

砂质海岸 生态减灾修复手册



自然资源部
2024年11月

组织机构和人员



指导机构

自然资源部海洋预警监测司



编制单位

自然资源部第三海洋研究所

河海大学

自然资源部海岛研究中心

中国海洋大学

河北省海洋地质资源调查中心

国家海洋环境监测中心

自然资源部第二海洋研究所

中山大学

浙江省水利河口研究院（浙江省海洋规划设计研究院）

鲁东大学

自然资源部海洋减灾中心

自然资源部南海生态中心

自然资源部北海生态中心

中交上海航道勘察设计研究院有限公司



特别顾问

蔡 锋 郑金海



编制组成员

戚洪帅	何岩雨	张 弛	于 帆	梁丙臣	张甲波	刘建辉	李 元
朱 君	贾良文	刘 根	时连强	李团结	王伟伟	曹 超	刘 峰
韩 宇	赵绍华	雷 刚	陈新平	杜 明	曹惠美	郑吉祥	刘阳洋
田 鹏	郑 洋						

前言

INTRODUCTION

自然灾害是人类面临的最重大的全球性问题之一。为有效应对自然灾害对人类的严重影响，基于自然的解决方案（NbS）、基于生态系统的减轻灾害风险（Eco-DRR）等方法在世界上受到广泛关注，旨在通过对生态系统的保护、恢复和可持续管理，利用生态系统服务功能应对灾害挑战，确保社会经济可持续和有韧性的发展。这些方法与中国的生态文明理念和新时代防灾减灾指导思想高度契合。

在沿海地区，滨海盐沼、牡蛎礁、砂质海岸、海草床等海岸带生态系统能够有效地防潮御浪、固堤护岸，是天然的“海洋卫士”，在减轻海洋灾害风险方面发挥着重要作用。通过实施海岸带生态保护修复，有助于发挥生态系统的减灾功能，提升沿海抵御台风、风暴潮等海洋灾害的能力。为加强对实践工作的指导，自然资源部组织编制了滨海盐沼、牡蛎礁、砂质海岸、海草床生态减灾修复系列手册，以生态与减灾协同增效为目标，对生态本底调查、生态问题诊断、修复目标、修复措施以及跟踪监测、效果评估和适应性管理等全链条技术环节给出详细说明。手册注重科普性、实用性和可操作性，图文并茂，通俗易懂，可为沿海地方科学实施海岸带生态减灾修复提供技术支撑。

生态减灾修复系列手册编制得到了财政部、世界自然保护联盟（IUCN）的支持，在此表示衷心感谢，并对海岸带生态减灾的实践者和专家表示敬意。

限于时间和水平，本系列手册难免存在不足之处，敬请批评指正。



C 目录 CONTENTS

1. 适用范围	1
2. 术语和定义	2
3. 修复原则	5
4. 总体技术流程	6
5. 本底调查	8
5.1 调查目的	8
5.2 调查内容和方法	8
6. 问题诊断与修复适宜性评估	16
6.1 问题诊断	16
6.2 修复适宜性评估	16
7. 修复目标	18
8. 修复方式	19
9. 修复措施	20
9.1 砂质海岸修复剖面设计	20
9.2 砂质海岸修复平面设计	26
9.3 砂质海岸修复填沙设计	30
9.4 辅助构筑物措施	32
9.5 后滨沙地植被修复措施	34
9.6 后滨沙丘修复措施	37

10. 跟踪监测、效果评估和适应性管理	39
10.1 修复工程监测	39
10.2 修复效果评估	43
10.3 砂质海岸修复社会效益	51
10.4 修复后管护措施	54
11. 砂质海岸修复经典案例	56
11.1 案例 1—美国佛罗里达州 Miami 海岸	56
11.2 案例 2—中国秦皇岛市金屋至浅水湾海岸	58
11.3 案例 3—中国珠海市情侣路香炉湾海岸	63
附录 砂质海岸的知识	69
1. 砂质海岸的概念与定义	69
2. 砂质海岸的发育与分布	73
3. 砂质海岸的成因类型	74
4. 砂质海岸的功能与价值	77
5. 几点动力地貌基本理论	78
6. 砂质海岸生态减灾修复的发展趋势	84
参考文献	87

1. 适用范围



本手册规定了砂质海岸生态减灾修复的原则、技术流程、工作内容，以及修复前本底调查、修复目标与修复方式确定、修复措施选择、修复设计与施工、跟踪监测、效果评估和适应性管理等工作对应的技术要求和方法。

本手册适用于我国砂质海岸的自然海滩、人工海滩的海滩生态减灾修复工作，其他工作可参照使用。



2. 术语和定义



下列术语和定义适用于本技术手册。

(1) 海岸带 Coastal zone

海陆相互作用的地带，其上限起自海水能够作用到陆地的最远点，下限为波浪作用影响海底的最深点。广义的海岸带可向陆延伸至毗连平原，向海延至大陆架边缘。

(2) 海岸线 Coastline

海陆分界线，在我国系指多年大潮平均高潮位时海陆分界线。

(3) 砂质海岸 Sandy coast

以波浪作用为主建造的，主要由砂（砾石）构成的海岸。

(4) 海滩 Beach

由激浪和激浪流作用，在海滨塑造形成的松散沉积物堆积体。

(5) 后滨 Backshore

从平均大潮高潮线向陆地伸延到生长植物或自然地理特征改变的地方。

(6) 前滨 Foreshore

平均大潮高潮线至平均大潮低潮线之间的地带。

(7) 内滨 Inshore

平均大潮低潮线至破波带外界之间的地带。

(8) 沿岸沙坝 - 槽谷 Longshore bar-trough

大致平行于岸线延伸的长条形沙脊和洼地。沙脊、洼地相伴而生，可能于低潮时出露，有时可能发育一系列这类相互平行但处于不同水深的沙坝 - 槽谷体系。

(9) 破波带 Breaker zone

来自滨外的波浪变得不稳定而破碎的区带。

(10) 激浪带 Surf zone

随着波浪破碎而形成类似于涌潮的推进波。其位置从内破碎带（inner breakers）向岸伸展到激浪带。

(11) 溅浪带 Swash zone

近岸带中最靠岸的部分，滩面交替地受到波浪冲溅的上冲流（uprush）而覆盖，回卷流（backrush）而暴露。

(12) 海浪 Ocean wave

由风引起的海面波动现象，主要包括风浪和涌浪。

(13) 潮汐 Tide

由天体的引潮力作用而产生的海面周期性涨落现象。

(14) 潮流 Tidal current

在日、月等天体的引潮力作用下的海水周期性的水平运动。

(15) 风暴潮 Storm surge

由热带气旋、温带天气系统、海上飚线等风暴过境所伴随的强风和气压骤变而引起的局部海面振荡或非周期性异常升高（降低）现象。

(16) 输沙率 Sediment transport rate

又叫单宽输沙率，单位时间内通过单位宽度断面的泥沙量。垂直岸线方向的称为横向输沙，沿岸线方向称为沿岸输沙。

(17) 海滩修复 Beach restoration

海滩受破坏或消失，导致海岸灾害防护功能、生态功能和旅游价值降低或丧失，为了恢复海滩系统、修复海滩景观、改善海岸带生态环境，通过海滩养护等工程技术手段来修复被破坏的海滩。

(18) 海滩养护 Beach nourishment

将异地与修复区海岸环境相适应的沉积物通过人工手段搬运到海岸指定位置，增加平均高潮位以上海滩的宽度，恢复海滩功能。必要时可辅以特定的海岸构筑物。

(19) 取沙区 Borrow area

用于挖沙的离岸或近岸的区域。一般设计海滩养护工程时需要考虑寻找一个或多个含有质量符合要求的取沙区。

(20) 砂泥分界线 Sand-mud transition boundary

海滩沉积物由砂向泥转化的分界线。

(21) 泥沙相容性 Sediment compatibility

养护砂与天然海滩砂的对比程度，指天然海滩砂与养护用沙的相对粒度特征的相似性。

(22) 单宽抛沙量 Nourishment volume density

海滩单位长度上的养护沙量，通常用 m^3/m 来表示。

(23) 闭合深度 Depth of closure

海滩剖面产生季节性有效变化的向海界限深度，该深度通常无海底底床显著变化，近滨与滨外间无明显沉积物交换。

(24) 海滩平衡剖面 Equilibrium beach profile

波浪作用下，侵蚀、堆积作用处于相对平衡状态的理想海滩剖面。

(25) 侵蚀热点 Erosion hot spot

比周边岸段侵蚀更快的区域或者是那些比基于对工程区泥沙运移机理以及海滩平面演变所做出的预测侵蚀率更大的区域。

3. 修复原则



开展砂质海岸生态减灾修复应遵循下述原则：

（1）**问题导向，因地制宜。**科学准确识别砂质海岸减灾功能和生态环境问题，分析海岸减灾能力下降和生态系统退化原因，以减灾需求、生态本底和自然禀赋为基础统筹考虑技术、时间、资金、生态影响等因素，因地制宜、分类施策，合理布局生态减灾修复工程。

（2）**自然恢复为主，人工修复为辅。**遵循自然生态系统内在机理和演替规律，维护生态系统多样性和连通性。尊重自然，顺应自然，保护自然。注重砂质海岸生态系统的自我修复能力，减少人类活动对生态系统的干扰；只有在自然恢复不能实现的条件下，充分结合现有的自然条件采取适当的人工辅助措施，促进砂质海岸生态系统修复和减灾能力提升。

（3）**陆海统筹，系统修复。**遵循基于生态系统考虑的原则，从陆海统筹角度考虑砂质海岸生态系统的功能，从其完整性出发开展系统修复，避免修复工作导致海岸带生态系统的割裂和损害。充分考虑生态修复活动空间上的系统性和时间上的连续性，分步骤、分阶段进行修复工作，并开展全过程的监督、生态环境跟踪监测和适应性管理。

（4）**合理可行，风险可控。**修复项目应符合国家和地区的用海、用岛、用地规定，砂质海岸生态减灾修复技术措施可行且投资成本合理；充分考虑生态修复活动与周边区域的相互影响，不宜采用无法预估实施后是否会对修复区域或周边区域造成不利影响的技术措施。

4. 总体技术流程



砂质海岸生态减灾修复是一项十分复杂的综合过程，不仅需要考虑修复区的海岸自然环境条件，也需要全面考虑修复海岸所处区域的经济环境、发展水平、城市规划与生物生境等社会人文和生态条件。

砂质海岸修复工程在实施前应充分收集整理资料数据，开展现场踏勘和背景调查，全面掌握修复区的历史演变与现状，分析、诊断海岸存在问题，并进行修复适宜性评估，在此基础上开展海滩修复方案设计。工程实施过程中宜加强质量控制，竣工验收后应进行跟踪监测、修复效果评估和科学管护。



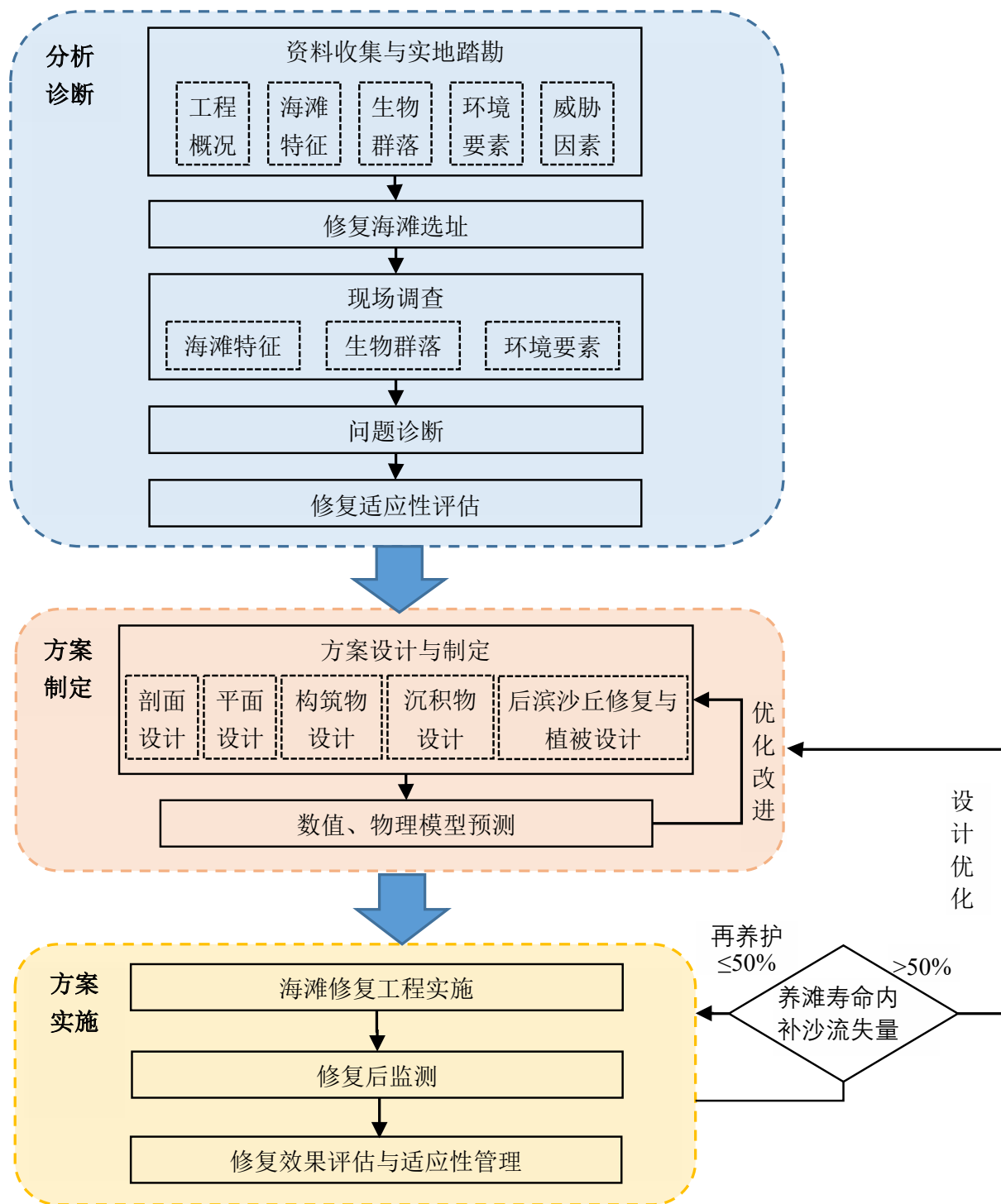


图1 砂质海岸生态减灾修复工作流程

5. 本底调查



5.1 调查目的

砂质海岸现状调查的目的在于了解海滩及临近海岸带地质、动力、水体及生物等环境要素现状，为分析砂质海岸侵蚀和淤积状态及修复计划的制定提供基础。同时，对演化状态不同、剖面和平面形态不同的砂质海岸进行调查，以确定待修复海岸的发展趋势，针对性提出砂质海岸修复方案，并为修复计划提供现实模板。

5.2 调查内容和方法

(1) 砂质海岸演变历史

砂质海岸修复工程区的规划和选择尤其需要考虑海岸的现状特征，对砂质海岸演变历史的分析有助于了解海岸现状的形成原因和形成过程，可以为人工海滩的设计提供一定的参考依据。对于需要进行沙滩养护的受损砂质海岸，首先需要了解沙滩地貌的发育演化历史（如岸线、干滩规模变化等），剖析沙滩地貌受损原因、了解海岸受损程度和发展状况，评估海岸背景侵蚀率，针对不同的侵蚀原因来制定相应的修复措施，恢复历史上完整的沙滩地貌形态。影响砂质海岸变化的因素复杂多样，从根本上而言海岸的地貌变化是动力作用下海岸沉积物迁移的结果，任何引起沉积物或者近岸水动力变化的因素都可能引起海岸地貌的变化。影响砂质海岸地貌变化的主要直接和间接因素如表 1 所示。

表 1 砂质海岸地貌变化的主要影响因素

	长时间尺度（数年 - 数百年）	短时间尺度（数天 - 数年）
直接 影响	风化、溶蚀、磨损和压实等造成的海岸沉积物体积的减小	海滩、近滨人工采砂 波浪和水流输沙
		风力输沙
		滩面排水输沙（如管涵等）
		海滩旅游活动

	长时间尺度（数年 - 数百年）	短时间尺度（数天 - 数年）
间接影响	全球气候变化	滨外挖砂
	海平面上升	风暴潮作用
	入海河流泥沙减少	上游护岸、丁坝、防波堤修建
	流域水土保持	海岸沙丘供沙减少
	河流改道	后滨护岸修建
	海崖侵蚀供沙减少	海滩地下水位变化
	滨外来沙减少	占滩建筑的修建
	滨外沙坝迁移、礁石和珊瑚礁消失	



(2) 海岸动力环境

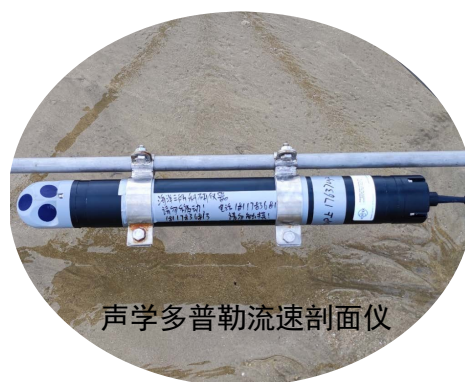
海岸动力环境调查包括波浪、海流、悬沙、潮位、风和多年以来的海平面变化等诸多方面，各动力调查项目的主要要求如表 2 所示。

波浪调查主要了解砂质海岸修复区的波浪状况并为沙滩修复工程的演变预测提供动力数据支撑。要求观测或收集近 5 年内不少于 1 年周期的连续实测数据，观测点海面开阔，无岛屿、暗礁、沙洲和水产养殖、捕捞区等障碍物影响，并尽



量避开陡岸。抛设浮标（或传感器）处的水深一般不小于 10 m，海底平坦，尽量避开急流区。传感器或测波浮标布放后应立即测定布放点的水深、布放时的潮高、布放点相对于岸上观测场地（或接收点）的方位、水平距离并记录布放时间。

近岸海流一般以潮流和风海流为主，在某些情况下，海岸其他类型的海流也相当显著，如由于波浪破碎产生的沿岸流和离岸流。这些海流对砂质海岸修复工程的沉积物运移、地貌演变乃至海岸带稳定有重要影响。海流观测区的大小，应根据工程要求，结合当地水文气象状况和地形条件等确定，着重在拟建工程及其附近进行海流观测。主要观测要素为流速和流向，辅助要素为风速和风向。至少冬夏两季各进行一次观测。海流连续观测的时间长度应不少于 25h，至少每小时观测一次。观测层次根据水深确定：当水深 $H \geq 5.0\text{m}$ 时，观测 6 层（表层，0.2H 层、0.4H 层、0.6H 层、0.8H 层、底层）；当水深 $3.0 \leq H < 5.0\text{m}$ 时，观测 3 层（0.2H 层、0.6H 层、0.8H 层）；当水深 $1.5 \leq H < 3.0\text{m}$ 时，观测 2 层（0.2H 层，0.8H 层）；当水深 $H < 1.5\text{m}$ 时，观测 1 层（0.6H 层）。



对工程区悬浮泥沙的调查观测目的是了解泥沙运移路径、泥沙通量大小，阐明泥沙运移对海岸带冲淤变化的影响，为砂质海岸修复工程建设提供依据。工程区海域悬浮泥沙观测与海流观测同步进行，观测层次和次数与海流观测一致。一般要求在平直海岸宜垂直于海岸线布设水文断面，当海岸弯曲或有河口时，断面数量视具体情况适当增加。

潮位观测主要是测量不同时间的潮汐高度，尤其是高潮、低潮的潮高及对应潮时。观测点应选择在与外海畅通，水流平稳，不易淤积，波浪影响较小的海域；应避开冲刷严重、易坍塌的海岸；在理论最低潮时，水深应大于 1 m；尽可能利用防波堤、码头、栈桥等海上建筑物。对于需要固定安装在水下的传感器，其安装高度应低于潮高基准面下 1m。观测站应在适当位置设置一个基本水准点和一至两个校核水准点。基本水准点是观测站永久性的高程控制点。校核水准点是用于引测和检查水尺零点、读数指针高程的水准点。

近岸风况既影响波浪特征也影响海岸风沙搬运过程，是砂质海岸修复工程考量的重要因素之一。要求在砂质海岸修复工程设计时掌握工程区附近不少于 1 年的风速资料。风况调查观测要素主要包括：瞬时风速、风向，日最大风速、风向及其出现时间，日极大风速、风向及其出现时间，瞬时风速大于或等于 17.0m/s 的起止时间。观测场应设在四周空旷平

坦、气流畅通并避免局部地形和障碍物影响的地方。观测场的大小一般应为：25×25m（海岛或平台上受条件限制可适当减小）。传感器应安装于观测场内北面且距地面高度 10~12m 处；若安装在平台上，应距上层平台面 6~8m 且距地面高度不得低于 10m。

区域海面变化相对较慢，但从长期来看，海面升降变化对于海岸地貌演变的影响亦不容忽视。从海平面变化的时间尺度和变化速率来看，一般要求搜集工程区域不少于近 30 年的海平面变化资料。



表 2 海岸动力环境调查基本内容及要求

调查项目	调查要求
波浪	观测时间：观测或收集近 5 年内不少于 1 年的连续实测数据。 站位布设：修复区附近海域水深 10~15m 处为宜。 观测技术要求：按《海滨观测规范》GB/T 14914-2006 执行。
海流	观测时间：至少冬、夏两季各进行一次，连续观测的时间不少于 25h。 测区布设：邻近工程区，一般位于工程区中部海域。 观测技术要求：按《海洋调查规范》GB/T 12763.2-2007 执行。
悬沙	观测时间：至少冬、夏两季各一次，每次不少于 25 小时全潮连续观测。 站位布设：垂直海岸线布设，不少于 2 个站位。 观测技术要求：按《海港水文规范》JTS145-2-2013 执行。
潮位	观测时间：观测或收集近 5 年内不少于 1 年的连续实测数据，原则上与波浪观测同步。 观测技术要求：按《海洋调查规范》GB/T 12763.2-2007 执行。
风	观测时间：观测或收集近 5 年内不少于 1 年的连续实测数据，原则上与波浪观测同步。 站位布设：修复区海岸开敞处。 观测技术要求：按《海滨观测规范》GB/T 14914-2006 执行。
区域海面	收集区域近年（不少于 30 年）海平面变化资料。

(3) 沉积物

沉积物的调查内容包括岸滩沉积物、水下沉积物以及海滩沉积物钻探调查。沉积物调查有助于了解工程海岸环境的沉积特征，为砂质海岸沙滩修复补沙粒径的选取提供本底依据。沉积物调查的基本内容和调查要求见表 3 所示。岸滩沉积物和水下沉积物的取样原则上与地

形测量同步，并确保不同期次的取样地点一致或相近。海滩沉积物钻探调查是为了探明砂质海岸的沙源储量、沙滩沉积特征以及极端动力事件作用记录，为砂质海岸修复设计提供参考依据。



图 2 海滩表层沉积物和柱状样采集（图片来源：自然资源部第三海洋研究所）

表 3 沉积物调查内容和基本要求

调查项目	调查要求
海滩沉积物粒度变化监测	位置：取样剖面同监测剖面，取样位置至少包括滩肩、高潮带、中潮带、低潮带等代表性部位，可根据现场特点增加采样数。 取样深度：表层至 20cm。 取样时间：原则上与岸滩测量同步。
海底沉积物粒度变化监测	取样密度：工程区由海向陆采样密度逐渐增大，不少于 10 个 /km ² 取样深度：表层。 取样频率：不少于 1 年 2 次，冬夏季节各一次。
海滩沉积物钻探调查	利用开挖探槽或钻孔手段，调查海滩沉积特征。 位置：至少包括滩肩、高潮带、中潮带、低潮带等代表性部位，可根据现场特点增加钻孔或探槽数。

(4) 地形地貌

地形地貌调查主要包括近岸地形、岸滩剖面与岸线变化监测等，其调查内容和要求见表 4。

近岸地形测量可以为砂质海岸修复设计的波浪场推算、岸滩演变预测、海滩设计以及补沙量的确定等提供基础依据。首先需要了解历史测量水深数据和最新出版的海底地形图和



海图，一般要求水下地形测量比例尺不低于 1:5000，岸滩地形测量一般不低于 1:1000。在测深过程中，导航定位准确度应优于 10m。在水深小于 30m 时，水深测量准确度应优于 0.3m；在水深大于 30m 时，水深测量准确度应优于水深值的 1%。

岸滩剖面监测可为岸滩冲淤变化分析提供数据支撑。剖面个数根据工程区的大小来决定，一般要求不少于 5 条 /km，特殊情况下根据海岸形态的变化酌情增加。不少于 1 年的周期性观测，每季度观测一次同时要求在台风作用后加测。

岸线变化监测应在砂质海岸修复工程设计前 1 年启动，监测范围应包括工程区及其周围海岸单元岸线，至少进行冬夏季节各一次的测量，原则上要求与岸滩剖面的冬夏季节测量同步，并在风暴潮作用后加测，以便判断岸线的变化趋势。

表 4 海岸地形地貌观测内容和基本要求

调查项目	调查要求
近岸地形测量	测量范围：拟修复区域岸线向海延伸至 10m 等深线以深。 测量比例尺：水下地形不低于 1:5000；岸滩地形一般为 1:1000。 测量技术要求：按《海洋调查规范》GB/T 12763.2-2007 执行。
岸滩剖面地形监测	测量范围：修复区后滨向海至平均最低潮水深 0.5m。 断面布设：断面垂直水边线布设，密度不少于 5 条 /km，基点固定。 测量频率：不少于 1 年周期，不低于每季度 1 次，台风作用后加测。 测量技术要求：按照《海洋工程地形测量规范》GB17501-2017 执行
岸线变化监测	测量范围：修复区所在的海岸单元及其附近海岸线。 测量频率：不少于 1 年周期，冬夏季各测量 1 次，台风作用后加测。 测量技术要求：按照《海洋工程地形测量规范》GB17501-2017 执行。 收集历史岸线对比资料，了解过去岸线的变化特征。

(5) 后滨植被

后滨植被是砂质海岸重要的生物类型，是砂质海岸消波耗能、防灾减灾的生物缓冲带，是砂质海岸修复生态减灾效益的重要评价指标。后滨植被调查的目的在于了解砂质海岸后滨沙生植被的种类、分布及群落结构，以便针对性开展植物筛选、土壤改良和植物配置等后滨沙地植被修复设计。基本的调查要素和调查要求见表 5。



表 5 后滨植被调查基本要素和要求

调查要素	植被类型、植物种类、面积、株数、株高、胸径、冠幅、盖度及生活力等。
站位布设	a) 样线设置。调查样线分布在整个调查区域内的各代表性地段，避免在一些地区产生漏空，并用 GPS 记录路线； b) 样方设置。主样方通常设置为正方形，乔木样方面积为 100m ² ，灌木样方为 25m ² ，草本植物样方为 1m ² ；两个样地之间的距离不小于 100 m，各植物群落至少 1 个样地。
调查频次	a) 常规调查：每年调查一次，应安排在 5 月~9 月间； b) 风暴期间调查：风暴后一个月内调查一次。
技术要求	a) 胸径≥5cm 的乔木、小乔木树种要求每木检尺；灌木树种及草本以丛或株为单位调查记载，填写植物资源记录表； b) 通过卫星遥感影像解译获取后滨植被面积，遥感影像分辨率应不低于 0.6m；通过无人机遥感影像解译获取后滨植被面积，遥感影像分辨率应不低于 0.3m。

