

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.06.006

西沙石岛末次冰期风成沉积序列新划分及其旋回特征

赵强^{1,2},许红³

1. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室,国家海洋局第一海洋研究所,青岛 266061

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室,青岛 266061

3. 青岛海洋地质研究所,自然资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室,青岛 266071

摘要:西沙石岛的风成碳酸盐岩是东亚季风末次冰期的产物,以砂丘与古土壤二元旋回的形式记录了东亚季风气候的干湿变化。利用西石 2 井钻孔岩芯资料结合石岛野外地质剖面的详细考察,对石岛风成沉积序列进行了重新的地层划分,将石岛风成沉积分为三层砂丘与两层古土壤的沉积组合。通过对测年数据及东亚季风末次冰期气候变化特征的分析,认为石岛末次冰期风成沙丘与古土壤记录与黄土高原 L1 黄土的 5 个次级气候阶段一一对应,都是对东亚季风末次冰期气候背景下,气候干、湿变化在岁差尺度的沉积响应,是具有稳定周期的气候旋回。

关键词:风成沉积;末次冰期;东亚季风;石岛;西沙群岛

中图分类号:P534.63 文献标识码:A

Last glacial aeolian sequence at the Shidao Island of Xisha Islands and its cyclic features

ZHAO Qiang^{1,2}, XU Hong³

1. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China

2. Key Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

3. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, MNR, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract: The aeolian carbonate deposits cropped out at the Shidao Island of Xisha Islands are the product of the East Asian monsoon in last glacial stage. The dry and wet alternation of the East Asian monsoon has been recorded by the binary cycles of the deposits in the forms of dunes and paleosols. Using the drilling core of Xishi-2, combined with the detailed investigation of the geological sections at the Island, the aeolian sequence is re-divided into three layers of sand dune and two layers of palaeosol. Based on the dating data and the climatic changes in the East Asian monsoon, we believe that the vertical changes of the aeolian sequence or the alternation of dunes and paleosols correspond well with the second-order climatic sub-stages of L1 found at the Chinese Loess Plateau, indicating a cycle on precessional scale.

Key words: aeolian sediment; last glacial period; East Asian monsoon; Shidao Island; Xisha Islands

西沙石岛由风成砂屑灰岩构成,它是东亚季风风成沉积在南海的唯一代表。由于独特的风成成因,石岛的地貌特征在整个南海诸岛中独一无二,在南海诸生物礁岛屿中海拔最高、年龄最老,并且是唯一完全固结成岩的岛屿。多年来,石岛以其特殊的沉积类型吸引着众多的学者前往考察^[1-13],而对石岛的成因国内沉积学界争论了几十年^[4,5,7,8,11,13]。随着研究的不断深入,尤其是西石 1 井的钻探及后续研究,其风成成因才得以确认^[8-10,14-16]。

作为东亚季风的直接产物,石岛由数层砂丘及

夹于其间的古土壤层组成,从而记录了气候背景的干、湿变化。石岛风成沉积位于末次间冰期格架灰岩之上,其所有的测年结果都在 1 万年以上,由此前人推断石岛风成沉积是东亚季风在末次冰期低海平面时期的沉积产物。由于石岛主体由生物砂屑灰岩组成,在大气淡水中固结成岩,后期的成岩胶结物以及生物碎屑中云母、高镁方解石矿物的新生变形作用都会对测年结果造成干扰,从而难以获取各层砂丘及古土壤准确的形成时代,也就不能确定石岛风成沉积序列所记录的究竟是千年尺度的还是万年尺

资助项目:国家自然科学基金“西沙石岛风成碳酸盐岩形成演化及其古气候意义”(41106064);泰山学者工程专项(tspd20161007)

作者简介:赵强(1981—),男,博士,助理研究员,从事海洋地质与海洋地球物理研究,E-mail: zhaoqiang@fio.org.cn

收稿日期:2018-07-15;改回日期:2018-10-26. 周立君编辑

度的气候变化。作为东亚季风出露在南海上的唯一沉积记录,石岛风成沉积旋回对于研究东亚季风末次冰期的气候变化无疑有着非常重要的意义^[8],但自20世纪90年代以来,对石岛风成沉积的研究基本陷入停滞。

在国家自然科学基金的支持下,我们在石岛上顺利实施了西石2井的钻探,获取了30m的岩芯,其中在井深21.5m处钻遇风成沉积的底界。本文利用新取得的岩芯资料,结合石岛野外地质剖面的考察工作,对石岛风成沉积序列进行了重新的划分与对比,并将石岛风成沉积置于东亚季风背景下与黄土高原同期沉积进行对比,以期揭示石岛风成沉积序列可能的成因机制。

1 区域地质背景

西沙群岛位于南海西北部,海南岛东南约210km处,主体部分位于 $17^{\circ}07' \sim 15^{\circ}43'N$ 、 $111^{\circ}11' \sim 112^{\circ}54'E$,有40余个岛、砂洲、礁、滩分布在这个海域内,岛屿总面积8km²,是我国南海四大群岛中陆地总面积最大的群岛^[17]。西沙群岛发育有宣德环礁、永乐环礁、北礁、浪花环礁、玉琢环礁、华光环礁、东岛环礁、磐石屿环礁、中建台礁以及1座暗礁(嵩焘滩)^[18]。石岛位于宣德环礁东南部,与三沙市

政府驻地永兴岛处于同一礁盘。石岛在永兴岛东北部,两岛相隔1km左右,目前已通过工程扩建连为一体(如图1)。

石岛海拔15.9m,居南海生物礁岛屿之冠,岛屿周围被海浪侵蚀成陡立的崖壁,发育海蚀洞、海蚀柱、海蚀壁龛等各类海蚀地貌。由于长期的侵蚀,石岛的形状已变得较不规则,南北长420m,东西宽280m,最窄处不足100m,面积不足0.1km²^[8]。

西石1井于1984年由原地质矿产部石油地质海洋地质局完成,完钻井深200.63m,其目的是钻穿第四纪礁相地层^[15]。西石1井钻遇了24.68m厚的风成生物砂屑灰岩,风成沉积之下为原地礁格架灰岩^[16],其顶部的U/Th年龄为131±10kaBP(24.68~24.86m)^[19],显示为末次间冰期沉积。根据西石1井钻井岩芯资料及野外露头,前人认为石岛风成砂屑灰岩由5层砂丘与4层含蜗牛化石的古土壤组成^[14,16]。石岛上部曾覆盖有鸟粪层^[1],如今已开发殆尽。

西石2井位于石岛南部,钻于2013年3月15—16日,孔深30.8m,分22回次取芯,共取岩芯12箱,实际取芯19.2m,取芯率89.3%。石岛风成砂屑灰岩的底界位于井深21.5m处,之下为厚约0.1m的黄褐色风化壳。风化壳之下为礁坪砂砾屑灰岩及原地礁格架灰岩,为末次间冰期高海平面时的产物。

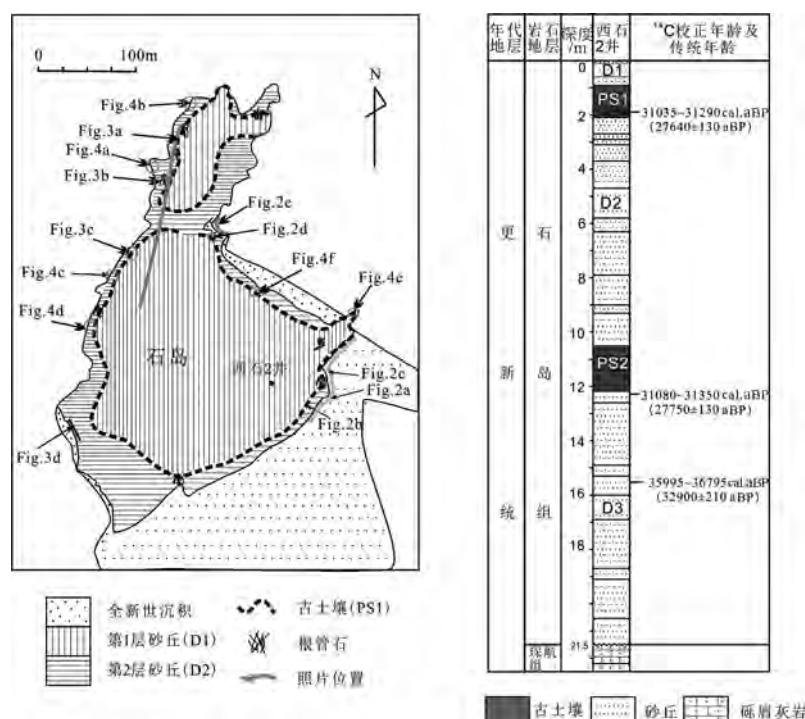


图1 石岛风成沉积分布及西石2井柱状图

Fig.1 Distribution of aeolian deposits on Shidao and the stratigraphic column of Xishi-2 well

