

# 海南岛全新世沙丘岩与海滩岩的沉积特征及其成岩环境

黄武轩<sup>1,2#</sup>, 梁磊<sup>2,3</sup>, 梁定勇<sup>2,3\*</sup>, 林义华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南 海口

<sup>2</sup>海南省地质调查院, 海南 海口

<sup>3</sup>海南省地质综合勘察院, 海南 海口

Email: \*3816501713@qq.com

收稿日期: 2021年7月12日; 录用日期: 2021年8月6日; 发布日期: 2021年8月11日

## 摘要

以海南岛沿海的全新世海滩岩和沙丘岩为研究对象, 通过野外露头、显微镜观察和扫描电镜等分析方法研究了海滩岩和沙丘岩的岩石学特征和成岩机制。海滩岩胶结物主要由文石针和泥微晶高镁方解石组成, 识别出三类胶结组构和五种成岩作用。沙丘岩胶结物主要由粒状低镁方解石组成, 识别出三类胶结组构和四种成岩作用。海南岛全新世碳酸盐岩的野外产状、胶结物成分和胶结组构所反映的成岩作用以及成岩环境特征, 提供了一个全新世以来, 以热带滨海地表为主要成岩环境, 以钙质胶结物及陆源碎屑为主要成分的早期成岩作用模式, 该启示将对我们解译古碳酸盐胶结岩的成岩作用提供借鉴。

## 关键词

海南岛, 全新世, 沙丘岩, 海滩岩, 成岩作用

# Sedimentary Characteristics and Diagenetic Environment of Holocene Eolianite and Beachrock in Hainan Island

Wuxuan Huang<sup>1,2#</sup>, Lei Liang<sup>2,3</sup>, Dingyong Liang<sup>2,3\*</sup>, Yihua Lin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou Hainan

<sup>2</sup>Hainan Geological Survey Institute, Haikou Hainan

<sup>3</sup>Geological Comprehensive Survey Institute of Hainan, Haikou Hainan

Email: \*3816501713@qq.com

Received: Jul. 12<sup>th</sup>, 2021; accepted: Aug. 6<sup>th</sup>, 2021; published: Aug. 11<sup>th</sup>, 2021

#第一作者。

\*通讯作者。

文章引用: 黄武轩, 梁磊, 梁定勇, 林义华. 海南岛全新世沙丘岩与海滩岩的沉积特征及其成岩环境[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(8): 1063-1073. DOI: 10.12677/ag.2021.118102

## Abstract

The Holocene beachrock in Hainan island as the research object, through Field phenomenon, microscope and SEM to study the cementation characteristics and diagenesis of beachrock and eolianite. The beachrock cement is mainly composed of Mud microcrystalline high magnesium calcite and aragonite needles. There are three kinds of cement fabric and five kinds of diagenesis. The eolianite cement is mainly composed of low magnesium calcite. There are three kinds of cement fabric and four kinds of diagenesis. The characteristics of diagenesis and diagenetic environment reflected by field occurrence, cement composition and cementation fabric of Holocene carbonate rocks in Hainan Island, provide an early diagenesis model of sediments with terrestrial debris as the main component in the nearshore diagenetic environment of tropical beaches since the Holocene, it will provide inspiration for us to understand and explain ancient carbonate rocks.

## Keywords

Hainan Island, Holocene, Eolianite, Beachrock, Diagenesis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

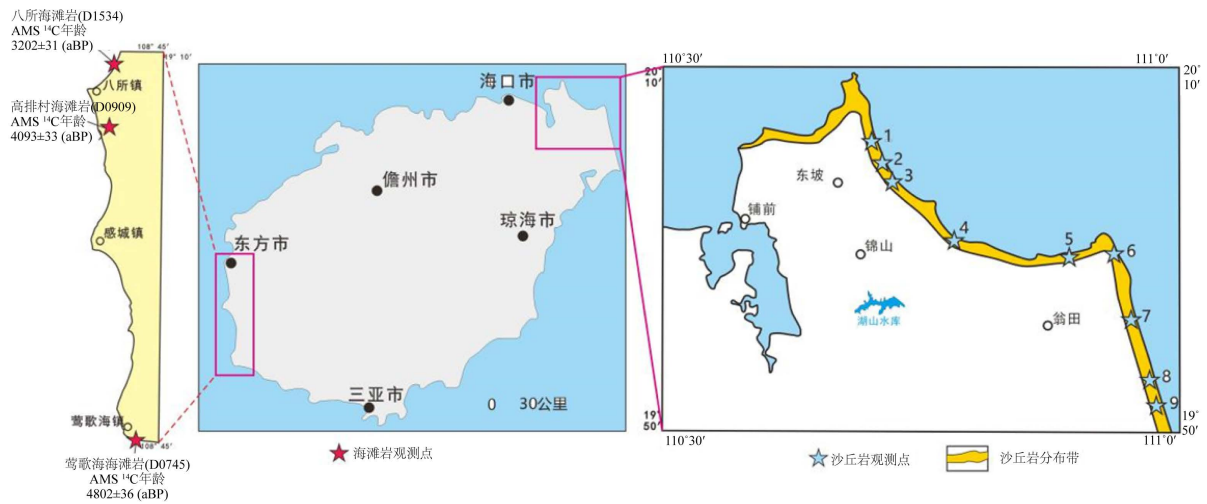
海岸带作为海陆交互作用的直接区域,发育类型丰富的碳酸盐胶结岩,其对环境变化响应迅速,记录了成岩作用初期的海陆相互作用过程,对于研究古海岸带演化、古气候、海平面变化等具有重要意义[1][2][3][4][5]。自上世纪八十年代以来,海陆交互带碳酸盐胶结岩的研究得以广泛开展[3]-[9],并在成因机制研究的基础上,对华南沿海的古气候[10][11][12][13]、构造升降[14][15]、海平面变化[16][17][18][19]等方面进行了深入研究。沙丘岩和海滩岩作为海岸带沉积常见的两种碳酸盐胶结岩,尽管形成于截然不同的沉积环境,但在岩石特征上具有相似性,且常伴生产出,以至于难以辨别,并将其混为一谈。造成这些争议的最主要因素在于对海滩岩和沙丘岩的沉积特征缺乏统一认识和对比,不少学者将华南沿海发育的各种不同成因机制的碳酸盐胶结岩都归入海滩岩[20]。刘妙容[18]简要介绍了海南岛东北部沙丘岩的沉积特征、梁定勇[2]对海南岛西南部全新世海滩岩地球化学特征进行了详细研究,认为海滩岩胶结物可作为记录古气候的良好载体,对海滩岩的岩石学研究不足。