(6) 底栖生物

随着人们对海洋环境质量关注程度的提高，砂质海岸修复工程影响下的底栖生物变化也日益引起重视，并且作为一个修复工程效果的判断指标之一。底栖生物调查的目的在于了解水下底栖生物的种类组成、分布，并对单位面积上底栖生物的平均密度和生物量作出比较可靠的估计，这些调查数据可以评述海滩环境和水体的污染程度。基本的调查要素和调查要求见表 6。



表 6 底栖生物调查基本要素和要求

调查要素	底栖动物、底栖植物的种类组成、数量（栖息密度、生物量或现存量）及其水平分布和垂直分布。
调查密度	通常在高潮区布设 2 站、中潮区布设 3 站、低潮区 1 站或 2 站； 在滩面较短的潮间带，在高潮区布设 1 站、中潮区布设 3 站、低潮区 1 站。
调查周期	通常按春季、夏季、秋季和冬季进行一年 4 个季度月调查； 根据不同要求可选择春、秋季两个季度月进行调查。
调查时间	潮间带生物采样必须在大潮期间进行； 或在大潮期间进行低潮区取样，小潮期间再进行高、中潮区的取样。

技术要求	硬相（岩石岸）生物取样，用 25cm×25cm 的定量框取 2 个样方；在生物密集区取样，采用 10cm×10cm 定量框取样； 软相（泥滩、泥海滩、海滩）生物取样，用 25cm×25cm×30cm 的定量框取 4 个样方至 8 个样方。同时进行定性取样与观察，定性取样在高潮区、中潮区和低潮区至少分别取 1 个样品。
------	--

(7) 水质环境质量

开展海水环境水质监测可进一步了解该海岸附近海域海水化学的基本状况，积累海水化学基础资料，提高对砂质海岸修复工程影响下海水环境分布、变化规律等综合认识，为砂质海岸修复、海岸带保护与管理等提供背景资料和决策依据。海水环境水质监测基本指标及要求见表 7。

表 7 海水环境水质监测基本指标及要求

监测指标	水质监测要素包括：为粪大肠杆菌、透明度、盐度、悬浮物、油类、pH、溶解氧。根据现场特点，可以适当增加相关项目。 水文气象要素包括：水温、风向、风速、降水量、气温、能见度。
监测范围	工程区域沿主流向向两侧各外推 3km 水域，所设站位均匀分布于整个水域，包括施工期影响最大的点，以及易受外部污染的外围点。
监测频次	监测频次尽可能分别安排在 6~9 月（游泳高峰期）和 12~2 月（游泳低峰期），每期原则上要求进行大潮和小潮期监测。
监测层次	水深< 5m，采集表层；5m ≤水深< 10m，采集表底层；水深≥ 10m，采集表中底层（表层为海面以下 0.1~1m、底层离底 2m）。
应急监测	出现下列情况之一时，需对海水环境水质进行应急监测： ①当发现水质出现明显恶化趋势时，需对相关参数进行监测； ②当地出现与水有关的疫情时，需加强微生物数量监测，根据不同的疫情，选择不同的微生物参数，如沙门氏菌、肠道链球菌、病原体等参数进行监测； ③附近海域发生突发事件，如溢油、赤潮等，亦需进行有针对性的监测。
技术要求	按《海洋调查规范》（GB12763-2007）和《海洋监测规范》（GB17378-2007）



6. 问题诊断与修复适宜性评估



6.1 问题诊断

在砂质海岸现状调查的基础上，分析并诊断海岸存在问题。砂质海岸生态修复的问题诊断内容主要包括海滩侵蚀诊断、海滩质量诊断、海岸减灾功能诊断和生态退化诊断等。

海滩侵蚀的诊断，通过调查与分析确定海滩的平衡状态与平衡条件，判断海滩侵蚀关键原因，量化侵蚀程度，以及海滩受损对海域资源环境、公众生产生活造成的影响。

海滩质量的诊断包括自然质量和开发质量评价，根据收集的数据资料和背景现场调查情况，开展海滩综合质量评价，对修复海滩进行等级鉴定。海滩自然质量、开发质量与综合质量等级评价指标和方法宜按照《海滩质量评价与分级》HY/T 254—2018 执行。

海岸减灾功能诊断包括砂质海岸的消浪能力，以及减灾缓冲能力和灾后自我恢复能力的综合判断。消浪能力评估宜按照《海岸带生态减灾修复技术导则第 7 部分：砂质海岸》T/CAOE 21.7-2020 中的 6.2 执行；减灾缓冲能力宜按照《海岸带生态系统现状调查与评估技术导则第 8 部分：砂质海岸》T/CAOE 20.8-2020 中的 7.3.1 执行。灾后自我恢复能力可以基于监测和数学模型进行判别。

生态退化的诊断宜包括潮间带生物群落和后滨植被群落的退化因子、退化程度及退化原因等，生态退化诊断的指标和方法宜按照《海洋生态修复技术指南 第 1 部分：总则》GB/T 41339.1—2022 中的 6.5.2 和 6.5.3 执行。

6.2 修复适宜性评估

根据问题诊断的结果，开展砂质海岸生态减灾修复适宜性评估，评估分析内容主要包括——

海滩受损机理分析：包括海滩受损情况、海滩输沙状态、周边人类活动、沿岸输沙、构筑物对海滩的影响、侵蚀热点区域成因；

政策规划适宜性分析：砂质海岸修复选址应符合但不限于政策法规、海洋功能区划、

海域使用规划、国土空间规划、城市建设规划等政策规划要求；

水文动力环境适宜性分析：采用现场调查和数值模拟等手段，分析修复区及其周边海域的波浪、潮汐与极端风暴动力条件，评估水深地形、岸线形态和构筑物对近岸水动力的影响，分析侵蚀热点的潜在区域、修复海滩泥化的可能性；

海岸地形地貌适宜性分析：包括修复区地形地貌是否具备或通过人工构筑物形成适宜海滩形成的地形地貌环境，以及现有海滩地貌的消波耗能和对风暴潮的缓冲能力；

水质底质环境适宜性分析：分析修复区域近岸水质条件、沉积物是否满足修复需求，宜符合 HY/T 255—2018 中 4.4 和 7.5 的规定；分析岸滩填砂施工对生态敏感目标的潜在影响。



7. 修复目标



基于问题诊断与修复适宜性评估结果，确定砂质海岸生态修复目标。砂质海岸修复目标不仅是对侵蚀岸线进行修复以恢复自然岸线形态，还应考虑修复区防灾减灾、海岸带生态保护以及滨海旅游观光等社会、生态和经济要素，综合制定砂质海岸修复目标。

从安全角度，通过海滩养护快速恢复侵蚀受损的自然岸线形态，拓宽海岸带应对海洋灾害的柔性缓冲空间，有效提升海岸生态减灾防护能力；从生态角度，结合沙生植被修复营造良好的动植物生境条件，构建海岸带健康生态系统；从经济角度，通过岸滩修复后公众亲水休闲空间的拓展，促进海滩旅游创收，带动海岸后方高地财产增值，推动滨海经济快速发展。综合上述安全、生态和经济目标实现，形成具有“减灾防护能力、生态系统活力、经济开发活力”三位一体的活力海岸，助力沿海经济高质量发展。



8. 修复方式



对于需要修复的受损砂质海岸，首先需要分析砂质海岸受损原因、了解海岸受损程度和发展状况，评估海岸背景侵蚀率，针对不同的直接侵蚀原因来制定相应的修复措施。

对于需要进行海滩养护的砂质海岸，由于砂质海岸现有的海滩状态（包括海滩长度、宽度、坡度、粒度等方面）难以满足防灾减灾、城市规划和发展等需求，需要进行海滩养护以改善海滩质量、提高灾害防御能力、增强海滩的容纳能力、提高旅游海滩吸引力。对于该类型人工海滩工程，需着重考虑海滩增宽、加长或者沉积物粒径变化等养护情况下的海滩演变行为，预测养护海滩后退速率、侵蚀热点、剖面变化及减灾功能等。

对于受人类活动影响导致原有海滩灭失的岸段，考虑城市健康、可持续发展以及人民对美好生活的向往等需求，拟重新营造砂质岸滩的，首先要分析海滩再发育可能性，可以根据经典海滩发育理论来研究该近岸环境是否仍然具备发育或维持海滩的动力因素、沉积特征，并结合物模和数模来验证，另外也可以通过相邻岸段、相似环境的区域类比法进行推断。



9. 修复措施



9.1 砂质海岸修复剖面设计

9.1.1 剖面类型

前人研究表明,较细的抛沙形成的平衡剖面坡度较缓、较粗的抛沙形成的平衡剖面坡度较陡。粒径越粗,单宽沙量的干滩宽度(Δy_0)越大。

不同粒径的岸滩修复剖面可以分为:“交叉型”,“非交叉型”和“浸没型”剖面。对于交叉型剖面来说(图3a),一个必要但不充分的条件是抛沙粒径比天然沙的粗。可以看出,这种剖面的优点在于,养护剖面与天然剖面“相交”(交叉),这样就不需要把抛沙扩展到闭合深度 h^* 处。第二种剖面(图3b)在大多数养滩工程中都可見到。如果抛沙与天然沙的粒径相当或稍细,则会出现非交叉剖面;如果抛沙较粗,也会出现。同时,此种类型的剖面会一直延伸到闭合深度 h^* 。第三种类型是浸没型剖面(图3c),它不向陆延伸至水边线,因此不会增加任何干滩宽度。这种剖面类型也属于非交叉型,并要求抛沙比天然沙细。

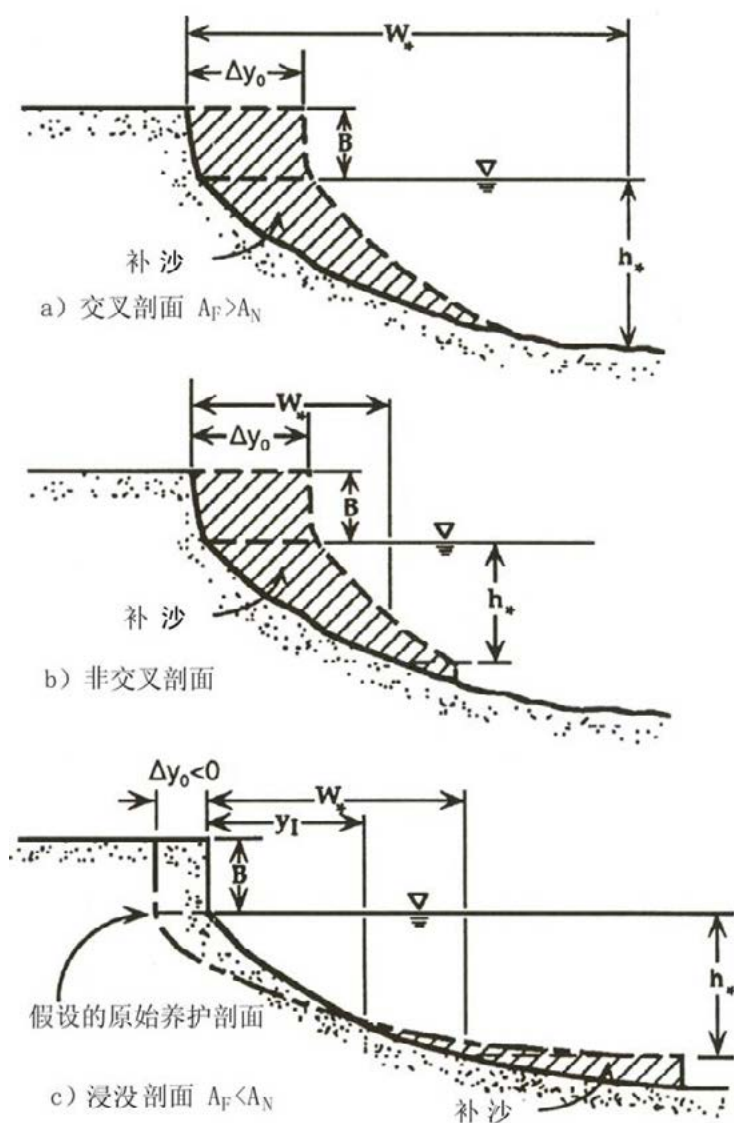


图3 岸滩修复剖面的3种类型^[1]

(图片来源: Dean, 1991)

9.1.2 剖面形态设计

砂质海岸海滩剖面形态设计的方法有多种，许多经验表明采用单一方法来进行岸滩剖面设计未必能达到良好效果。反之，应采用多种设计方法相互比较验证来确定岸滩剖面形态，并得出单宽补沙量的范围。本手册主要列举三种常用的砂质海岸海滩剖面设计方法。

(1) Dean 的平衡剖面模式

Bruun^[2] 最早指出，海滩剖面满足 $h=Ax$ 表达式。Dean^[1,3] 对 Bruun 提出的模式加以理论化，得到海滩平衡剖面模式：

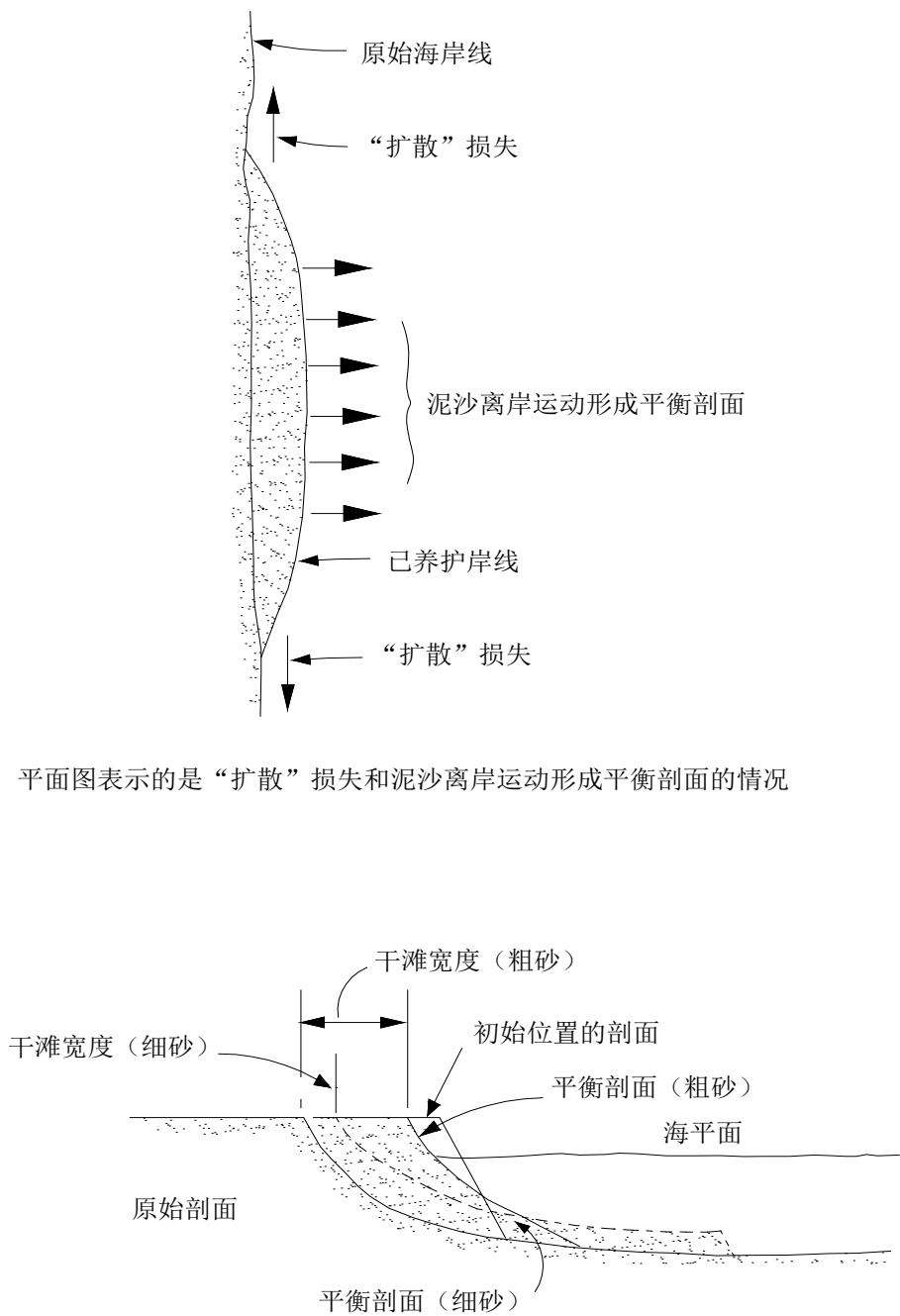
$$h=Ax^m$$

式中： h 为当地水深（m）； x 为离岸距离（m）； m 为统计得到的系数； A 与沉降速度 w 相关， $A=0.067w^{0.44}$ （ $W=14D^{1.1}$ ， D 为平均粒径）。

Dean 通过对美国大西洋海岸和墨西哥海岸的 504 条海滩剖面数据进行拟合，发现 m 值介于 0.2 ~ 1.2 之间，并且符合正态分布，期望值为 2/3，所以一般采用 2/3 作为 m 的值。Dean 模式简单实用，已被广泛应用于美国砂质海岸海滩修复工程的剖面设计中。

(2) 荷兰的经验方法

Verhagen 在 1992 年提出了一种在荷兰广泛应用的养滩经验方法，该方法主要分成五个步骤（有些步骤可能不适用于某些特定工程）^[4]：（1）在工程区进行至少 10 年以上的岸线测量来提供背景侵蚀率；（2）利用至少 10 年的测量数据来计算该岸段每年的沙流失量；（3）在计算出的沙流失量上增加 40% 的流失量；（4）在得到的数值上乘以一个适当的“半衰期”，比如 5 年；（5）在低潮线以下 1m 处与沙丘基部之间的海滩上抛填这些数量的沙来完成海滩养护工程。该方法的不足之处是在选择的“半衰期”后期，由于背景侵蚀是引起泥沙流失的主要因素，因此，所有抛填的沙将被侵蚀掉，增加 40% 的沙公认为是为了弥补该海滩养护工程泥沙的纵向扩散流失（图 4a）。对于后续的海滩再养护工程所需的沙量，可以根据前面养护工程的观测结果得出。荷兰的经验方法简单直接，并认为任何质量好的沙被抛填在海滩上都会对海岸线有好处。



(a) 平面图表示的是“扩散”损失和泥沙离岸运动形成平衡剖面的情况

(b) 剖面图表示原始剖面，初始位置剖面和在粗砂，细砂养护下的平衡剖面。

图 4 与海滩养护工程相关的泥沙运移流失和海滩剖面^[5]

(图片来源: Dean, 2002)

(3) 剖面类比经验方法

受区域构造、气候分带、动力条件和沉积物供给等多种因素影响，不同地区的砂质海岸形态类型多样，某些特殊情况下还出现同一海岸不同岸段海滩形态类型迥异的现象。在

强潮海岸背景下，根据 Masselink 和 Short^[6] 提出的概念模式，主要发育极耗散型 (ultra-dissipative beach) 和低潮阶地型 (low-tide-terrace beach) 等海滩动力地貌类型。在这种特殊的强潮动力环境下，前人的平衡海滩理论模式往往不适用，实际海滩剖面形态与 Dean 的平衡剖面模式存在显著的差别（图 5），这就要求海岸工程人员进行砂质海岸修复设计时充分考虑实际海滩特征。

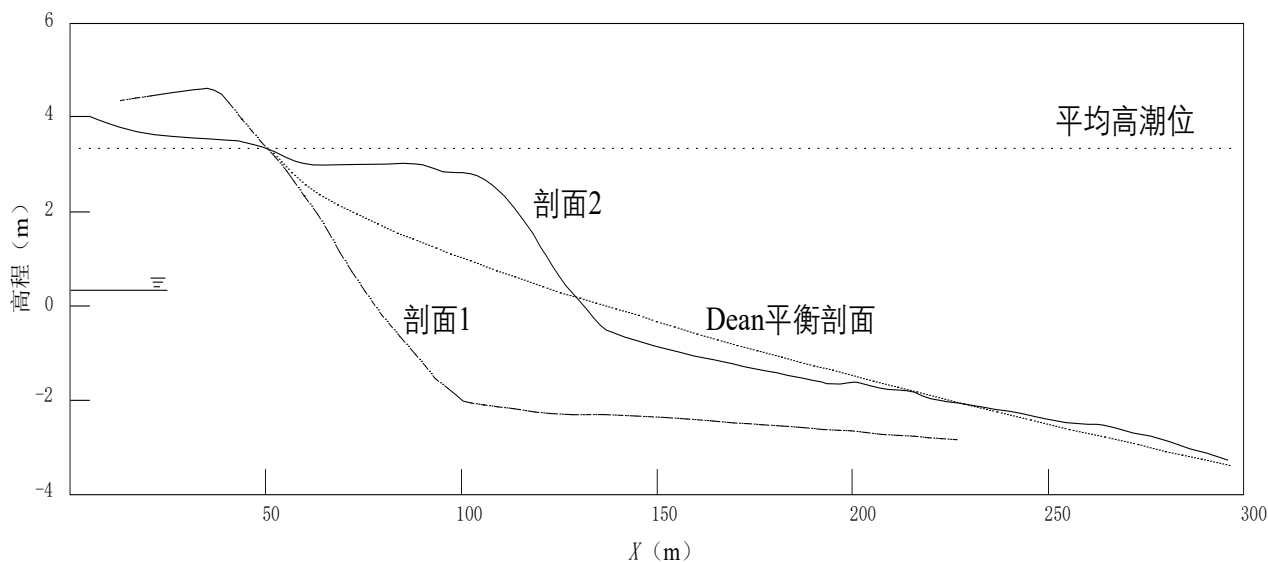


图 5 实测海滩剖面形态与 Dean 平衡剖面差异对比，
剖面 1 和剖面 2 为强潮海岸典型低潮阶地型海滩剖面形态^[7]
(图片来源: Shi et al., 2013)

在前人已有的海滩平衡剖面设计方法不适用的情况下，剖面类比经验方法是一个十分重要的选择。剖面类比法是指，拟修复海岸与动力条件、近岸沉积特征十分相似的相邻砂质海岸，存在可类比性。拟修复海岸因自然和人为因素发生侵蚀破坏或消失，而临近类比岸段或海岸单元海滩保存较好或处于动态平衡状态，通过借鉴类比海滩的形态，来设计修复岸滩剖面。

剖面类比法既可作为砂质海岸修复设计的指导方法，也可用于验证其他设计方法的可行性和准确性。岸滩剖面设计类比法应用步骤如下：

- A. 全面分析相邻岸段的近岸动力环境条件、海岸地貌类型、岸滩走向、岸滩剖面类型和沉积物特征；
- B. 基于上述分析，选择与工程区海岸最相似的类比砂质岸滩；

C. 在类比岸滩典型位置（如海滩中部、两侧或者变化显著处）布设观测断面进行周期性岸滩形态测量，测量范围包括最低潮线到平均大潮高潮线以上的区域，以确定岸滩滩面形态；

D. 根据类比岸滩的滩面形态特征，进行砂质海岸修复剖面设计。

9.1.3 剖面补砂方式

砂质海岸修复剖面设计和填砂方式直接决定修复成效，常见的剖面补砂方式有沙丘补沙、滩肩补沙、剖面补沙和水下沙坝补沙四种。

(1) 沙丘补沙（图 6）：将泥沙堆积于海滩后滨，提升后滨沙丘的高度和宽度，增加海岸应对极端动力事件的防护水平和缓冲能力，配合后滨沙生植被修复可以提升海岸风沙防护能力。该补沙方式为防御性修复，不增加干滩宽度作为休闲空间，一般在地势较低的海岸薄弱区域以及海岸风沙活动剧烈的区域采用该方法。沙丘补沙修复的技术流程详见 9.6 节。

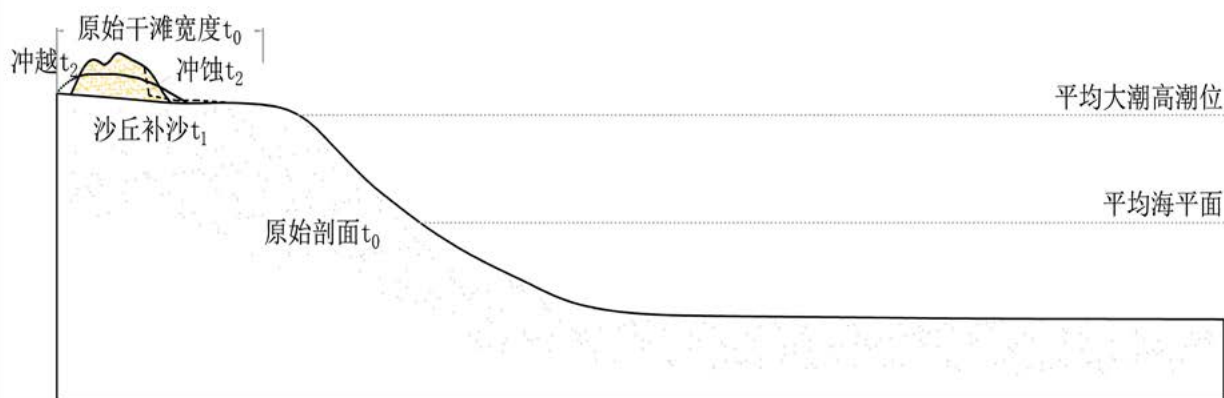


图 6 剖面补砂方式：沙丘补砂^[8]（图片来源：戚洪帅等，2021）

(2) 滩肩补沙（图 7）：将泥沙直接堆积于滩肩前缘，恢复沙滩修复前的滩肩宽度并适当拓展干滩规模。修复后海滩会在动力作用下进行自然调整，干滩宽度会逐渐变小而稳定。该补沙方法施工简单，修复初期滩面变化快速，需要较长的时间才能形成平衡剖面，风暴浪是其演化的主要动力因素。滩肩补沙是我国最常见的补沙方法，尤其是需要快速增加休闲空间的修复工程。滩肩高程设计需要综合考虑当地的历史高水位高程、波浪爬高、陆上景观高程、现有海滩高程和相邻海滩高程以及养滩成本等多方面的因素来确定，允许在极端天气时存在一定程度的漫滩。可参考《海滩养护与修复技术指南》HY/T 255—2018 进行滩肩高程设计。

