸风成沙与一般海滩沙相比具有普遍含有粉砂、略细、多正偏、峰态偏窄等特点,但差异并不明显,其概率累积曲线相近且通过粒度参数图和因子分析方法等一般难以将其完全区分^[94-97]。另外,中国海岸风成沙的沉积结构存在明显的区域性,海岸现代风成沙沉积结构特征会因不同的区域、沙丘类型、沙丘规模、沙丘距海岸线远近及人类活动影响等而变化,不同类型海岸沙丘表面的粒度分异也呈现出不同的特征模式^[98-101]。

4.2 海岸沙丘沙表面结构

海岸沙丘石英颗粒表面结构是判定其沉积环境的重要标志,根据扫描电子显微镜下对海岸沙丘石英砂表面微结构的观测,吴正等^[17,36,102-103]总结了

中国海岸沙丘石英砂表面结构的基本特征,一般既具有诸如碟形坑、新月形撞击坑及颗粒磨损圆化与麻点(霜面)、 SiO_2 沉淀层与裂纹等风成环境典型特征,同时也具有水下撞击V型坑、化学溶蚀坑和溶蚀沟等代表海滩环境的特征,风成环境与海滩环境两种环境的表面结构特征常相互迭加或共生出现于同一颗粒表面,海岸沙丘石英砂表面结构既有风成特征,又有海滩沙特征的继承性,说明海岸沙丘石英砂表面结构在任何气候条件下都应是沉积环境判别的主要指征。但是,中国南北方海岸沙丘石英颗粒表面结构存在一定的差异,如滦河以北海岸风成沙石英颗粒表面机械撞击痕迹占绝对优势,碟形坑较典型,但亚热带海岸风成沙石英颗粒表面的化学沉淀和溶融作用部分地改造了机械撞击痕迹甚至完全将其覆盖,撞击痕迹明显不同^[86]。中国海岸风成沙石英颗粒表面结构从北到南机械痕迹由强到弱、化学痕迹则由弱到强,其对古沉积环境的指征在不同气候带间应不具可比性^[104]。

4.3 海岸风沙沉积构造

对中国海岸风沙沉积构造的研究主要在河北昌黎海岸、福建长乐与平潭岛海岸及海南岛海岸3个区域。在河北昌黎海岸,探坑及天然剖面揭示海岸风沙地貌的层理构造非常发育,主要有高角度板状交错层理、低角度板状交错层理、楔状层理和平行层理等并常见再作用面^[42,86-87,105-106],利用探地雷达对昌黎海岸典型横向沙脊和新月形沙丘沉积构造探测结果表明,横向沙脊的沉积构造主要由高角度交错层理和波状交错层理组成^[107-108],脊顶为因风向季节性变化形成的槽状交错层理,高角度交错层理是向岸风作用形成的前积层理,发育的波状交错层理则是波浪作用形成的海滩沉积构造。在福建海岸,现代风沙层理主要有平行层理、低角度交错层理、高角度交错层理、楔状层理和发散状层理等^[29],其中长乐东部沿岸海岸沙丘沉积构造类型有水平层理、板状交错层理、发散状层理、楔状交错层理和同生变形构造等^[109],近期采用探地雷达技术探测结果发现其下伏的海滩波浪作用形成波状交错层理之上是风成大角度倾斜的交错层理以及局部水平层理^[110]。海南岛东北部海岸沙丘的沉积构造,主要为大型的高角度板状或楔状交错层理,并以存在准同生变形构造为特征^[36,49]。

5 海岸风沙地貌发育演变

中国海岸风沙地貌发育演变研究以晚更新世以来海岸古沙丘演变过程为重点,早期集中于对海岸沙丘岩及老红砂的研究,后期则基于测年数据等对全新世以来海岸沙丘的形成时代及其原因进行了较多探讨。

5.1 晚更新世时期

中国更新世时期发育的海岸沙丘因年代久远沙丘形态已不复存在,目前海岸带所见的“老红砂”大多是晚更新世形成的以棕红色、黄棕色为主的残留海岸沙丘砂,因其胶结良好、抗侵蚀能力较强,在局部岸段可形成海岸台地、海岸阶地或残留岗丘等,与现代海岸沙丘的分布范围基本一致^[19, 111-114]。其中,山东半岛成山头附近的“柳芥红层”,多层海岸沙丘砂自上而下由黄橙色至棕红色^[115-117],是在78.9—13.1 ka BP时期在太阳辐射量和东亚夏季风格局共同影响下海岸沙丘砂与古土壤或湖积层叠覆堆积的产物^[118];福建东南沿海的平潭青峰、晋江科任等地,“老红砂”的颜色呈棕红色—黄棕色交替的多期旋回变化,早期石英砂热释光测年与¹⁴C测年表明其形成于60—10 ka BP且至少有2—3期海岸古风沙的加积活跃期^[29, 111, 119-120],近期通过加密采样及OSL测年所建立更精细的年代标尺结果表明,在150—10 ka BP的万年尺度上其粒度和磁化率等环境代用指标峰谷值呈现4—6期的周期变化特点,说明晚更新世时期的海岸风沙活动受到诸如太阳辐射、东亚季风和海平面波动等全球大背景因素控制^[121-123]。

