

基于 GPR 图像的福建长乐海岸沙丘沉积构造与海岸环境演变

邓 涛^{1,2}, 李志忠^{1,2,3}, 靳建辉^{1,2,3}, 姜 锋^{1,2}, 赖海成^{1,2}, 申健玲^{1,2},
于晓莉^{1,2}, 苑秀全^{1,2}

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福建福州 350007; 3. 福建师范大学 地理研究所, 福建 福州 350007)

摘要: 为了探讨福建长乐东部海岸环境演变, 运用探地雷达(GPR)探测了研究区海岸沙丘的沉积构造, 初步得出以下结论: (1)研究区海岸沙丘沉积构造主要由海滩沉积和海岸沙丘沉积构成, 其中下伏沉积为海滩波浪作用形成的波状交错层理, 上覆沉积为风成大角度倾斜的交错层理以及局部的水平层理; (2)上部发育的倾向向背的大角度风成交错层理, 反映了研究区丰富的沙源、宽阔的海滩、植被扩张的进积海岸特点; (3)从沉积序列分析, 研究区海岸地貌环境演变经历了早期的滨岸浅海到晚期的海岸沙丘带两个阶段, 反映了海岸向东的进积过程中, 外力作用由波浪作用为主演变为风沙沉积作用为主。

关键词: 探地雷达(GPR); 海岸沙丘; 沉积构造; 海岸环境; 长乐

中图分类号: P92 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)05-0088-09

doi: 10.11759/hyxx20150614001

海岸沙丘是形成于陆地、海洋和大气系统交界面的相当复杂的现象^[1-3], 海岸沙丘的沉积构造类型及其组合特征, 反映了砂质海岸特有的沉积相和沉积环境。因此, 海岸沙丘是重建海岸环境演变历史的重要载体。以往对海岸沙丘沉积构造的研究, 大多依赖于天然侵蚀剖面、人工探槽的直接观察和钻孔地层资料的综合分析获得, 20 世纪 90 年代以来, 探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)被广泛运用于探测沙丘的沉积构造。

探地雷达是用高频电磁波来确定介质内部物质分布规律的一种地球物理探测方法, 具有高效率、无损探测、探测深度较深等优越性, 不少学者已经运用 GPR 探测研究了海岸沙丘的沉积构造。例如 Bristow 等^[4]采用 GPR 获取了英国东部诺福克郡北部进积型海岸海岸前丘的 GPR 图像并据此解译了海岸前丘的沉积构造和演变。Pedersen 等^[5]以 GPR 为主要研究手段采集了丹麦日德兰半岛西北部海岸沙丘分布区总长约 16 km 的 GPR 剖面, 并结合钻孔资料和 ¹⁴C 年龄分析了该地区全新世风沙景观的变化过程。González-Villanueva 等^[6]综合运用 GPR、历史航空像片以及钻孔资料研究了西班牙西北部 Traba 海岸沙丘上的槽状风蚀洼槽和碟形风蚀洼槽的演变。Tamura 等^[7]借助 GPR 探测了日本海沿岸鸟取海岸沙丘的沉积构造, 并结合光释光测年研究了该地区海岸沙丘的建造过程。Trivedi 等^[8]采用 GPR 对印度嘎

奇湾沿岸的海岸沙丘进行了探测, 综合粒度分析, 解释了研究区海岸沙丘的起源。Buynevich 等^[9]报道了 GPR 在巴西北部赤道附近 Atalaia 海岸一个入侵海岸森林的抛物线沙丘内部构造探测中的应用。Dougherty^[10]运用 GPR 探测了新西兰北部 Omaha 进积障壁沙嘴现代海滩和海岸沙丘的沉积构造, 并从 GPR 图像中提取了 25 个全新世风暴侵蚀-沉积界面。

中国现代海岸沙丘分布广泛, 从北方温带半湿润地区到南方亚热带及热带湿润地区的海岸带都有分布。其中, 福建最大的河流——闽江入海口南侧的长乐海岸是中国海岸沙丘的主要分布区之一^[11-15]。前人在长乐海岸沙丘的成因、分布、形态、结构、构造与发展演变等方面做了不少研究^[16-29], 李从先等^[16]报道了福建长乐文武砂海岸沙丘中的高角度交错层理、低角度交错层理、楔状层理、发散状层理等层理类型; 刘建辉^[26]、杨锐^[29]通过观察野外天然露头

收稿日期: 2015-06-14; 修回日期: 2015-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271031, 41301012, U1405231); 福建省自然科学基金项目(2013J01153, 2014J01151)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271031, No.41301012, No.U1405231; Provincial Natural Science Foundation of Fujian, No.2013J01153, 2014J01151]