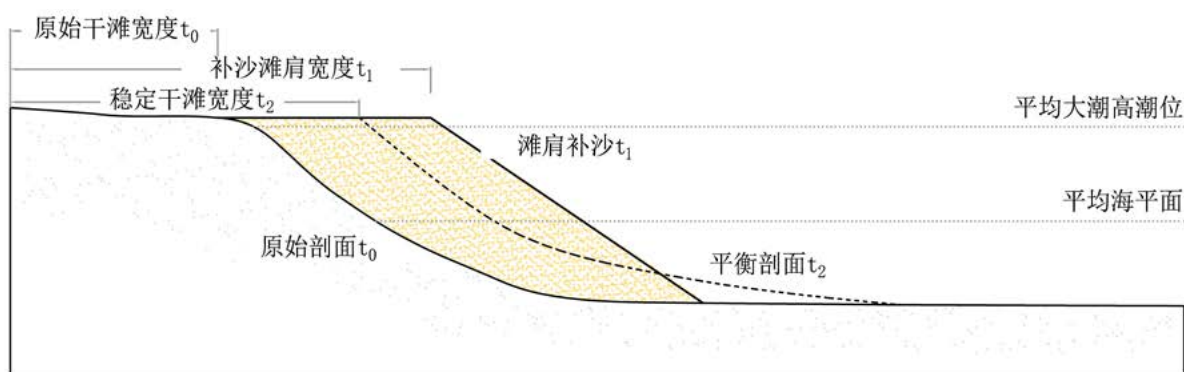


图 7 剖面补砂方式：滩肩补砂^[8]（图片来源：戚洪帅等，2021）

(3) 剖面补沙（图 8）：在整个海岸剖面上进行补沙，人工塑造近平衡剖面形态。该方法需要精准的设计填砂粒径、填砂剖面 and 超填率，修复后岸滩经较短的时间即可达到平衡状态，岸线变化小，干滩基本稳定。但剖面补沙施工技术要求高，施工期风暴作用对其影响较大。

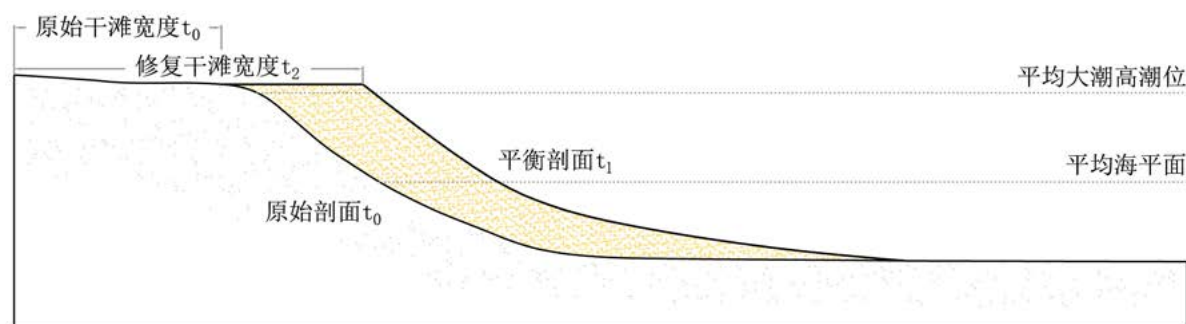


图 8 剖面补砂方式：剖面补砂^[8]（图片来源：戚洪帅等，2021）

(4) 水下沙坝补沙（图 9）：在近岸水下区域进行泥沙抛填，形成平行于海岸的水下人工沙坝，这一方面可以作为软性潜堤起到消浪护岸的屏障作用，同时可以依靠波浪的作用持续对海滩进行补给，使得海滩滩面逐渐增加。人工沙坝的坝顶水深、高度和坡度是影响其稳定性及动态护滩效果的核心因素。该补沙方法可以有效增加砂质海岸的防护能力，但不会直接增加海滩干滩宽度。不适用于以增加休闲空间为目的的砂质海岸修复工程，通常和其他补沙方式组合使用。

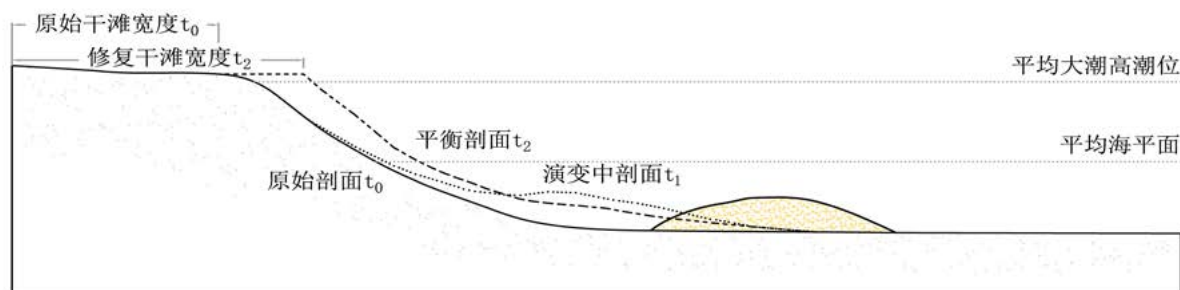


图9 剖面补砂方式：水下沙坝补砂^[8]（图片来源：戚洪帅等，2021）

9.1.4 剖面分层设计

砂质海滩修复填砂可采用单层或多层设计，修复岸滩长度大、填砂量较多时宜采用多层设计，垫层砂粒径和分选可大于沉积物设计粒径，表层砂粒径和分选与沉积物设计粒径一致。

砾质海滩宜采用分层设计，砾石填充结构可使用滩面耗能层、渗透垫层和基础层构成的三层混合断面结构。

9.2 砂质海岸修复平面设计

依据海岸形态及其背景输沙条件，砂质海岸修复工程平面形态设计包括岬湾岸滩、平直岸滩和人工砂源岸滩三种平面形态修复设计类型。

9.2.1 岬湾岸滩平面形态设计

岬湾岸滩是砂质海岸的一种常见形式，是一个相对独立的沉积单元，受岬角遮蔽的影响海滩通常处于稳定状态（图10）。此类海滩通常发育于构造控制的主动大陆边缘海岸，是我国最为常见的海滩类型。对于受损的岬湾海岸可采用构筑物（如人工岬头）构建静态平衡岬湾进行沙滩补沙修复，岸线形态布设通常采用 Hsu 和 Evans^[9] 提出的抛物线模式，主要包括以下几个方面：调整平衡平面形态、根据主波向确定工程区的波浪绕射点、确定静态平衡海滩的下游平直段起点（图11）。具体工程设计时，可采用基于平衡岬湾理论的 MepBay^[10] 或 MeePaSol^[11] 模型，模拟、预测修复砂质岸线在常浪作用下形成的静态平衡岬湾岸线形态。

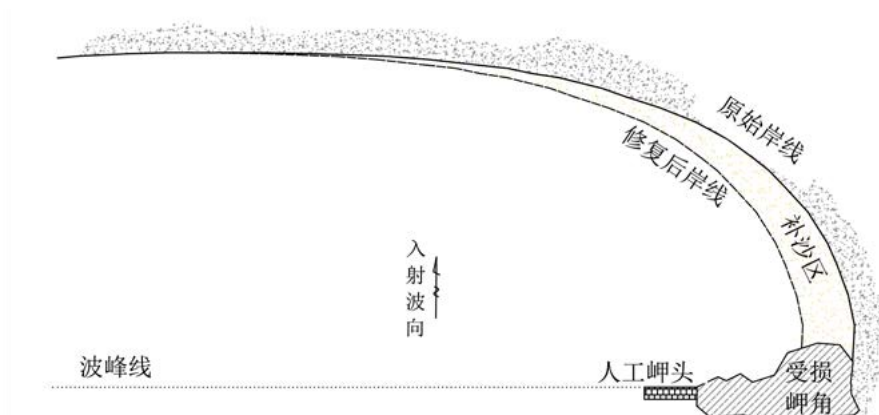


图 10 岬湾海滩平面形态设计^[8] (图片来源: 戚洪帅等, 2021)

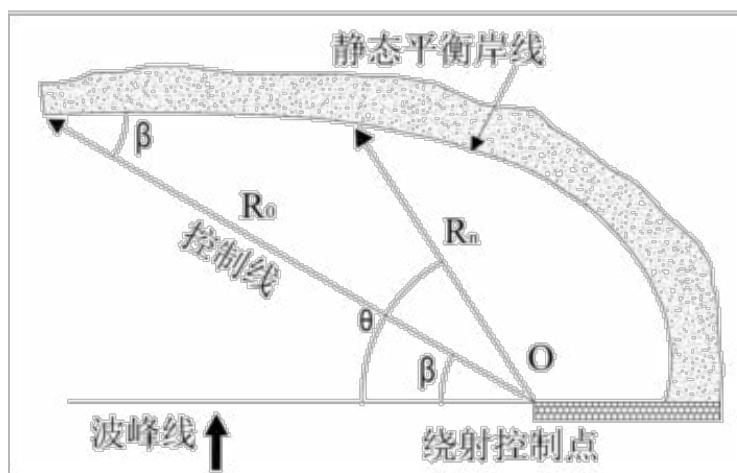


图 11 基于 Hsu 和 Evans 的静态平衡岬湾岸滩形态设计^[9]

(图片来源: Hsu & Evans, 1989)

平衡岬湾岸滩修复具有海滩平面形态调整较小, 岸滩相对比较稳定的优点, 一旦稳定状态形成很少需要进行再养护。但该方法的利用受限于海岸发育的自然条件, 通常适用于岬角破坏、海滩失稳、人为损毁的岬湾海岸, 不适合在平直海岸局部地塑造岬湾岸滩。

9.2.2 平直岸滩平面形态设计

对于有明显上下游输沙链的平直岸滩, 在泥沙供给不足、局部构筑物和采砂等情况下, 沿岸输沙会导致沉积物净流失, 海岸产生持续性海岸侵蚀 (图 12)。针对这种类型的岸滩, 最常用的修复方式就是在侵蚀位置进行直接补沙修复, 这也是全球应用最广泛的方式, 美国大多数砂质岸滩修复采用此养滩方法。该方法养滩通常结合采砂区设置进行多次再养护, 养护周期一般为 5~7 年。

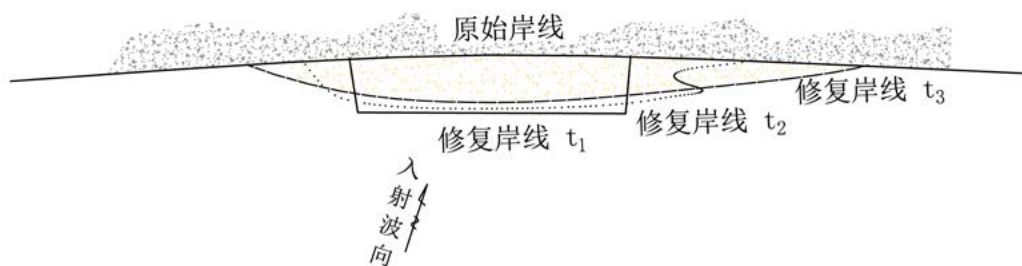


图 12 平直岸滩平面形态设计^[8] (图片来源: 戚洪帅等, 2021)

相对于岬湾岸滩而言, 平直岸滩的沿岸输沙对修复岸滩平面形态的调整作用在修复岸段和相邻非修复岸段之间的过渡区域表现最为明显。因为海滩养护意味着岸线向海移动, 并形成一個过渡区域, 而该区域的海岸线与原来的岸线方向不一致。沉积物将会从养护海滩向毗连非养护海滩扩散, 从理论上说最终会在某点存在侵蚀和堆积的转换点, 且形成一个稳定的岸线形态 (图 13)。因此, 要得到一定量规模的矩形养护海滩, 就需要计算在某个特定时期内能够保留下来的海滩面积, 可应用一线模型 (如 GENESIS、ONELINE 等) 进行分析计算。

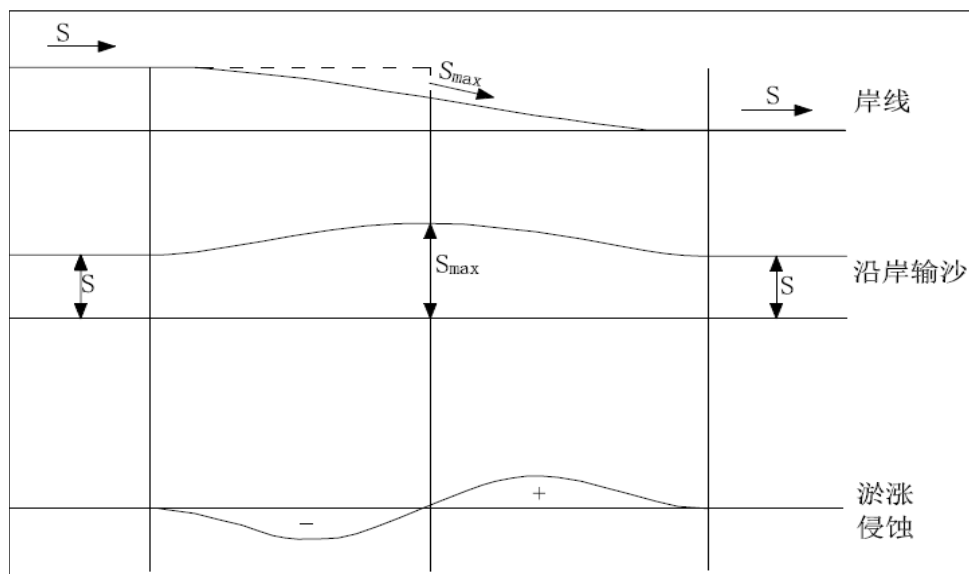


图 13 平直海岸养护海滩两端扩散地貌过程示意^[4]

(图片来源: 蔡锋等, 2015)

9.2.3 人工砂源岸滩平面形态设计

对于有明显输沙背景的砂质海岸，需持续的物源供给以维持其海岸平衡。可以通过提供人工砂源的方式在上游进行补沙，使其在沿岸流的作用下向下游运移，利用自然过程缓解下游海岸侵蚀（图 14）。该方法已被成功应用于荷兰海岸（图 15），2011 年在北海海岸填造了 2100 万 m^3 的人工砂源，保证了为下游 10 公里的海岸 20 年内提供足够的沉积物供给，达到促进沙丘和海滩的发育、增加海岸的防护能力、创造生境、提高娱乐发展潜力的目的，该设计方法又被称为“sand engine”（沙引擎）。

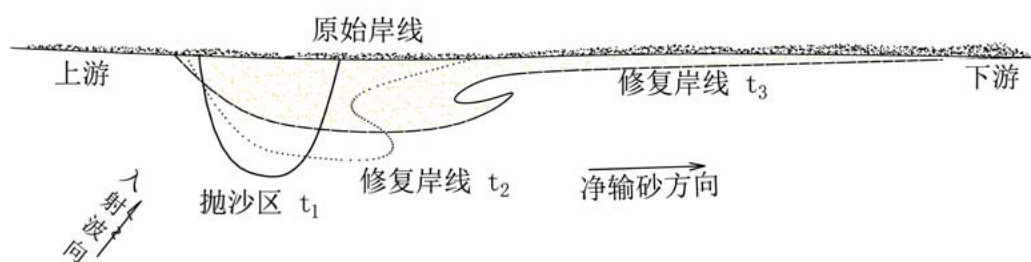


图 14 人工砂源岸滩平面形态设计^[8]

（图片来源：戚洪帅等，2021）

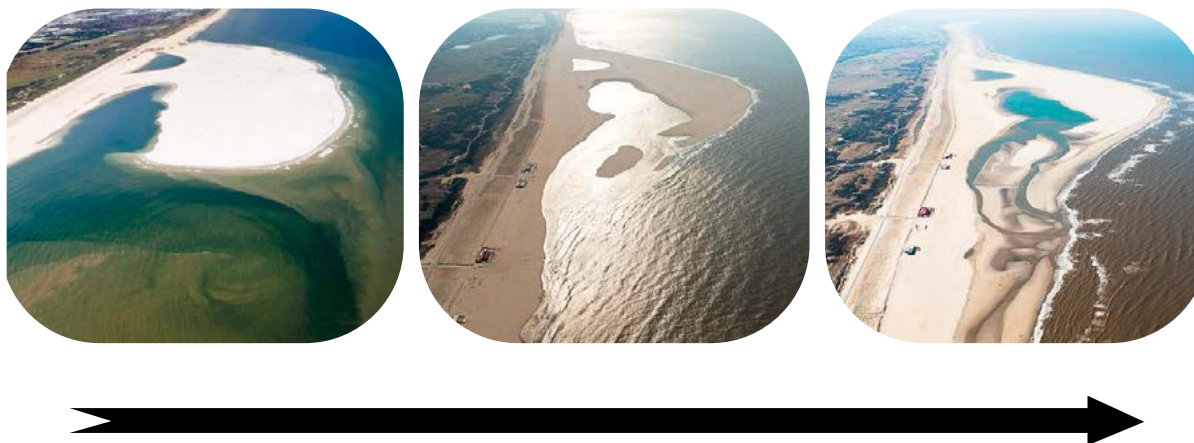


图 15 荷兰人工砂源养滩实例^[12]

（图片来源：Stive et al., 2013）

9.3 砂质海岸修复填沙设计

9.3.1 岸滩修复填沙考虑

沉积物粒径的选择是砂质岸滩修复设计最重要的环节之一，在设计修复工程的填沙特征时，要考虑其在海岸防护和休闲旅游方面的四个主要表现：岸滩稳定性、沉积物动力学、持久性和海岸休闲需求。

(1) 岸滩稳定性

天然状态下，砂质海岸沉积物一直处于持续不断的分选作用中，因此某一区域自然海滩沉积物粒径和分级特征就是岸滩稳定所需填沙物质的主要指示标识。但是受到养滩沙来源的限制，不论从技术上、预算上或者可行性方面都难以实现养护沙与原海滩沙的完全一致。

较细的补沙粒径形成的平衡剖面坡度较缓、较粗的抛沙形成的平衡剖面坡度较陡。岸滩修复的平衡剖面形态很大程度上取决于养护沙的粒径与原海滩沙的相对关系，不同沉积物粒径与典型滩面平均坡度之间的对应关系如表 8。同时，某种粒级沉积物组成的岸滩在强波浪动力条件下会形成一个较缓的坡度，而动力较弱情况下则形成较陡的坡度。

表 8 不同沉积物粒径在不同波浪条件下的岸滩剖面坡度对应关系

沉积物平均粒径 (mm)	中等波况 海滩坡度范围	大浪情况 海滩坡度范围
0.2	1:50~1:100	1:50~1:100
0.3	1:25~1:50	1:45~1:55
0.4	1:15~1:25	1:40~1:45
0.5	1:10~1:15	1:35~1:40

如果补沙沉积物比原岸滩沉积物粗，那么就会发生海滩粗化。在难以改变自然海岸侵蚀过程的条件下，一般采用这种较粗的沉积物进行人工补沙修复，以保持修复岸滩更为稳定。粗化补沙一般多针对那些侵蚀严重并难以对后滨形成有效保护的砂质海岸，相对而言，对于侵蚀程度很轻且十分舒适的砂质岸滩，一般不建议粗化补沙。

粗化补沙一般应用于近岸动力和输沙较强的环境条件。如开敞海岸沿岸流和沿岸输沙明显的岸段，砾级沉积物可以对岸滩提供更好的保护。粗化补沙的缺点在于太粗的沉积物补沙可能会影响到砂质海岸海滩旅游的舒适性，以及对当地动植物群落栖息有影响，因此

在选择时必须进一步研究。

(2) 沉积物动力学

一旦抛沙之后，补沙沉积物就会受到波浪和潮流的作用发生搬运和分选。特别是在砂质海滩，通过底部冲刷和海滩表面的风沙搬运作用，一部分的细颗粒沉积物可能会流失。如果补沙沉积物是从外滨抽沙而来富含较多细颗粒物质，那么一开始的细颗粒沉积物部分损失将会较大。补沙区细颗粒部分的冲刷流失可能对附近底栖生物群落有较长期的影响。

如果填沙沉积物的粒级域要广于原海滩沙，一般而言其表现要差于天然沙。这其中部分原因在于它包含了更大比例的细颗粒组分。突出于滩面的超大颗粒沉积物会被移出滩外并搬运至外滨，反之，在一个具有自然粒级的海滩，滩面受到不同粒级沉积物的相互固锁作用而受到保护。

(3) 持久性

岸滩沉积物受到波浪和潮流的持续动力作用，沉积物的磨圆和质量亏损取决于岸滩沉积物的矿物组成和形态。一般而言，我国砂质海岸沉积物的主要组成矿物为石英、长石和云母。目前我国的砂质岸滩修复养护沙多来自于近滨和河流，故而其磨圆度已经相当高，由于颗粒磨圆引起的沉积物质量亏损率则较小，而不规则颗粒沉积物（如碎石屑）由于磨圆造成的质量亏损率则较高。

补沙沉积物中的贝壳含量对于岸滩持久性而言十分重要，因为贝壳破碎较快且密度较小、形态更薄，易受风力搬运作用。沉积物中的粘土组分则容易受到侵蚀和悬浮作用而搬运。

(4) 海岸休闲需要

对于旅游休闲砂质海岸，一般对岸滩填沙的触感、颜色以及不同矿物的组分有一定要求。旅游岸滩要保证触感舒适，利于滩面行走和活动；砂质颜色尽量以近于黄色或者白色为主，可以提高视觉美感；养滩沉积物组分含量中要减少含泥量和含贝壳量，一般要求补沙沉积物中含泥量 $<0.2\%$ ，贝壳含量 $<1\%$ 。

9.3.2 沉积物粒径对修复后岸滩平面演化影响

对砂质海岸自身特征而言，理想化的岸滩修复养护沙是与天然岸滩相匹配的沉积物。但是在大多数情况下，取沙区多位于滨外，在海岸带横向分选过程作用下，粒径一般小于天然海滩沙。只有一小部分岸滩修复工程的养滩沙会大于或等于天然海滩沙。如果岸滩修复充填沙与原海滩沙一致，不论波浪入射方向是否改变，修复后岸滩平面的质心可基本保

持稳定。保持稳定的原因是在修复工程区内，沙粒的沿岸运移速率和沙从上游向修复区和从修复区向下游运移速率一致。

如图 16 所示，输运系数会随着沙粒径的增大而减小。如果岸滩修复工程的养滩物质比天然海滩砂更粗（或更细），那么修复工程区内的输沙率就不再等于上游向修复区的输沙率和修复区下游的输沙率。当修复充填沙粒径小于天然海滩沙粒径时，上游向修复区的输沙率小于修复区内输沙率就导致修复后岸滩平面质心向下游迁移，进而影响修复后岸滩平面性质演化。

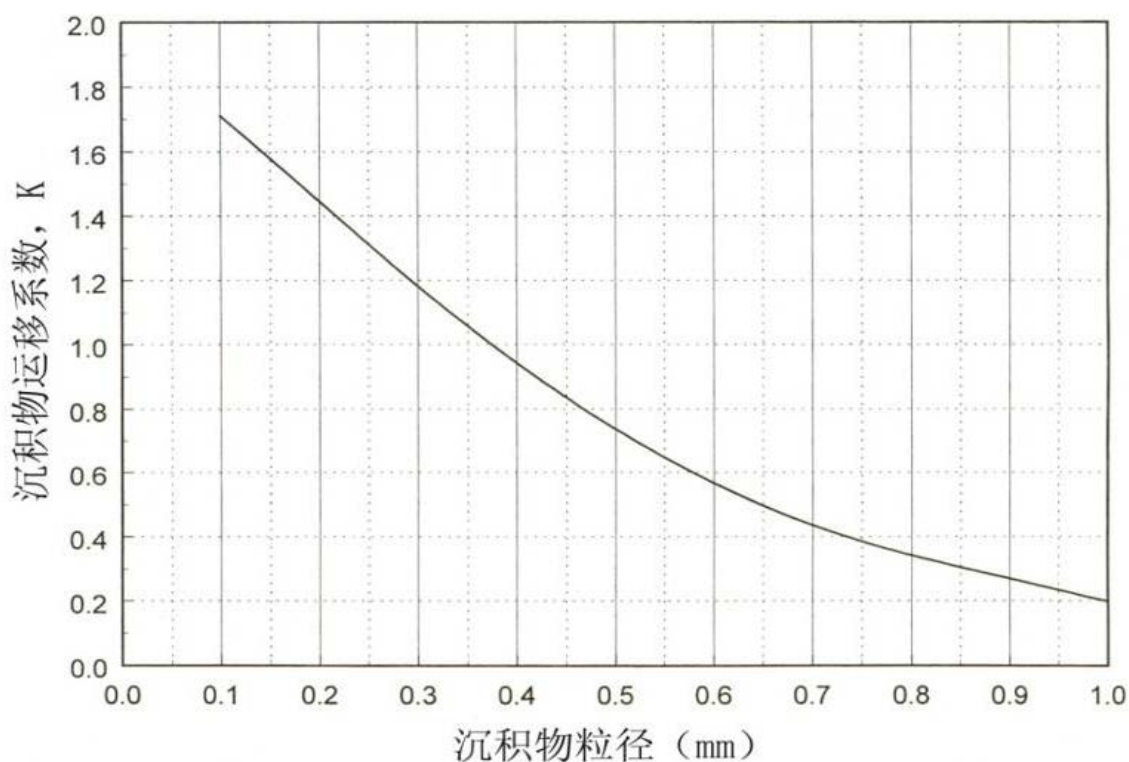


图 16 沉积物运移系数和中值粒径 (D_{50}) 的关系

9.4 辅助构筑物措施

(1) 拦沙堤

拦沙堤包括完全拦沙和部分拦沙两种功能类型。

——完全拦沙。应修建于修复海岸沿岸输沙的下游段，还应与岸线形态相吻合构成人

工岬角。推荐入射主波向与拦沙堤间的交角为 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}$ ；拦沙堤在水中的长度以岸线至破波点距离的 $40\%\sim 60\%$ 为最有效设置距离。

——部分拦沙。通常位于砂质海岸修复区的末端，通过拦沙实现岸滩的局部调整，提升修复岸段的岸滩地貌稳定性，并保证泥沙向下游交换的自然畅通。



(2) 离岸堤

离岸堤包括出水离岸堤和潜堤两种类型。

——出水离岸堤，其设计应遵循离岸堤背后修复岸滩的岸线变化与影响因素之间的相互关系，其关系式如下：

$$\frac{X_s}{B} = f(H_0/L_0, S/B, \tan \theta, \alpha, G_0, \gamma)$$

式中，

X_s ——离岸堤之背后沙嘴长度，单位为米（m）；

B ——堤长，单位为米（m）；

H_0 ——深水波波高，单位为米（m）；

L_0 ——深水波波长，单位为米（m）；

$\tan \theta$ ——海滩坡度；

S ——离岸距离，单位为米（m）；

α ——堤附近波向角，单位为度（ $^{\circ}$ ）；

G_0 ——开口宽度，单位为米（m）；

γ ——堤体的孔隙率（%）。

在上游有足够来沙的情况下，当离岸堤的离岸距离 X_B 与堤长 L_B 的比值在 $1\sim 2$ 时，堤后将形成由岸伸向海的沙岬；当 $X_B/L_B < 1$ 时，沙岬将发展成连岛沙坝。

——潜堤，其堤顶高程应低于最低低潮位面，适用



于潮差较小的海岸区域。

推荐潜堤平均低潮位时透射系数为 0.2~0.3，平均高潮位时透射系数不低于 0.6，潜堤波浪透射系数与堤顶在计算水位以上的高度之间的关系应符合 JTS 154 的规定。

(3) 人工岬头

人工岬头通过改变波浪绕射点来改变海岸入射波浪，配合补砂可塑造稳定的岬湾岸滩。

人工岬头适用于静态岬湾海岸，应有利于构造静态岬湾形态，不能破坏原岬湾形态和现有岸滩稳定性，不能用于平直海岸的岸滩修复。如条件允许，人工岬头宜与鱼礁、牡蛎礁等生态方式相结合建设，并采用生态友好型材料。