另外,在末次冰期时期中国东部海平面下降幅度达100—120 m,黄、渤海陆架全部出露,东海陆架大部分甚至南海北部也裸露成陆,在末次冰期干冷气候影响下中国大陆架发生沙漠化并在古海岸带发育了多种形态类型的海岸沙丘,但在冰后期海面上升、海岸线不断向陆推进(海侵)过程中,大陆架上的古海岸风沙沉积已被改造为“残留沉积”或近滨浅海底部的砂质沉积,表现为统一海相地层的解体、大面积的混杂堆积、漫长的风蚀基面、休止角型沉积结构并发现了埋藏沙丘群等^[124-132]。

5.2 全新世以来

中国的现代海岸沙丘基本形成于全新世时期,

但不同区域的形成时代及其演变过程并不相同。如河北滦河三角洲北部的海岸沙丘,是距今大约1 000—3 000 a前在海岸沙坝基础上经风力作用改造逐渐发育演变而成^[86, 133];山东烟台海岸沙丘全新世时期的发育演变,受海岸变迁影响6 000 a BP以来有5个风沙堆积期,前4个风沙堆积期与4个海平面下降期一致,第5风沙堆积期与小冰期一致^[40];在福建海岸,闽江河口南岸长乐海岸沙丘形成于2 470±90 a BP^[51],约2 000 a BP以来长乐、晋江、漳浦等地随着海平面下降、海岸线后退,沿海砂质海岸广泛发育海岸沙丘或风积砂层,并呈现为阶段性演化特点^[51, 134],其中尤以小冰期发育的海岸沙丘规模较大、风积层厚度大且保存较好^[135-139]。华南地区全新世海岸风砂沉积也呈现多期沉积特点^[36, 140],全新世早期发育的海岸沙丘多被淹没改造,但距今约3 000 a以来在温凉干燥气候期、东北季风影响下发育的海岸沙丘和风砂沉积出露较为广泛^[19, 49, 141],并存在距今约1 000—3 000 a形成的海岸沙丘岩^[142-145]。

6 海岸风沙问题及其防治

6.1 海岸风沙危害

中国海岸风沙危害问题由来已久,主要表现为风沙掩埋地表建筑物和港口、损坏道路、损毁农作物和影响沿海盐业与养殖业生产等,并具有就地起沙、风力搬运物质均匀、危害隐蔽性等特征^[146-149]。例如15世纪后期胶东半岛北岸风沙曾致使大片村舍被掩埋,福建东山岛海岸近百年来被风沙埋没的村庄有13个、良田近1 300 hm²,广东潮阳海门海岸近50 a来被风沙埋没村庄14个,福建平潭岛公元1723—1735年有13个村被风沙压废,广东电白海岸20世纪20—50年代风沙淹没了8个村庄和近300 hm²农田,广东省湛江南三岛1929—1949年被流沙埋没耕地近70 hm²、掩埋村庄2个,海南文昌海岸近200 a中风沙埋没村庄13个、农田204 hm²,五龙港也因风沙淤塞而废弃,还有白砂、砂头和录内等5个村庄因风沙侵袭搬迁了3次。目前,风沙严重破坏地表建筑物和道路等风沙危害已不多见,但海岸土地沙化问题依然存在^[150-152],如海南岛西部海岸的土地沙化问题尤为突出,虽然近50 a中海南岛西部沙化土地总体逆转^[153-155],沙化土地面积尤其是严重沙化土地面积在减少,但其变化具有局部反复波动的特点,如1990—1994年沙化最为严重的昌江、东方、乐

东沿海地区的沙化土地平均每年增加 24.42 km^2 ^[156]。海岸风沙危害的产生是区域自然致灾因子基础上深受人类不合理活动影响的结果^[73, 157-161],甚至被认为是一个以人为作用为主的过程^[120],尤其是局部地区的毁林、采砂和旅游等活动往往造成严重的风沙危害,如海南万宁县因开采钛铁矿海岸防护林被毁导致风蚀加剧甚至风沙埋没农田 33.3 hm^2 ^[147]。