2 地层特征

石岛风成沉积序列可分为砂丘(包括沙丘和丘间沉积)和古土壤两类沉积单元,其中古土壤层是地层划分的关键^[8-10]。古土壤中含有大量的陆生蜗牛化石^[20]及植物根系化石^[16,21],说明当时植被繁茂,代表气候暖湿阶段的产物;而砂丘中则难以发现有蜗牛化石存在,根管石也非常稀少,说明植被非常稀疏,代表气候冷干期的产物。古土壤的出现意味着沙丘发育的终止,原先荒芜的沙丘表面被植被覆盖,并经历成壤化改造。因此,古土壤的下部是由早期沙丘物质改造而来,因而其底界面是个比较模糊的渐变面。虽然植被的覆盖终止了沙丘的发育,但在季风以及台风等的作用下,在古土壤发育期间仍然有细粒物质的不断叠加,只是沉积速率异常缓慢,碎屑颗粒与植物枝叶、蜗牛壳、鸟类粪便等同步堆积并风化成壤,最终以醒目的棕褐色与灰白色的砂丘层迥然有别。古土壤的顶界面则是一个清晰的突变面,代表气候的突然转折,被作为石岛风成沉积中的一级地层界面^[10],而砂丘内部不同期次间的侵蚀界面被作为二级地层界面^[10]。根据野外露头结合钻井岩芯资料,本文对石岛风成沉积序列进行了重新的地层划分,认为石岛风成沉积序列由3层砂丘与2层古土壤组成,不同于早期5层砂丘夹4层古土壤的地层划分^[12,16]。

2.1 古土壤发育特征

石岛东南部根管石(又称根结核)丛之下出露的古土壤最易识别(如下图2a,2b),该层古土壤厚约0.2~1.5m,多在0.5m以下,在石岛东部的大部分地区都可连续追踪(图1,图2);外表呈鲜艳的棕黄色,块状,疏松多孔,易于风化,露头上常见侵蚀下凹现象,含较多蜗牛化石,局部有大量的根管石发育;其上部边界清晰,常与上覆砂丘呈高角度的不整合接触,而下部边界略模糊。

经过追踪对比,发现该层古土壤从石岛东南根管石丛下出发,沿海岸往东北绕过石岛东南角高耸的被称之为“海角”的海岸岬角,断续过东部海滩区,从东部海滩北端岬角“天涯”下倾斜向上并暂时消失(如图2e),而后继续往北在石岛东北端称之为“西沙老龙头”的“龙头”处再次出现,从石岛北端刻有“龙眼”的砂丘下部穿过,绕到石岛西海岸顶部(图3a),依据断续的根管石丛及古土壤侵蚀下陷形成的醒目特征,在高角度进积砂丘顶部一路往南追踪(图3b,3c),直至进积砂丘的末端,往岛屿内部折返,在

高立的“准备打仗”的标语牌东部边缘及进岛道路西侧崖壁再次见到古土壤及根管石丛,并断续与石岛南岸潮间带上裸露的根管石丛相接,直至返回东南海岸的根管石丛下部(如图1)。在这层古土壤的追踪过程中,有过多次的间断,但其下部的砂丘基本连续,因此,我们判断它们为同一期古土壤。这层古土壤上部有一层厚度较薄的砂丘断续分布,其上再无古土壤发现,因此本文认为该层古土壤作为石岛最晚一期古土壤,称为第1层古土壤(PS1)。

但在早期研究中,作者曾将该古土壤作为第2层古土壤^[12],这是因为在该层古土壤上部见到“茂密”的根管石丛,并推断根管石丛是后期暖湿期的产物,于是推测在含根管石的砂丘上部(或后期)还有一期古土壤存在,并将这层推测的古土壤与西石1井最上部的一层古土壤相对应^[16]。当时认为这层古土壤被风化剥蚀掉了,因此在野外剖面上没有见到。但是经过西石2井的钻探以及野外剖面上古土壤层的详细追踪和对比,本文认为当初推测的一层古土壤(最晚期的)并不存在。

根据PS1古土壤与其上覆砂丘的地层接触关系,我们推断在古土壤PS1发育末期,环境变得干旱,在海岸上形成新砂丘并往前推进,从而形成剖面上常见的古土壤层PS1与上覆砂丘层间的高角度不整合面。上覆砂丘细层倾角超过30°,与休止角接近,体现了砂丘往前进积的特征。在PS1古土壤的追踪和对比中,发现根管石丛在古土壤层并非连续出现,往往是在小范围内密集分布,而在许多可清晰判定为古土壤的露头中见不到根管石的踪影。根据石岛所出露的根管石丛的特征,我们判断它们为一种木本类植物的根系,与现在宣德环礁赵述岛海岸出露的植物根系非常相似。进而推测石岛古土壤发育时岛屿不同部位的植被类型可能并不一致,这是因为古土壤是在高低起伏的沙丘地貌上发育起来的,地势较低的汇水洼地可能更利于木本类植物的生长发育,其根系繁茂并深入砂丘内部,而地势相对较高不利于淡水蓄积的部位可能以草本类植物为主,根管石仅在木本类植物生长区较为常见。当气候背景再次变得干旱后,新的沙丘在海岸形成并往前推进,砂丘进积将木本类植物部分掩埋但并未导致它们马上消亡,它们仍顽强存活了一段时间,其根系最终在古土壤上部的砂丘中石化为根管石。因此,此类根管石丛不宜作为后一期古土壤存在的标志。石岛其余各处PS1古土壤之上根管石的出露特征也表明PS1之后并无新的古土壤出现(图2d),PS1古土壤层是石岛上最后一期古土壤。