海南岛位于热带地区,炎热的蒸发环境有利于形成沙丘岩和海滩岩,这为二者的对比研究提供了良好的基础地质条件。本文在系统概括前人的工作基础上,从野外产状到镜下鉴定对海南岛沿海发育的沙丘岩和海滩岩在沉积构造、胶结物成分和类型进行补充分析并对比研究,明确其成岩过程和成岩环境,有利于后续学者区分这两种岩石,为海陆交互带的碳酸盐岩沉积提供新的启示。

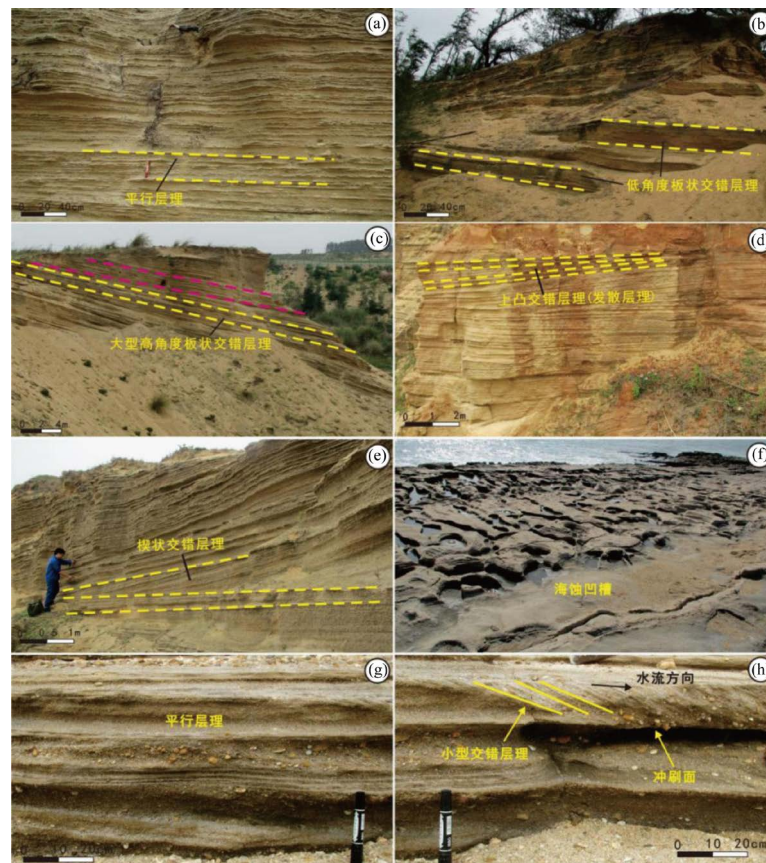
## 2. 地质背景

海南岛东北部海岸分布有较广的海成阶地和海积平原,从木兰头至东村沿岸堆积着许多高低不一的沙丘群,延绵30余公里,最大高程达50m左右。近万年来,由于海平面反复上升与下降,在沿海形成大面积的海成沙丘(图1)。沙丘砂中含有大量的钙质贝壳碎屑,在淋滤溶蚀作用下形成钙质沉淀,进而胶结成为沙丘岩层。沙丘岩出露厚度一般为2~12m,固结程度较差,已受后期水蚀、风蚀与人为破坏,保

存不佳，断续沿海岸分布。文昌木兰头至龙楼一带沙丘岩沉积构造的以板状交错层理和平行层理为主，其次可见楔状交错层理和上凸(发散)交错层理(图 2(a)~(e))。倾角约 3°~22°，从下往上，沙丘岩交错层层厚没有规律，反应了水动力多变的特点。