6.2 主要防治措施

中国海岸风沙危害防治的主要措施,包括保护海岸植被、建设防护林、合理开发海岸砂矿资源、建设防沙工程及按临界容量进行适度开发等^[146-149, 159-161],其中植树造林的防风固沙效果最为显著^[162-168]。中国自20世纪50年代开展的沿海防护林建设固定了大面积的海岸流动沙地,有效减轻了风沙危害,例如福建平潭岛自1953年开始风沙治理,在“因地制宜、因害设防”的方针指导下,以治理风沙灾害、改善生态环境为目标,大力营造风口前沿基干林、防风固沙林、农田防护林、护路林等,至1997年基本建成了带、网、片、点连成一体的防护林体系,风沙化土地得到全面治理,有效改善了环境,取得了较好的生态、经济和社会效益^[169]。经长期风沙防治建设,中国海岸风沙危害的规模和程度明显降低,如河北昌黎海岸20世纪50年代后的植树造林活动极大地改造了海岸风沙景观,区内有林沙地面积从1956年的 1.23 km^2 扩展到2000年的 58.44 km^2 ,随之海岸沙地尤其是裸露沙地面积大幅度减小^[170];福建海岸1958—2013年间沙地面积经历了1958—1988年裸沙地快速减少、1988—2000年裸沙地持续缩减和2000—2013年林地快速减少的不同变化阶段,但海岸裸沙地面积总体呈减少趋势,主要是在植树造林、防护林建设及近期经济发展过程中海岸裸沙地向林地和耕地及建设用地转变所致^[171]。

7 研究展望

自20世纪80年代以来,中国海岸风沙地貌研究几乎是从无到有发展至今并取得了丰富成果,借助于独特的区域优势近40年中查明了中国海岸风沙地貌的基本类型,探索了不同区域的海岸风沙地貌发育模式,开展了海岸风沙运动过程的基本观测,明晰了海岸风沙沉积的主要特征,探明了海岸风沙地貌的演化过程,开展了风沙防治并取得了显著的效果。但是,中国海岸风沙地貌研究与国际研

究相比因起步较晚、研究时间短等原因,在海岸风沙地貌类型研究的完备性、形态动力学研究的深入性、发育演化分析的系统性、研究技术方法的协同性以及海岸风沙资源利用防治的协调性等方面尚存在一定的差距^[8, 17-25, 172-173]。为此需要进一步从海岸风沙地貌形成于海、陆、气交互作用环境的根本特征出发,依托野外观测试验、分析实验、物理模拟和数值模拟四位一体多学科协同的技术方法,进行中国海岸风沙地貌与大气、波浪、海滩的综合研究。近期的研究方向主要是开展海岸风蚀地貌调查研究提升中国海岸风沙地貌类型研究的完整性,基于风沙运动观测、试验和模拟深入研究中国风沙地貌的形态动力学机制,在现代地球系统科学思想指导下开展波浪-海滩-沙丘相互作用研究以进一步厘清中国海岸风沙地貌的发育演化过程及其与全球变化的关系,从保护海岸风沙景观并减少危害目的出发开展海岸风沙资源开发利用与保护治理措施的协调研究。

参考文献:

- [1] 朱震达,吴正,刘恕,等.中国沙漠概论[M].北京:科学出版社,1974.
- [2] 朱震达,陈治平,吴正,等.塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M].北京:科学出版社,1981.
- [3] 吴正.风沙地貌学[M].北京:科学出版社,1987.
- [4] 王涛.中国沙漠与沙漠化[M].石家庄:河北科技出版社,2003.
- [5] 吴正.中国沙漠及其治理[M].北京:科学出版社,2009.
- [6] 吴正,等.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2010.
- [7] 董治宝,苏志珠,钱广强,等.库姆塔格沙漠风沙地貌[M].北京:科学出版社,2011.
- [8] 董治宝,吕萍.70年来中国风沙地貌学的发展[J].地理学报,2020,75(3):509-528.
- [9] 唐耀先.东山岛之风蚀及其防止[C]//福建省地质土壤调查所年报,1945.
- [10] 曾昭璇.韩江三角洲[J].地理学报,1957,23(3):255-273.
- [11] 汤麟武.台湾海埔地之波浪漂沙[J].台银季刊,1962,13(2):189-214.
- [12] 赵昭昭,蔡文焰,吴幼恭.闽南龙海、漳浦一带流沙的成因及其防治[J].福建师范学院学报,1963(2):97-114.
- [13] 郭宝章.台湾之防风林及功效[J].台银季刊,1963,14(1):188-203.
- [14] 柳楷.台湾西海岸沙丘生态之研究[C]//台湾省林业试验所试验报告,1975:1-14.
- [15] 邓国雄.台湾北端富贵角海岸风棱石计量研究[R].嘉新水泥公司文化基金会,1974:18-24.