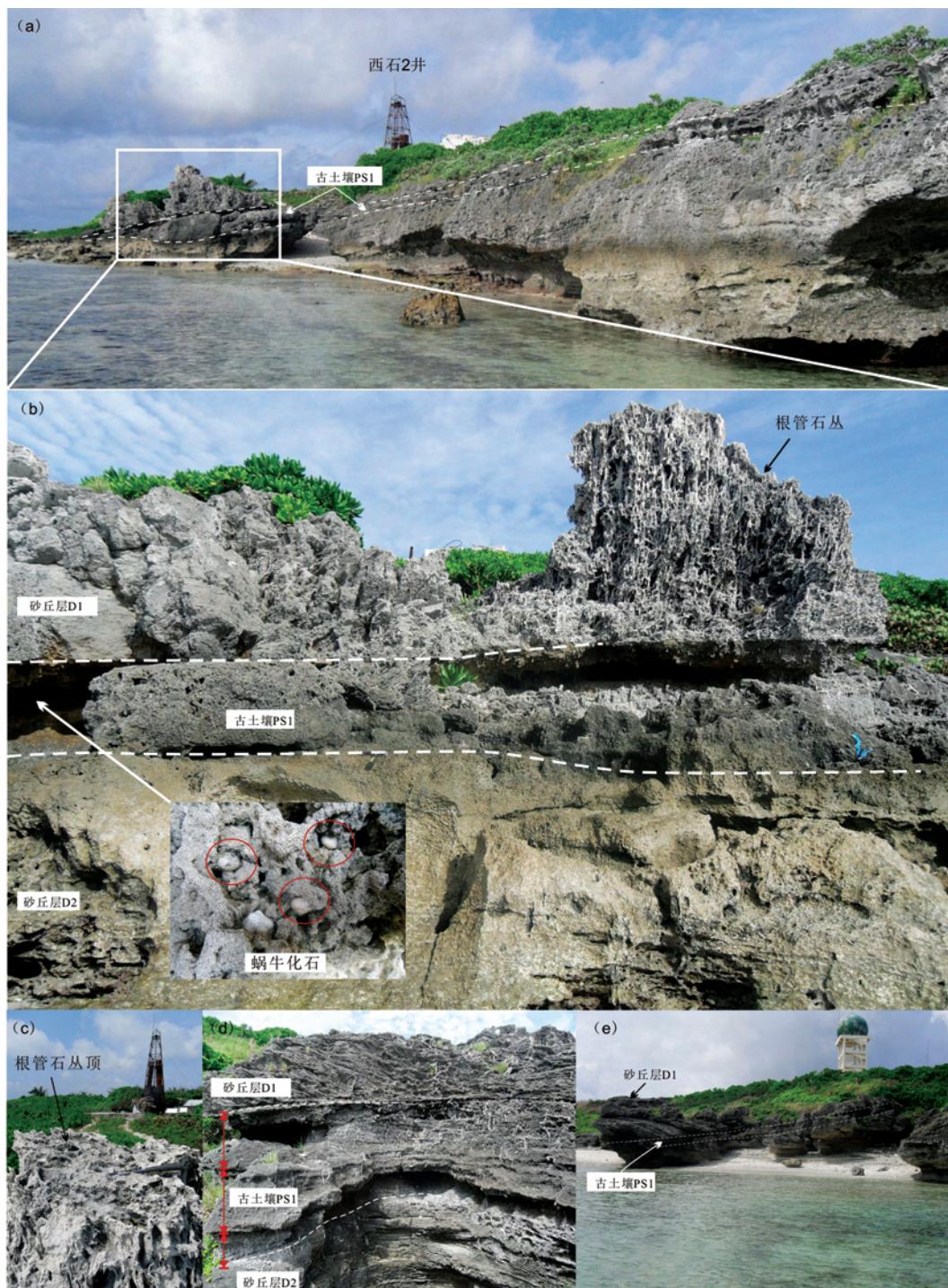


图2 石岛 PS1 古土壤露头特征
Fig.2 The outcrops of PS1 paleosol on Shidao Island

PS1 古土壤在石岛上可分为两个不连续的部分(如图 1 所示),早期观点认为这是两层不同期次的古土壤,北部的古土壤相对更早^[16]。但在野外剖面上,这两部分古土壤下部的砂丘层明显是可以连续追踪的,因而它们应是同一期古土壤。PS1 古土壤在石岛西海岸较不连续,且厚度较薄,缺失较为严重,局部发育的根管石丛(图 4b,4c)由于抗风化能

力较强而成为识别这层古土壤的重要标志。

西石 2 井与石岛东南部的根管石丛相隔仅有几十米远,其所在位置比石岛南部根管石丛顶部略低或大致相当(图 2c),在西石 2 井井深 0.9~2.1m 处钻遇 PS1 古土壤。由于风化严重,西石 2 井上部 0~2.7m 的岩芯全部破碎成松软砂屑,由于上部岩层已经历了长期的风化,从岩芯外表难以直接判断

PS1 古土壤的位置。我们在井深 0.9~1.7m 处发现多个蜗牛化石，并发现多个破碎的根管石及早期古土壤碎屑或团块（砂屑颗粒组成的砾屑），团块内部发现似根管石致密胶结物，可能是当时植物根系胶结而成。需要特别指出的是，西石 2 井钻井岩芯中发现多个砾石碎屑，粒径 0.5~4.0cm，它们由石英、长石等硅酸盐砂屑颗粒胶结而成，并且是钙质胶结。西沙群岛不具备产生这类砾屑的条件，综合分析认为这些砾屑为后期人为混入物，原产地可能是海南岛沿岸的砂岩，人为破碎成砾屑，可能是由于石岛的工程建设而从外部带入的。

西石 2 井在井深 10.5~12.2m 处钻遇第 2 层古土壤（PS2）。该层古土壤呈黄褐色，颜色与上下岩芯明显不同，岩芯胶结不够致密，破碎成粉状和棱角块状，取芯率较低，碎屑颗粒很细，内部发现少量蜗牛化石碎片，古土壤下部有淀积层发育。早期研究认为在石岛西海岸北部的崖壁底部还有一层古土壤出露^[15,16]，我们也在野外剖面上见到了上、下砂丘间的不整合接触以及接触面土状风化的特征，并在这一层位发现了两个罗思那编成螺（*Plectotropis lofouana* (Moellendorff)）化石。但因为该层“古土壤”仅部分出露且厚度较薄，蜗牛化石稀少，未见根管石发育，特别是侧向发育自然转变为砂丘层，并没入砂丘顶部，其综合表现与其他古土壤层相差甚远，若仅凭两个蜗牛化石便列为古土壤则显得过于牵强。建议后续工作对此做进一步的研究，以确认 PS2 是否在该处出露。

在石岛西海岸南侧大型溶洞的洞口东侧洞壁上有一层强烈风化层位于上、下两套高角度不整合的砂丘层之间（图 3d），该层也被认为是一层古土壤（Zhaoqiang, 2011）。本文鉴定后发现其中所含的化石并非是陆生蜗牛化石，而是密集的海相金口蝾螺（*Turbo chrysostomus* Linne）化石，其¹⁴C 年龄为 5520±30aBP，与旁边崖壁上镶嵌的珊瑚砾岩最顶部的年龄（5570±40aBP）非常相近，显然为全新世最高海平面时期的洞穴充填物。但从上、下砂丘的接触形态看，该处至少为一个二级地层界面，也有可能发育古土壤，只是被侵蚀掉并替换为洞穴充填物。由于并未发现古土壤存在的直接证据，PS2 古土壤是否在该处出露还需做进一步的研究。

2.2 风成砂丘沉积特征

石岛风成砂丘由砂屑灰岩组成，碎屑颗粒以中砂为主（Mz=1.85~3.13Φ），由珊瑚屑、藻屑、有孔虫屑及介屑组成，不同部位的碎屑组分的含量存在

显著差异^[8,13,15,16]。本文将石岛风成沉积分为 3 期砂丘沉积，自上而下依次为第 1—3 层砂丘，均为灰白色中、细粒砂屑灰岩。

顶部的第 1 层砂丘（D1）位于 PS1 古土壤之上，位于石岛的顶部，厚度相对较薄（0~1m），局部缺失，常以高角度进积的形式覆盖在 PS1 古土壤之上（细层倾角大于 30°）（图 2d, 2e），在石岛北端和西侧海岸崖壁以及石岛南部剖面上见有平行层理、低角度斜层理和交错层理发育。

第 2 层砂丘（D2）位于 PS1 古土壤下部，是石岛的主体，在石岛海岸各处的崖壁上大范围出露，常见平行层理、大型交错层理、穹形层理和高角度前积斜层理等（图 4），野外露头上未见其确切的底界面。在西石 2 井，D2 砂丘层介于 2.2~10.5m 之间，厚约 8.3m，为灰白色砂屑灰岩，胶结相对致密。其中，在 4.7~6.3m 有根孔发育，上部有较多蜂窝状孔隙，但胶结相对致密，未见根管石，也未发现有蜗牛化石，并呈亮的灰白色。另外，在井深 9~9.3m 也发现有植物根孔。根孔的存在表明当时的砂丘上有少量植被生长，但显然未造成地层的土壤化。这是因为西沙地处热带海洋季风气候区，即便是在沙丘快速进积的气候干燥期，也有可能在局部地区有植被生长并在砂丘中留下根孔。西石 1 井报道井深 4.5~4.9m 钻遇一层古土壤，此次在西石 2 井 D2 砂丘中部发现的根管孔从深度看与该层古土壤相近。考虑到 D2 砂丘下部亦见到根孔，说明石岛在沙丘发育期仍然有在局部地区生长植被的条件。