**Figure 1.** Distribution of Holocene beachrock and eolianite in the Hainan Island  
**图 1.** 海南岛全新世海滩岩和沙丘岩分布图



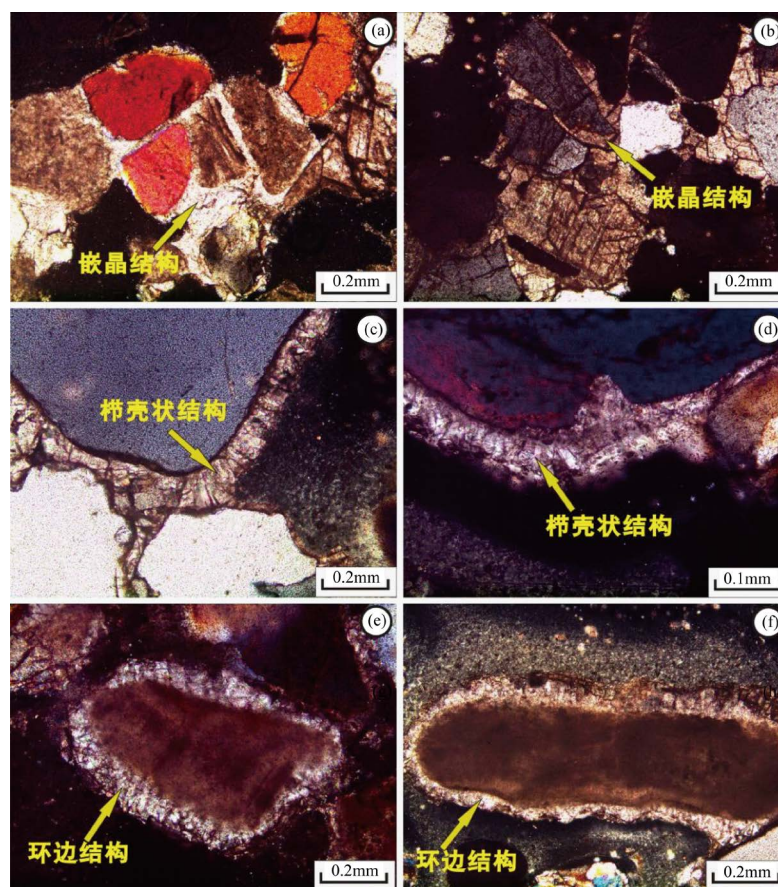
**Figure 2.** Sediment structure characteristic of beachrock and eolianite  
**图 2.** 海滩岩和沙丘岩的沉积构造特征

海滩岩主要发育于海南岛西侧砂质海岸上，横向上平行海岸带呈断续状分布，纵向上由潮间带(海平面以下)延伸至潮上带全新世沙堤下部。海滩岩中含腹足、双壳、珊瑚等生物碎屑，亦见完好的腹足类壳瓣；岩层中发育略向海倾斜的层理，靠近海岸沙堤海滩岩倾角较缓，约为 $4^{\circ}$ ，向海则逐渐变大到 $10^{\circ}$ 。海浪的冲刷侵蚀作用在海滩岩层面留下深度大小不一的海蚀凹槽(图 2(f)，图 2(h))，并且潮间带下部常见浪蚀陡坎或崩塌现象。通过对海滩岩中的生物贝壳进行 AMS $^{14}\text{C}$  测年分析可知，海滩岩年龄[2]在  $3202 \pm 31\text{a BP}$ ~ $4802 \pm 36\text{a BP}$  之间(图 1)。

### 3. 沙丘岩胶结物特征及成岩环境

沙丘岩胶结物主要由粒状亮晶方解石( $\text{CaCO}_3$ )组成，方解石呈粒状或连晶块状，粒径大于  $0.05\text{ mm}$ ，晶体洁净明亮。胶结物来源于生物碎屑的溶解以及沉淀，孔隙水在其间扮演着重要角色，胶结物呈现低 Mg、Sr 特征[18]。

碳酸盐岩胶结物结构是判别孔隙流体物理化学条件的重要指标。海南岛全新世沙丘岩胶结物结构显示出嵌晶结构、栉壳状结构和环边结构 3 种主要类型。其中，嵌晶结构以方解石晶体粒度较大为显著特征，单个晶体填充多个相邻的粒间孔隙，并将多个碎屑颗粒镶嵌在同一个晶体中，且方解石晶体具有一致的光性特征(图 3(a)，图 3(b))，表明其缓慢沉淀于钙质孔隙水溶液环境，反映其成岩环境温度高、孔隙

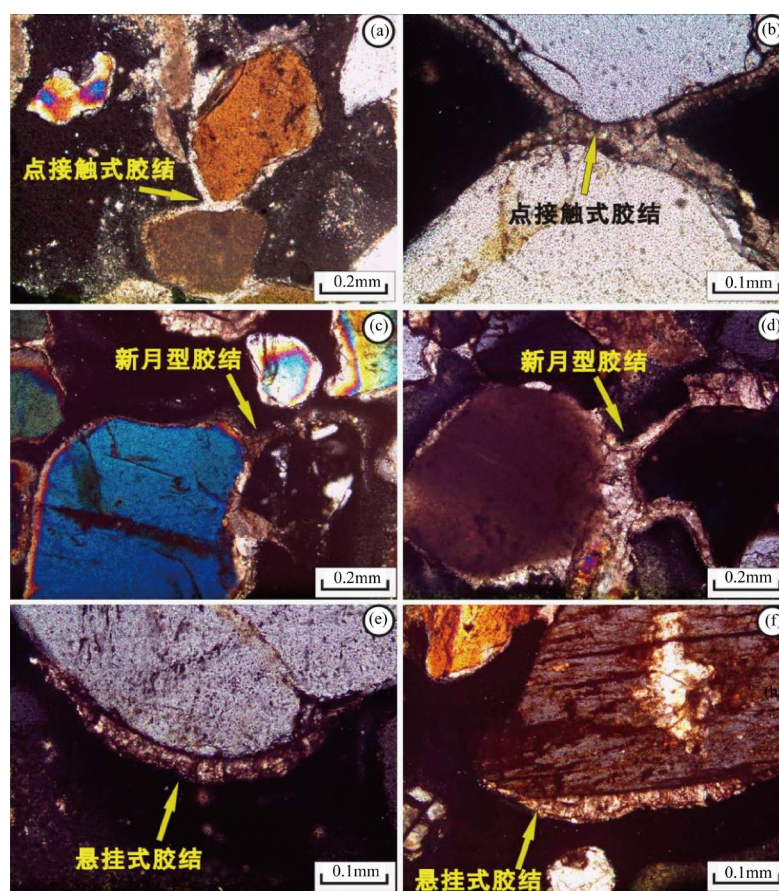


(a)和(b): 方解石晶体可填充多个相邻的粒间孔隙，并将数个碎屑颗粒镶嵌在同一个晶体中，晶体具有同一消光位，正交偏光；(c)和(d): 短柱状方解石晶体垂直颗粒表面生长，正交偏光；(e)和(f): 孔隙流体受重力作用影响，形成不等厚环边结构，正交偏光。