- [16] 江永哲,张文昭.海岸飞沙量估算之风洞试验[J].中华水土保持学报,1978,19(2):53-58.
- [17] 吴正,吴克刚.中国海岸风沙研究的进展和问题[J].地理科学,1990,10(3):230-236.
- [18] 吴正.中国海岸风沙地貌与沉积研究的新进展[J].地球科学进展,1993,8(2):59-61.
- [19] 吴正,黄山,胡守真,等.华南海岸风沙地貌研究[M].北京:科学出版社,1995.
- [20] 董玉祥.中国海岸风沙研究:进展与展望[J].地理科学进展,2006,25(2):26-35.
- [21] 董玉祥.波浪-海滩-沙丘相互作用模式研究述评[J].中国沙漠,2010,30(4):796-800.
- [22] 董玉祥.国外海岸沙丘形成与演化的研究[J].海洋地质与第四纪地质,2001,21(2):93-98.
- [23] 董玉祥.海岸沙丘运动观测与模拟的研究与进展[J].干旱区资源与环境,2001,15(2):60-66.
- [24] 董玉祥,杜建会.海岸风沙地貌台风响应研究的现状与趋势[J].中国沙漠,2014,34(3):634-638.
- [25] 董玉祥,张青年,黄德全.海岸风蚀地貌研究进展与展望[J].地球科学进展,2019,34(1):1-10.
- [26] 林惠来.台湾海峡西海岸历史年代风沙的初探[J].台湾海峡,1982,1(2):74-82.
- [27] 张文开.长乐东部风沙地貌及其开发利用[J].福建师范大学学报(自然科学版),1994,10(2):81-88.
- [28] 张文开,李祖光.福建长乐海岸沙丘形成发育及其区域分布特征[J].中国沙漠,1995,15(1):31-36.
- [29] 李从先,陈刚,杨红君.福建海岸的风成沉积[J].中国沙漠,1989,9(4):8-18.
- [30] 郑瑞壬,邓国雄.桃园台地海岸沙丘形态与沙粒分析[J].中国地理学会会刊,1991(19):21-32.
- [31] 张政亮.兰阳平原海岸沙丘之地形学研究[D].台北:台湾师范大学,1992.
- [32] 石再添,张瑞津,林雪美,等.台湾北部海岸沙丘之地形学研究[J].师大地理研究报告,1992,18:193-240.
- [33] 石再添,张瑞津,张正亮,等.台湾西部海岸沙丘之地形学研究[J].师大地理研究报告,1993,19:99-148.
- [34] 石再添,张瑞津,张正亮,等.台湾南端与东部海岸沙丘之地形学研究[J].师大地理研究报告,1994,21:1-42.
- [35] 王鑫.台湾的地形景观[M].台北:渡假出版社,2004:184-189.
- [36] 吴正,吴克刚,黄山,等.华南沿海全新世海岸沙丘研究[J].中国科学(B辑),1995,25(2):211-218.
- [37] 姚清尹,陈华堂,陆国琦,等.琼雷地区地貌类型研究[J].热带地理,1981,1(1):13-20.
- [38] 吴克刚.海南岛东北部海岸沙丘地貌[J].热带地貌,1985,6(1):25-54.
- [39] 李善为,刘敏后,王永吉,等.山东半岛海岸的风成沙丘[J].黄渤海海洋,1985,3(3):47-56.
- [40] 张振克.烟台附近海岸风沙地貌的初步研究[J].中国沙漠,1995,15(3):210-215.
- [41] 傅命佐,徐孝诗,徐小微.黄、渤海海岸风沙地貌类型及其分布规律和发育模式[J].海洋与湖沼,1997,28(1):56-65.
- [42] 祁兴芬,庄振业,韩德亮,等.秦皇岛市海岸风成沙丘的研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2004,34(4):617-624.
- [43] 刘建辉,郭占荣,雷怀彦,等.福建长乐东部海岸沙丘风蚀坑研究[J].台湾海峡,2008,27(2):230-236.
- [44] 石谦,蔡爱智.福建平潭岛的风沙地貌与海岸演变[J].台湾海峡,2009,28(2):163-168.
- [45] 董玉祥.中国温带海岸沙丘分类系统初步探讨[J].中国沙漠,2000,20(2):159-165.
- [46] 方海燕,俎瑞平,张克存.海岸风沙地貌分类研究现状[J].水土保持研究,2004,11(3):248-251.
- [47] 董玉祥.中国海岸风沙地貌的类型及其分布规律[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(4):99-104.
- [48] Dong Y X.Recent progress of coastal aeolian research in China[J].Science in Cold and Arid Regions,2011,3(6):543-549.
- [49] 吴正,吴克刚.海南岛东北部海岸沙丘的沉积构造特征及其发育模式[J].地理学报,1987,42(2):129-141.
- [50] 陈方,蔡明理,理祖光,等.长乐东部沿海海岸风沙区域分异探讨[J].南京大学学报(自然科学版),1995,31(3):487-494.
- [51] 陈方,朱大奎.闽江口海岸沙丘的形成与演化[J].中国沙漠,1996,16(3):227-233.
- [52] 王颖,朱大奎.海岸沙丘成因的讨论[J].中国沙漠,1987,7(3):29-40.
- [53] 祁兴芬,刘连兴,刘富刚.昌黎海岸沙丘的发育条件及动态变化[J].德州学院学报,2006,22(1):82-84,99.
- [54] 李志星,李志忠,靳建辉,等.2008-2018年河北昌黎海岸输沙势时空变化与沙丘形态演变[J].中国沙漠,2020,40(3):94-105.
- [55] 陈方,李祖光,汪榕光,等.长乐东部沿海及海坛岛风沙地貌发育条件分析[J].福建师范大学学报(自然科学版),1992,8(4):93-99.
- [56] 刘建辉,郭占荣.福建长乐东部海岸沙丘发育成因及特征[J].福建地质,2006,25(4):185-191.
- [57] 游繁结.台湾海岸飞沙量推估之初步研究[J].中华水土保持学报,1986,27(1):107-117.
- [58] 陈方,贺辉扬.海岸沙丘沙运动特征若干问题的研究[J].中国沙漠,1997,17(4):355-361.
- [59] 翁宇斌.厦门岛东北岸海岸风沙运动观测研究[J].海洋湖沼通报,2009(3):184-190.
- [60] 韩庆杰,屈建军,张克存,等.海滩湿润沙面起动摩阻风速的风洞试验[J].中国沙漠,2011,31(6):1373-1379.
- [61] 韩庆杰,屈建军,张克存,等.华南热带湿润海滩风蚀模数的风洞研究[J].水土保持学报,2010,24(1):37-40.
- [62] 雷怀彦,林炳煌,刘建辉,等.福建东部海岸风沙流结构特征及沙害防治对策[J].华侨大学学报(自然科学版),2008,29(1):143-147.
- [63] 董玉祥, Hesp P A, Namikas S L,等.海岸横向沙脊表面风沙流结构的野外观测研究[J].地理科学,2008,28(4):507-512.
- [64] 董玉祥,马骏.风速对海岸风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的影响[J].中山大学学报(自然科学版),2008,47(5):98-103.
- [65] 董玉祥,马骏.风速对海岸沙丘表面风沙流结构影响的实证