在石岛北部，砂丘层 D2 的发育可分为两个阶段（如图 4a）：下部以类似背斜构造的穹形砂丘为主，可见到 3 个相隔较近的穹形砂丘发育，但这些砂丘的底部已被后期礁坪掩埋，出露不完整；上部砂丘层以大型平行层理和低角度斜层理为主，厚约 2~4m，两期砂丘沉积间发育清晰的侵蚀界面（如图 4b）。由北而南，下部的穹形砂丘层逐渐没于水下，显示当时沙丘地形的起伏；其上以平行层理为主的砂丘层则逐渐向发育高角度进积斜层理的砂丘翼部转变。在石岛西海岸中段，陡立的崖壁均由连续进积的砂丘翼部构成，由北往南连续推进超过 100m（图 4c, 4d），顶部为相对平整的夷平面。在岛屿东部的海岸上，D2 砂丘主要以低角度斜层理为主，局部地区发育交错层理（图 4e, 4f），与西海岸砂丘的形态显著不同，但同样未见到 D2 的底界出露。

第 3 层砂丘（D3）仅见于西石 2 井，位于 PS2 古土壤之下，位于井深 12.2~21.5m，厚 9.3m。钻井岩芯中该层砂丘中、上部均破碎成松散砂屑，不显层

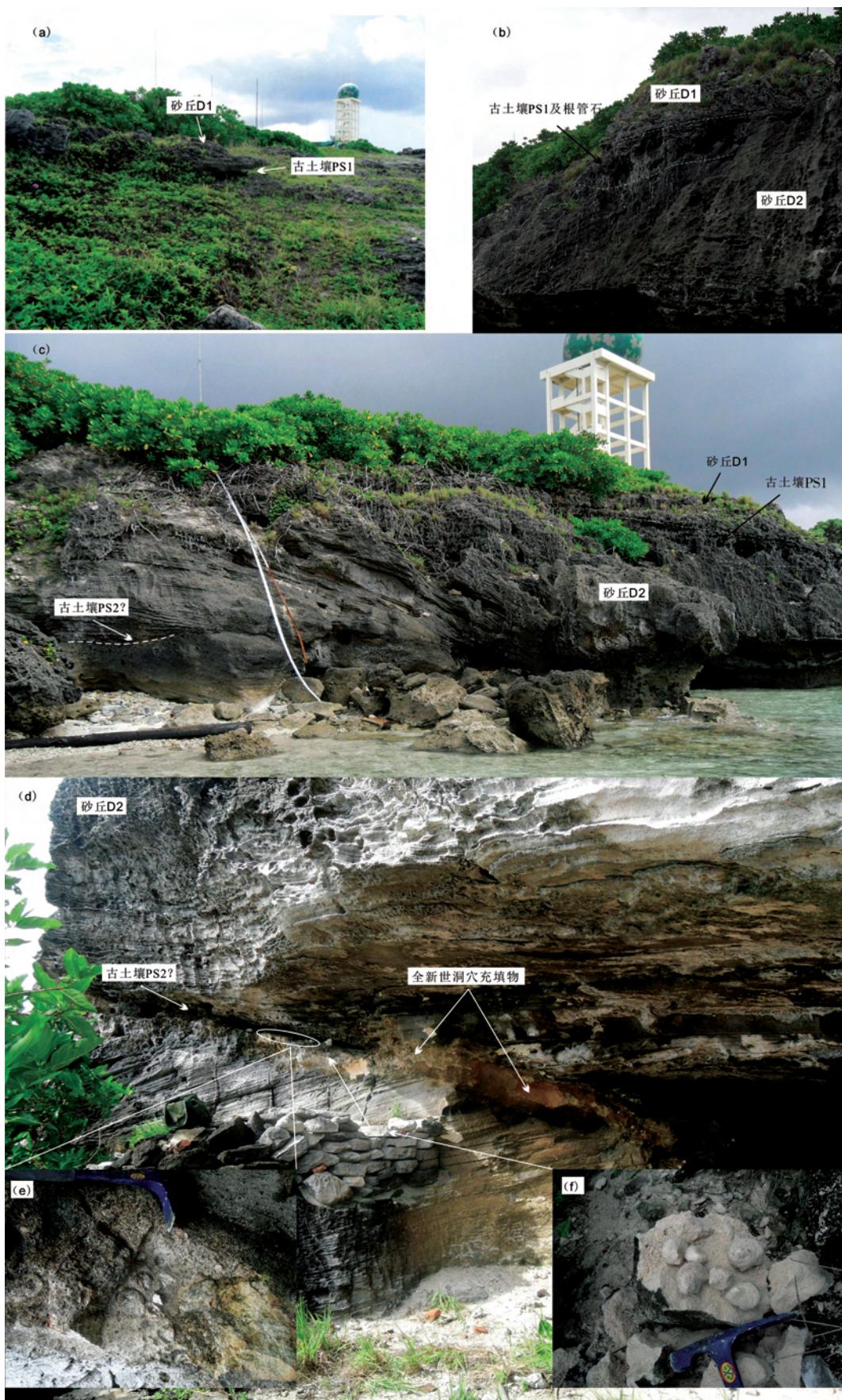


图3 石岛西海岸露头特征

Fig.3 Outcrops along the west coast of Shidao Island



图4 砂丘层D2沉积特征

Fig.4 Sedimentary characteristics of D2 layer of dunes

理,胶结作用非常微弱。碎屑颗粒以中、粗粒为主,含有弱固结团块,手捏即碎。底部厚约1m的岩芯破碎成块状,粒度较细,胶结程度相对略好于中、上部,但仍不够致密,疏松多孔,手捏可碎。D3底部为风化壳,覆于末次间冰期礁坪砾屑灰岩之上,显示二者间的风化间断。

3 风成沉积的形成年代

石岛风成沉积历经数十年的研究,已经积累了近百个测年数据^[12],这些测年结果均指示石岛风成沉积形成于末次冰期,但精确度较差。早期研究人

员依据少量¹⁴C年龄数据,认为石岛沉积具有“上老下新”的现象。后来发现,成岩胶结物中新碳的混入,会使样品的¹⁴C年龄偏轻^[13,22]。随着大量数据的积累,可发现石岛的年龄数据并非是简单的“上老下新”,而是混杂错乱^[12]。业渝光等、陈以健等尝试用ESR方法进行测年并对¹⁴C年龄进行校正^[23,24],但ESR方法本身误差过大,且同样面临着因成岩作用影响而偏轻的问题,从测年结果来看并不理想。何起祥等利用西石1井的δ¹⁸O曲线,并通过与格陵兰冰心的δ¹⁸O曲线进行了对比来推测石岛风成沉积序列的δ¹⁸O年龄^[25];但陈以健等^[24]认为,由于风成沉积中含有较多(40%~50%)高δ¹⁸O值的浅水

瓣鳃类、有孔虫和绿藻类,这可能推高了风成沉积序列的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,并且样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值极易受成岩作用的干扰^[26],因而通过与冰心 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线对比获得的 $\delta^{18}\text{O}$ 年龄并不可靠。而古土壤中蜗牛壳的U/Th年龄不仅与ESR和 ^{14}C 年龄差距巨大,可能因成壤化作用而偏老^[16]。截至目前,通过直接测年的方法尚未得到石岛较为可靠的年龄。

石岛风成沉积主要在大气淡水淋滤作用下固结成岩^[26],后期胶结物与生物碎屑颗粒致密固结在一起,难以分离,况且生物碎屑颗粒还普遍发生部分淋溶与矿物的新生变形作用,而早期的测年样品又基本采自野外露头,不可避免会发生测年结果偏轻的现象。在西石2井的钻井岩芯中,钻遇部分胶结很弱的层位(特别是D3砂丘层),岩芯破碎后碎屑颗粒之间相互分离,颗粒表面光滑,如同现代海滩上的松散砂屑,显示胶结作用非常微弱,大大降低了后期胶结物的影响。

测年样品采自岩芯中胶结相对较弱的10个层位,用蒸馏水反复冲洗,烘干,在体视镜下选取表面光滑、干净且不易发生新生变形的介壳类碎屑送Beta实验室进行 ^{14}C 测年。古土壤的测年主要利用其中的蜗牛化石,由于岩芯中蜗牛化石数量较少,主要利用野外剖面上的蜗牛化石来测定古土壤的年龄。

样品测年结果如图5所示。在之前的 ^{14}C 测年数据中,大多数样品的年龄介于1~2万年之间,仅有少数砂丘顶部样品的年龄在2万年以上,且没有一个样品的年龄达到3万年。而此次10个砂丘样品中除了2个样品的年龄小于3万年外,其余均在3万年以上,其中最老的校正年龄为35995~36795cal.aBP(传统年龄为32900±210aBP)(井深15.6~15.7m)(图5)。该结果将石岛风成沉积的 ^{14}C 年龄大大提前,进一步确认了石岛风成沉积形成于末次冰期的气候背景下。