Figure 3. Structure type of eolianite cements  
图 3. 沙丘岩胶结物结构类型

水较充足。在栉壳状结构中,方解石晶体近垂直地附着在被胶结颗粒表面,呈短柱状生长(图3(c),图3(d))。粒状或柱状方解石胶结物是淡水渗流环境的标志,不同于潮间带海水渗流成岩环境下的纤维状或叶片状方解石(参考文献),表明其缓慢形成于含钙质粒间淡水环境。在环边结构中,方解石晶粒附着在被胶结颗粒的表面环绕生长,形成不等厚环边(图3(e),图3(f))。这种结构反映已结晶的亮晶方解石在淡水淋滤作用影响下,易溶组分流体受重力作用向下渗滤,大部分钙质组分悬挂于颗粒底部,少部分钙质流体受颗粒顶托作用影响,停留在颗粒顶部结晶[10]。

沙丘岩常见的胶结类型为点接触胶结,胶结物仅分布于颗粒两点间的接触处,粒间仍空余大量未被胶结物填充的孔隙。点接触式胶结能够清晰反映出孔隙中的钙质流体在重力作用下向底层流动,只残余少量粒间水附着在颗粒接触点周围,进而钙质沉淀形成粒间接触式胶结(图4(a),图4(b))。新月型胶结实际上是点接触式胶结的特殊形式,由于表面张力的作用在两个颗粒间形成水膜,胶结物形态似弯月状,表面常向接触点方向凹进(图4(c),图4(d))。孔隙水在重力作用下克服表面张力,沿着颗粒表面往下流动,富集于颗粒的底部,逐渐析出钙质组分并向下呈悬垂状生长,从而形成重力悬挂型胶结。胶结物很少或不出现在颗粒上方,其形状和结构可指示顶底方向(图4(e),图4(f))。重力悬挂型胶结和新月型胶结均可指示沉积物顶底,是早期浅埋成岩作用的产物,是陆地淡水渗流环境的典型特征。



(a)和(b): 点接触式胶结, 正交偏光; (c)和(d): 新月型胶结, 在表面张力的作用下, 孔隙水形成水膜, 形态近似于弯月状, 正交偏光; (e)和(f): 孔隙水在重力作用下悬挂于颗粒的下部, 逐渐析出钙质组分并向下呈悬垂状生长, 正交偏光。

Figure 4. Cementing type of eolianite cements

图4. 沙丘岩胶结物胶结类型

#### 4. 海滩岩胶结物特征及成岩环境

通过扫描电镜分析,共划分出泥晶方解石(改制软泥)、针柱状文石、微晶方解石与亮晶方解石等四种不同类型的胶结物。钙质软泥如图(图 5(a))所示,此类型胶结物结晶程度差,相比其他类型胶结物显“脏”,钙质软泥形成于海滩岩成岩作用初期,原始的灰泥与陆源碎屑粘土混杂在一起充填于海滩岩孔隙间,形成杂基支撑;针柱状文石作为海水碳酸盐胶结物的初始成分,晶型具有明显的特点,大多呈长柱状或锯齿状,围绕着石英颗粒或者生物介壳生长[2] (图 5(b)、图 5(c));微晶方解石大多呈粒状,少部分呈长条状,形态复杂多变(图 5(d));亮晶方解石内部基本不含杂质,晶体明亮干净,呈连晶粒状充填于粒间孔隙。由(图 5(e),图 5(f))可见,石英颗粒边缘为微晶方解石,往孔隙中间过渡为亮晶方解石。