作者简介: 邓涛(1989-), 男, 福建宁化人, 硕士研究生, 主要从事地貌过程与环境演变研究, 电话: 15259841905, E-mail: dt_2158@126.com; 李志忠, 通信作者, 教授, 博士, 主要从事地貌过程与环境演变研究, 电话: 13799382329, E-mail: lizz@fjnu.edu.cn

和人工剖面发现了福建长乐海岸沙丘中的板状交错层理、楔状交错层理、水平层理、准同生变形构造(扭曲层理)等层理类型。但目前长乐海岸沙丘沉积构造研究大多只涉及浅表层、局部的沉积构造,缺少连续的、较大深度的海岸沙丘沉积构造信息,妨碍了对海岸沙丘整体沉积构造和沉积环境的认识。本文以探地雷达(GPR)作为主要研究手段,在较大范围、较大深度上获得了福建长乐海岸沙丘连续的沉积构造信息,并据此初步探讨了研究区海岸环境的演变。

1 研究区概况

研究区位于福建省长乐市滨海平原东部、闽江入海口南侧,现代地貌类型为宽阔低平的海积平原或风积平原(图 1)。闽江是中国东南沿海最大的河流,水

量丰富,多年(1950~2010年)平均年径流量 573.9 亿 m^3 ,多年(1950~2010年)平均年输沙量 637 万 $t^{[30]}$ 。闽江口的沿岸流和波浪的运动方向和季风有明显的关系。波浪为风浪和涌浪形成的混合浪,方向以 NNE-ENE 为主,近岸海流在 10 月至翌年 5 月流向 S-SW 向,7~8 月为 N-NE 向,6 月和 9 月为过渡期。闽江大量的入海泥沙在波浪和南下浙闽沿岸流的作用下向南沿海岸带运移,并形成闽江口南岸典型的堆积型砂质海岸。该段海岸地势平坦,潮差大(平均值 4.5 m,最大值 7 m),退潮后可形成宽广的砂质海滩(宽 250~500 m,坡度 $0.5^{\circ}\sim 3^{\circ}$),成为福建长乐东部海岸风沙沉积的最主要沙源^[19, 23, 25]。长乐东部海岸属进积型海岸,据前人的研究^[31],自汉代以来,长乐海岸线不断向东南方向后退。