根据石岛早期的 ^{14}C 测年数据的统计结果,顶部砂丘的测年结果相对最老且基本都在1.5万年以上,且多数在2.0万年前后^[12],考虑到这些年龄还会因碳酸盐岩的成岩蚀变作用而偏轻,由此推断石岛顶部D1砂丘最晚在1.5万年之前便已形成,而在2万年之前便开始发育。此次西石2井顶部(0~0.1m)测得一个相对较老的年龄(32740~33520cal.aBP,传统年龄29340±150aBP)。如前所述,我们在西石2井井深0.9~1.1m处发现多个砾屑,由石英、长石等硅质砂屑颗粒被钙质胶结而成,砾径1~4cm。这绝非西沙原地产物,推断为后期人类建设活动混入物。同时也表明钻井所在的浅表层

地层序列可能已被人类建设活动破坏,而所测得的钻井岩芯表层0~0.1m的年龄已不能代表地层的真实年龄。

古土壤PS1中的测年结果为31035~31290cal.aBP(传统年龄27640±130aBP)(取样深度1.8~1.9m),其中3处蜗牛化石的测年结果分别为18840~18950cal.aBP(传统年龄15810±60aBP)、19015~19380cal.aBP(传统年龄16340±50aBP)和20090~20290cal.aBP(传统年龄16960±60aBP)。蜗牛化石采自PS1古土壤不同部位,由于单个蜗牛壳无法满足测年所需,每处均选送了多个蜗牛壳,它们采自古土壤不同层位,因此所得到的实际是一个蜗牛化石的混合年龄,其年龄范围为15810~20290cal.aBP。结果显示,PS1生物砂屑测年结果比蜗牛化石偏老约1万年。作为后来的产物,蜗牛化石的年龄小于PS1土壤样品年龄本属正常现象,但PS1中蜗牛化石指示的年龄为末次盛冰期阶段,理论上在这一阶段更可能发育砂丘而非古土壤。况且,PS1之上的D1砂丘早在2万年之前便开始发育,PS1的年龄只可能更早。另外,测年蜗牛化石均采自古土壤浅表层甚至裸露在外,遭受过长期的侵蚀风化及大气降水淋滤,其年龄的可靠性值得怀疑。综合判断,我们认为以PS1生物砂屑的测年结果(27640±130aBP)来代表古土壤PS1的年龄更为可靠。由此,推测D1砂丘可能形成于15~25kaBP间的末次盛冰期,而PS1则发育于末次盛冰期之前的一个暖湿阶段。

D2砂丘上(采样井深3.2~3.35m)、中(采样井深6.3~6.4m)、下部(采样井深9.6~9.7m)3个样品的年龄分别为27195~27465cal.aBP(传统年龄23420±90aBP)、21830~22195cal.aBP(传统年龄18570±60aBP)和30785~31045cal.aBP(传统年龄27150±120aBP),自上而下先变新再变老。D2砂丘的钻井岩芯胶结致密,其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有强烈负偏的特征(图5),表明D2砂丘经历了较为强烈的成岩作用。因此,其测年结果可能要比地层实际年龄偏轻。D2砂丘是石岛上最重要的一层砂丘,其最典型特征是在石岛西部海岸发育连续上百米的高角度进积斜层理,厚度和规模远远超过D1砂丘。西石2井位于石岛南部,D2砂丘进积斜层理的前缘,根据D2砂丘在石岛西海岸的进积形态(图4c,d),钻井岩芯仅能揭示D2砂丘晚期很小一部分沉积序列(图6),钻井岩芯砂丘样品的测年结果未必能准确代表地层的实际年龄,还需要根据地层展布情况仔细分析。根据测年数据,我们推测D2砂丘

至少形成于3万年以前。

PS2古土壤上、下的砂屑灰岩的¹⁴C年龄在3万年左右(图5),指示与PS1古土壤基本同期,这凸显了样品的测年结果依然存在问题。D3砂丘顶、底¹⁴C测年结果均为31kaBP左右,而中部测得最老的年龄(井深15.4~15.5m,35995~36795cal.aBP,传统年龄32900±210aBP),同样说明测年结果受到了后期成岩作用或新生变形作用的干扰,特别是D3砂丘底部样品成岩蚀变特别明显。D3砂丘上部与中部的岩芯胶结作用最微弱,岩芯完全破碎成松软砂屑,测年结果受后期胶结物的影响较小。二者测年结果相差约5000年(上部新,中部老)(取样位置见图5),即便考虑到后期新生变形、重结晶等成岩作用的影响,D3中部的样品由于形成更早而受到更多的影响,理应更为“偏轻”,从而导致测年结果的年

龄差要小于地层真实年龄差。因此,D3砂丘的上部与中部显示的5000年的年龄差是可信的。由此推断,D3中上部砂丘的发育期超过5000年,而D3整个砂丘的发育期则可能达到1万年。

总之,此次测年结果由于采用生物碎屑测年,有效避免了后生成岩胶结物的影响,从而将石岛风成沉积的¹⁴C测年结果整体增加了约1万年,多个样品的测年结果在3万年以上。测年结果依然受到成岩作用的影响,测年数据与地层新老关系不匹配,不能判定各期砂丘与古土壤的准确的发育时间。D3砂丘的测年结果显示,D3上部砂丘的发育期在5000年以上,完整的发育期可能达到1万年;同理,规模较大的D2砂丘的发育期也可能达到10000年。从现有测年数据推断,石岛风成沉积至少在4万年之前便开始发育。