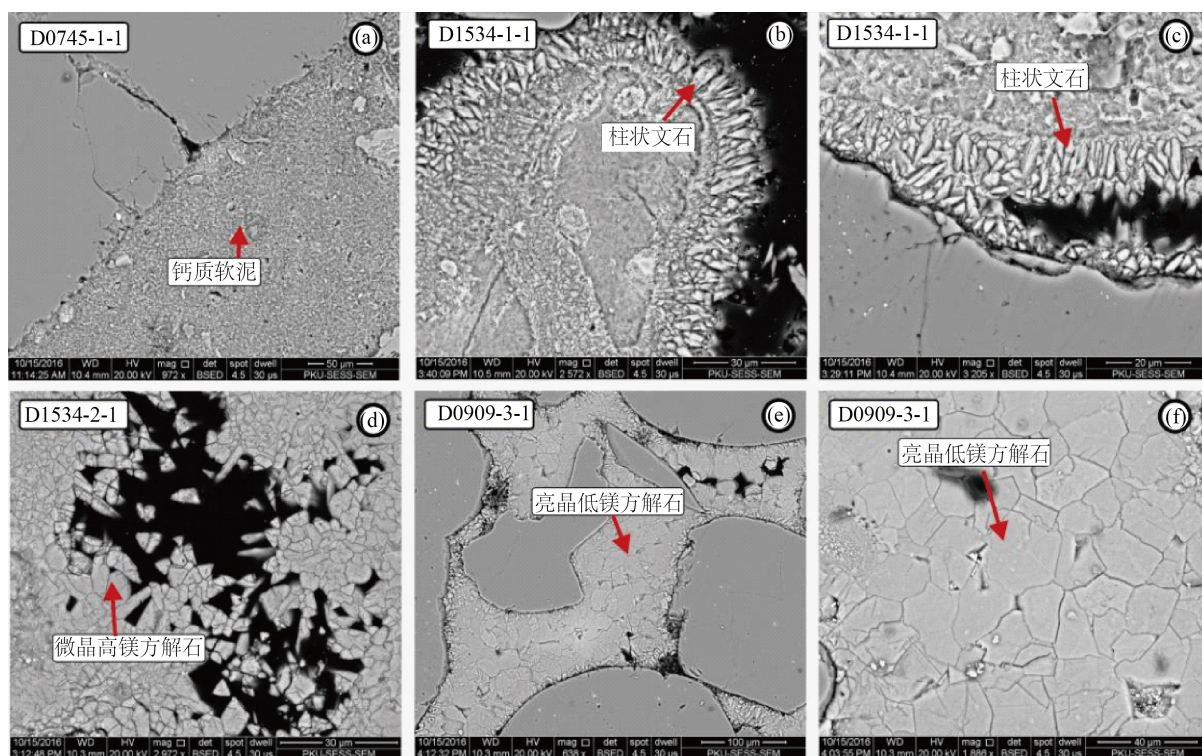


Figure 5. SEM characteristics of the beachrock cements

图 5. 海滩岩胶结物扫描电镜特征

位于低潮线附近海滩岩胶结物主要成分是泥晶高镁方解石,泥晶围绕颗粒外壁生长,环边厚约数十微米,部分碎屑颗粒间形成“廊桥”连结。胶结较充分的区域,泥晶呈凝团状或均匀分布状持续向孔隙中心沉淀直至孔隙完全被填充[21],灰泥中的凝团块有可能是藻团块。泥晶胶结物中含有较多的溶蚀孔隙(图 6(a)),个别孔隙中心可见少量重结晶微亮晶方解石胶结物。局部可见粉砂与钙质软泥胶结物混合填充的现象,表明在海水潜流环境为主的条件下,泥晶既能以沉淀的方式进行胶结,也能以钙质软泥机械渗入的方式填结[21]。图 7(a)可见生物贝壳以及部分颗粒外壁则发育有一薄层针柱状文石环边,部分陆屑颗粒间则有针柱状文石的“廊桥”粘结痕迹,这正是海水潜流带典型的胶结组构标志[22];位于潮间带的海滩岩,受海水潜流-渗流环境影响,胶结物成分主要为文石以及泥微晶方解石,其中大部分生物介壳外壁均可见厚约 30~40 微米的针柱状文石等厚环边,而在大部分石英颗粒外壁则少见厚度均匀的柱状文石环边,显示出柱状文石等厚环边发育对基底的选择性(图 6(c),图 6(d))。与低潮线处海滩岩胶结物相比,

该处海滩岩胶结物粒度较粗，以泥微晶为主(图 6(b))，说明在间歇性淡水渗流作用下，孔隙水中  $Mg^{+}$  离子浓度降低，进而结晶形成少量微亮晶方解石胶结物；潮上带的海滩岩处于淡水渗流环境、偶有海水潜流影响的环境，大部分岩石孔隙几乎全为高镁方解石泥晶所占据，局部可见泥晶高镁方解石与粉砂(屑)混和的充填现象，部分孔隙中央可见淡水渗流与海水渗流环境相互影响下的微晶方解石胶结物。埋藏在沙丘下，脱离海水环境的海滩岩，在淡水渗流作用下，泥晶高镁方解石向低镁微亮晶方解石转变，并在上覆沙丘的压力作用下低镁微亮晶方解石重结晶形成晶型更大的方解石(图 7(d))。