(4) 旁通输沙

河道、航道或突堤等阻隔海岸沉积物的自然传输时，宜采用旁通输沙设计连接上下游海岸，实现海岸输沙链的自然流通状态，维持下游岸滩平衡稳定。

宜采用普通泵和射流泵两种方式人工构筑旁通输沙系统。



9.5 后滨沙地植被修复措施

9.5.1 植物筛选

植物筛选具体要求如下：

——宜选用抗风、耐土壤盐、耐盐雾、耐干旱、耐贫瘠的植物，适生植物参见 HY/T 0304 附录 C；

——以木本植物为主，乔灌木相结合，地被植物宜以多年生植物为主，一年生植物为辅；

——优先选择固氮植物，适当配置“花化”、“彩化”、“香化”的植物；



- 在不破坏野生植物资源的前提下，宜多选用珍稀濒危植物；
- 鼓励驯化和繁殖目前市面上没有的乡土植物，并推广应用。

9.5.2 土壤改良

土壤改良包括自然恢复型改良和景观构建性改良，其要求应遵循遵守 HY/T 0304 中 7.2 的规定。

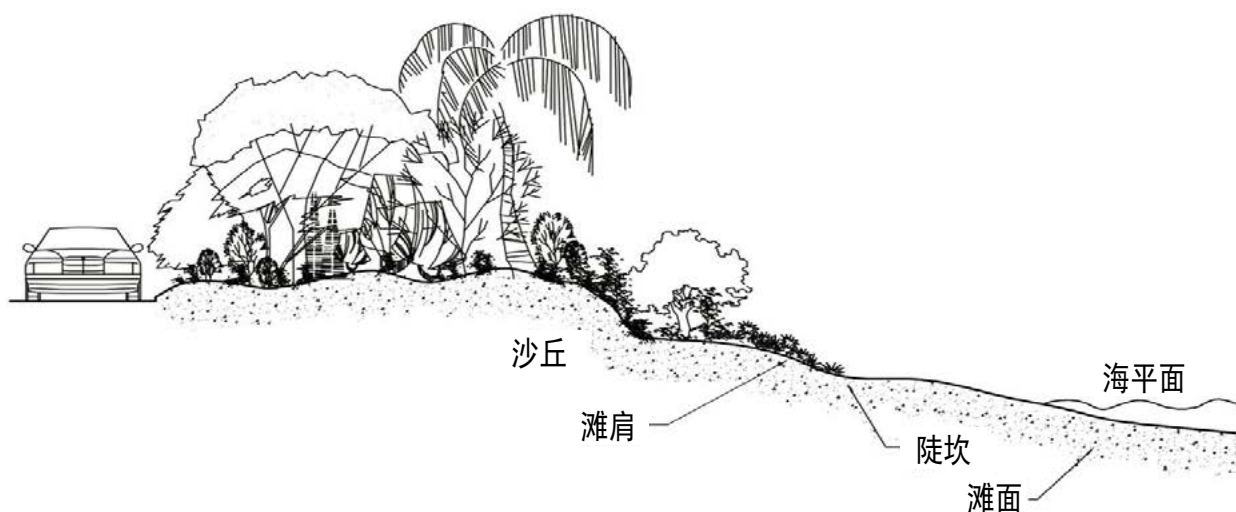
9.5.3 植物配置

植被配置具体要求如下：

a) 针对防风固沙和海岸保护的植被修复，通常选择大面积种植适生物种，风口处的乔木及灌木应按照 LY/T 1763—2008 的要求执行。

b) 针对构建生态景观的植被修复，方案设计时应考虑以下几点：

- 常绿植物和落叶植物、骨干植物与基调植物、速生植物与慢生植物等科学配置；
- 体现造景需要，满足生态修复功能要求，构建具有海岸带特征的植物群落景观；
- 根据立地条件种植不同的物种，与周围景观元素构成丰富有层次的植物群落。由海向陆可将砂质海岸后滨沙地植物群落分为四至五道防线。



适用于中国砂质海岸海滩后滨沙地修复的植物配置模式

A. 单纯草本的植物群落

此类模式主要用于后滨沙地的无树木或建筑物遮挡的砂质海岸第一道防线，可提高岸滩的植被覆盖率，配置视觉效果好。可参考如下配置方式：

- a) 热带：老鼠芳、海滨莎、铺地黍、白花马鞍藤、马鞍藤、文殊兰等；
- b) 南亚热带：老鼠芳、狗牙根、龙爪茅、马鞍藤、海边月见草、文殊兰等；
- c) 中亚热带：海边月见草、狗牙根、龙爪茅、结缕草、马鞍藤、卤地菊等；
- d) 北亚热带：老鼠芳、中华结缕草、珊瑚菜、海滨山黧豆、毛马齿苋等；
- e) 温带：补血草、筛草、砂引草、滨麦、珊瑚菜、沙苦苣菜、瓦松等。

B. 灌木及地被（草）的灌草丛群落组合

此类模式主要用于后滨沙地的第二道防线，利用灌草丛群落为总体植物群落起到过渡、立体及层级配置的缓冲效果，丰富景观层次，可参考如下配置方式：

- a) 热带：海滨莎、老鼠芳、马鞍藤、单叶蔓荆、草海桐、刺葵、露兜树等；
- b) 南亚热带：老鼠芳、狗牙根、白茅、马鞍藤、海边月见草、草海桐等；
- c) 中亚热带：白茅、矮生苔草、珊瑚菜、单叶蔓荆、海滨木槿等；
- d) 北亚热带：老鼠芳、卤地菊、马鞍藤、单叶蔓荆、凤尾丝兰、海桐等；
- e) 温带：獐毛、狗牙根、单叶蔓荆、细叶砂引草、酸枣、怪柳、黑松等。

C. 乔、地被（草）的植物群落组合

此类模式主要用于砂质海岸带的第三道和第四道防线，砂质海岸带中利用高大的乔木配以不同的地被（草）植物，可营造空旷的植物空间景观，产生简单的视觉景观效果，并能形成良好的透景线，可参考如下配置方式：

- a) 热带：文殊兰、海滨莎、白子菜、银毛树、海滨木巴戟、海岸桐等；
- b) 南亚热带：毛马齿苋、马鞍藤、文殊兰、椰子、榄仁、黄槿、血桐等；
- c) 中亚热带：卤地菊、肾叶打碗花、珊瑚菜、黄连木、朴树、榕树等；
- d) 北亚热带：象草、海边月见草、芙蓉菊、朴树、楝树、乌桕、银海枣等；

e) 温带：砂引草、结缕草、艾、沙枣、蒙桑、大果榆、黑弹树、黄连木等。

D. 乔、灌、地被（草）的植物群落组合

此类模式多用于砂质海岸带的第五道防线，利用植物的形态、季相进行植物景观的营造，以合理的垂直排列和空间组织形成层级的植物配置，群落上层选用喜光的大乔木针叶树、阔叶树；春色叶树种、秋色叶树种等。群落中层选用耐半荫的小乔木和花灌木，耐荫的种类于树林下，喜光的种类种植在群落的边缘，下层选择耐荫的地被和草本植物。密林区内乔、灌、草均衡搭配，丰富景观层次。可参考如下配置方式：

- a) 热带：马鞍藤、白子菜、草海桐、海南龙血树、血桐、椰子、酸豆等；
- b) 南亚热带：文殊兰、毛马齿苋、九里香、黄金榕、夹竹桃、刺桐等；
- c) 中亚热带：长春花、夹竹桃、千头木麻黄、灰莉、异叶南洋杉、刺桐等；
- d) 北亚热带：毛马齿苋、长春花、夹竹桃、金森女贞、凤尾丝兰、珊瑚树等；
- e) 温带：黑麦草、天人菊、海桐、枸杞、大叶黄杨、铺地柏、黑松、龙柏等。

9.6 后滨沙丘修复措施

后滨沙丘是砂质海岸的重要地貌单元，不仅能对极端海洋动力起到“柔性”防护作用，同时可为滨海动植物提供宝贵的生境空间。后滨沙丘修复包含沙丘修复形态、修复高度、丘趾高程、结构材料以及沙丘植被等方面设计要点。沙丘修复简图如图 17 所示，其中， Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别表示不同沙丘顶高程； Z_4 表示向海侧第一道沙丘的迎风坡脚高程； H_1 、 H_2 、 H_3 分别指示不同沙丘修复高度，以丘顶至坡脚间的高程差表示；MHWS 表示多年平均大潮高潮位。

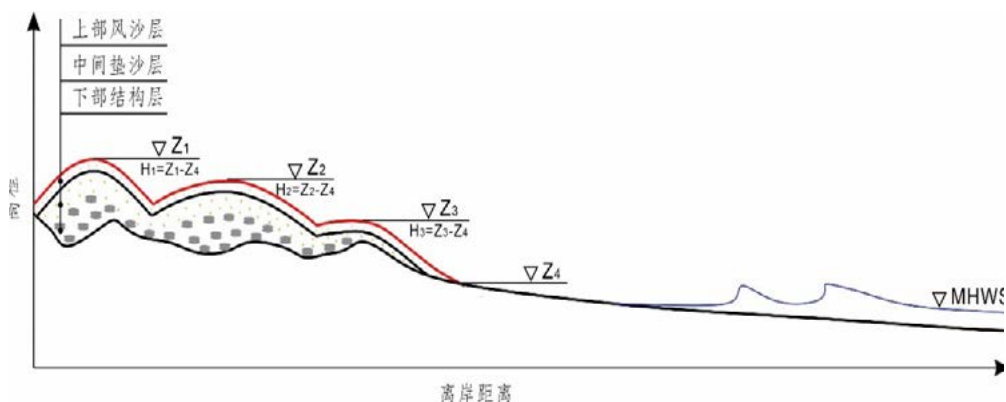


图 17 后滨沙丘修复设计简图

沙丘修复形态。借鉴自然海岸沙丘地貌发育特征，修复沙丘宜采用波状起伏的“多峰”形态。从风沙地貌学角度，“多峰”形态有助于降低输沙率，是风沙地貌与风动力相适应、互反馈的动态平衡状态；

海岸沙丘修复高度。“多峰”型修复沙丘向岸侧第一道沙丘的防灾减灾等级最高，设计高度 H_1 ($H_1=Z_1\sim Z_4$) 应综合考虑极端水动力作用时的海岸防护要求与自然状态下的海岸沙丘生长发育规律确定。若现状海岸抵御 50 年一遇极端高水位叠加 50 年一遇波况的高度阈值为 h_1 ，同个海湾或毗邻海湾保存完好的自然沙丘发育高度为 h_2 ，则沙丘修复高度取二者之大值，即 $H_1=\max(h_1,h_2)$ ；相反地，向海侧第一道沙丘的防灾减灾要求最低，设计高度 H_3 ($H_3=Z_3\sim Z_4$) 可取现状海岸抵御 10 年一遇极端高水位叠加 10 年一遇波况的高度阈值；中间沙丘的修复高度 H_2 介于 H_1 和 H_3 之间，可取二者的平均高度，即 $H_2=(H_1+H_3)/2$ 。

修复沙丘向海侧坡脚高程。依据自然海岸沙丘发育特征，前丘坡脚 (Z_4) 通常位于多年平均大潮高潮线 (MHWS) 之上，叠加波浪爬高 (R)，即 $Z_4=\text{MHWS}+R$ 。其中， R 可采用《港口与航道水文规范》(JTS 145-2015) 所规定的波浪爬高公式；

沙丘修复结构及材料。采用三层结构，自上而下依次为：上覆风沙层、中间垫砂层和下覆结构层。上覆风沙层厚约 0.2m，采用分选良好的细砂充填，砂的品质 (粒径和物质组分) 应接近天然沙丘砂；中间垫砂层厚约 1m，采用中细砂充填，砂的品质接近于天然海滩砂；下覆结构层主要是维持沙丘整体的形态稳定，可采用沙袋堆砌，沙袋内充填砂的品质可适当降低；

沙丘植被构建。在沙丘修复的基础上，开展乔 - 灌 - 草多层次相结合的沙丘植被体系构建，具体为：在沙丘迎风面扦插沙生藤本或草本植物，形成第一道固沙屏障，美化滨海岸线；在沙丘顶部成排列植沙生耐盐碱灌木，形成抗风固沙灌木带，进一步提高沙丘稳定度；在沙丘后方培育乔木林带，进一步改善区域风沙流场结构。选用植物品种以抗风、耐盐、耐旱、耐贫瘠及耐盐雾的乡土植物为主，兼顾生态功能与景观价值。

10. 跟踪监测、效果评估和适应性管理



10.1 修复工程监测

10.1.1 修复砂质海岸稳定性与演变监测

修复砂质海岸稳定性与演化监测首先需要建立一个测量的基准，如果前期调查所建立的测量基准可用则直接沿用，若不可用则新建一个测量基准作为未来海岸地貌演化监测的参考点；一般的岸滩演化监测要素包括岸滩剖面 and 滩面地形测量、离岸断面和水下地形测量、沉积物演变、航空 / 遥感影像变化分析等。有时还包括气象数据和波浪数据，需要根据监测目的来有效选取，并非所有的监测内容都必须包含在某一个监测计划中。为了评估工程影响及演变结果，有必要在工程建设前后进行监测。

(1) 测量基线建立

在实施监测计划之前，必须设立测量基线，用于岸滩物理变化监测。根据我国砂质海岸修复工程的地貌特点，一般将测量基线设置于人工护岸（海滩后方为人工护岸）、后滨固定植被沙丘顶部（海滩后方为沙丘）、海崖顶部（海滩后方为海崖），或者人工建筑物上，并在测量基点处设置相对安全的固定桩（点），从附近已知点引出绝对高程和坐标。

(2) 岸滩形态监测

岸滩剖面 and 地形的测量是演化监测的核心，可通过多种方法来完成。要求具有较高的测量精确度，并要求在参考基准和精度方面与历史资料不矛盾，能够和早期所积累的资料对比，以便于准确分析演变特征。因此在实际测量时要注意以上方面的问题。岸滩形态监测的主要内容及基本要求见表 9。

岸滩监测剖面的布设间距和调查频率应该与工程设计的时空演变过程相匹配。大多数工程长约 1~2km，一般剖面间距大约 200~400m，即可满足测量的需求。由于修复引起的海岸线和海岸形态的突出与变化，在岸滩修复工程两端附近往往存在一个较大的空间梯度，在监测剖面的布置时要注意要确保在工程区中部必须有监测断面，在某些变化剧烈或岸线特殊的区域酌情增加监测。此外，工程区内和周边区域的剖面间距可根据修复工程变化来推算、依监测资源和监测目的尤其是监测结果的使用来确定。根据以往的经验，一些工程在两端和工程周边区域布设 5~10 条监测剖面。剖面监测的频次应与设计时间尺

度内的工程演变相适应。

岸滩全地形的监测是为了全面反映修复后岸滩地貌的变化特征，包括侵蚀热点、沉积物平衡以及冲淤变化等。相对剖面监测而言，全地形测量的频次较低，一般在施工后立即测量一次，此后逐年按一年一次的频率来完成。全地形测量需要与修复前的岸滩地形相比较，也需要与岸滩剖面的监测结果相结合，既相互对比又能相互验证，来分析修复后岸滩的演变特征和稳定性。

岸滩修复工程区水下剖面和地形监测是岸滩监测的延伸与发展，修复岸滩泥沙的横向扩散和堆积会引起水下地形的变化，尤其是一个独立的岬湾海岸单元的补沙，其水下地形变化更为显著，对于水下剖面和地形的监测有助于了解修复岸滩沉积物的运移和堆积。从监测成本和效率考虑，水下地形测量在工程施工后的三年内应不低于每年一次，要求水下地形的测量横向范围以延伸至闭合深度为宜。

海岸线变化测量是砂质海岸地貌演变监测的核心内容之一，岸线的淤进或蚀退是岸滩最显而易见的变化现象，也是海岸管理者、投资人及民众最为关注的问题，是岸滩稳定性判断的重要指标，可以直观反映岸滩的演变过程。因此岸线监测需要从修复工程实施后即开始，要求施工后第一年以较高的频率进行监测，尤其施工后第一个半年是岸滩形态显著调整的重要时期，岸线变化明显，不少于每两个月进行一次监测。

表 9 修复后的岸滩形态监测内容及要求

监测项目	调查要求
岸滩剖面与地形	测量范围：修复区后滨向海至平均大潮低潮线 断面布设：尽量确保后监测断面与修复前断面相互重合，断面垂直水边线布设，密度不少于 5 条 /km，基点固定 测量频率：施工后第一年，不低于每季度 1 次，风暴潮作用后加测；此后不少于 2 次 / 年；岸滩全地形测量频率可与剖面一致 测量技术要求：按照《海洋工程地形测量规范》GB17501-2017 执行
水下离岸剖面与地形	测量范围：修复区域向海延伸至闭合深度以深 断面布设：以岸滩监测剖面的原点、方向一致延伸向海 测量频率：施工后前三年内，不低于每年 1 次 测量技术要求：按《海洋调查规范》GB/T 12763.2-2007 执行
岸线变化	测量范围：修复区所在的海岸单元范围内海岸线 测量频率：施工后第一个半年要求每 2 个月一次，第二个半年不低于每季度 1 次，风暴潮作用后加测；此后不少于 1 年 / 次 测量技术要求：按照《海洋工程地形测量规范》GB17501-2017 收集历史岸线对比资料，了解过去岸线的变化特征

监测项目	调查要求
后滨高度	测量范围：砂质海岸后滨前缘沙丘、滩肩的最高点的位置和高程，若有海堤且无滩肩或沙丘发育，则为海堤堤顶位置和高程 测量频率：风暴前 2 个月内完成前期调查，风暴后 5 天内完成灾后调查 测量技术要求：按照《海洋工程地形测量规范》GB17501-2017 执行
侵蚀热点	测量范围：后滨侵蚀陡坎、堤前下蚀区域、工程构筑物及近岸人类活动导致岸滩变化剧烈的区域 测量频率：风暴后 5 天内、1 个月、3 个月分别完成后续重复调查 测量内容：后滨陡坎范围和高度、侵蚀热点范围与数量

(3) 沉积物变化监测

为了与设计方案相一致，在修复前通常要采集沙样来测定原岸滩和取沙区的沙粒特征。原砂质海岸的砂样采集数量和位置可灵活多变，但是每个剖面的采样位置必须包括沙丘、滩肩、滩面，以及在超过推算的闭合深度 25% 的一定深度或距离的地方，一般以 1m 高程差为间隔进行采样。原则上，至少每隔一个剖面应进行采样。修复后，也应该根据监测目的来进行采样分析。比如，如果天然沙和修复沙存在较大差异或者修复沙的分选很差，样品采集分析应有助于记录修复沙的变化或在近岸动力作用下修复沙与天然沙融合所需的时间。原则上修复后沙样的采集在修复后不久就应进行，根据当前的经验，沉积物采样工作一般与地形监测同步，其要求见表 10。

表 10 修复后的沉积物变化监测内容及要求

监测项目	监测要求
沉积物	站位布设：a) 沉积物调查剖面同地形调查剖面一致，应分别在沙丘、滩肩、高潮带、中潮带、低潮带等代表性位置各设置 1 个表层沉积物取样点；b) 潮间带宽度不大于 200m，潮间带沉积物调查站位设置不少于 3 个；潮间带宽度大于 200m，潮间带沉积物调查站位设置不少于 5 个站位；c) 近岸水下沉积物调查站位布设原则为每 500m 一个站位。 取样深度：表层 5~20cm 取样频次：与修复岸滩剖面变化监测同步
砂泥分界线	调查方法：利用高精度测量设备获取沙泥分界线平面位置和高程 调查频次：近 2 年内，不少于冬夏各 1 次 位置：滩面沉积物砂、泥过渡地带

(4) 遥感影像监测

航空影像比剖面测量或其他测量都要来的直观高效，还可为工程演变尤其是干滩的残留宽度提供有效的全面指示，对于公众而言十分易懂。低潮时航拍的高质量影像可为干滩

宽度的近似量测提供基础。航空影像相对便宜，通常在修复前后以及相关目的的剖面测量的同时进行拍摄。

10.1.2 修复海岸环境监测

修复海岸自然环境包括海岸动力变化、水质环境、底栖生物、后滨植被、沙颜色、沉积物环境适宜性等。上述每一种特征的重要性在不同修复工程中也存在差异。一般的修复岸滩环境专项监测包括水动力环境监测、水质环境监测、底栖生物监测和后滨植被监测，沙色和环境适宜性等方面针对性监测较少。

(1) 海岸动力环境监测

砂质海岸修复工程建设往往对局部近岸动力环境造成一定影响，尤其海岸地形的变化和养滩补沙不可避免地影响到工程区近岸的波浪场、流场以及海水中的悬沙浓度。工程完工之后的海岸动力环境监测内容和要求如表 11 所示。

表 11 修复后的海岸动力环境调查内容及要求

调查项目	调查要求
波浪	观测时间：a) 近 5 年内代表性季节不少于 1 个月的连续观测深水波况；b) 风暴潮期间 观测水深：a) 海岸附近海域水深 10~20m 处为宜；b) 风暴期间加测潮间带及近岸浅水区波况 观测技术方法：a) 应符合 GB/T 14914.2-2019 中第 7 章的规定；b) 在风暴前在目标海滩海域 10~20m 水深区域开展海床基动力观测，可采用 Nortek 浪龙 ADCP 和 RBR 水位计观测风暴期间目标海域的浪、流和水位数据； 注：海滩断面观测选取的断面应具有典型性，一般设置在整个砂质岸段的中间段，且非侵蚀热点和无人工构筑物影响的区域。潮间带及近岸浅水区波浪观测方法如下：布设 3 个浪潮仪组成的观测阵列，横向范围涵盖潮下带、潮间带、潮上带（堤前）区域，相邻仪器之间高程差为 0.1~2.0m，采样频率为 2~4Hz。
风暴潮最大漫滩高度	观测时间：风暴后观测 观测手段：现场调查和无人机遥感相接方式
海流	观测时间、站位布设及技术要求见表 2。
悬沙	
潮位	
风	
区域海面	

(2) 水质环境监测

由于人们越来越深刻地认识到环境质量的重要性，尤其对于作为海滨浴场的砂质海岸，对水质环境的要求较高，因此要加强对该类砂质海岸附近海域的监测，特别是在工程完工后的第一个半年。根据海岸的自身特点设计常规监测方案，一般的水质环境监测内容和要求如表 7 所示。

(3) 底栖生物监测

砂质海岸修复工程对修复区域内的底栖生物产生潜在影响，这些影响可能是短期的，也可能是长期的，需通过工程实施后的跟踪监测加以量化。通常在施工后 1~2 年内选择春、秋季两个季度进行底栖生物调查，调查要素、密度和技术要求见表 6。

(4) 后滨植被监测

砂质海岸修复前后的后滨植被种类组成、群落结构、分布面积 / 盖度变化等是修复工程生态效益评估的重要指标。通常在施工前以及施工后 1~2 年内进行后滨植被跟踪调查，调查要素和技术要求见表 5。

10.2 修复效果评估

砂质海岸生态减灾修复效果评估包括灾害受损评估、减灾功能评估、稳定性评估与生态效果评估 4 个方面。通过开展效果评估，掌握修复工程实施的生态与减灾效益，综合评估工程的保护修复效果并提出管理策略。

10.2.1 灾害受损评估

10.2.1.1 评估指标

砂质海岸灾害受损评估指标见表 12。

表 12 砂质海岸灾害受损评估指标

指标		类型	破坏程度		
			小	中	大
海岸线位置	平均大潮高潮线的变化量，侵蚀为负，淤积为正	主要指标	淤积或稳定	侵蚀后退距离为原干滩宽度的 5~25%	侵蚀后退距离为原干滩宽度的 25% 以上

指标		类型	破坏程度		
			小	中	大
堤前 / 后滨滩面高程	沙丘、滩肩等自然后滨的平均高程，或堤前滩面的高程，采用与灾前差值，下蚀为负，淤高为正	主要指标	淤高或稳定	局部下蚀	整体下蚀
潮间带坡度	平均高潮线到平均低潮线之间的坡度，以“高差 / 水平距离”表示	次要指标	变缓	不变	变陡
侵蚀热点	侵蚀热点数量或所占岸线的比例	次要指标	无	少于 2 处 且 10% 岸线占比	大于 2 处或大于 10% 岸线占比
沉积物粒度	沙丘或滩肩、高潮带、中潮带、低潮带沉积物粒径	次要指标	基本不变	局部粗化	整体粗化

10.2.1.2 评估方法与结果

以砂质海岸北或东为起点，将砂质海岸每 200m 作为一个评价单元，根据评价指标的前后变化对比确定砂质海岸损害情况，将其分为损毁、受损和稳定三个级别，具体如下：

- a) 其中一项主要指标破坏程度为大时，该评估单元确定为损毁；
- b) 两项主要指标破坏程度皆不大于中，或有一项次要指标为大时为受损；
- c) 两项主要指标破坏程度皆为小，且次要指标为大时为稳定；
- d) 风暴后 15 日内，开展首次跟踪调查，评价风暴导致的砂质岸线损毁情况；
- e) 分别于风暴后 1 个月和 3 月后开展调查，评价砂质海岸恢复情况，并最终确定风暴灾害导致的砂质海岸不可逆损毁情况。

10.2.2 减灾功能评估

砂质海岸减灾功能评估主要评价砂质海岸抵御海浪和风暴潮的能力。以波高衰减率、漫滩高度作为评估指标。

10.2.2.1 评估指标

(1) 波高衰减率

波高衰减率的计算方法为波高为 H_1 的波浪传播经过宽度为 L 的海滩后，波高衰减量 (H_1-H_2) 与原波高 H_1 的比值百分数：

$$R_{wL} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \times 100\%$$

式中：

R_{wL} ——波高衰减率；

H_1 ——破波带外侧的波高，单位为米（m）；

H_2 ——破波带内侧的波高，单位为米（m）。

(2) 漫滩高度

漫滩高度指风暴期间当最高水位超过干滩高程时，最高水位与干滩高程的差。

10.2.2.2 评估方法

砂质海岸减灾功能中的波浪衰减率可采用现场观测、经验公式计算，物理模型试验或数值模拟等方法确定，具体参见《海岸带生态减灾修复技术导则 第7部分：砂质海岸》附录 A。

10.2.2.3 评估结果

根据所选方法，结合测量或计算获取的相关数据，应用 10.2.2.1 节波高衰减率公式计算砂质海岸的波高衰减率。评估结果可根据波高衰减率将减灾能力分为优、良、中、差四个等级。对于同一浪级，波高消减率越高时，海滩的减灾效果越好，减灾功能评估等级越高（见表 13）。该指标与漫滩高度相关，若漫滩高度为负值，则该参数值为 100%，所有能量达到海岸线或海堤前被消耗。

表 13 不同浪级和波高衰减率对应的砂质海岸减灾能力

波高衰减率	轻浪 ($0.5 \leq H_{1/3} < 1.25$)	中浪 ($1.25 \leq H_{1/3} < 2.5$)	大浪 ($2.5 \leq H_{1/3} < 4.0$)
100%	优	优	优
$\geq 80\% \sim < 100\%$	良	良	优