- 研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(9):179-183.
- [66] 董玉祥, Namikas S L, Hesp P A. 海岸风沙流中不同粒径组沙粒的垂向分布模式[J].地理研究,2009,28(5):1179-1187.
- [67] 董玉祥,马骏.输沙量对海岸沙丘表面风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的影响[J].中山大学学报(自然科学版),2009,48(3):102-108.
- [68] 董玉祥,黄德全,马骏.海岸沙丘表面不同部位风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的变化[J].地理科学,2010,30(3):391-397.
- [69] 董玉祥, Hesp P A, Namikas S L, 等.海岸横向沙脊表面风沙流结构粒度响应的野外观测研究[J].中国沙漠,2008,28(6):1022-1028.
- [70] Dong Y X, Hesp P A, Huang D Q, et al. Flow dynamics and sediment transport over a reversing barchans, Changli, China[J]. Geomorphology, 2017, 278: 121-127.
- [71] Hesp P A, Dong Y X, Cheng H, et al. Wind flow and sedimentation in artificial vegetation: field and wind tunnel experiments[J]. Geomorphology, 2019, 337: 165-182.
- [72] 范航清.广西海岸沙滩红树林的生态研究I:海岸沙丘移动及其对白骨壤的危害[J].广西科学,1996,3(1):44-48.
- [73] 胡镜荣,顾建清.自然保护区持续发展概论:以国家级昌黎黄金海岸自然保护区为例[M].北京:科学出版社,1996:76-81.
- [74] 李晶,高伟明,刘国君.昌黎黄金海岸沙丘动态变化及成因解析[J].海洋通报,2009,28(2):81-89.
- [75] 刘国君,高伟明,李晶.基于GPS RTK技术的海岸沙丘动态监测[J].海洋测绘,2010,30(1):56-58.
- [76] 黄德全,董玉祥,哈斯,等.海岸横向沙脊的移动与形态变化:以河北昌黎黄金海岸横向沙脊为例[J].地理研究,2011,30(12):2229-2238.
- [77] 董玉祥,黄德全.河北昌黎翡翠岛海岸沙丘移动的初步观测[J].中国沙漠,2013,33(2):486-492.
- [78] 董玉祥,黄德全.海岸新月形沙丘移动与形态变化的典型研究[J].地理科学,2014,34(7):863-869.
- [79] 周艳军,孙丽华,樊清华.翡翠岛沙丘动态变化监测与动力成因探讨[J].气象科技进展,2019,9(3):41-46.
- [80] 杨林,董玉祥,杜建会.海岸沙丘对风暴响应研究进展[J].地球科学进展,2017,32(7):716-722.
- [81] 董玉祥,黄德全,张雪琴.海岸沙丘形态对台风响应的初步观测[J].地理研究,2016,35(10):1925-1934.
- [82] 杨林,董玉祥,黄德全,等.海岸沙席形态及近表层沉积物粒度对台风的响应[J].地理科学,2017,37(8):1243-1250.
- [83] 杨林,董玉祥,黄德全,等.台风“麦德姆”后海岸横向沙丘年内形态变化的观测[J].中国沙漠,2018,38(6):1136-1143.
- [84] Yang L, Dong Y X, Huang D Q. Morphological response of coastal dunes to a group of three typhoons on Pingtan Island, China[J]. Aeolian Research, 2018, 32: 210-217.