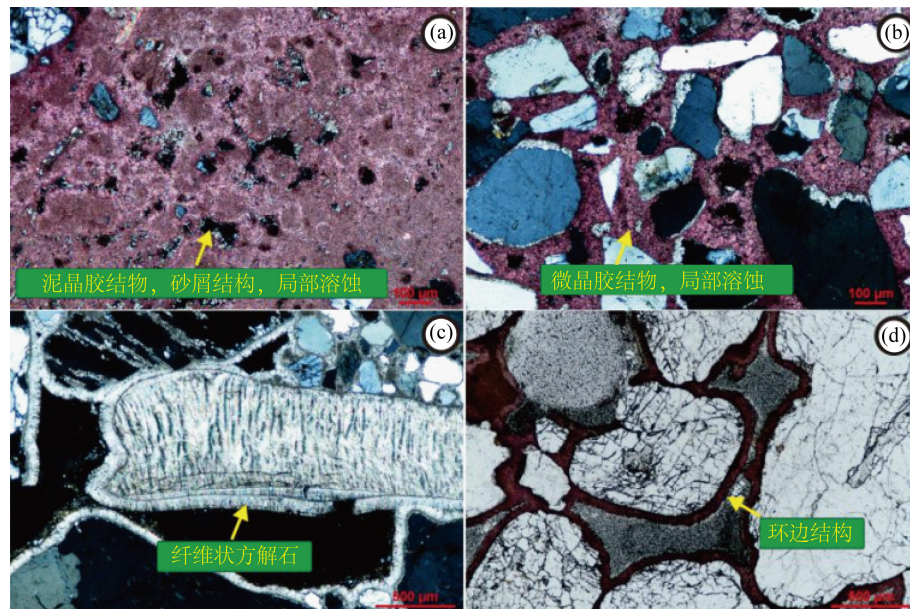


Figure 6. Cementing type of beachrock

图 6. 海滩岩胶结类型

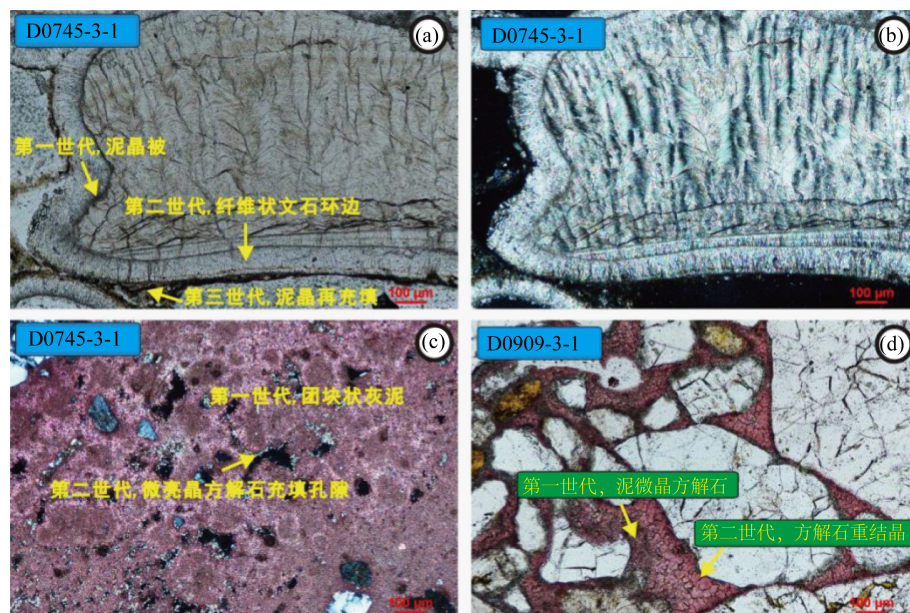


Figure 7. Generation relationship of beachrock cement

图 7. 海滩岩胶结物世代关系

## 5. 沙丘岩与海滩岩的成岩特征对比

对于海岸带碳酸盐岩,前人做了不少工作,也存在划分上的不统一,有学者将海滩岩归为贝壳堤岩、有的学者将沙丘岩划归为海滩岩,并探讨沙丘岩的古海平面指示意义。之所以出现不同的观点,主要是对碳酸盐岩的岩石学认识存在差异。为了更好地对沙丘岩和海滩岩进行分类,我们对海南岛沿岸发育的海滩岩和沙丘岩的相关特征进行了对比分析(表 1)。

**Table 1.** The feature comparison of beachrock and eolianite

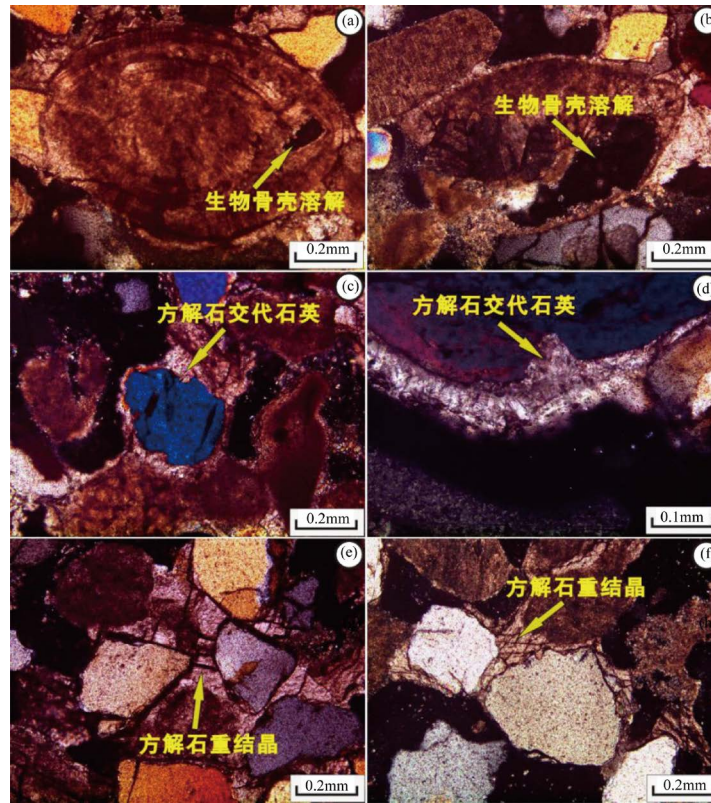
**表 1.** 沙丘岩与海滩岩的特征对比

特征	沙丘岩	海滩岩
分布特征	海岸平原和丘陵山坡。与下伏基岩为不整合接触,分布海拔高度 2~50 m	潮间带及其附近,与下伏基岩间夹有连续分布的底砾层,底面相对较平整,分布海拔高度-1~1.5 m
组分	由石英砂和生物屑组成,生物屑为粒径稍大于石英砂的贝壳碎片	由石英砂和生物屑组成,常含海绿石、黄铁矿等海洋自生矿物。生物屑为粒径远大于石英砂的完整贝壳个体和珊瑚碎片[10]
沉积构造	平行层理、大型交错层理(板状、楔状、上凸),层系中等,前积层倾角跨度大,3°~22°	水平层理,缓向海倾交错层理(5~11°),相邻纹层颗粒粒径差异大,层系较薄
地球化学特征	低镁低锶类	属高镁高锶类-低镁低锶类
成岩特征	粒状低镁方解石,嵌晶胶结、桥式胶结、重力悬挂式胶结,孔隙充填,泥晶套,贝壳碎屑溶蚀成铸模孔	文石针环边胶结,泥微晶高镁方解石充填孔隙胶结;亮晶低镁方解石嵌晶结构。
胶结物及结构		
胶结程度	半胶结~胶结,较松散	完全胶结,致密
成岩环境	淡水渗流带	海水潜流带;混合水潜流渗流带;淡水渗流带
成岩作用类型	主要由大气淡水淋滤和自身重力引起的胶结作用、溶解作用、交代作用和重结晶作用	主要由不同的成岩环境引起的胶结作用、压实压裂作用、重结晶作用、溶蚀作用和交代作用
指示意义	反映潮上带环境,不能指示古海平面位置	指示古海平面位置