波高衰减率	轻浪 ($0.5 \leq H_{1/3} < 1.25$)	中浪 ($1.25 \leq H_{1/3} < 2.5$)	大浪 ($2.5 \leq H_{1/3} < 4.0$)
$\geq 60\% \sim < 80\%$	中	良	良
$\geq 40\% \sim < 60\%$	差	中	良
$\geq 30\% \sim < 40\%$	差	差	中
$< 30\%$	差	差	差

10.2.3 养护海滩稳定性评估

10.2.3.1 评估指标

砂质海岸修复以生境修复为主，其稳定性是决定其生态功能的根本要素。本部分基于自然动力条件、海滩物理特征、海滩适应能力三个方面构建了养护海滩稳定指标体系，评估指标的释义及数据来源见表 14。

表 14 指标释义及数据来源

类别	序号	指标	指标释义	数据来源
海洋动力环境	1	波浪强度	反映作用于海滩的波浪能量高低，以近岸平均有效波高表示	波浪观测站或浮标
	2	风暴强度	反映风暴对海滩的影响，以历史记录最大波高表示	历史气象统计资料
	3	风暴频率	反映风暴作用频次，以多年平均有效风暴次数表示	历史气象统计资料
海滩物理特征	4	养滩长度	指养护海滩在沿岸方向上的长度	实地调查或影像
	5	填沙粒径	反映养护海滩沉积物粒径的粗细，以当前表层沉积物中值粒径与原滩或相邻海滩中值粒径之比表示	实地调查
	6	单宽补沙量	反映补沙强度，以单位长度海滩上的填沙体积表示	资料收集
	7	海滩平面形态	反映近岸波浪的折射过程以及海滩对波浪作用的暴露程度	实地调查或影像
	8	辅助构筑物	反映近岸构筑物对波浪的消减和折射过程，以及对沿岸输沙的拦截	实地调查或影像
海滩适应能力	9	潮间带宽度	反映近岸波浪耗散的有效区间，以海滩沿岸方向上平均高潮位与平均低潮位之间的水平距离表示	实地调查
	10	干滩宽度	反映海滩抵抗侵蚀的能力，以后滨沙丘或海堤向海至平均大潮高潮线之间的水平距离表示	实地调查或影像
	11	侵蚀热点密度	反映海滩的局部侵蚀特征，以单位长度海滩上侵蚀热点个数表示	实地调查

按照养护海滩稳定性由高到低的顺序，将指标依次划分为极稳定、稳定、较稳定、不稳定和极不稳定 5 个等级，并分别赋值 5、4、3、2 和 1（见表 15）。

表 15 养护海滩稳定性评估指标分级表

序号	评估指标	描述	指标等级				
			5	4	3	2	1
1	波浪强度	有效波高 (m)	≤ 0.3	(0.3,0.6]	(0.6,0.9]	(0.9,1.2]	> 1.2
2	风暴强度	历史记录最大波高 (m)	≤ 5.0	(5.0,6.0]	(6.0,7.0]	(7.0,9.0]	> 8.0
3	风暴频率	平均每年风暴个数 (次 / yr)	≤ 0.5	(0.5,1.0]	(1.0,1.5]	(1.5,2.0]	> 2.0
4	养滩长度	沿岸长度 (km)	≥ 2.0	[1.5,2.0)	[1.0,1.5)	[0.5,1.0)	< 0.5
5	填沙粒径	客砂与原砂中值粒径之比	≥ 1.75	[1.5,1.75)	[1.25,1.5)	[1.0,1.25)	< 1.0
6	单宽补沙量	单位长度海滩的补沙量 (m ³ /m)	≥ 400	[300,400)	[200,300)	[100,200)	< 100
7	海滩平面形态	平面形态	袋状	岬湾	弧形	平直	凸出
8	辅助构筑物	辅助构筑物的类型及相对位置	离岸堤 (S/L < 2)	下游丁坝	离岸堤 (S/L > 2)	中游丁坝	无
9	潮间带宽度	高潮与低潮之间的水平距离 (m)	≥ 80	[60,80)	[40,60)	[20,40)	< 20
10	干滩宽度	滩肩前缘至后滨沙丘或海堤之间的距离 (m)	≥ 80	[60,80)	[40,60)	[20,40)	< 20
11	侵蚀热点密度	单位长度海滩的侵蚀热点数量 (个 / km)	0	(0,1.0]	(1.0,2.0]	(2.0,3.0]	> 3.0

10.2.3.2 评估方法

各指标的权重见表 16。

表 16 养护海滩稳定性评估指标权重

评估指标	波浪强度	风暴强度	风暴频率	养滩长度	相对粒径	单宽补沙量	平面形态	辅助构筑物	潮间带宽度	干滩宽度	侵蚀热点密度
指标权重	0.093	0.050	0.094	0.082	0.126	0.104	0.045	0.066	0.119	0.086	0.135

养护海滩稳定性评估采用加权求和的方法。根据表 15 指标分级方法确定各指标得分，结合表 16 中各指标相应的权重，采用加权求和的方法，计算养护海滩的稳定性指数（Nourished Beach Stability Index，NBSI），计算公式如下：

$$NBSI = \sum_{i=1}^m (P_i \times \omega_i)$$

式中，

m——评估指标的个数；

P_i——单项指标的得分；

ω_i——该指标对应的权重。

10.2.3.3 评估结果

砂质海岸的稳定性评估结果分为五个等级（见表 17）。

表 17 砂质海岸稳定性指数五级分类

等级	极低	较低	中等	较高	极高
描述	极不稳定	不稳定	较稳定	稳定	极稳定
分级（NBSI）	≥ 1 ~ < 2.41	≥ 2.41 ~ < 2.92	≥ 2.92 ~ < 3.08	≥ 3.08 ~ < 3.59	≥ 3.59 ~ < 5

10.2.4 生态效果评估

10.2.4.1 评估指标

砂质海岸生态系统状况评估从海滩特征、生物群落与环境要素三个方面进行定量评估。

具体评估指标及赋值权重见表 18。

表 18 砂质海岸生态状况评估指标与权重赋值

评价内容		评估指标	指标权重赋值
海滩特征	海滩资源禀赋	干滩宽度	40
		潮间带宽度	
		潮间带坡度	
		沉积物类型	
		沉积物分选度	
		海滩地貌特征	
	承灾能力	岸线长度	40
		向海开阔度	
		相对潮差	
		海岸侵蚀强度	
生物群落	潮间带底栖生物	生物量变化率	10
	后滨植被	总面积变化率	
		盖度变化率	
环境要素	水环境	近海海水水质等级	10
	底质环境	潮间带沉积物质量等级	

10.2.4.2 参照系

参照系按以下方式选取和使用：

- a) 收集调查区域的历史资料，包括常规监测、专项调查、文献资料等获得的生态系统数据，建立参照系。
- b) 参照系宜采用上述数据有代表性的、能够反映生态系统变化的资料。
- c) 当历史资料齐全时，以历史资料作为评估的参照系。
- d) 当有部分历史资料时，以部分历史资料作为评估的参照系，数据缺少部分仅对现状开展描述性评价。
- e) 当缺乏历史资料时，仅开展生态系统现状评估，结果宜作为以后评估的参照系。

10.2.4.3 评估方法与结果

砂质海岸生态状况评估方法见下式：

$$I_{sc}=S_r+S_d+B+E$$

式中：

I_{sc} ——砂质海岸生态系统状况综合指数；

S_r ——海滩资源禀赋状况指数；

S_d ——承灾能力状况指数；

B ——生物群落状况指数；

E ——环境状况指数。

S_r 、 S_d 、 B 、 E 计算方法详见《海岸带生态系统现状调查与评估技术导则第 8 部分：砂质海岸》7.3 节。当 $I_{sc} > 64$ 时，砂质海岸生态系统状况为稳定，评价等级为Ⅰ级；当 $30 < I_{sc} \leq 64$ 时，砂质海岸生态系统状况为受损，评价等级为Ⅱ级；当 $I_{sc} \leq 30$ 时，砂质海岸生态系统状况为严重受损，评价等级为Ⅲ级。

在调查成果报告中，结合以上砂质海岸生态状况综合评估结果和威胁因素等未纳入以上定量评估的其余调查要素，综合分析砂质海岸生态状况变化的内在原因和外部驱动因素，提出相应管理措施（见表 19）。

表 19 砂质海岸生态系统状况评估结果分级说明及管理措施

分级	分级说明	管理措施
Ⅰ级	砂质海岸生态系统稳定，海滩剖面地形和平面形态处于动态平衡状态，生物群落、水环境和沉积环境良好，可自我维持	持续跟踪监测、科学管理
Ⅱ级	砂质海岸生态系统受损，发生海岸侵蚀现象，生物群落、水环境和沉积环境等方面出现受损，尚可维持基本结构和自我恢复能力	加强生态管理，控制威胁因素，促进砂质海岸生态系统自然恢复
Ⅲ级	砂质海岸生态系统严重受损，海岸侵蚀严重，生物群落、水环境和沉积环境等方面出现严重受损，难以维持海滩基本特征和自我恢复能力	加强生态管理，控制威胁因素，建议开展人工修复措施，改善生态系统状况

10.3 砂质海岸修复社会经济效益

砂质海岸修复的社会经济效益体现在以下几个方面：旅游休闲效益、近岸财富增值效益、社会影响效益、防灾减灾效益等。是否进行砂质海岸修复某种程度上取决于未来一段时间内修复海岸的经济效益与维护费用之比。对于是否进行砂质海岸修复在经济方面的关键考虑因素就是效益与成本，并且应该尽可能全面、合理地考虑修复工程的演变和不同成本-效益之间的相互联系。砂质海岸修复的经济效益评估可适当参考海滩经济价值评估方法^[13]。

10.3.1 砂质海岸修复成本

砂质海岸修复成本包括工程调查费用，研究设计费用，取沙区勘探、开采、运输（也可能是购沙和运输）费用，施工费用以及维护费用等几个主要部分。假定一个砂质海岸修复工程的自然演变过程可知，在预测将来再养护修复的成本时，最大的不确定性就是取沙区变化引起的勘探、开采、运输费用的变化，并随着未来更多的环境关注和制约有可能增加再养护费用，这些环境关注和制约将要求更高的研究成本。

10.3.2 旅游休闲效益

砂质海岸修复拓宽了海岸亲水空间，改善了海岸环境，将吸引更多的游客，因此产生更高的旅游休闲效益。随着海滩宽度的增加，海滩使用人数增多，海滩所带来的旅游经济收益随之呈增长趋势（图 18）。

厦门市砂质海岸修复实践形成了环岛 20 余公里完整的黄金沙滩岸线，系统提升了厦门市环岛路沿线海岸的环境质量，成为厦门旅游经济新的增长点、重大海滩活动的举办中心和旅游休闲的新去处，为该市旅游业的发展起到了举足轻重的推动作用。据厦门市海洋与渔业局统计，厦门市沙滩修复工程“使得近海每平方公里海域创造的海洋经济增加值达一亿元，为全国平均水平的 40 倍”。

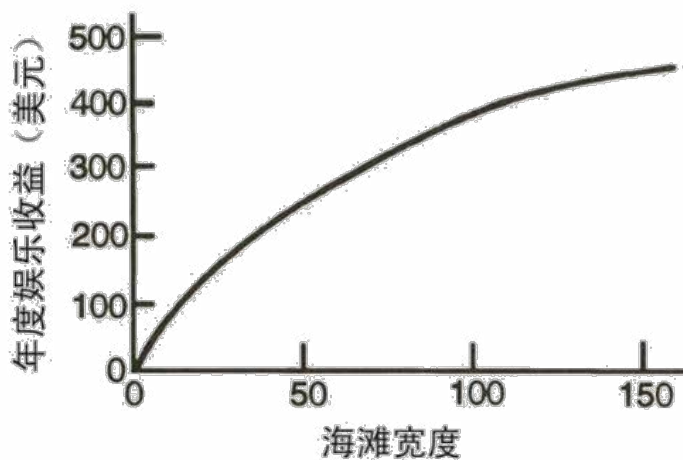


图 18 海滩休闲旅游效益随海滩宽度的变化关系^[14]

(图片来源: Dean, 1988)

10.3.3 近岸财富增值效益

砂质海岸修复后成功吸引了游客，改善了环境，附近海岸陆域财产的价值也相应得到提升，产生了近岸财富增值效益。Stronge^[15-16] 根据对众多砂质海岸修复工程的探索性经济效益研究，确立了岸滩养护修复引起的近岸区域房产、土地等经济实体效益的自然增长。以佛罗里达 Macro 岛海滩修复工程为例，该岛海滩修复工程投入 400 万美元，与周边没有修复的岸段相比陆域财产价值大约增加了 4.5%，约计 900 万美元，并且还产生 13.2 万美元的税收^[15]。对于 Captiva 岛弗洛里达岸滩修复工程，财产价值增加 20.6%，造成了财产增值 2 亿美元和财产税增加了 100 万美元。

厦门市以观音山砂质海岸修复为契机，打造“梦幻海岸”的高品质旅游商务区，观音山国际商务营运中心已经成为集研发、营运、展示和结算等为一体的区域性营运中心。片区建成后，入驻企业每年将创造 20 亿元的税收。开发建设至今，片区企业纳税已超 10 亿元，仅 2011 年 1 月 -7 月，片区企业纳税已达 5.6 亿元。修复形成的黄金海岸所产生的间接财富增值效益虽然难以量化，但是亦可见一斑。

10.3.4 社会效益

砂质海岸修复工程作为沿海城市的重点建设项目之一，往往成为一个城市新的海滨活动中心，其社会文化效应不容忽视。如厦门观音山砂质海岸修复工程的实施就为厦门的滨海文体活动搭建了一个新的平台，具有十分重大的社会效应。平潭龙凤头岸滩修复之后结合沿岸规划和景观设计，成为平潭岛旅游新品牌，也是目前平潭大型社会活动的举办重要场所，形成了巨大的社会效应。

厦门观音山砂质海岸修复工程于 2007 年完成，以此为舞台举办了多次有影响力的海岸文体活动，包括厦门观音山海滩文化节，海滩足球赛，海滩排球赛等，为提高厦门滨海休闲娱乐水平、丰富海滩文化内涵做出了重要贡献。厦门观音山海滩文化节，从 2008 年至今已经举办 5 届，社会影响越来越大。充分挖掘了厦门市海岸文化内涵，促进了文化产业发展，延伸和扩展了厦门“Sun、Sand、Sea”3S 的文化内涵，丰富了厦门海滩文化，向国内外游客展示厦门滨海城市的魅力，打造厦门又一城市名片。观音山沙滩已经被国家体育总局排管中心确认为“中国排球协会全国海滩排球赛事基地”，未来将有更多大型海滩排球盛事将在观音山海滩举行。在举办全国海滩排球锦标赛的同时还举办海峡两岸海滩排球邀请赛，邀请台北、台中高校代表队参加，共同推进两岸高校间的体育交流活动，为两岸的民间文化交流搭建了一座新的桥梁。

平潭岛龙凤头海滨浴场曾经是平潭及周边市民的避暑胜地，但是 20 世纪 90 年代由于海堤的修建严重破坏了岸滩地貌。2011 年 7 月砂质海岸修复后，成为大众型旅游休闲观光游憩海岸，各种重要海滩活动接连在此举办。2012 年 6 月 17 日“海峡两岸（平潭）沙滩文化节”在平潭龙凤头海滩开幕，活动历时三个月，吸引了大量游客，有力促进了平潭旅游。2012 年 5 月“风筝冲浪国际巡回赛（KTA）中国平潭站”在龙凤头海滨浴场举行，借助该赛事架起平潭综合实验区与世界沟通的又一道桥梁，为平潭建设国际知名的海岛旅游休闲目的地，打造现代化、国际化综合实验区注入新的活力。

10.3.5 防灾减灾效益

砂质海岸修复工程的实施增强了沙滩稳定性，形成完整而稳定的沙滩地貌系统是海岸防灾减灾的最佳缓冲器，抵御风暴潮灾害效果显著，增强了海岸综合防护能力。尤其人工海岸区在沙滩修复完成后，将原硬性防护转为软性防护，在大海和陆地间形成缓冲区，通过地貌动态调整消波耗能，减弱台风等恶劣天气带来的破坏力，有效提升了海岸韧性。

以珠海市砂质海岸修复为例，沙滩修复后发挥了良好的海岸防护作用，先后经历了“天鸽”、“山竹”两次超强台风的正面袭击，有效抵御了风暴浪潮灾害，成为珠海市海岸防护的天然屏障。在台风期间，香炉湾修复沙滩很好地保护了后方道路等设施，受沙滩保护的海岸护栏完好无损（图 19）；而相邻无海滩保护的岸段，海堤坍塌十余处，沿海护栏损毁近百处（图 20）。



图 19 超强台风期间，受沙滩保护的海岸护栏和后滨设施完好无损

（图片来源：自然资源部第三海洋研究所）



图 20 无沙滩保护的岸段，台风过后堤岸垮塌、护栏损毁
(图片来源：自然资源部第三海洋研究所)

10.4 修复后管护措施

根据砂质海岸修复后跟踪监测和效果评估资料，分析、判断砂质海岸修复过程中存在的问题，包括海滩地貌形态问题、环境质量和生态生境问题等；针对不同的问题采取不同的管护措施。

(1) 海滩地貌形态维护

由波浪、海流、暴雨地表漫流等因素冲刷沙滩，造成海滩地貌形态破坏，根据破坏量的大小和严重程度，确定是在海滩系统内部砂体调整，还是需要外部输入砂源开展再养护工作。海滩系统内部（单个相对独立沙滩的高滩和低滩之间，或者输沙方向上游和下游岸段之间）海砂的调整，包括滩面形态的整理和修补，属于海滩日常形态维护范畴；若海滩侵蚀破坏严重，影响到海滩整体形态稳定和功能使用，则需要外部砂源输入才能维持岸滩稳定。根据《海滩养护与修复技术指南》（HY/Y 255-2018），当海滩修复填沙流失量超过 50% 时须进行再养护补沙。

(2) 海滩环境质量维护

因入海河流输入、海岸人员活动产生的垃圾问题，需要定期、专人清理、保洁，并按市政管理要求完成海滩垃圾的收集、包装和运输。海滩保洁工作需每天实施以保证滩面清洁。

因自然或人为原因造成海滩后滨滩面硬化、滩面生物碎屑富集和沙滩舒适度降低等问题，则需要采取不定期的机械、人工清理和整饬。利用具备犁耙功能的沙滩车对旅游海滩后滨滩面定期犁耙，使得滩面保持松软，提高游客休闲的舒适度；海滩后滨滩面犁耙维护建议1个月左右1次，可根据海滩实际情况调整频次。后滨滩面生物碎屑富集问题，可采用表层一定厚度砂体不定期过筛的方式解决，建议每年1~2次，具体根据海滩实际情况确定。

(3) 海滩生境维护

对于由于风沙影响造成的海滩后方栈道、绿道等路面积沙等问题，应根据情况采用设置防风障或补种后滨植被等措施，降低风沙影响。日常风沙清理根据大风天气造成的风沙堆积情况开展，一般在大风天气后1~2天完成清理。针对海滩后滨植被缺失或损坏、退化等问题，加强对海滩后滨植被的养护与管理，可按照城市绿地养护管理的相关规定实施。



11. 砂质海岸修复经典案例



11.1 案例 1—美国佛罗里达州 Miami 海岸

一、项目概况

美国佛罗里达州 Miami 海滩，是世界上最成功的砂质海岸修复案例之一。半个多世纪前，Miami 海岸的自然侵蚀和风暴破坏严重威胁着海滩健康，海岸后方大规模住宅开发和旅游经济的可行性和安全性受到严峻挑战。经过几年的调查、规划和协调，USACE 完成了一个海滩恢复和风暴灾害减轻计划；1968 年，美国国会授权 USACE 建造 Dade County 海滩侵蚀控制和飓风保护项目，包含砂质岸滩养护修复以及后期的一系列定期养护计划。

二、海岸修复前

Miami 海岸的丁坝群已经不能阻止海滩侵蚀，至 1975 年潮水已直逼海岸附近的酒店，1970 ~ 1978 年间海滩宽度不足 50m。

三、海岸修复后

抛沙之后，1979 年海滩宽约 150m。1978 年利用海滩 800 万人次/a，5 年后的 1983 年为 2100 万人次/a，经济收入增加 40 倍。利用近岸泥沙修复后的岸滩成功阻止了风暴潮的破坏，为海岸提供有效保护的同时，极大促进了当地旅游经济发展，具有显著的防灾减灾和社会经济效益。



图 21 美国佛罗里达州 Miami 海滩修复前后对比图^[17]

(图片来源：U.S. Army Corps of Engineers, 2019)

四、再养护修复

自上世纪 70 年代末砂质海岸修复后，陆续开展了一系列定期抛沙养护。Miami 海岸修复属于夷直型海滩养护，养护后沿岸出现局部侵蚀热点。定期养护主要是抛填沙至侵蚀热点处，维持砂质岸线的整体稳定性。

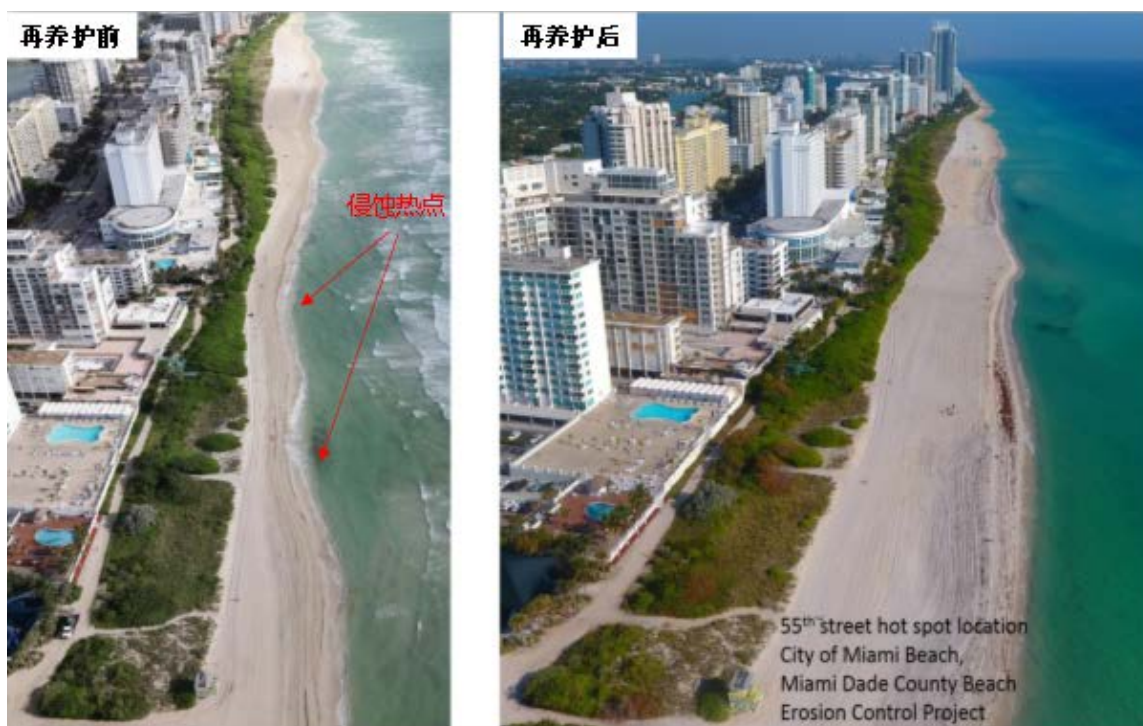


图 22 美国佛罗里达州 Miami 海滩再养护修复^[17]

(图片来源：U.S. Army Corps of Engineers, 2019)

11.2 案例 2—中国秦皇岛市金屋至浅水湾海岸

一、项目概况

秦皇岛市位于河北东北部，南临渤海，北依燕山，是全国十佳生态文明城市、中国北方最宜居城市、中国最美海滨城市，秦皇岛的海岸沙软潮平，海水清澈，风景秀丽，沙滩无疑是让秦皇岛享誉国内外的名片之一。但是随着海浪不断冲刷沙滩，导致岸边的沙子逐渐流失，在金屋至浅水湾岸段基本已无干滩，海边木栈道被海水冲毁，已经严重影响后缘滨海大道的安全。

金屋至浅水湾岸段沙滩长期处于侵蚀状态，在风暴潮作用下侵蚀程度加剧，修复前该区域沙滩已经侵蚀至海岸线界碑附近，大部分沙滩滩肩形态已经消失，局部区域覆植沙丘遭到侵蚀，木栈道倒塌，浴场海滩生态功能和旅游休闲价值显著下降。



图 23 秦皇岛市金屋至浅水湾海岸修复前实景图

(图片来源：河北省海洋地质资源调查中心)

2018 年，秦皇岛市人民政府委托河北省地质矿产勘查开发局第八地质大队作为技术支撑单位开展渤海综合治理攻坚战行动计划申报工作，金屋至浅水湾浴场侵蚀岸段沙滩修复工程也纳入了 2018 年度渤海综合治理攻坚战，该工程方案尊重自然、顺应自然、保护自然，通过海洋地质调查，查明项目区地形地貌、海洋动力、海洋环境等特征，查清了岸线侵蚀原因，并通过滩肩补沙、人工沙丘、水下沙坝、离岸潜堤、沙堤等多重防护措施，营造稳定的沙滩岸线，工程完工后，成功抵御了“利奇马”台风等多次风暴潮影响，防护效果良好，显著提升了区域防灾减灾能力。

二、项目区自然地理条件

(1) 气候气象

秦皇岛市属温带半湿润大陆性季风型气候，主要特点是四季分明。因受海洋影响较大，气候比较温和，春季少雨干燥，夏季温热无酷暑，秋季凉爽多晴天，冬季漫长无严寒。

日照：秦皇岛年平均日照时间在 2700 ~ 2850h 之间。

气温：年平均气温 8.8 ~ 11.3℃之间；盛夏日平均气温 22 ~ 25℃之间。

降水：年平均降水量 650 ~ 750mm，降水多集中在夏季，冬季降水稀少。

(2) 海洋水文

潮汐：本海域为规则的半日潮类型，平均潮差 0.7m，平均潮位具有冬低夏高的特点，升降变化规律明显。12 月平均潮位最低，为 62cm；7、8 月平均潮位最高，为 114cm。