- [85] 杨林,董玉祥,黄德全.台风群后海岸爬坡沙丘形态变化特征[J].中国沙漠,2020,40(2):1-8.
- [86] 李从先,陈刚,王秀强.滦河以北海岸风成砂沉积的初步研究[J].中国沙漠,1987,7(2):12-21.
- [87] 曾照爽,庄振业,祁兴芬,等.秦皇岛昌黎黄金海岸的沙丘沉积和发育机理[J].海洋地质动态,2003(7):23-27.
- [88] 陈方,李祖光,张文开,等.长乐东部沿岸风沙沉积物的粒度分布特征[J].福建师范大学学报(自然科学版),1991,7(2):84-90.
- [89] 于晓莉,李志忠,靳建辉,等.福建长乐海岸海滩-沙丘系统砂物质的粒度特征反映的海岸动力环境分异[J].亚热带资源与环境学报,2016,11(2):13-21.
- [90] 陈方,李祖光,汪裕光,等.海坛岛风沙表层沉积物的粒度分布特征[J].台湾海峡,1993,12(4):385-392.
- [91] 蔡爱智,蔡月娥.中国海岸风沙沉积的成因与特征[J].中国沙漠,1983,3(3):1-10.
- [92] 董玉祥.海岸现代风成沙粒度参数特征的研究[J].沉积学报,2002,20(4):656-662.
- [93] 董玉祥.国内外海岸风成沙粒度参数特征的比较与分析[J].中山大学学报(自然科学版),2003,42(4):110-113.
- [94] 傅启龙,沙庆安.昌黎海岸风成沙丘砂组构特征及其与海滩砂的比较[J].地质科学,1993,28(1):52-60.
- [95] 周莉.山东半岛浅滩沙、河流沙和沙丘沙粒度频率分布和统计参数的环境意义[J].山东海洋学院学报,1979,9(2):39-49.
- [96] 唐丽,董玉祥.华南海岸现代风成沙与海滩沙的定量识别[J].中山大学学报(自然科学版),2015,54(6):130-136.
- [97] 司月君,李保生,李志文,等.北部湾海岸现代风沙与海滩沙粒度特征对比[J].中国沙漠,2020,40(6):43-52.
- [98] 董玉祥.人为干扰下海岸沙丘表面粒度分布变异实证研究[J].中国沙漠,2008,28(2):202-207.
- [99] 董玉祥,马骏,黄德全.海岸新月形沙丘表面的粒度分布[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28(3):15-22.
- [100] 董玉祥,马骏,黄德全.福建长乐海岸横向前丘表面粒度分异研究[J].沉积学报,2008,26(5):813-819.
- [101] 董玉祥,马骏,黄德全.河北昌黎黄金海岸横向沙脊表面的粒度分布模式[J].地理研究,2008,27(4):725-733.
- [102] 吴正,廖秉良,金志敏,等.粤琼海岸沙丘砂石英颗粒的表面结构特征[J].华南师范大学学报(自然科学版),1993(2):49-53.
- [103] 吴正,廖秉良,金志敏,等.我国海岸沙丘石英砂表面结构特征再探[J].科学通报,1995,40(17):1602-1604.
- [104] 陈秀英,李萍,李从先.我国南北方海岸风成沙丘石英颗粒表面结构的对比研究[J].海洋科学,1987(5):20-22.
- [105] 傅启龙,沙庆安.昌黎海岸风成沙丘的形态与沉积构造特征及其成因初探[J].沉积学报,1994,12(1):98-105.
- [106] 祁兴芬,刘富刚,袁小兰.海岸沙丘的沉积构造及其形成原因的探讨[J].海洋地质动态,2008,24(1):9-11.
- [107] 姜锋,李志忠,靳建辉,等.基于GPR图像的河北昌黎海岸横向沙脊北段沉积构造及其成因[J].地理研究,2015,34(8):1559-1598.
- [108] 姜锋,李志忠,靳建辉,等.河北昌黎典型海岸沙丘的沉积构造及其发育模式[J].海洋学报,2016,38(7):107-116.
- [109] 刘建辉.长乐东部海岸沙丘的沉积与移动特征研究[D].厦门:厦门大学,2007.
- [110] 邓涛,李志忠,靳建辉,等.基于GPR图像的福建长乐海岸沙