沙丘岩的成岩作用类型主要有胶结作用、溶解作用、交代作用和重结晶作用,其中胶结作用是最主要的成岩作用类型,代表大气渗流带的特征胶结物-新月型胶结物和重力悬挂型胶结物(图 4)。沙丘岩中存在较多海相生物壳屑,其中很多文石质生物壳屑被溶蚀后形成具有保留原来形态的铸模孔(图 8(a),图 8(b))。石英颗粒被溶解之后,溶蚀空间被沉淀的方解石占据,由于溶解作用为选择性溶解,形成方解石从边缘向颗粒中心、呈港湾状交代石英颗粒现象(图 8(c),图 8(d)),反映了成岩水介质条件为碱性的特征。重结晶作用主要表现为粗大的晶体镶嵌结构和嵌晶胶结的出现(图 8(e),图 8(f)),反映成岩环境温度较高,孔隙水充足、孔隙水的活动性较强。以上特征表明沙丘岩形成于淡水渗流环境。

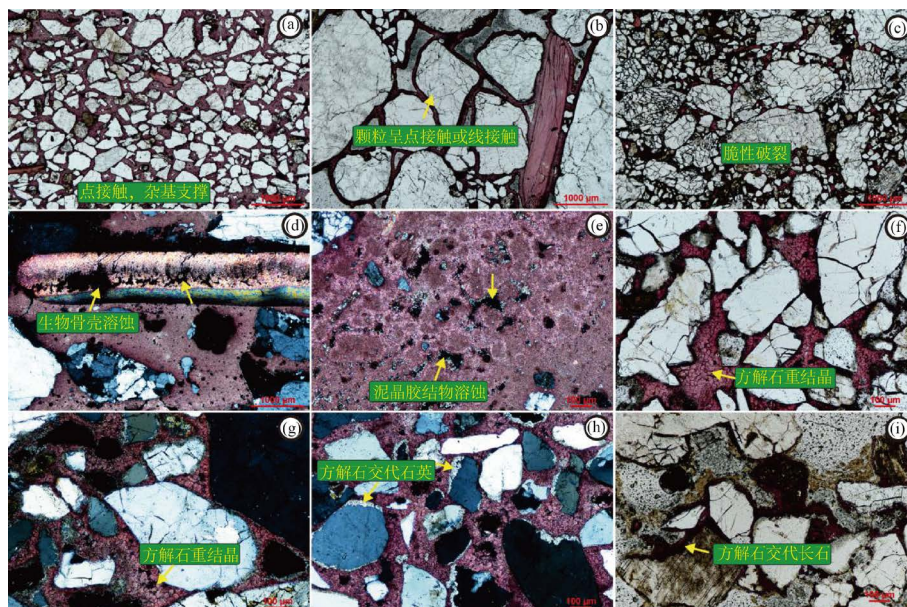
海滩岩的成岩作用类型主要有压实作用、胶结作用、溶蚀作用、交代作用和重结晶作用。海滩岩压实作用主要的表现形式为刚性碎屑石英破碎、粒间孔隙减少,生物碎屑与石英颗粒呈定向排列。颗粒间呈点接触,以孔隙式和基底式胶结为主(图 9(a)~(c));暴露于大气淡水环境下的海滩岩,通过含不饱和  $\text{CaCO}_3$  孔隙水的溶蚀作用,柱状(纤维状)文石质和高镁方解石质的生物骨屑发生溶蚀。这种溶蚀作用具选择性,如文石质的生物骨骼比方解石易溶蚀(图 9(d))。另外,海滩岩中存在胶结物被溶解的现象,主要为团块状高镁方解石在溶解作用下中存在较多的溶蚀孔隙,孔隙多呈不规则港湾状,部分孔隙被亮晶方解石部分充填(图 9(e));石英颗粒被溶解之后,溶蚀空间被沉淀的方解石占据,由于溶解作用为选择性溶解,形成方解石从边缘向颗粒中心、呈条带状交代石英或长石颗粒现象(图 9(h),图 9(i));海滩岩的重结晶作用主要表现为泥晶方解石向微亮晶方解石转化(图 9(f),图 9(g)),靠近颗粒边缘的方解石胶结物粒度较细,越往孔隙中间粒度逐渐变粗,反映成岩环境温度升高,孔隙水的活动性增强。





(a)和(b): 生物碎屑溶蚀, 溶蚀孔隙被后期生成的方解石部分充填, 正交偏光; (c)和(d): 石英颗粒被溶解后, 溶蚀空间被沉淀的方解石占据, 形成方解石从边缘向颗粒中心、呈港湾状交代石英颗粒现象, 正交偏光; (e)和(f): 粒状方解石重结晶形成晶粒粗大的晶体, 常表现为连晶结构或镶嵌结构, 并具有同一消光位, 正交偏光。