波浪：秦皇岛海域海浪主要以风浪为主，涌浪次之，其海浪的形成主要取决于风向。平均浪高 0.4 ~ 0.6m，最大浪高 3.5m。波浪周期平均为 2.6s。

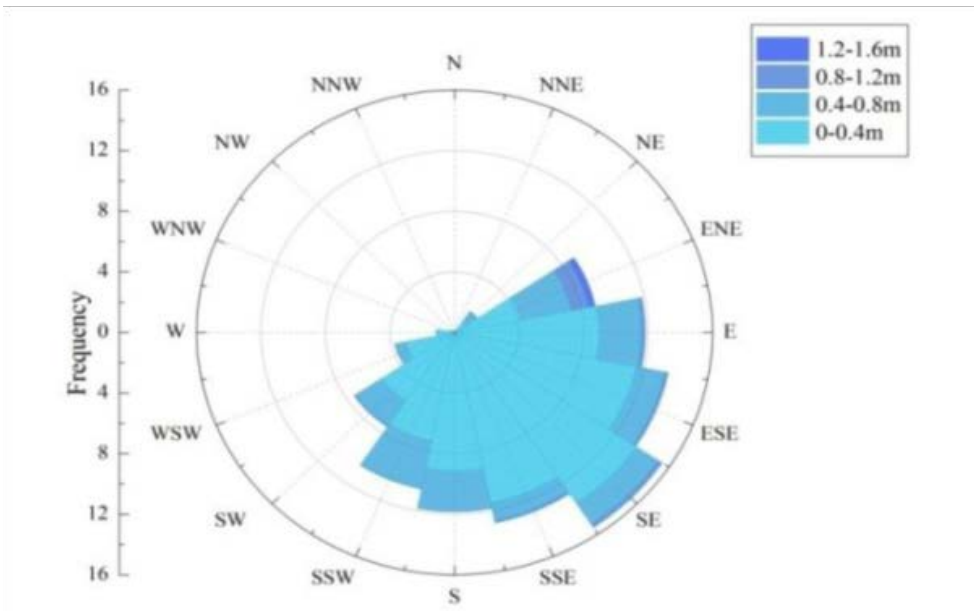


图 24 修复区波浪玫瑰图（图片来源：河北省海洋地质资源调查中心）

三、海滩修复方案

修复思路：尊重自然预留空间，达到人与自然的和谐；确保生态多样性，是人与生态共生；融合景观环境，共享自然景观；创造亲水休闲环境，促进人与人的和谐。

(1) 滩肩补沙

滩肩补沙可以快速增加干滩宽度，采用交会型剖面，修复岸滩长度3.5km，修复后滩面高程达到2.0m，沙滩宽度增加20~60m。

(2) 人工沙丘

沙丘为海岸地区常见的地形景观，由于其特殊的地形位置与组成特征，使其成为海岸自然防御系统中的最后一道防线。近年来有以人工方式重建沙丘恢复自然环境生态的以达到海岸保护的目。金屋至浅水湾近岸有覆植沙丘发育，但是大部分沙丘受侵蚀影响，沙丘形态遭到破坏，原有沙丘宽度不断缩减、植被凋零，因此，根据周边原生覆植沙丘形态，在滩肩补沙后缘营造人工沙丘，人工沙丘长度3.5km，沙丘高程3.0m，宽10m。

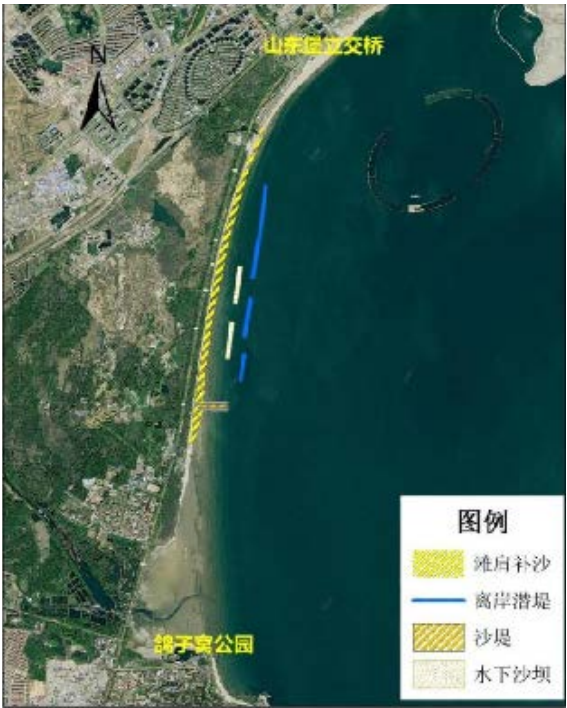


图 25 砂质海岸修复平面布置方案
(图片来源: 河北省海洋地质资源调查中心)



图 26 砂质海岸修复剖面设计效果图
(图片来源: 河北省海洋地质资源调查中心)

（3）离岸潜堤

离岸潜堤是通过使波浪提前破碎来达到减缓波能的效果，减少海滩侵蚀，促使岸线向平衡形态发展，本次离岸潜堤采用鱼礁型，鱼礁型潜堤对水循环和生态环境影响较小，堤顶不露出水面，无损于视觉景观。离岸潜堤共计3座，总长度1650m。

（4）拦沙堤

拦沙堤是起到构建岬湾形态、减缓沿岸流的作用。设计拦沙堤1座，长度400m，堤顶宽50m，堤顶高程+0.5m。

（5）水下沙坝

水下沙坝是指未出露海面的与海岸略成平行的狭长堆积地貌，通过采用中粗砂，构建离岸距离较近的水下沙坝，起到喂养和遮蔽功效，所谓喂养功效是指近岸沙坝泥沙在波流作用下向岸输移，于其后一定位置回落淤积；遮蔽功效是使波浪提前破碎，消耗沙坝向岸侧的波浪能量，促使遮蔽区水体的挟沙能力减低，发挥掩护作用。本次水下沙坝设计2座，离岸距离约200m，总长度800m，堤顶宽约50m，堤顶高程0.0m。



图 27 水下沙坝平面布置图

(图片来源：河北省海洋地质资源调查中心)

四、海岸修复效果

利用拓展优化的海滩生态修复模式，使得海滩宽度增加 20~60m，多重防护体系克服了传统人工养滩模式的养滩寿命短、海滩自营力丧失和养滩工程与生境保护之间的矛盾等问题，该成果在秦皇岛市多项海岸带生态修复项目中进行了应用。项目的实施有效遏制了海岸侵蚀后退，修复了受损的沙滩资源和海岸生态环境，不仅提升了海滩的生态和旅游价值，同时提高了城市抵御侵蚀的承载能力。

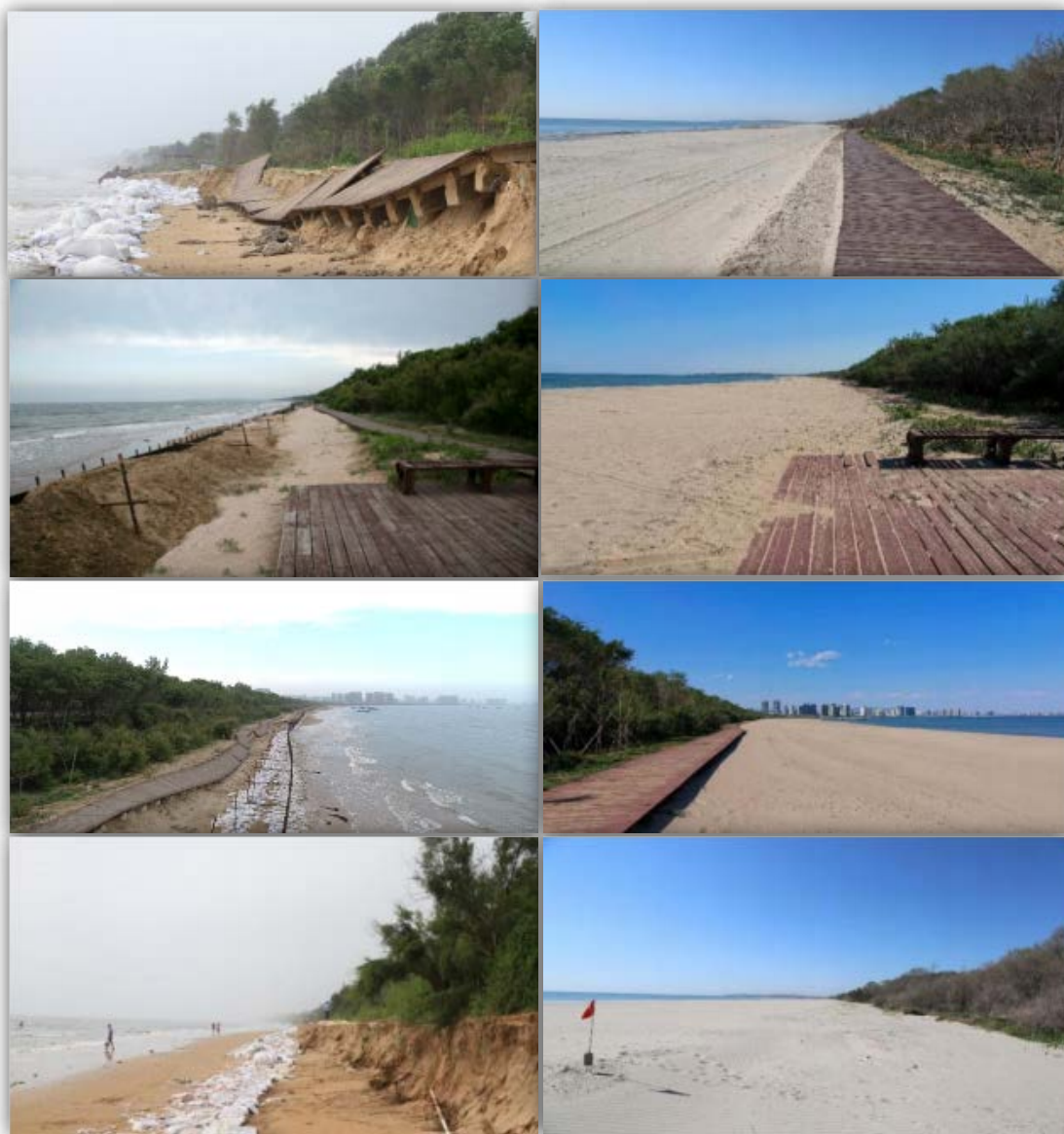


图 28 砂质海岸修复前后对比图
(图片来源：河北省海洋地质资源调查中心)

11.3 案例 3—中国珠海市情侣路香炉湾海岸

一、项目概况

珠海市位列中国十大最宜居城市首位，气候适宜、环境优美、滨海旅游资源丰富。情侣路是珠海市最优良的景观岸段，途经九洲港、海滨泳场、珠海渔女、香炉湾等著名风景旅游点，沿线海涛阵阵、风景秀丽，是珠海市城市名片之一。但是由于各种原因，情侣路沿岸除了海滨浴场岸段有一段数百米长的沙滩，其他岸段鲜有沙滩，使得情侣路海岸滨海休闲旅游空间大打折扣，与珠海市滨海旅游城市的地位很不相称。

香炉湾位于情侣路中段海岸，岸滩修复前，湾内断续分布几小片砂质海滩，每段长十几米至几十米，总体规模较小，基本不存在干滩，在高潮位时不能出露海面。滩面坡折明显，坡折以上高—中潮带滩面宽 10~30m 不等，由灰黄色粗砂组成，较松散，坡度较陡；至低潮带坡度变平缓，沉积物也逐渐过渡为粉砂质泥或泥质粉砂，上有浮泥且多碎石。



图 29 珠海市香炉湾修复前的海岸地貌实景

(图片来源：自然资源部第三海洋研究所)

2014 年，珠海市人民政府委托自然资源部第三海洋研究所开展情侣路岸段的沙滩修复整治工程方案设计，方案基于沙滩定位，根据实测地形及海区水动力环境，设计滩肩补沙修复方式，合理利用天然岬头并辅以拦砂堤构建，营造稳定的岬湾岸线形态。岸线修复后进一步拓展了珠海市情侣路滨海旅游休闲空间，取得显著的社会经济效益。

二、项目区自然地理条件

(1) 气候气象

珠海市地处南回归线以南，冬夏季风交替明显，中年气温较高，冬无严寒，夏不酷热，年日温差较小，属于亚热带海洋性气候。

气温：本地区年平均气温 22.3℃，最低气温 2.5℃。春季天气多变，气温变幅大；夏季月平均气温 28.6℃，最高温度 38.5℃；冬季气温低，1 月份最低，月平均气温 14.5℃。

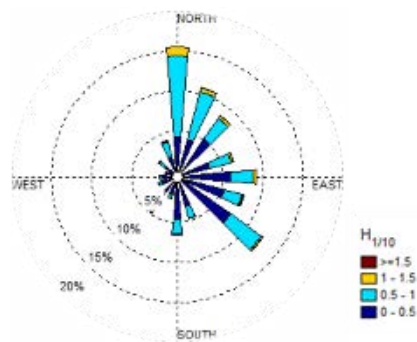
降雨：本地区雨量充沛，年平均降雨量为 1770~2300mm，4 月至 9 月盛行东南季风，为雨季，降水量占全年的 85%；10 月至次年 3 月盛行东北季风，为旱季。

风况：本地区历年平均风速 3.1m/s，风向随季节变化显著。夏季多为南风 and 西南风，有台风侵袭；秋冬季北风和东北风最多，常年盛行东南风和东北风。全市大风日数（风速 >17.2m/s）地域差异明显，香洲地区年平均 9.2 天。

(2) 海洋水文

潮汐：本海域潮汐属不规则半日混合潮型，潮差相对较小，属弱潮区；潮流呈往复流性质。

波浪：冬季 N 向浪优势明显，频率占 27%，其次为 NNE 向；夏季常浪向为 SE 向，频率为 13%，其次为 S 向，频率为 11%。有效波高多低于 1.0m。全年优势浪向为 N~SE 向。



(3) 地形地貌

香炉湾岸段包括低矮丘陵区和平原两种地貌，半段海岸位于低矮丘陵区域，属于山地港湾岸线，另外半段位于滨海平原区域，属于平原海岸。沿湾岸段全部修筑直立式人工护岸，由于湾内动力较弱，岸滩地貌主要呈现“砂质海滩 + 泥质潮滩”的混合地貌类型。



三、海滩修复方案

项目定位：本工程定位为具有景观美化功能的旅游、休闲、运动型修复海岸，即在现有的沙滩基础上，通过人工回填沙恢复和向海扩大现有沙滩规模，形成具有完整地貌单元的滨海沙滩岸线。

修复思路：基于项目定位，设计滩肩补沙修复方式，合理利用天然岬头并结合适当的固砂构筑物，营造稳定的岬湾岸线形态，形成较为广阔的干滩空间。

(1) 剖面设计

考虑到项目需要快速增加滨海休闲空间，采用滩肩补沙修复方式。

滩肩宽度：设计施工滩肩平均宽度约 75m，修复后海滩会在水动力作用下进行自然调整，干滩宽度会逐渐变小而稳定，预期稳定滩肩平均宽度约 50 m。

滩肩高程：设计滩肩高程低于海岸后方道路 0.5m，允许大潮和风暴期间存在局部漫滩。现阶段，滩肩高程应参照《海滩养护与修复技术指南》（HY/Y 255-2018），结合海滩后滨基础设施高程综合确定。

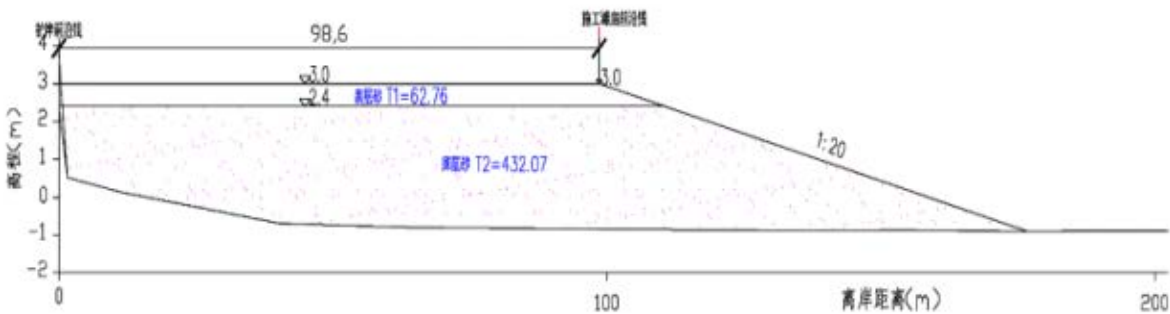


图 30 香炉湾海滩修复剖面设计图

(图片来源：自然资源部第三海洋研究所)

(2) 填沙设计

沙滩回填采用中细砂~中砂，粒径 0.3~0.6mm；

采用分层设计，表层砂品质要求较高，垫层砂粒径和分选可稍大于沉积物设计粒径。共补砂 37.2 万 m³，其中表层砂 7.5 万 m³，垫层砂 29.7 万 m³。

(3) 平面设计

香炉湾岸段北有野狸岛，南侧有海滨公园天然岬角，海岸初步具备天然岬湾形态。基于现有海岸形态，在沙滩修复区南、北两侧分别构筑拦砂堤，营造更为稳定的平衡岬湾岸线形态。

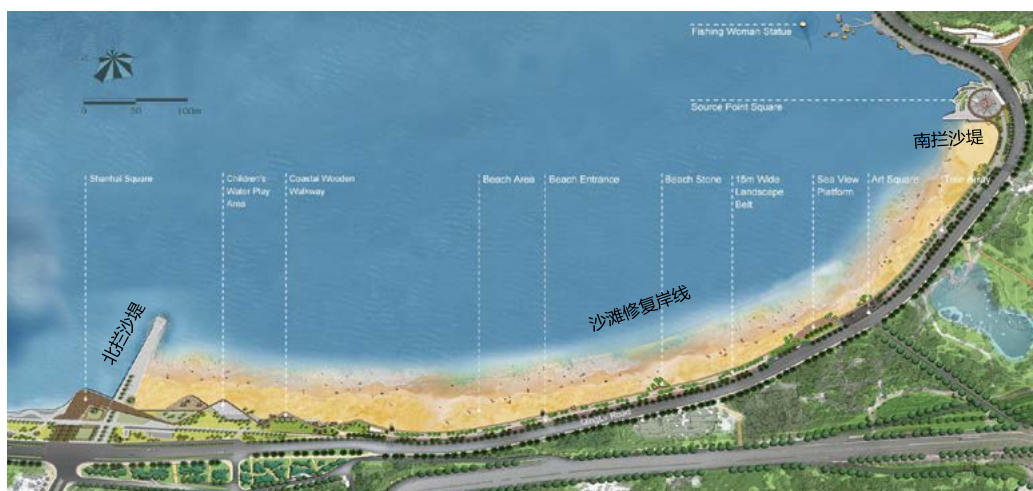


图 31 香炉湾海滩修复平面布置图

(图片来源：自然资源部第三海洋研究所)

(4) 辅助构筑物设计

北拦沙堤：长 360m，坝顶高程 3.80m，坝顶宽 6.00m；

南拦沙堤：长 100m，坝顶高程 3.50m，坝顶宽 3.00m。

(5) 后滨植被设计

植物选择：根据工程区海岸动力环境，选用抗风、耐盐碱，兼具景观效应的植物；

层级构建：采用乔—灌—草相结合方式，与周围景观元素构成丰富有层次的植物群落。



图 32 香炉湾海滩后滨植被修复后实景图

(图片来源：自然资源部第三海洋研究所)

四、海岸修复效果

珠海香炉湾海岸修复工程的实施，对于拓展珠海市情侣路香炉岸段滨海旅游空间，保护情侣路海岸，促进“美丽珠海”建设，具有重要现实意义。



项目建设显著提高珠海市香洲区地方旅游经济的发展，促进沿线土地升值、第三产业发展等，具有间接的经济效益。项目为珠海市民和游客提供了宝贵亲水空间，年游客量达千万，使珠海“一带九湾”的核心空间得到了质的提升，具有显著的社会效益。香炉湾修复工程已成为海岸生态修复的典范，得到国内外一致认可，获“IFLA Award of Excellence”“Dame Sylvia Crowe Award-LI, UK Royal”“中国人居环境范例奖”。

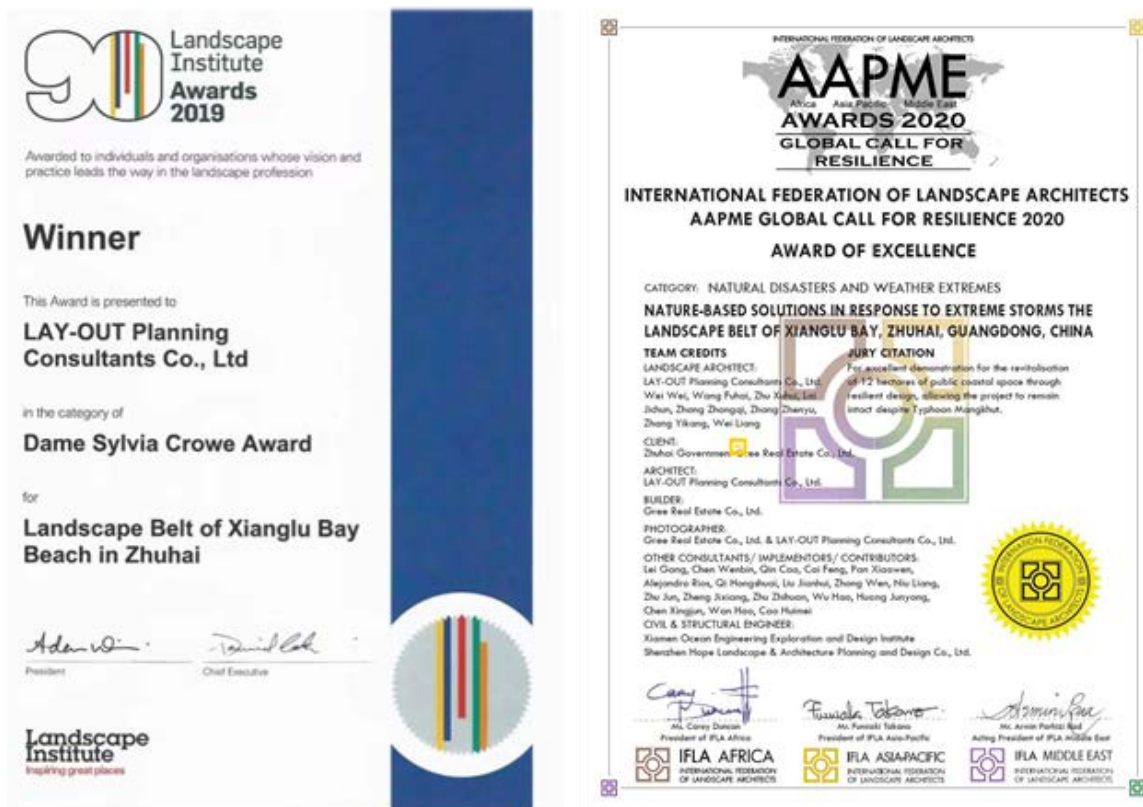


图 33 香炉湾海滩修复工程获奖情况

(图片来源：自然资源部第三海洋研究所)

附录 砂质海岸的知识



1. 砂质海岸的概念与定义

(1) 海岸带与海岸线定义

海岸带是指海陆相互作用的地带，即海水运动对于海岸作用的最上界限及其邻近陆地、潮间带，以及海水运动对于潮下带岸坡冲淤变化影响的范围。实际上对于海岸带宽度的范围各国规定不尽相同。我国在《全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程》中规定为：一般岸段，自海岸线向陆地延伸 10 km 左右，向海扩展到 10 ~ 15 m 等深线；河口地区，向陆地到潮区界，向海到淡水舌锋缘。图 34 是纵观前人相关报道资料而提出的一种包含砂质海滩的通常海岸带剖面，以及其相应各个分区地貌类型的分布概况。

海岸线又称指示岸线，它并非现实存在的一条曲线，而是人们对海陆交界的一种虚拟表示。按照《国家基本比例尺地图图式第 1 部分：1:500 1:1000 1:2000 地形图图式》（GB/T 20257.1—2017）的规定：海岸线指海面平均大潮高潮时的水陆分界线；干出线指海面最低低潮时的水陆分界线（最低低潮线）。其中，海岸线通常位于具自然地理特征意义上的改变处，如海崖、受潮汐影响的河口地段水涯线、沙丘坡脚外缘滨后带海侧之陆生植物完全不能成活的界限（于图 34 中表示在滨后滩坎外缘处）。

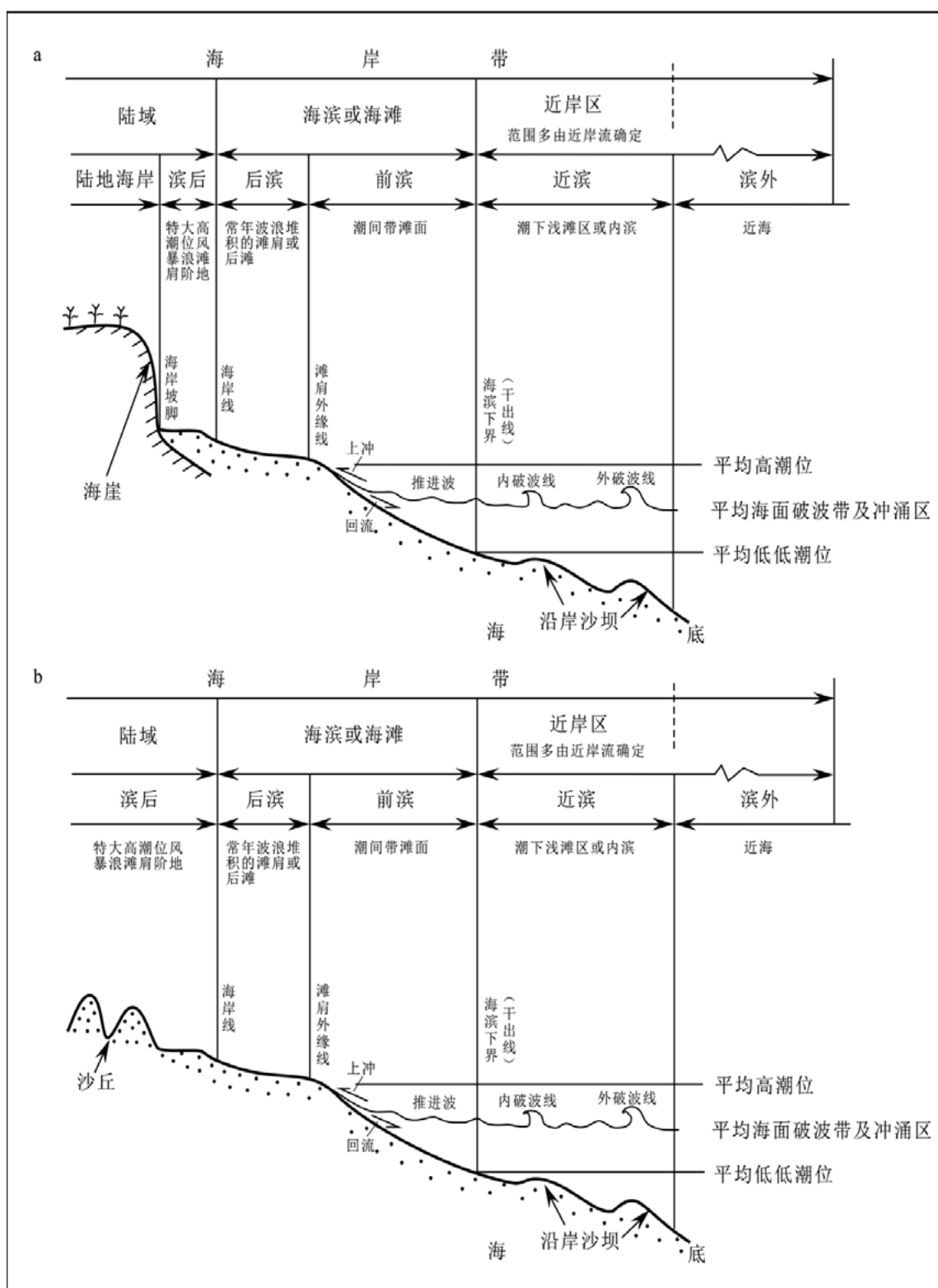


图 34 海岸带剖面地貌分类及其相关术语 (以砂质海岸为例) ^[18]

a 滨后为海崖型海岸带; b 滨后为沙丘型海岸带 (图片来源: 蔡锋等, 2019)