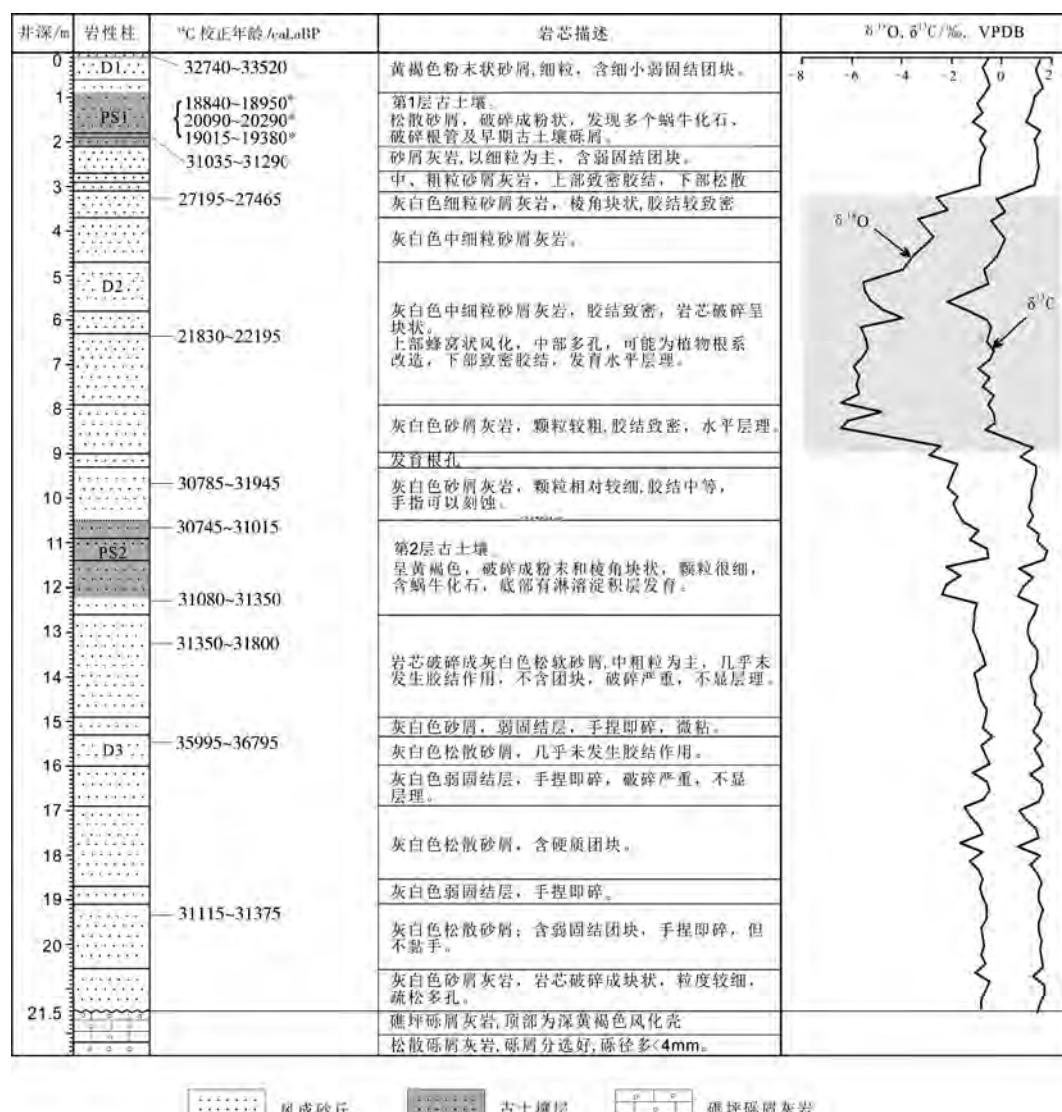


图5 西石2井综合柱状图

Fig.5 Integrated stratigraphic column of well Xishi-2

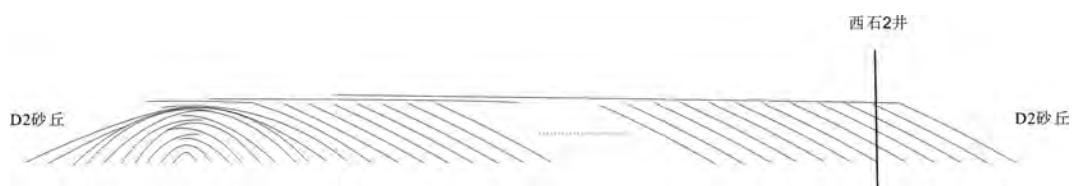


图 6 西石 2 井钻井岩芯在 D2 砂丘地层序列中的位置(据图 4a-d)
Fig.6 Location of drilling well Xishi-2 and penetrated sequence of aeolian dunes

4 石岛风成沉积与同期黄土沉积对比

石岛风成沉积是末次冰期东亚季风的产物,记录的也是东亚季风末次冰期的气候变化,砂丘的进积方向显示东北向的冬季风是其主要的驱动力^[16]。由于测年结果无法直接给出石岛风成沉积序列的准确的形成时代,我们便尝试在东亚季风区内从区域对比的角度来揭示石岛风成沉积序列的形成时代及其发育机理。

在早期的研究中^[12],作者曾将石岛风成沉积的砂丘与古土壤分别看作是末次冰期内千年尺度的冷干和暖湿期气候事件的产物,并与末次冰期华南洞穴石笋的氧同位素曲线进行对比,以推测其可能的形成时代。由于末次冰期含有十几期暖期事件(D-O1—D-O17),而石岛仅有“4 层”古土壤(据西石 1 井)发育,二者完全无法匹配。于是推测石岛的 4 层古土壤可能是相对长期的暖期事件,即 D-O4(29000 ~ 30000aBP)、D-O8 (36300 ~ 38000aBP)、D-O12 (45800 ~ 46800aBP) 和 D-O16-17 (56200 ~ 58100aBP)期间发育起来的。这一推断的认识基础是把石岛风成沉积中古土壤的发育看作短暂的偶发性事件,是末次冰期背景下发育的砂丘的陪衬,代表冷干气候背景下出现的短暂的暖湿期,于是古土壤的发育期便远小于砂丘的发育期。按照这一认识,石岛中的砂丘与古土壤旋回便不能被看作是具有稳定周期的气候旋回事件。

西沙海域位于东亚季风区的南部,末次冰期期间,东亚季风最重要的沉积产物是我国黄土高原广布的“马兰黄土”(L1 黄土层)。西沙和黄土高原分别位于东亚季风的南、北两端,尽管两地跨越 20 个纬度,相隔数千里,分处热带和温带,但山东荣成的

柳夼红层^[27,28]、长江中下游的下蜀黄土^[29,30]以及华南沿海的老红砂岩^[31-35]也都是东亚季风末次冰期风成沉积的产物,它们以黄土与古土壤、红色砂层与土壤黏土或者红、黄砂层的交替代表了末次冰期期间东亚季风的干、湿气候旋回,可视为西沙与黄土高原之间的连续过渡,并且各剖面的测年数据显示它们之间是可以对比的(图 7)。这充分表明,末次冰期的冷干期,当强劲的东北季风在黄土高原沉积黄土时,其前锋同时也将长江沿岸的沙土堆成黄土,将华南沿海以及西沙石岛的海滩沙塑造成沙丘;而当末次冰期中的相对暖湿期到来时,黄土高原中南部尚且能成壤,华南及西沙石岛则更易成壤,西沙石岛的末次冰期的成壤期应比黄土高原只长不短。

实际的对比亦表明,L1 黄土在高原的大部分地区都可分为 5 个次级阶段^[36],为 3 个冷干期夹 2 个相对暖湿期,其中的 2 个暖湿期在高原南部的渭南、洛川、宝鸡等地形成了 1~2 层弱发育的次级古土壤^[37-39],而在黄土高原北部的榆林地区形成了砂丘中的黄土夹层^[40,41]。西沙石岛则以 3 层砂丘与 2 层古土壤的序列同样记录了东亚季风末次冰期期间 5 个次级阶段的干、湿变化,与东亚季风在黄土高原 L1 黄土中的 5 个次级气候旋回刚好一一对应(图 7)。这说明位于东亚季风南、北部的风成沉积产物对东亚季风末次冰期期间的次级气候变化作出了基本同步的沉积响应。

测年数据表明,黄土高原 L1 黄土中的 5 个次级气候旋回显示清晰的岁差周期,并且岁差周期在华南洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线中也有清晰记录^[42-44]。因此,石岛风成砂丘与古土壤所记录的干、湿气候旋回也可能对东亚季风末次冰期期间岁差尺度气候干、湿变化的沉积响应。

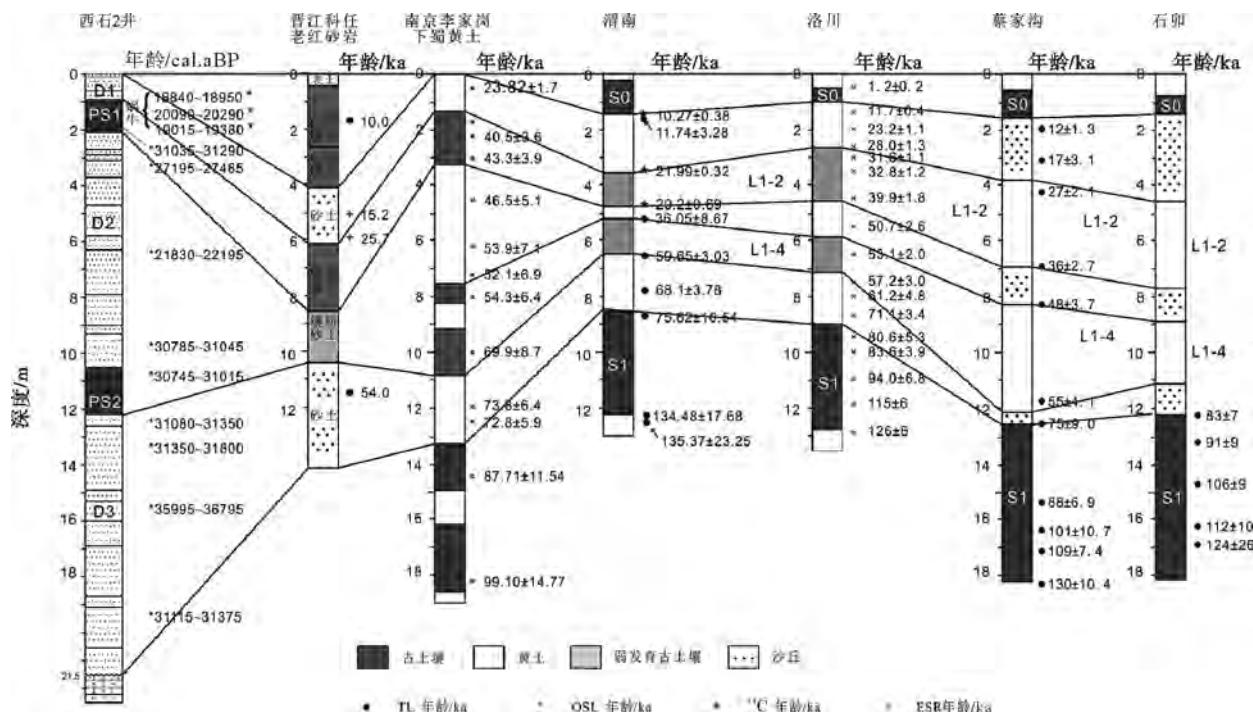


图7 西石2井风成沉积序列与黄土高原L1黄土的对应关系
Fig.7 Correlation between the aeolian sequences in well Xishi-2 and loess layer L1 in the Chinese Loess Plateau