**Figure 8.** Diagenesis characteristics of eolianite  
**图 8.** 沙丘岩成岩作用特征



**Figure 9.** Diagenesis characteristics of beachrock  
**图 9.** 海滩岩成岩作用特征

## 6. 结论

(1) 沙丘岩分布于海岸平原, 形成于风成沙丘顶部, 海拔高度约 2 m~50 m, 发育平行层理、大型交错层理(板状、楔状、上凸), 倾角大。海滩岩分布于潮间带附近, 海拔高度约-1 m~1.5 m, 发育水平层理, 缓向海倾交错层理。

(2) 沙丘岩的成岩作用类型主要有胶结作用、溶解作用、交代作用和重结晶作用, 形成于淡水渗流环境; 海滩岩的成岩作用类型主要有压实作用、胶结作用、溶蚀作用、交代作用和重结晶作用, 成岩环境多样, 有海水潜流环境、混合水潜流-渗流环境和淡水渗流环境。

(3) 海滩岩与沙丘岩形成均经过地表成岩环境的改造, 这是海陆交互带陆源碎屑与海洋贝壳发生初期成岩作用的实例。这一现实例子提供了从海水环境、混合水环境到淡水环境的胶结组构序列, 对反演古代海岸带碳酸盐岩的成岩作用和成岩环境有借鉴意义。

## 基金项目

2019 年海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目基金(2019RC348、2019RC346)与中国地质调查局基础地质调查项目(DD20190047、基[2014]01-019-031)共同资助。

## 参考文献

- [1] Vieira, M.M. and Ros, L.F.D. (2006) Cementation Patterns and Genetic Implications of Holocene Beachrocks from the North Eastern Brazil. *Sedimentary Geology*, **192**, 207-230. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.04.011>
- [2] 梁定勇, 李孙雄, 魏昌欣, 王勇, 周进波, 林义华, 等. 海南岛西南部全新世海滩岩地球化学特征及其古气候意义[J]. 地层学杂志, 2018, 42(1): 108-116.
- [3] Longman, M.W. (1980) Carbonate Diagenetic Textures from Nearsurface Diagenetic Environment. *AAPG Bulletin*, **64**, 461-487. <https://doi.org/10.1306/2F918A63-16CE-11D7-8645000102C1865D>
- [4] 曾昭璇. 略论我国的海滩岩[J]. 第四纪研究, 1980, 5(1): 14-18.
- [5] 李平日. 华南全新世海滩岩及其古地理意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1988, 8(4): 21-29.
- [6] 徐辉龙, 孙金龙, 李亚敏. 华南沿海全新世海岸带碳酸盐胶结岩的分类及其研究意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(3): 57-64.
- [7] 吴克刚. 海南岛现代风成岩(沙丘岩)的形成及其地貌意义[J]. 地理研究, 1988, 7(2): 67-71.
- [8] Beier, J.A. (1985) Diagenesis of Quaternary Bahamian Beachrock: Petrographic and Isotopic Evidence. *Journal of Sedimentary Petrology*, **55**, 755-761. <https://doi.org/10.1306/212F87DD-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- [9] 王为. 香港海滩岩与海滩风暴沉积[J]. 中国科学(D 辑), 1998(3): 257-262.
- [10] 王建华. 海南岛天涯海角和莺歌海海滩岩的特征与沉积、成岩环境[J]. 热带海洋, 1991(4): 11-16+107.
- [11] Woodroffe, S.A. and Horton, B.P. (2005) Holocene Sea-Level Changes in the Indo-Pacific. *Journal of Asian Earth Sciences*, **25**, 29-43. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.01.009>
- [12] Kneale, D. and Viles, H.A. (2000) Beachcement: Incipient CaCO<sub>3</sub>-Cemented Beachrock Development in the Upper in Tertidal Zone, North Uist, Scotland. *Sedimentary Geology*, **132**, 165-170. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00029-4)
- [13] Rey, D., Rubio, B., Bernabeu, A.M. and Vilas, F. (2004) Formation, Exposure, and Evolution of a High-Latitude Beachrock in the Inter-Tidal Zone of the Corrubedo Complex (Riade Arous a Galicia, NW Spain). *Sedimentary Geology*, **169**, 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.05.001>
- [14] Friedman, G.M. (2005) Climatic Significance of Holocene Beachrock Sites along the Shorelines of the Red Sea. *AAPG Bulletin*, **89**, 849-852. <https://doi.org/10.1306/02160504111>
- [15] 毕福志, 袁又申. 中国全新世气候变化规律[J]. 大自然探索, 1993(4): 28-38.
- [16] 杨守仁, 杨松. 中国 10ka 来海滩岩时空分布与气候变迁[J]. 科学通报, 1996, 41(8): 723-727.
- [17] 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, 2010, 64(9): 1126-1133.
- [18] 刘妙容, 王贵勇, 李森, 廖肖霞, 黎志伦. 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.

- [19] 毕福志, 袁又申. 闽粤沿海近五千多年来海岸升降周期的初步研究[J]. 中国科学 B 辑, 1987(4): 429-440.
- [20] 孙金龙, 徐辉龙. 中国的海滩岩研究与进展[J]. 热带海洋学报, 2009(2): 103-108.
- [21] 蔡李梅, 付菊, 阎丽妮. 川西坳陷中江气田侏罗系沙溪庙组致密砂岩储层特征及主控因素分析[J]. 华南地质与矿产, 2017, 33(4): 383-393.
- [22] 吴正, 王为. 华南海岸沙丘岩的特征及其形成发育模式[J]. 第四纪研究, 1990(4): 334-343, T002.