(2) 海岸地貌分类

海洋与陆地相互作用的地带，由潮上带、潮间带和潮下带（水下岸坡）三部分组成。潮间带位于大潮的高、低潮位之间，随潮汐涨落而被淹没和露出的地带，基本上相当于地形上的海滨带，是海岸带的主体地貌单元。受潮汐和波浪的作用塑造了潮滩、海滩、岩滩、红树林滩、珊瑚礁滩等地貌。

①粉砂淤泥质海岸

粉砂淤泥质海岸是由小于 0.05mm 粒级的粉砂淤泥组成的海岸。此类型海岸的岸线较平直，海滩宽广、岸坡极缓，在岸坡的形成塑造过程中潮流起着主导作用。当潮波进入浅水后，由于潮波前坡变陡、涨潮流速大于落潮流速，掀沙力很强，挟沙力大，在海底形成混浊层。因此，在涨潮时底部泥沙都向岸推动一段距离，从而使海滩不断向外淤涨，岸坡也很缓，一般为 0.5‰~1‰。

②砂砾质海岸

砂质海岸潮间带沉积物碎屑成分（包含岩屑、矿物屑和生物屑等）主要由砂（粒径 0.063~0.2 mm）组成，其体积含量一般占 75% 以上，其余碎屑颗粒（砾石或粉砂淤泥质碎屑）的总体含量少于 25%。当砾石或粉砂淤泥质颗粒为 25~50% 时，则可分布称之为砾质砂或粉砂淤泥质砂。

什么是海滩？

海滩是砂质海岸的重要地貌单元，是由激浪和激浪流形成的松散沉积物堆积体。关于海滩的定义不尽相同，US Army Corps of Engineers 将海滩定义为：海（包括较大水域的海湾、潟湖和河口区等）的边界地带——沿岸海滨带所形成的和缓倾斜的未固结的沉积物堆积体。根据全国科学技术名词审定委员会公布的《海洋科技名词（第二版）》，海滩为在潮间带，由波浪作用形成的向海平缓倾斜的砂砾质堆积体。本手册将海滩定义为：位于海岸线与破浪带之间，主要由波浪作用塑造的，由未固结的砂、砾质沉积物组成的海滨地貌单元。海滩可细分为后滨、前滨和内滨，滩面位置大致和前滨一致。



海滩主要分布于以波浪作用为主的海岸，沉积物分选好，属激浪带产物，滩面有隆起

的不对称滩脊（沙堤）和凹下的滩槽。通常还发育因波浪折射或沿岸流引起松散物质纵向位移而成的沙嘴^[19]。组成物质自岸向海有变细的特征，一般高潮区较粗，以中粗砂为主；中、低潮区较细，主要为中细砂或细砂。沙滩上地貌类型是复杂多样的，常见的有沿岸沙堤、潟湖、沙嘴和连岛沙坝等。

③基岩海岸

基岩海岸的海岸线曲折且曲率大，岬角（突入海中的尖形陆地）与海湾相间分布，岬角向海突出，海湾深入陆地。海湾奇形怪状，数量多，但通常狭小。在外营力的作用下，软硬不一的岩石组成的基岩海岸会形成海蚀崖、海蚀柱、海蚀洞、海蚀平台等多种海蚀地貌。海蚀平台一般位于平均海面附近，也有分布于高潮线以上的，它们是由特大暴风浪作用而形成的暴风浪平台；也有位于海面以下的，它们是由波浪侵蚀作用在下限处形成的海底平台。

④红树林海岸

红树林是生长在热带—亚热带低能海岸潮间带上部，受周期性潮水浸淹，以红树植物为主体的常绿灌木或乔木组成的潮滩湿地木本生物群落，属常绿阔叶林。全球红树林大致分布在南、北回归线之间，最北可达 32°N ，最南可达 33°S 。我国的红树林属于东方群系，共有红树植物16科20属37种^[20]，自然分布于广东、广西、海南、福建、台湾等省区^[21]，20世纪80年代在浙江瑞安引种秋茄成功，使得我国红树林分布向北延伸至 28°N 。

红树林多分布于有明显滩面的海湾或入海河口汇合处避风的淤泥质滩面上，其生长条件受气温、洋流、波浪、岸坡、盐度、潮汐、底质等多种因素影响。

⑤珊瑚礁海岸

珊瑚礁是由生活在水深20 m以浅的海底造礁珊瑚的骨骼与少量石灰质藻类和贝壳胶结后，经过长年累月的堆积，形成一种有孔隙的钙质岩体的特殊地貌。

我国珊瑚礁地貌根据地理分布、地貌类型、地质特征和发育历史，可分为三大礁区：a. 南海诸岛区包括东沙、西沙、中沙和南沙四大群岛的珊瑚岛、礁、滩，以第三纪以来长期发育的环礁为特征，珊瑚礁沉积厚达千米以上；b. 南海北部沿岸区包括海南岛沿海、北部湾海域、桂粤闽沿海及邻近小岛，主要为全、新世以来形成的岸礁，尚有少量离岸礁、潟湖岸礁以及在浅海底现已死亡的“底礁”，珊瑚礁沉积很薄，一般不超过10m；c. 台湾沿海区包括台湾岛东岸、恒春半岛、台南高雄地区、北岸以及澎湖列岛、钓鱼岛及其他小岛，以隆起珊瑚礁为特征，是第四纪以来长期发育的岸礁。

2. 砂质海岸的发育与分布

我国砂质海岸发育和分布具有以下特征：

(1) 构造格局控制我国砂质海岸的整体布局

砂质岸滩的形成和发育是构造活动形成的格局在水动力作用下在局部堆积而成，区域构造背景是海滩发育的基础。中国沿海地区地处太平洋板块和亚欧板块俯冲带，典型的沟-弧-盆体形系在岛弧后面形成一系列的边缘海（包括黄海、东海和南海在内的中国近海），成为地球上构造活动最为剧烈和集中的区域。中国海岸带在频繁火山、地震等构造活动作用下，沿海发育一系列的断陷区、隆起区和褶皱造山带。在断陷区往往发育三角洲和古滨海平原，随着全新世海平面上升，形成一系列的泥质海岸或砂质海岸，夷直型海滩在砂质海岸普遍发育。而隆起区和褶皱造山带则往往是侵蚀台地和山地直面海岸，全新世海平面上升形成一系列的溺谷和基岩岸线，溺谷内部水动力较弱通常发育泥质岸线。在水动力作用下，面向外海开阔海域的基岩岸线会形成一系列大小不等的海湾，侵蚀来源的陆源物质则会在海湾内堆积下来发育成为海滩。俯冲型主动大陆边缘的特征决定了中国沿海多发育岬湾型海滩和原生海湾型泻湖海滩，这和美国大西洋沿岸的海滩存在着不同，障蔽岛海岸在中国很难见到。这也是中国砂质海岸在区域构造背景控制下表现出的一个显著特点。

(2) 河口影响砂质海岸发育，对沙滩分布影响明显

海岸是陆海能量和物质交换的中心地带，河流带来的泥沙物质是影响海岸发育的支配性原因。中国入海河口达 1879 个，入海河流总流域面积总计达 431 万 km^2 ，河流带来的大量的泥沙对中国海岸的发育起着重要作用，对砂质岸滩的发育也产生明显的影响。河流带来的大量细粒物质，会在堆积在河口和附近区域形成泥质岸线，致使砂质沉积物组成的砂质岸滩完全没有发育的空间和条件。中国入海河流悬沙浓度高，入海泥沙量巨大。其中黄河在北方地区多次改道，除了现行快速生长黄河三角洲外，还在江苏沿海形成一个废弃黄河三角洲，大量的细粒物源使得泥质海岸在江苏沿海和渤海湾西岸占主导性地位，致使砂质岸滩没有发育的空间和物源条件。长江携带的泥沙则广泛的影响到上海和浙江沿海，也使得沪和浙北地区几乎没有砂质岸滩发育。另外辽河、滦河、闽江的形成的三角洲区域也罕见沙滩发育。相对而言，珠江则对周边砂质岸滩发育影响要小得多，这是一方面是由于珠江流域植被覆盖率高，含沙量较低，另一方面是由于珠江为溺谷型河口，河口区始终处于沉积物的“饥饿”状态，大部分泥沙在河口区沉积下来。细粒泥质物质输出不大，为周边沙滩发育提供更大的空间。总体说来，中国砂质岸滩分布格局就是在各大入海河流控制

下的相间分布，在各大河口三角洲区由于细粒泥质沉积的富存，剥夺了砂质沉积物组成的砂质海岸的发育空间。在黄河和长江两大河流的影响下，中国中部江苏、上海和浙北地区很少有砂质岸滩发育。

(3) 海岸侵蚀普遍存在，砂质海岸发育受到人为影响明显

在全球气候变化、海平面上升和人为活动的综合影响下，海岸侵蚀普遍存在，砂质岸滩质量明显下降。甚至有大量的滨海沙滩因人为采砂而消失。根据我国 908 海岸带综合调查数据，我国将近一半的砂质海岸处于不同程度的侵蚀和退化状态。



图 35 砂质海岸侵蚀退化严重

(图片来源：自然资源部第三海洋研究所)

(4) 空间分布整体特征表现为“南多北少中间空”

从砂质海岸总体分布上来看，砂质岸滩存在着明显的不均衡性，尤其在中国沿海的中部罕有沙滩分布。海岸带作为中国沿海经济发展的龙头区域，对砂质海岸旅游资源的需求不言而喻。区域需求和供应不协调的矛盾，成为中国砂质海岸经济发展的天然缺陷。

从空间分布上来看，我国的砂质海岸分布广泛，但总体上又较为零散，在沿海各省都有不同规模的分布。其中华北以辽东湾两侧、山东半岛最为发育；华南地区则更为发育，尤其是闽中南地区、以及粤、桂、琼各省皆是砂质海岸分布的主要区域。从地形地貌上来看，我国砂质海岸构造背景复杂，气候和水动力环境各异，会发育于多种地貌单元之中。

3. 砂质海岸的成因类型

我国海岸南北纬度跨度大，构造背景、物源和水动力环境差别大，致使砂质海岸地貌

发育复杂多变。国内外没有一个公认的海岸地貌类型的分类原则和标准。夏东兴等^[22]以浪潮作用指数K作为重要参数,将山东半岛虎头崖至岚山头岸段分为五段四种类型:平直海岸,泻湖沙坝海岸,低平海岸和岬湾海岸。庄振业等^[23]对山东半岛沙坝分布的研究,将研究区砂质海岸地貌类型划分为三种类型:岬湾型海岸、沙坝泻湖海岸和夷直型海岸,其中沙坝泻湖海岸又可分为沙坝型、沙咀型和连岛型海岸三个亚型。蔡锋等^[24]根据华南海滩的成因和地貌组合将华南海滩划分为岬湾型、沙坝-泻湖型和夷直型三种类型,归纳了华南海滩的基本类型和特征。本手册基于前人研究,结合对全国砂质海岸特征的认识进一步优化我国砂质岸滩分类体系。

(1) 岬湾岸型

岬湾岸以基岩岬角与溺谷海湾交替分布为特征,岬角遭受侵蚀,湾部多堆积扩展,兼具有侵蚀和堆积的海岸过程。岬湾岸型海滩是中国砂质海岸中分布最为普遍的类型,其成因特点与主要堆积地貌形态如下:①海滩直接背依基岩海岸,或是规模不大的古第四纪沉积层海岸。②湾内多自成一独立地貌单元,海滩沉积物主要来自本岬湾周边陆上和海岸侵蚀剥蚀的泥沙,或是由注入本海湾中的山溪性小河流的来沙。③以滨海横向输沙为主要特征,即入海泥沙主要在近岸区不对称波动水流的横向分量的作用下,发生横向分异迁移的过程中形成的。④在较小或狭窄的岬湾内,多形成规模较小的“袋状”海滩。⑤在较宽阔的岬湾内,常形成具有切线岸段和遮蔽岸段的螺线状海滩,长度可达1km以上。



图 36 岬湾岸型海滩示例^[18] (图片来源:蔡锋等, 2019)

(2) 沙坝 - 泻湖岸型

沙坝 - 泻湖岸型海滩指沙坝 - 泻湖体系中拦湾沙坝（滨外坝沙体）向海侧的海滩。本类型砂质岸滩堆积地貌的总体特征如下：通常形成于岬湾内或湾口岸区，沙坝一端靠陆，另一端向海伸长；滨外坝沙体与海滩为同一成因整体；由于海滩对动力条件和供沙状况的变化具有自调整响应，以达到泥沙作动态平衡迁移的机能，岸线一般呈凹弧形或半心形，规模较大者可形成螺线形状。众所周知，向岸入射波浪特征、海岸平面分布形状及海底地形等因素决定着入海泥沙的再分配和滨海泥沙的运动规律。鉴于我国构造隆起带海岸动力环境多变，滨外坝沙体的堆积形态和成因特点亦复杂多样，总体可概括为沙嘴型、连岛沙坝型、离岸沙坝型以及叠合成因巨大沙坝型四种基本成因形态。



图 37 沙坝泻湖海岸示例^[18]（图片来源：蔡锋等，2019）

(3) 浪控三角洲平原岸型

中国沿岸浪控三角洲平原岸型海滩主要发育于构造隆起带（尤其是华南隆起带）中，以新构造期形成的断陷盆地和断陷带为背景，入海沙量较大的河流河口区海岸，如闽中长乐闽江三角洲平原、粤东澄海韩江三角洲平原、粤西吴川鉴江三角洲平原、琼北海口南渡江三角洲平原和琼西昌化江三角洲平原等的外缘。此外，台湾褶皱带西岸桃园 - 新竹、台中 - 云林区段浪控冲 - 海积扇三角洲平原外缘的海滩也属这一类型。全新世海侵后海面相对稳定以来，此类型海岸有河流供沙条件，在较强波浪作用下，径流 - 波浪成为控制河口的动力系统，于是在三角洲平原前缘形成砂质海滩；并由于平原海岸快速前展，以及平原边缘缺乏基岩岬角对向岸入射波浪的遮挡，几乎整个岸段在波浪的直接作用下，岸线经过长期自我调整响应过程，形成了长而平直的宽阔海滩。

4. 砂质海岸的功能与价值

(1) 砂质海岸的功能

海滩是砂质海岸的重要地貌单元，位于海陆交接地带，是沿海地区重要的海洋自然资源之一，具有防灾减灾、生态维护和旅游休闲三大功能。

自然防护功能：海滩是砂质海岸的天然防护屏障，在消波耗能护岸、防御海洋灾害、保护人民生命财产方面具有重要作用。得益于其动态的地貌演化过程，海滩能够通过自我调整快速适应变化的水动力环境，有效抵御风暴潮、台风浪等极端动力事件，并能适应全球气候变化引起的海平面上升、极端事件加剧环境。其护岸功能既安全、高效又具有可持续性，同时拥有较高的海岸韧性，是其他海岸工程设施无法比拟的。

生态功能：海滩既是滨海动植物的优良栖息地，也是海龟、中华鲎等重要保护动物的繁育场，还是污染物的过滤器，对于维持海岸生态系统健康具有不可替代的作用。保护好海滩资源就是保护其生态环境、维护海洋生态的完整性。

社会功能：海滩是一种宝贵的自然旅游资源，以其知名的“3S”（Sun、Sand、Sea）自然禀赋成为重要的旅游休闲胜地。当前，海滩已经成为滨海旅游的主要目的地，对滨海旅游业发展贡献巨大。联合国世界旅游组织（WTO）的统计表明，滨海旅游已经成为了蓝色经济的重要组成部分，占世界 GDP 的 5%，并提供了 6%～7% 的工作岗位。我国滨海旅游业起步较晚但发展迅速，公众的海滩旅游需求日益增强，滨海旅游经济已成为沿海地区社会经济的新增长点。

(2) 砂质海岸的价值

砂质岸滩因其特有的功能和附带价值一直是人类社会最为宝贵和重要的自然资源之一。海滩价值可分为使用价值和非使用价值（图 38），前者包含社会经济价值和自然经济价值，后者包含存在价值、遗赠价值和选择价值。海滩资源合理开发利用既可提升城市品位，改善人居环境，又可带来巨大经济效益，平均每年产生经济价值 4000 亿元^[13]，支撑着占海洋产值近 50% 的滨海旅游业（图 39），是我国海洋经济实现高质量发展的战略性新兴产业之一。

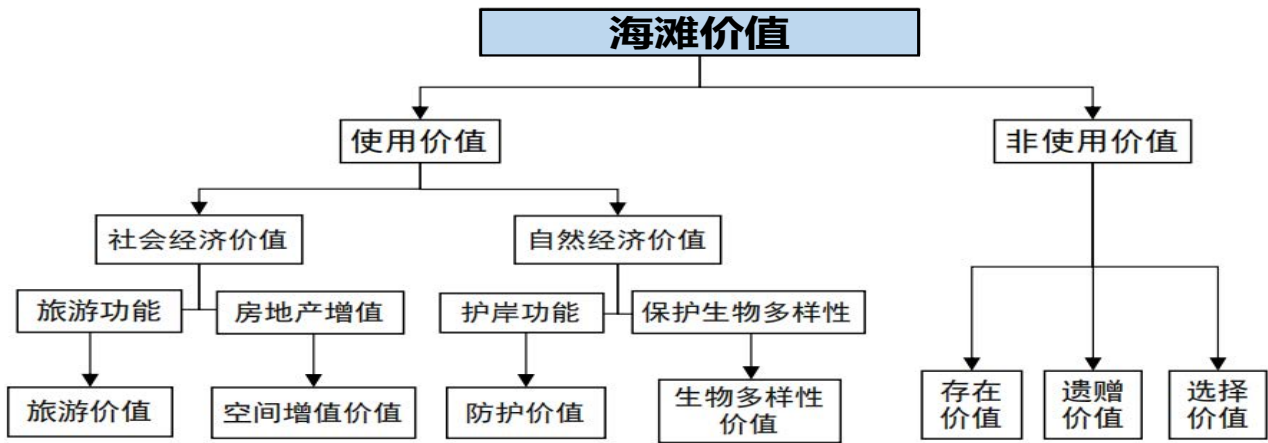


图 38 砂质海岸海滩价值组成部分^[13]（图片来源：Liu et al., 2023）

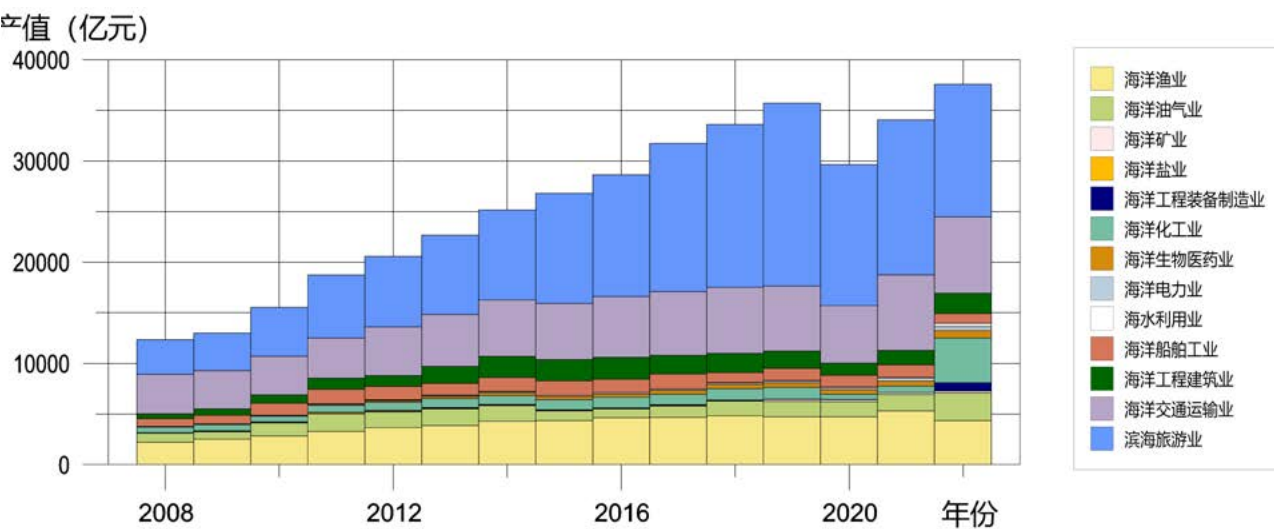


图 39 我国主要海洋产业产值结构：滨海旅游业产值占比近 50%
（图片来源：自然资源部第三海洋研究所）

5. 几点动力地貌基本理论

(1) 海滩剖面形态转化

根据过去几十年的海滩动力地貌过程研究，一般公认有两种代表性的海滩剖面——沙坝型（bar）和滩肩型（berm），后者又称阶梯型（step），如图 40 所示。阶梯型海滩是没有沿岸沙坝的海滩剖面，Johnson^[25] 给这种海滩取名为正常海滩（normal beach）或夏季海滩

(summer beach)；沙坝型海滩是有沿岸沙坝的海滩剖面，Johnson 给这种海滩取名为风暴海滩 (storm beach) 或冬季海滩 (winter beach)。冬季海滩以较缓的前滨 (foreshore) 坡度和近海沿岸沙坝为特征；夏季海滩是淤积的，而且有较陡的前滨坡度和近海阶梯代替沙坝。这两种剖面可以相互转化，相互制约，共同控制着海滩过程。

海岸的侵蚀常常是在一次大的风暴后完成的，一次大风浪的侵袭，海岸线可能后退几米至几十米。侵蚀下来的泥沙被搬运到离岸区，使近岸区海滩坡度变小，从而泥沙在离岸区堆积成水下沙坝。水下沙坝的形成，使波浪在离岸较远的地方破碎，传至近岸的波浪减弱，从而使海岸受到了保护。海滩剖面逐渐适应于大风浪的季节，形成了以沙坝为特征的风暴剖面。当风暴季节过后，海面有一段相对平静时期，风浪相对减小，并以涌浪为主，泥沙又从离岸区逐渐向岸边推移。泥沙向岸边堆积，逐渐形成了滩肩，滩肩不断地增长，使岸线不断地淤进。当风暴期间形成的沙坝完全消失时，泥沙全部推向岸边，形成坡度较大的滩肩剖面 (阶梯剖面)，又称涌浪剖面。一年中海滩剖面就是这样随着水文要素的变化在上述两种剖面之间转化。

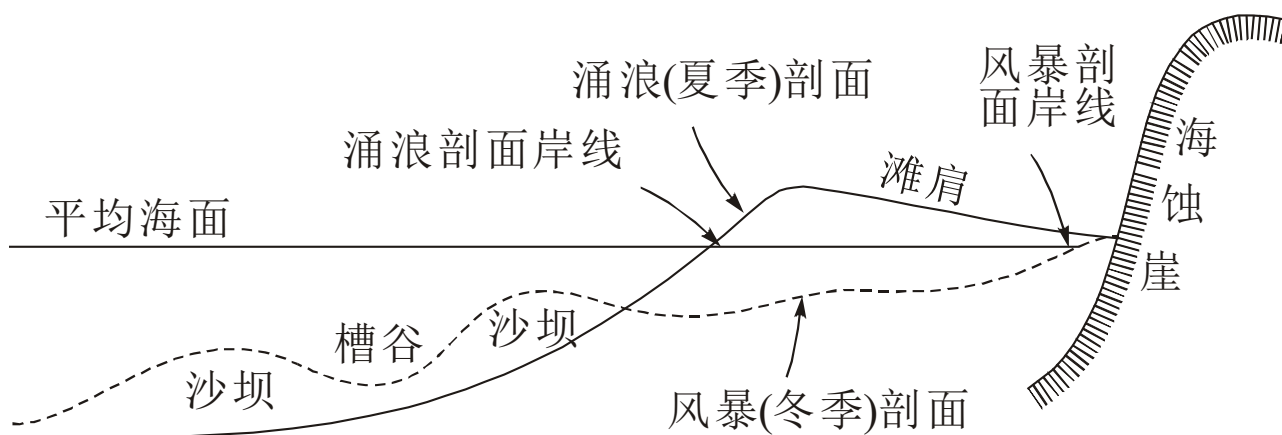


图 40 滩肩型和沙坝型海滩剖面示意图^[26] (图片来源: Komar, 1976)

Masselink 和 Short^[6] 在分析海滩泥沙与波、潮、流相互作用和相互适应的基础上应用相对潮差 (Relative Tide Range, 表示为 RTR) 和无量纲沉积速率 (Dimensionless Fall Velocity, 表示为 Ω) 两个参数将海滩划分为 8 种主要类型 (图 41)。根据其划分条件，可以判断适宜于砂质海滩发育的主要动力环境。

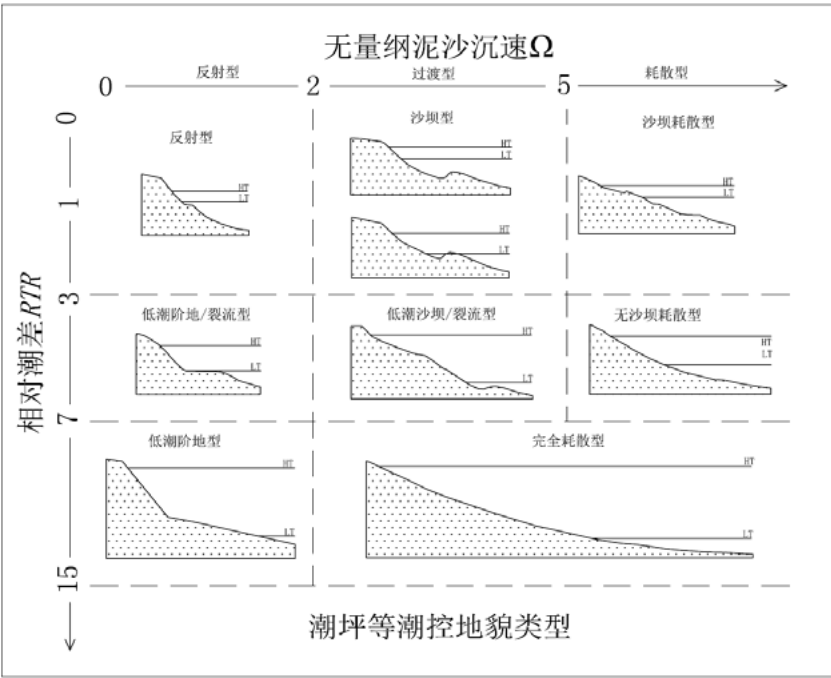


图 41 Masselink 和 Short 海滩剖面类型划分^[6]

(图片来源: Masselink & Short, 1993)

(2) 闭合深度

砂质岸滩剖面季节性有效波动的最深界限是海岸工程学上的重要概念, 这个概念被海岸工程学者称之为“闭合深度”(图 42)。海滩剖面的塑造通常限定在一定的范围内, Hallermeier^[27] 在岸滩变化研究时提出了砂质海岸活动岸滩的闭合深度 (Depth of closure) 的概念, 在该深度以上泥沙运动活跃, 而此深度以下变化很小或可以忽略。