- 丘沉积构造与海岸环境演变[J].海洋科学,2016,40(5):88-96.
- [111] 曾从盛.闽东南沿海老红砂研究[M].北京:地质出版社,1999.
- [112] 袁宝印,夏正楷,李保生,等.中国南方红土年代地层学与地层划分问题[J].第四纪研究,2008,28(1):1-13.
- [113] 吴正,王为.华南沿海老红砂的成因与古地理环境[J].中国科学,1997,27(6):537-542.
- [114] 张家富,袁宝印,周力平.福建晋江“老红砂”的释光年代学及对南方第四纪沉积物释光测年的指示意义[J].科学通报,2007,52(22):2646-2654.
- [115] 杨光复,韩有松,张铭汉,等.关于胶东半岛“柳柎红层”沉积特征及其成因的探讨[J].海洋与湖沼,1982,13(3):231-240.
- [116] 张明书,刘健.山东荣成成山头“柳柎红层”的层序、划分与成因及其气候意义(1)[J].海洋地质与第四纪地质,1992,12(1):73-83.
- [117] 张明书,刘健.山东荣成成山头“柳柎红层”的层序、划分与成因及其气候意义(2)[J].海洋地质与第四纪地质,1992,12(2):53-64.
- [118] 李志文,李保生,孙丽,等.柳柎剖面末次冰期层段Rb/Sr的不稳定变化及其揭示的气候特征[J].热带地理,2015,35(4):592-600.
- [119] 吕鹏.闽南沿海老红砂的成因与发育模式[J].热带地貌,1998,19(增刊2):33-62.
- [120] 吴正,王为.闽粤沿海老红砂多期沉积地层的发现及其意义[J].中国沙漠,2001,21(4):328-332.
- [121] 胡凡根,李志忠,靳建辉,等.福建晋江海岸带老红砂多期发育模式初步研究[J].第四纪研究,2012,32(6):1207-1220.
- [122] 温小浩,李保生,孟洁,等.150-20 ka BP福建东部平潭岛海岸风成沉积的粒度特征及其环境意义[J].中国沙漠,2015,35(6):1473-1482.
- [123] 靳建辉,李志忠,雷国良,等.华南老红砂沉积年代学及其环境意义:以福建青峰老红砂为例[J].地理科学,2017,37(2):301-310.
- [124] 吴正,冯文科,廖秉良,等.晚更新世末期南海北部大陆架的古地理探讨[J].地理学报,1993,48(6):491-497.
- [125] 徐文强,黄求获.辽东湾晚更新世末期陆相沉积石英砂表面的微结构[J].海洋科学,1994,18(2):51-56.
- [126] 赵松龄.晚更新世末期中国陆架沙漠化及其衍生沉积的研究[J].海洋与湖沼,1991,2(3):285-293.
- [127] 赵松龄.陆架沙漠化[M].北京:海洋出版社,1995.
- [128] 赵松龄,于洪军,刘敬圃.晚更新世末期陆架沙漠化环境演化模式的探讨[J].中国科学(D辑),1996,26(2):142-146.
- [129] 赵松龄,于洪军.晚更新世末期黄、渤海陆架沙漠化环境的形成[J].第四纪研究,1996(1):42-47.
- [130] 于洪军,徐兴永,韩德亮,等.晚更新世末期东海陆架沙海之形成[J].海洋科学进展,2002,20(4):51-55.
- [131] 曾兰华,李森,李保生,等.海南岛西部八所组上部砂质沉积物的成因及其环境意义[J].地质论评,2007,53(6):783-790.
- [132] 颜晋聪,李森,张叶春,等.南海北部大陆架残留风成砂与海岸带古风成沙的对比及关系研究[J].中国沙漠,2009,29(6):1093-1099.
- [133] 高善明.滦河河北岸海岸沙丘的形成时代[J].海洋湖沼通报,1983(3):29-32.
- [134] 徐晓琳,李志忠,靳建辉,等.近2000年来福建南部海岸沙丘记录的风沙活动序列[J].海洋科学,2017,41(6):79-91.
- [135] 杨顺良,郑承忠,翁宇斌,等.厦门岛东南海岸贝壳层与风沙的研究[J].台湾海峡,2002,21(1):12-17.
- [136] 胡凡根,李志忠,靳建辉,等.基于光释光测年的福建晋江海岸沙丘粒度记录的风沙活动[J].地理学报,2013,68(3):343-356.
- [137] 靳建辉,李志忠,胡凡根,等.全新世中晚期福建海岸沙丘记录的海岸环境与人类活动[J].地理学报,2015,35(5):751-765.
- [138] 靳建辉,李志忠.小冰期福建海岸沙丘的沉积环境[J].中国沙漠,2017,37(6):1111-1120.
- [139] 于晓莉,李志忠,靳建辉,等.近300年来福建长乐海岸沙丘记录的风沙环境演变[J].海洋与湖沼,2017,48(2):232-245.
- [140] 白晔,陈佳升,程延,等.广东全新世海岸风沙沉积分布[J].中国沙漠,2020,40(6):73-83.
- [141] 廖肖霞,李森,王贵勇,等.38 ka以来海南岛东海岸风成沙的粒度特征及其反映的沉积环境演变过程[J].中国沙漠,2009,29(6):1086-1092.
- [142] 赵希涛,沙庆安,Goldsmith V,等.福建莆田海岸沙丘岩:I.沉积构造与古风[J].中国科学(B辑),1988,18(11):1196-1205.
- [143] 张景文,李桂英,赵希涛.福建莆田海岸沙丘岩的形成年代[J].海洋科学,1988,12(4):68-69.
- [144] 刘妙容,王贵勇,李森,等.海南岛海岸沙丘岩的特征,成因及其环境意义[J].中国沙漠,2009,29(6):1081-1085.
- [145] 王为,吴正.华南海岸沙丘岩形成与全新世环境变化的关系[J].地理学报,2009,64(9):1126-1133.
- [146] 蔡克明.山东滨海的风沙灾害[J].海洋科学,1982(2):68.
- [147] 吴正,黄山,胡守真.海南岛海岸风沙及其治理对策[J].华南师范大学学报(自然科学版),1992(2):104-107.
- [148] 陈欣树,陈俊仁.华南沿海风沙灾害与防治[J].中国地质灾害与防治学报,1993,4(3):100-102.
- [149] 张振克,杨运恒.胶东半岛北部沿海现代风沙灾害特点、成因及减灾对策[J].中国沙漠,1992,12(4):34-40.
- [150] 朱震达,陈广庭.中国土地沙漠荒漠化[M].北京:科学出版社,1994:73-81.
- [151] 谭伟福.广西沿海风沙化土地现状分析及评价[J].广西林业科学,1995,24(4):174-181.
- [152] 汤养麟.福建省沿海沙化土地现状及其综合治理的对策[J].福建水土保持,2000,12(3):8-12,36.
- [153] 马荣华,胡孟春,毛端谦,等.基于RS和GIS的海南西部土地沙化/土地退化动态趋势研究[J].生态科学,2000,19(2):19-23.
- [154] 郑影华,李森,王兮之,等.RS与GIS支持下近50 a海南岛西部土地沙漠化时空演变过程研究[J].中国沙漠,2009,29(1):56-62.
- [155] 李森,孙武,李凡,等.海南岛西部热带沙漠化土地特征与成因[J].地理学报,2005,60(3):433-444.
- [156] 毕华,刘强.海南昌江县海滨土地风沙化及其环境整治[J].中