5 结论

根据野外考察结果及新取得的钻井岩芯资料,对西沙石岛风成沉积序列进行了重新的地层划分,认为石岛末次冰期风成沉积序列由3期砂丘与2层古土壤组成。石岛末次冰期风成砂丘与古土壤旋回与黄土高原末次冰期L1黄土的5个次级气候阶段刚好一一对应,都是对东亚季风末次冰期内岁差尺度的气候干、湿变化的直接响应。

致谢:野外考察过程中得到了三沙市政府及石岛驻岛官兵的大力支持,以及中石油杭州地质研究院张建勇、中科院南海海洋研究所黎大宁等人的友好帮助;成文过程中得到了中科院深海科学与工程研究所吴时国老师的多次鼓励和指导,在此一并致谢!

参考文献(References)

- [1] 穆恩之.西沙群岛永兴岛与石岛地质述略[J].地质论评,1948(Z1):159.[MU Enzhi. Geology survey of Yongxingdao and Shidao Islands[J].Geological Review, 1948(Z1):159.]
- [2] 陈俊仁.我国南部西沙群岛地区第四纪地质初步探讨[J].地质科学,1978(1):45-56,97.[CHEN Junren. A preliminary discussion on quaternary geology of Xisha Qundao islands of South China[J]. Scientia Geologica Sinica,1978,1:45-56,97.]
- [3] 黄金森,朱袁智,沙庆安.西沙群岛现代海滩岩岩石学初探[J].地质科学. 1978,4:358-363.[HUANG Jinsen, ZHU Yuanzhi, SHA Qingan. Preliminary study of petrology on recent beach-rocks in the Xisha Islands, Guangdong province[J]. Scientia Geologica Sinica,1978,4:358-363.]
- [4] 卢寅传,杨学昌,贾荣芬.我国西沙群岛第四纪生物沉积物及成岛时期的探讨[J].地球化学,1979(2):93-102.[LU Yinchou, YANG Xuechang, JIA Rongfen. Geochimica. Quaternary biological sediments in the Xisha Archipelago, China and a discussuon on the age of island-formation[J]. Geochimica, 1979(2):93-102.]
- [5] 朱袁智,钟晋樑.西沙石岛和海南岛沙丘岩初探[J].热带海洋, 1984, 3(3):64-71.[ZHU Yuanzhi, ZHONG Jinliang. A prelimentary study on the dune rock of Shidao Island, Xisha Islands and Hainan Island[J]. Tropic Oceanology, 1984,3(3): 64-71.]
- [6] 沙庆安.西沙永乐群岛珊瑚礁一瞥[J].石油地质与天然气地质, 1986, 7(4):412-417.[SHA Qingan. A glimpse of coral reefs of the Yongle Islands, Xisha Archipelago[J]. Oil & Gas Geology, 1986,7(4):412-417.]
- [7] 陈以健,焦文强.西沙群岛石岛的放射性碳剖面:近代地壳运动的证据[J].海洋地质研究,1982,2(2):27-37.[CHEN Yijian, JIAO Wenqiang. Radiocarbon profiles of the Rocky Islet, Xisha Islands: Evidence of recent crustal movement[J]. Marine Geological Research,1982,2(2):27-37.]

- [8] 业治铮,张明书,韩春瑞,等.西沙石岛风成石灰岩和化石土壤层的发现及其意义[J].海洋地质与第四纪地质,1984, 4(1):1-10. [YE Zhizheng, ZHANG Mingshu, HAN Chunrui, et al. 1984. A new discovery on Shidao Island of Xisha Archipelago: eolianite (eoliancalcarenite) and fossil soils[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1984, 1: 1-10.]
- [9] 业治铮,何起祥,张明书等.西沙群岛风成生物砂屑灰岩的构造特征及相模式[J].沉积学报,1985, 3 (1): 1-15. [YE Zhizheng, HE Qixiang, ZHANG Mingshu, et al. 1984. The sedimentary structures and the facies model of the Late Pleistocene eolian biocalcarenites in Shidao Island of Xisha Archipelago[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985,3(1):1-15.]
- [10] YE Zhizheng, HE Qixiang, ZHANG Mingshu, et al. Sedimentary structure and the facies models of the late Pleistocene eolian biocalcarenites in Shidao Island of Xisha Archipelago[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985.4 (4): 603-604.
- [11] 吕炳全,王国忠,全松青.西沙群岛灰沙岛的沉积特征和发育规律[J].海洋地质与第四纪地质,1987,7(2):59-70.[LV Bingquan, WANG Guozhong, QUAN Songqing. Sedimentary characteristics and evolutionary pattern of the sand cays in the Xisha Islands[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1987,7(2):59-70.]
- [12] ZHAO Qiang, WU Shiguo, XU Hong, et al. Sedimentary facies and evolution of aeolianites on Shidao Island, Xisha Islands[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011,29(2):398-413.
- [13] 吕炳全,王国忠,全松青,等.试论西沙群岛石岛的形成[J].地质科学, 1986 (1): 82-89, 102. [LV Bingquan, WANG Guozhong, QUAN Songqing, et al. Apreliminary study of the formation of Shidao Island, Xisha islands[J]. Scientia Geologica Sinica,1986(1):82-89,102.]
- [14] 何起祥,张明书.中国西沙礁相地质[M].北京:科学出版社, 1986.[HE Qixiang,ZHANG Mingshu. Xisha Reef Geology of China[M]. Beijing: Science Press, 1986.]
- [15] 张明书,何起祥,业治铮,等.西沙生物礁碳酸盐沉积地质学研究[M].北京:科学出版社,1989.[ZHANG Mingshu, HE Qixiang, YE Zhizheng, et al. Reef Carbonate Sedimentary Geoloy Research on Xisha Islands [M]. Beijing: Science Press,1989.]
- [16] 张明书,何起祥,等.西沙礁相第四纪地质[C]//地质矿产部海洋地质研究所集刊(一).山东科学技术出版社,1987;189-321. [ZHANG Mingshu, HE Qixiang, et al. The Quaternary reef geology of Xisha Islands[C]//Marine Geology Institute Collection, Ministry of Geology and mineral resources (1).Shandong Science and Technology Press,1987:189-321.]
- [17] 王国忠.南海珊瑚礁区沉积学[M].北京:海洋出版社, 2001. [WANG Guozhong. Sedimentology of the Coral Reefs in the South Chin Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2001.]
- [18] 赵焕庭.西沙群岛考察史[J].地理研究,1996(4):55-65. [ZHAO Huanting. History of expeditions to Xisha Islands [J]. Geographical Research,1996(4):55-65.]
- [19] HE Qixiang, ZHANG Mingshu, YE Zhizheng. Sedimentary facies if reef deposits in the Xisha Islands, China[C]//Proceedings of the First International Conference on Asian Marine Geology. Shanghai, September 7-10. China Ocean Press, Beijing,1990:277-290.
- [20] 冯伟民,余汶.西沙群岛石岛晚更新世碳酸盐土壤层陆栖蜗牛化石[J].海洋地质与第四纪地质,1991,11(3):69-74,131-132. [FENG Weimin, YU Wen. Terrestrial snail fossils in soil layers of Late Pleistocene biocalcarenite in the Shidao Island of the Xisha Islands[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,1991,11(3):69-74,131-132.]
- [21] 魏喜,贾承造,孟卫工,等.西沙群岛石岛根管石特征、成因及地质意义[J].岩石学报,2008,24(10):2415-2422.[WEI Xi, JIA Chengzao, MENG Weigong, et al. Characteristics, origin and geological significance of rhizolith in Shidao of Xisha Islands[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (10): 2415-2422.]
- [22] 业渝光,王雪娥,刁少波.西沙群岛石岛¹⁴C年代数据可靠性的初步研究[J].海洋地质与第四纪地质,1987,7(2):121-130. [YE Yuguang, WANGXuee, DIAO Shaobo. A preliminary study on the reliability of radiocarbon age from Shidao Island of Xisha Archipelago[J].Marine Geology&.Quaternary Geology,1987,7(2):121-130.]
- [23] 业渝光,和杰,刁少波,等.西沙石岛风成岩的ESR和¹⁴C年龄[J].海洋地质与第四纪地质,1990, 10(2):103-110.[YE Yuguang, HE Jie, DIAO Shaobo. ¹⁴C and ESR ages of eolian calcarenite from Shidao Island of Xisha Islands[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,1990,10(2):103-110.]
- [24] 陈以健,卢景芬,蔡同茂,等.西沙珊瑚砂屑灰岩的ESR年龄测定[J].地质论评,1988,34(3): 254-262. [CHEN Yijian, LU Jingfen. ESR dating of coral-fragment limestone from the Xisha Islands[J]. Geological Review,1988,34(3): 254-262.]
- [25] 何起祥,张明书,业治铮,等.西沙群岛石岛晚更新世碳酸盐沉积物的稳定同位素地层学[J].海洋地质与第四纪地质, 1986, 6 (3): 1-7. [HE Qixiang, ZHANG Mingshu, YE Zhizheng, et al. Carbon and oxygen isotope stratigraphy of Late Pleistocene carbonate deposits at Shidao Isand, Xisha Islands, China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1986, 6(3): 1-7.]
- [26] 赵强,许红,吴时国,等.西沙石岛风成碳酸盐沉积的早期成岩作用[J].沉积学报,2013,31(2):220-236.[ZHAO Qiang, XU Hong, WU Shiguo, et al. Early diagenesis of Late Pleistocene aeolian carbonate sediment on Shidao Island, Xisha Islands [J]. Acta Sedimentologica Sinica,2013,31(2):220-236.]
- [27] 张明书,刘健.山东荣成成山头“柳夼红层”的层序、划分与成因及其气候意义(I)[J].海洋地质与第四纪地质,1992,12 (1):73-83. [ZHANG Mingshu, LIU Jian. The sequence,division, genesis and climatic implication of “ Liukuang red beds” in Chengshantou, Rongcheng County, Shandong Province (I) [J]. Marine Geology & Quaternary Geology,1992, 12(1):73-83.]
- [28] 张明书,刘健.山东荣成成山头“柳夼红层”的层序、划分与成因及其气候意义(II)[J].海洋地质与第四纪地质,1992,12 (2):53-64. [ZHANG Mingshu, LIU Jian. The sequence,division, genesis and climatic implication of “ Liukuang red beds” in Chengshantou, Rongcheng County, Shandong Province (II) [J]. Marine Geology & Quaternary Geology,1992, 12(2):53-64.]