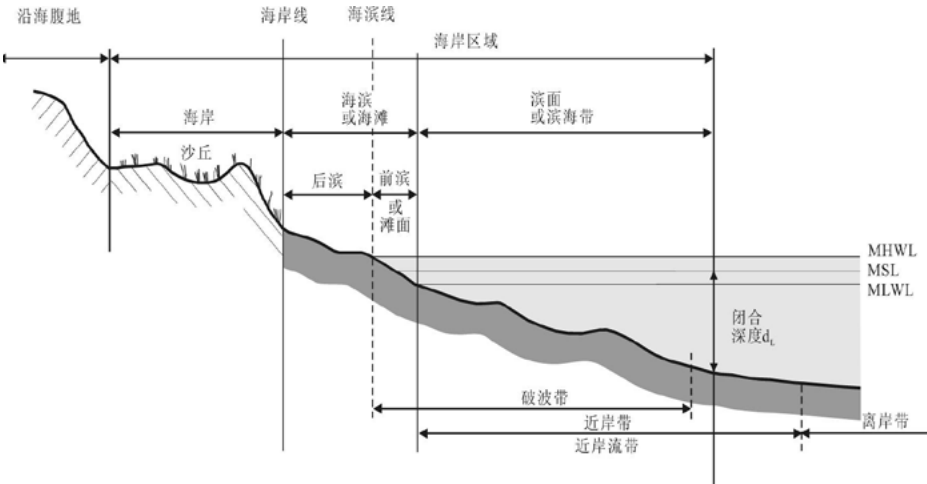


图 42 砂质海岸剖面及其闭合深度示意图^[4] (图片来源: 蔡锋等, 2015)

闭合深度的近似方程为^[27-28]:

$$h_* = 2.28H_e - 68.5 \left(\frac{H_e^2}{gT_e^2} \right)$$

式中, H_e 为每年不超过十二个小时或者只占总时间 0.14% 的有效波高, T_e 为与 H_e 相应的波周期。 H_e 可通过年平均有效波高 $\overline{H}$ 和波高标准偏差 σ_H 求得:

$$H_e = \overline{H} + 5.6\sigma_H$$

值得注意的是, Hallermeier 公式与泥沙粒径无关, 这与闭合深度定义有一定偏差。

Birkemeier^[29] 通过更准确的现场观测对 Hallermeier 方程进行了评估, 并推荐了与 Hallermeier 方程几个不同的常数:

$$h_* = 1.75H_e - 57.9 \left(\frac{H_e^2}{gT_e^2} \right)$$

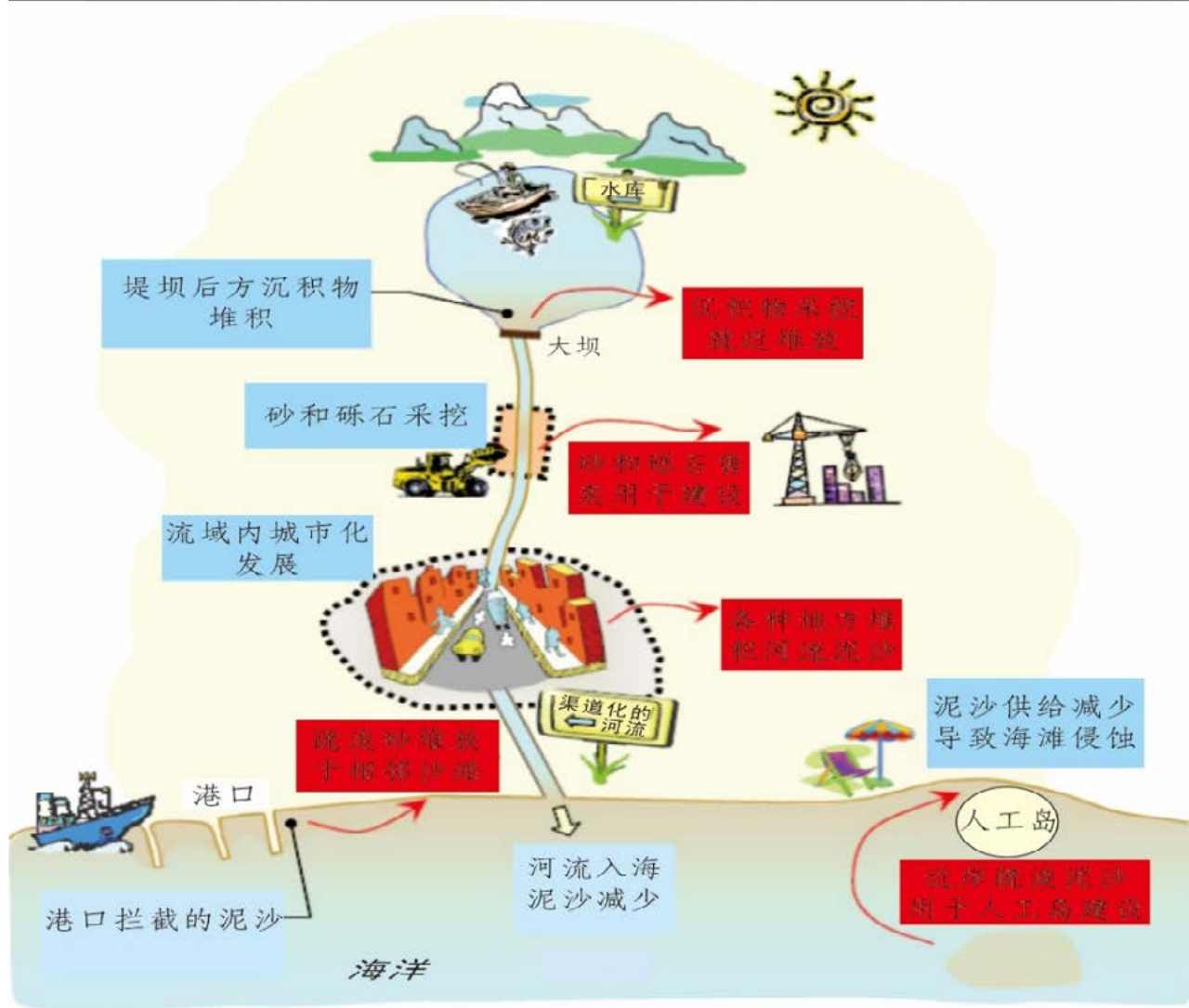
同时, 发现下面简化的近似关系式与测量结果吻合很好:

$$h_* = 1.57H_e$$

如前文所述, 闭合深度实质上是砂质海岸修复设计中的一个工程概念。值得注意的是, 定义了 h_* 与每年超过 12 小时的波高的对应关系, 闭合深度很可能每年都会发生变化。同时, 在砂质海岸修复工程当中, 初始的剖面比较陡, 由于重力的作用, 泥沙也会迁移到超过闭合深度的地方。

(3) 海岸沉积物管理

海岸区域沉积物管理的目的是综合海岸带、河口和河流体系内的规划、工程和活动, 并拓展解决问题的视野, 从工程尺度的区域拓展到由自然沉积物过程界定的大区域(图 43)。区域沉积物管理能够发现自然系统及其相关的生态系统的变化, 以及单个工程在有限的空间和时间框架的响应。

图 43 海岸沉积物源、汇与运移系统示意图^[30]

(图片来源: 刘根, 2022)

区域沉积物管理的一个重要方面就是区域内沉积物的收支, 其有助于确定沿岸沉积物运移速率、运移模式和路径、侵蚀和淤积区域的位置, 认识该区域内海滩和水深变化的原因及规模。通过沉积物收支, 可以预测一切因改变沉积物总量的行为所带来的影响。

海岸沉积物管理研究中所面临的挑战主要有合理确定海岸单元(也称为海岸沉积单元、沉积单元, 后文统称为海岸单元)的边界、充分认识泥沙运移的路径, 以及泥沙收支计算的不确定性。海岸沉积物管理中有两个重要步骤, 即海岸单元划分和沉积物收支计算。

①海岸单元划分

海岸单元是指在一个区域内, 海岸过程及其对海岸地质的影响大体上是相同的。单元

边界通常是一个特征地貌,例如岬角或河口,可有效地将单元及其过程与其相邻的单元分开。单元边界作为沉积物运输的天然屏障,使边界之间的区域被视为具有可量化沉积物源和汇的半封闭系统。海岸沉积物管理源于海岸沉积物单元,海岸单元方法是通过对每个单元内或沉积物单元之间的沉积物流动性及运移方式进行深入了解,已被许多国家用来进行不同空间尺度的海岸管理。

②沉积物收支

在海岸地貌研究中,用沉积物收支法来确定海岸侵淤的观点由来已久。根据质量守恒原理,沉积物增加、平衡或减小,决定了海岸线是否会长期淤涨、保持稳定或侵蚀。沉积物收支需要考虑所有可能的泥沙来源、运移路径、去向和运输方式,最核心的内容是依据计算程序,评估泥沙的贡献和损失,最终确定某一海岸单元内的沉积物净增加或较减少(沉积物的平衡)。沉积物收支法可以更好地认识沉积物源、汇和运移路径,已被广泛用于海岸科学、工程和管理。

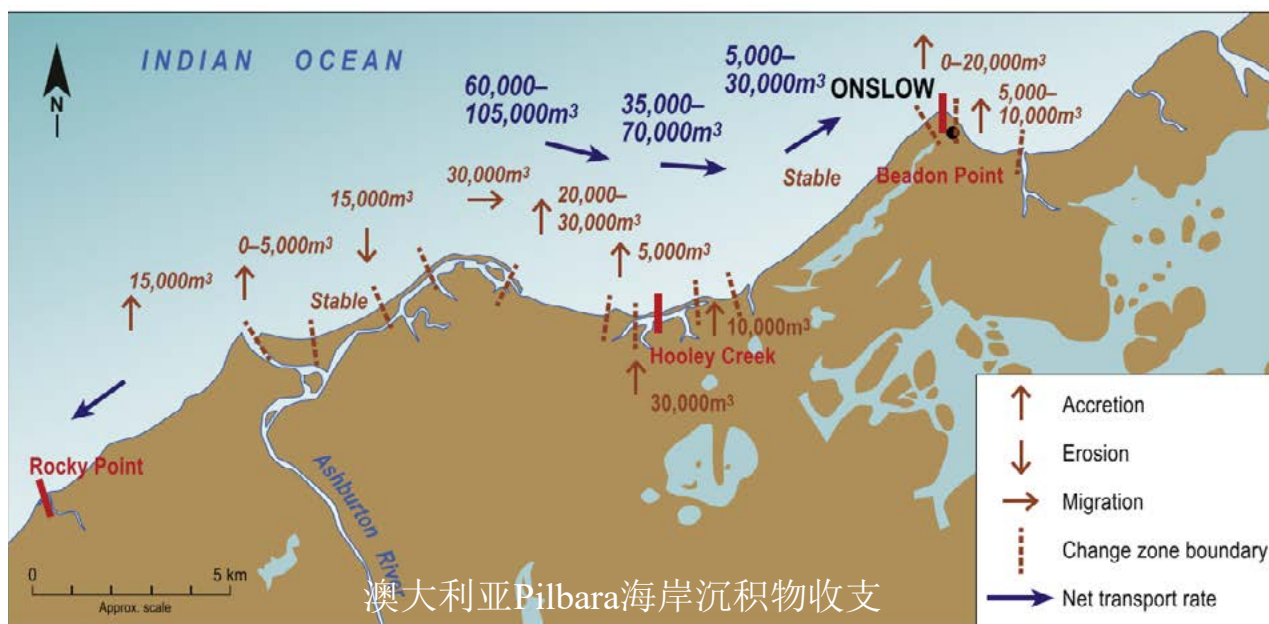


图 44 澳大利亚 Pilbara 海岸沉积物收支概念图^[31-32]

(图片来源: Eliot, 2013)

6. 砂质海岸生态减灾修复的发展趋势

砂质海岸是宝贵的空间资源，国内外对滨海沙滩的需求日益增长。随着国际上基于自然过程的海岸保护理念和我国习近平生态文明思想的推进，以海滩修复为主的砂质海岸可持续性生态修复技术必将被广泛应用，更多样化的技术方法和更先进的修复理念亦会不断发展。

(1) 砂质海岸修复技术应用扩展

从全球砂质海岸修复实践来看，大多数工程为侵蚀受损砂质岸段的修复，通常具备发育海滩的动力环境。但我国砂质海岸修复工程却更为多样化，包括砂质同相养滩、岩滩养滩、泥滩养滩和生物碎屑海岸养滩等类型，但针对复杂海岸的海滩修复技术仍需进一步拓展。针对动力环境不适宜的海岸拓展海滩修复的应用，利用卵石养滩技术实施强侵蚀岸段的海滩修复，提升海岸防护能力；利用局部动力增强、去泥化等技术在弱动力海岸实施海滩修复，增加滨海休闲空间。利用海滩修复技术优化围填海和海堤工程，在合适的堤前区域构筑海滩，提升砂质海岸防护能力，抵御风暴潮等极端动力事件，将海滩修复技术作为海岸带保护修复技术的重要支撑。

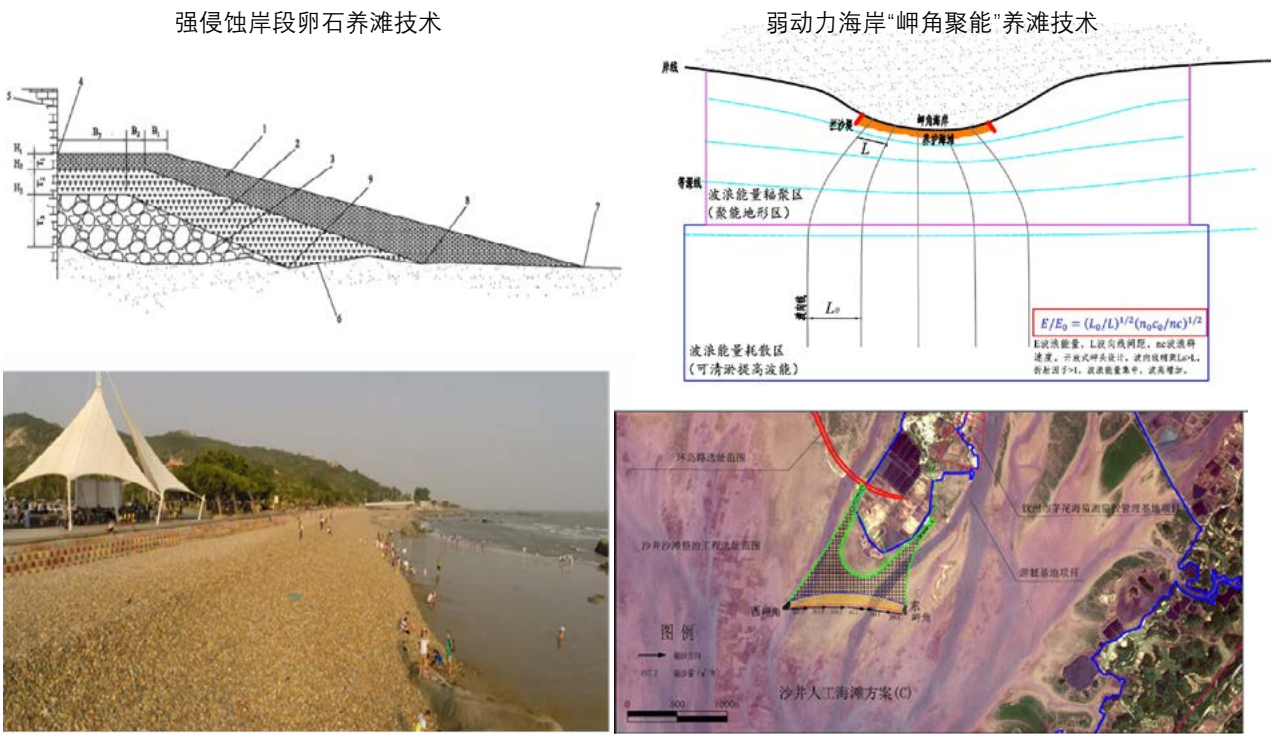
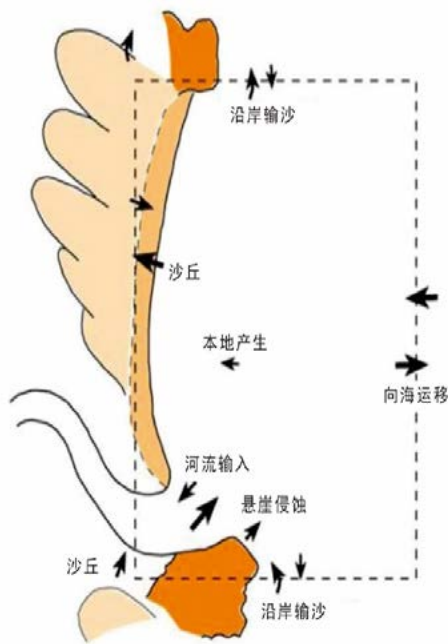


图 45 复杂动力环境砂质海岸修复技术应用扩展

(图片来源：自然资源部第三海洋研究所)

(2) 基于沉积物管理的砂质海岸修复

区域沉积物管理是从系统的角度管理区域沉积物，统筹区域内与沉积物相关的海岸工程项目，拓展到自然沉积单元的大区域来解决海岸带的问题。通过建立沉积单元之间和单元内部的沉积物流动性，分析系统内外沉积物收支，建立沉积物管理的综合框架，已被广泛用于海岸科学、工程和管理。砂质岸滩修复是海岸带沉积物的人为再分配，应将其纳入到海岸带沉积物管理的范畴。将修复考量从受损岸段拓展到整个沉积单元系统，从区域沉积物运移和收支角度分析岸滩修复沉积物的再分配过程，及其产生整体修复效益。基于沉积物管理的砂质海岸修复是海岸带系统修复的实现途径，从根本上解决砂质海岸受损问题，降低可能导致的负面影响。



(3) 从地貌系统到生态系统的考虑

海滩既是一个地貌系统，也是一个生态系统，其是海洋生物重要的栖息地、产卵场和觅食地。海滩生物通常适应于海滩的高能环境，但难以抵抗海滩修复带来的快速栖息环境变化。砂质海岸修复会对海滩生态环境会产生负面影响，包括直接掩埋底栖生物，施工期高浊度对生物的损伤和沉积物组分改变对底栖动物的影响等。但实践证明这些负面影响通常是暂时性的，且可以通过改善施工方式来减小对海岸带生态环境的影响。长期来看，砂质海岸修复对环境和生物具有较大的益处，可以为多种物种提供栖息地，形成具有良好生物多样性的海岸生态系统。从整体看来，当前砂质海岸修复工程项目以岸滩地貌系统稳定性为主，生态系统修复技术不足，从地貌系统到生态系统的全面考虑的砂质海岸修复技术是未来发展的趋势。其一是加强砂质海岸修复生态系统影响评估，建立涵盖地貌和生态的修复评价方法；其二是基于生态系统考虑优化岸滩修复设计和施工技术，包括沉积物设计、修复时间选取、修复单元布设和施工间隔等方面。其三是将前滨地貌修复和后滨植被修复相结合，构建完善的后滨植被群落，为鸟类等物种提供栖息地。

(4) 全球砂源赤字条件下的砂质海岸保护和修复

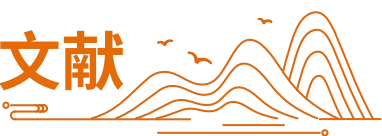
由于基础建设、围填海和岸滩修复等工程的大量需求，全球砂资源快速减少，即将进

入砂赤字的时代，同时全球海平上升给砂质海岸修复带来更大要求，随之而来的是修复成本将急剧增加，近年来，随着我国海域采砂的控制，砂质海岸修复成本增加了近五倍。因此，如何应对砂资源短缺是未来砂质海岸资源保护和修复的核心问题，为此应提出砂质海岸修复的几点建议。一是充分评估砂质海岸修复工程的必要性和充分性，对于一般性海岸可以通过设置蚀退线管控，通过自然蚀退达到海岸平衡。二是进一步加强海岸带系统沉积物管控，严格禁止人工采砂，减少沉积单元内的沉积物亏损。三是节约用砂，在适宜的岸滩修复养护区域可以采用人工砂替代天然砂。四是对具备构建静态岬湾条件的海岸，尽可能构建平衡岸线；对存在明显输沙的海岸，可采用循环养护的方法进行定期养护修复。

海滩修复与养护经过近百年的发展和应用，已经成为砂质海岸防护的主要技术，在世界范围内仍是海岸防护的最佳选择。随着地貌系统和生态系统相结合的岸滩修复技术的发展，“自然工法”（Engineering with Nature）、“活力海岸”（Living Shorelines）等基于自然的海岸保护手段和理念日趋加强。不断提升的海滩养护与修复作为砂质海岸修复的主要技术，必将得到更为广阔的应用^[33]。对于我国来说，砂质海岸修复起步晚，发展快，岸滩修复类型多样。近年来，在生态文明建设要求下，我国实施了“蓝色海湾”、“海岸带保护修复工程”等多项海岸带修复重点项目，先后完成岸滩养护修复工程百余项，提升了海岸防护能力，拓展了海岸空间。以海滩修复与养护为主的砂质海岸修复已成为我国海岸带防灾减灾、自然资源管理和生态修复的核心技术，必将在生态文明建设中迎来更为蓬勃的发展。



参考文献



- [1] Dean R G. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications[J]. Journal of Coastal Research, 1991, 7(1): 53-84.
- [2] Bruun P. Coast erosion and the development of beach profiles[R]. Beach Erosion Board Corps of Engineers, 1954.
- [3] Dean R G. Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf coasts[R]. Department of Civil Engineering and College of Marine Studies, University of Delaware, 1977.
- [4] 蔡锋等. 中国海滩养护技术手册 [M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [5] Dean R G. Beach nourishment: theory and practice[M]. World Scientific, 2002.
- [6] Masselink G, Short A D. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model[J]. Journal of Coastal Research, 1993, 9(3): 785-800.
- [7] Shi F, Cai F, Kirby J T, et al. Morphological modeling of a nourished bayside beach with a low tide terrace[J]. Coastal Engineering, 2013, 78: 23-34.
- [8] 戚洪帅, 刘根, 蔡锋, 等. 海滩修复养护技术发展趋势与前景 [J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(01): 111-125.
- [9] Hsu J R C, Evans C. Parabolic bay shapes and applications[C]//ICE Proceedings. Thomas Telford, 1989, 87(4): 557-570.
- [10] Klein A, Vargas A, Raabe A, et al. Visual assessment of bayed beach stability with computer software[J]. Computers & Geosciences, 2003, 29(10): 1249-1257.
- [11] Lim C, Hsu J R C, Lee J L. MeePaSoL: A MATLAB-based GUI software tool for shoreline management[J]. Computers & Geosciences, 2022, 161: 105059.
- [12] Stive M, De Schipper M, Luijendijk A, et al. The sand engine: a solution for vulnerable deltas in the 21st century?[C]//Proceedings coastal dynamics, 2013, 1537-1546.
- [13] Liu S S, Cai F, Qi H S, et.al. Economic contribution of beach resources and their sustainable development in China[J]. Ocean and Coastal Management, 2023, 239: 106598.

[14] Dean R G. Realistic economic benefits from beach nourishment[C]//Proceedings, Twenty-first International Conference on Beach Nourishment, ASCE, Chapter 116, Malaga, Spain, 1988, 1558-1572.

[15] Stronge W B. The economic impact on the Marco Island beach restoration: a preliminary analysis[C]//Proceedings, national conference on beach nourishment technology, Florida Shore and Beach Preservation Association, Tallahassee, FL, 1992, 102-114.

[16] Stronge W B. The economics of government funding for beach nourishment projects: The Florida case[J]. Shore and Beach, 1995, 63(3): 4-6.

[17] U.S. Army Corps of Engineers. Miami-Dade County, Miami Beach Hotspots Renourishment Project[R]. 2019.

[18] 蔡锋等. 中国海滩资源概述 [M]. 北京: 海洋出版社, 2019.

[19] 陈子燊. 波控弧形海湾近岸平衡剖面特征分析 [J]. 热带海洋, 1996, 15(1): 17-23.

[20] 陈映霞. 红树林的环境生态效应 [J]. 海洋环境科学, 1995, 14(4): 51-56.

[21] 谭晓林, 张乔民. 红树林潮滩沉积速率及海平面上升对我国红树林的影响 [J]. 海洋通报, 1997, 16(4): 31-37.

[22] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要 [J]. 地理学报, 1993(5): 468-476.

[23] 庄振业, 陈卫民, 许卫东, 等. 山东半岛若干平直砂岸近期强烈蚀退及其后果 [J]. 青岛海洋大学学报, 1989, 19(1): 90-98.

[24] 蔡锋等. 华南海滩动力地貌过程 [M]. 海洋出版社, 2008.

[25] Johnson J W. Sand transport by littoral currents[R]. University of California, Institute of Engineering Research, Waves Research Laboratory, 1952.

[26] Komar P D. Beach Process and sedimentation[M]. Prentice Hall, Englewood, Cliffs, N.J., 1976.

[27] Hallermeier R J. Uses for a calculated limit depth to beach erosion[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1978, 1(16): 1493-1512.

[28] Hallermeier R J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate[J]. Coastal engineering, 1981, 4: 253-277.

[29] Birkemeier W A. Field data on seaward limit of profile change[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1985, 111(3): 598-602.

[30] 刘根. 海滩系统沉积物管理研究 [R]. 厦门: 自然资源部第三海洋研究所, 2022.

[31] Eliot M. Application of geomorphic frameworks to sea-level rise impact assessment[R]. Damara WA Pty Ltd, 2013.

[32] Eliot M, Eliot I. Interpreting estuarine change in northern Australia: physical responses to changing conditions[J]. Hydrobiologia, 2013, 708: 3-21.

[33] 郑金海, 张弛. 海滩养护动力地貌基础理论与关键技术研究述评 [J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 791-796.

[34] GB 3097-1997 海水水质标准

[35] GB/T 12763.2-2007 海洋调查规范第 2 部分: 海洋水文观测

[36] GB/T 12763.4-2007 海洋调查规范第 4 部分: 海水化学要素调查

[37] GB/T 12763.8-2007 海洋调查规范第 8 部分: 海洋地质地球物理调查

[38] GB/T 12763.10-2007 海洋调查规范第 10 部分: 海底地形地貌调查

[39] GB/T 12763.11-2007 海洋调查规范第 11 部分: 海洋工程地质调查

[40] GB/T 14914-2006 海滨观测规范

[41] GB/T 15920-2010 海洋学术语 物理海洋学

[42] GB 17501-2017 海洋工程地形测量规范

[43] GB/T 18190-2000 海洋学术语 海洋地质学

[44] GB 18668-2002 海洋沉积物质量

[45] GB/T 50430-2007 工程建设施工企业质量管理规范

[46] JTS 154-1-2011 防波堤设计与施工规范

[47] JTS 257-2008 水运工程质量检验标准

[48] JTS 145-2-2013 海港水文规范

[49] SL 260-2014 堤防工程施工规范

[50] T/CAOE 20.8-2020 海岸带生态系统现状调查与评估技术导则第 8 部分：砂质海岸

[51] T/CAOE 21.7-2020 海岸带生态减灾修复技术导则第 7 部分：砂质海岸



联系我们

邮箱: qihongshuai@tio.org.cn

扫码下载手册全文