- 国沙漠, 2000, 20(2): 223-228.
- [157] 姚清尹. 海南岛地貌与其他自然条件的关系[J]. 热带地理, 1983, 3(1): 20-26.
- [158] 韩超群. 广东西南湛江市风沙特征和成因初探[J]. 中国沙漠, 1985, 5(1): 27-32.
- [159] 赵沼炳. 闽东南沿海风沙的成因与防治[J]. 水土保持学报, 1989, 3(3): 58-63.
- [160] 胡镜荣. 旅游沙丘因子和临界容量[J]. 地理学与国土研究, 1999, 15(1): 61-64.
- [161] 顾建清, 孙立汉, 葛年生. 昌黎自然保护区人类活动影响与保护[J]. 地理学与国土研究, 1992, 8(3): 23-26.
- [162] 连育青. 福建海岸风沙危害的治理[J]. 中国水土保持, 1987(2): 22-23.
- [163] 徐文辉, 薛万华. 平潭县燕下埔沙荒风口综合治理试验初报[J]. 福建林业科技, 1994, 21(1): 50-53.
- [164] 谢平, 谢东雄, 郑超. 湛江市南三岛海岸防护林的生态效益[J]. 湛江海洋大学学报, 1998, 18(1): 80-82.
- [165] 张云吉, 金秉福, 李宁. 山东半岛沿海防护林与沙质海岸地貌变迁[J]. 海洋科学, 2002, 26(8): 31-33.
- [166] 周柳青, 梁任重. 广东风沙土地现状与治理措施[J]. 热带林业, 2003, 31(4): 49-50.
- [167] 吴逸波. 平潭综合实验区风口地防护林的建立[J]. 防护林科技, 2012(5): 72-73, 87.
- [168] 周瑞莲, 强生斌, 逢金强, 等. 海岸防风固沙树种耐风吹阈值比较[J]. 中国沙漠, 2020, 40(6): 127-138.
- [169] 朱俊凤, 朱震达. 中国沙漠化防治[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 233-236.
- [170] 乌格特茉莉, 董玉祥, 哈斯, 等. 近50 a来河北昌黎黄金海岸沙地变化[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 777-782.
- [171] 王金华, 董玉祥. 1958-2013年华南海岸沙地利用变化及其驱动因素: 以福建海岸为例[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 582-591.
- [172] 董玉祥. 国际海岸风沙研究的新进展[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 347-348.
- [173] 张绍云, 董玉祥. 海岸沙地风蚀坑形态-动力学研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(10): 1028-1037.

Review of coastal aeolian geomorphology research in China in the past 40 years

Dong Yuxiang^{1,2}, Li Zhizhong³

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. School of Resources and Planning, Xinhua College of Guangzhou, Guangzhou 510520, China; 3. College of Geographical Sciences / Ministry of Education Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Based on the main development of the research on coastal aeolian geomorphology in China from the 1980s, the important achievements in coastal aeolian geomorphology research in China are summarized, which include the types of coastal aeolian geomorphology, formation models of coastal aeolian geomorphology, coastal sand-wind movement, characteristics of coastal aeolian sediments, evolution process of coastal aeolian geomorphology as well as protection of coastal aeolian. Based on the problems of coastal aeolian geomorphology research in China, the main development aspects of coastal aeolian geomorphology research in China in the future are given, which are investigation of coastal wind-eroded landform, morphodynamics of coastal aeolian geomorphology, interaction of surfzone-beach-dune, the relation between global changes and coastal aeolian evolution process, as well as the utilization and protection of coastal aeolian resources.

Key words: China; coast; aeolian geomorphology; review