- beds" in Chengshantou, Rongcheng County, Shandong Province (II) [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1992, 12(2):53-64.]
- [29] 黄姜依,方家骅,邵家骥,等.南京下蜀黄土沉积时代的研究[J].*地质论评*,1988,34(3):240-247. [HUANG Jiangnong, FANG Jiahua, SHAO Jiaji, et al. Study of the deposition age of the Xiashu loess in Nanjing[J]. *Geological Review*, 1988, 34(3):240-247.]
- [30] 张茂恒,孟景闻,夏应菲,等.最近11万年来东亚季风轨道与千年尺度气候变率在南京下蜀黄土中的记录[J].*地层学杂志*,2011,35(3):321-327. [ZHANG Maoheng, MENG Jingwen, XIA Yingfei, et al. Orbital and millennial scale periodicity of Eastern Asian monsoon variation during the past 110ka recorded in the Xiashu loess[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2011,35(3):321-327.]
- [31] 胡凡根,李志忠,靳建辉,等,福建东部海坛岛老红砂敏感粒度组分对东亚冬季风演变的响应[J].*中国沙漠*,2013,23(2):443-452. [HU Fangen, LI Zhizhong, JIN Jianhui, et al. Response of environmentally sensitive grain size components of Old Red Sand in QF section from Haitan Island of Fujian Province to East Asian winter monsoon evolvement[J]. *Journal of Desert Research*, 2013,23(2):443-452.]
- [32] 李志文,李保生,孙丽,等.中国东南沿海老红砂岩的研究现状与展望[J].*中国沙漠*,2011,31(1):49-57. [LI Zhiwen, LI Baosheng, SUN Li, et al. Overview and prospect of research on Old Red Sand along southeast coast of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2011,31(1):49-57.]
- [33] 谭惠忠,吴正.闽粤沿海老红砂的热释光测年[J].*中国沙漠*,2001,21(4):393-396. [TAN Huizhong, WU Zheng. The dating of the "Old Red Sand" on the coasts of Fujian and Guangdong[J]. *Journal of Desert Research*, 2001,21(4):393-396.]
- [34] 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. [WU Zheng, WANG Wei. Fingding and significance of "Old Red Sand" strata with multiple depositional stages on the coasts of Fujian and Guangdong[J]. *Journal of Desert Research*, 2001,21(4):328-332.]
- [35] 吴正,王为,谭惠忠,等.闽南粤西沿海老红砂的沉积年代[J].*科学通报*,2000,45(5):533-537. [WU Zheng, WANG Wei, TAN Huizhong, et al. The deposition age of "Old Red Sand" on coasts of Fujian and Guangdong[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000,45(5):533-537.]
- [36] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stepwise expansion of desert environment across northern China in the past 3.5 Ma and implications for monsoon evolution [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2005, 237(1-2):45-55.
- [37] 安芷生,吴锡浩,汪品先,等.最近130ka中国的古季风-II.古季风变迁[J].*中国科学*,1991b, 21(11):1209-1215. [AN Zhisheng, WU Xihao, WANG Pinxian, et al. The Paleomonsoon of China since 130ka-II. Paleomonsoon Variations[J]. *Science China*, 1991, 21(11):1209-1215.]
- [38] 郭正堂,刘东生,安芷生.渭南黄土沉积中十五万年来的古土壤及其形成时的古环境[J].*第四纪研究*,1994,14(3):256-269. [GUO Zhengtang, LIU Tungsheng, AN Zhisheng. Palaeosols of the last 0.15 Ma in the Weinan loess section and their paleoclimatic significance [J]. *Quaternary Sciences*, 1994,14(3):256-269.]
- [39] Lv Houyuan, Wu Naiqin, Liu Tungsheng, et al. Seasonal climatic variation recorded by phytolith assemblages from Baoji loess sequence in central China over the last 150000a [J]. *Science in China(Series D)*,1996,26(6): 629-639.
- [40] 孙继敏,丁仲礼.近13万年来黄土高原干湿气候的时空变迁[J].*第四纪研究*, 1997, 17(2):168-175. [SUN Jimin, DING Zhongli. Spatial and temporal changes of dry and wet climate during the last 130000 years in the loess plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 1997,17(2):168-175.]
- [41] 董光荣,李保生,高尚玉,等.鄂尔多斯高原的第四纪古风成沙[J].*地理学报*, 1983(4):341-347. [DONG Guangrong, LI Baosheng, GAO Shangyu, et al. The Quaternary eolian sands in the Ordos Plateau [J]. *Geography Journal*, 1983(4):341-347.]
- [42] Cheng H, Edwards R, Broecker W, et al. Ice age terminations[J]. *Science*,2009,326: 248-252.
- [43] Wang Y, Cheng H, Edwards R, et al. Millennial-and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years[J]. *Nature*, 2008, 451:1090-1093.
- [44] Yuan D, Cheng H, Edwards R, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon[J]. *Science*, 2004,304:575-578.