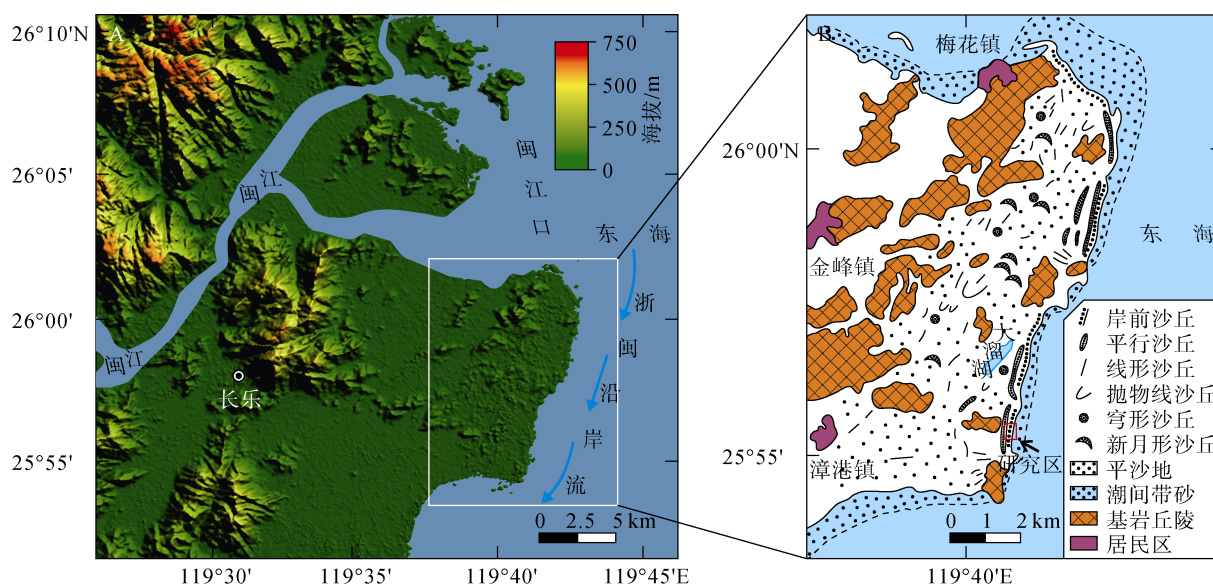


图 1 研究区地理位置和海岸风沙地貌

Fig. 1 Geographical location and coastal aeolian landforms of the study area

研究区属亚热带季风气候,年平均气温 $19.3^{\circ}C$,最冷月(1月)平均气温 $10.2^{\circ}C$,最热月(7月)平均气温 $28.3^{\circ}C$,多年平均年降水量 1382.3 mm 且集中在 3~9 月(图 2A)^[32]。受季风气候和台湾海峡“狭管效应”的影响,研究区风力强劲,秋冬季 NE、ENE 风频率高、平均风速可达 8 m/s(图 2B、C)^[33],为研究区向岸的风沙活动的主要风向,而此时正值降水较少的旱季,起动风速较小,海滩砂在向岸风作用下,由海滩向岸上运移堆积形成海岸风沙地貌。而 SSW 风为研究区主要的离岸风,主要发生在夏秋季的台风盛行季节。

现代长乐海岸带,地势低平宽阔,在强劲的风

力作用、充足的沙源供给、平坦的海岸地形条件下发育了典型的海岸风沙堆积地貌。长乐东部沿海一带为福建省三大风沙分布区之一,全长约 30 km,呈 NNE-SSW 条带状平行岸线展布,风沙地面积约 $79 km^2$,占全县耕地面积的 43%,从北部的梅花镇至南部的漳港镇,主要发育有近岸现代沙丘系统——锥形沙丘、岸前沙丘、平行沙丘和内侧早期沙丘系统——线形沙丘、抛物线沙丘、穹形沙丘、新月形沙丘、平沙地等(图 1)^[20-21]。岸前沙丘带由梅花镇东部海岸起自北向南断续分布,总长约 10 km,受下伏地形影响,沙丘高度起伏不一,最高处海拔约为 16 m。岸前沙丘向海坡脚散布大量贝壳壳体,靳

建辉等^[34]在长乐市江田镇东山村的海岸沙丘底部也发现大量贝类壳体, 主要为文蛤和牡蛎, 并用

光释光(OSL)测年测得该海岸沙丘的最老年龄为 5.6 ka BP±0.4 ka BP。

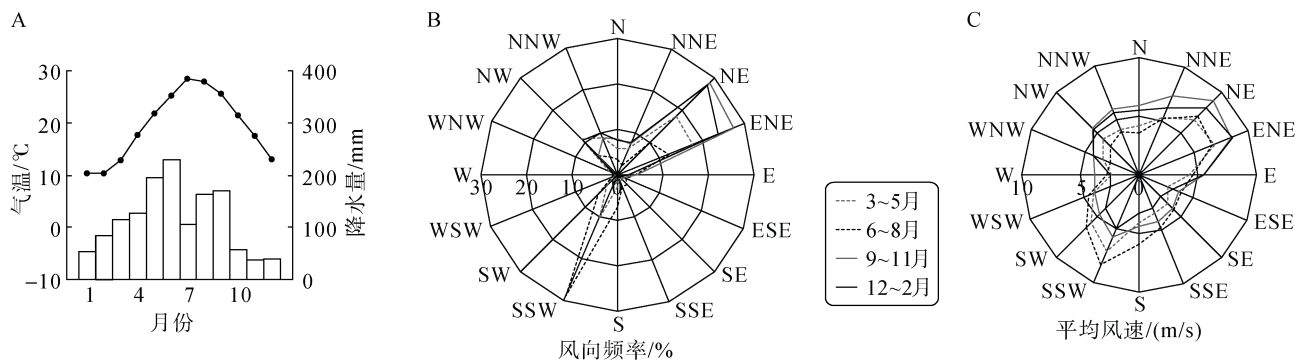


图 2 研究区气温、降水、风向频率和平均风速

Fig. 2 Temperature, precipitation, wind frequency, and mean wind speed of the study area

2 材料与方法

研究区海岸风沙地貌类型多样(图 3), 发育了风影沙丘、锥形前丘、风蚀洼槽、斜向沙脊等海岸风沙地貌类型。活动性强, 植被较少, 主要植物有木麻黄科木本植物木麻黄(*Casuarina equisetifolia* L.)、莎草科草本植物海滨莎(*Remirea maritima* Aubl.)、旋花科蔓生草本植物马鞍藤(*Ipomoea pes-caprae* (L.) R.

Brown)等。风影沙丘是研究区最常见的海岸沙丘类型, 数量众多, 大小不一但具有一定的共性, 即沙丘走向与盛行风向平行, 迎风坡短而陡、背风坡长而缓, 迎风坡覆盖着海滨莎等植物、背风坡砂体裸露。风影沙丘之间相互连接构成了与海岸线平行的锥形前丘。研究区西部有几处风蚀洼槽, 从风蚀洼槽中吹蚀出的风沙在其下风向堆积形成了走向与海岸线斜交的斜向沙脊。

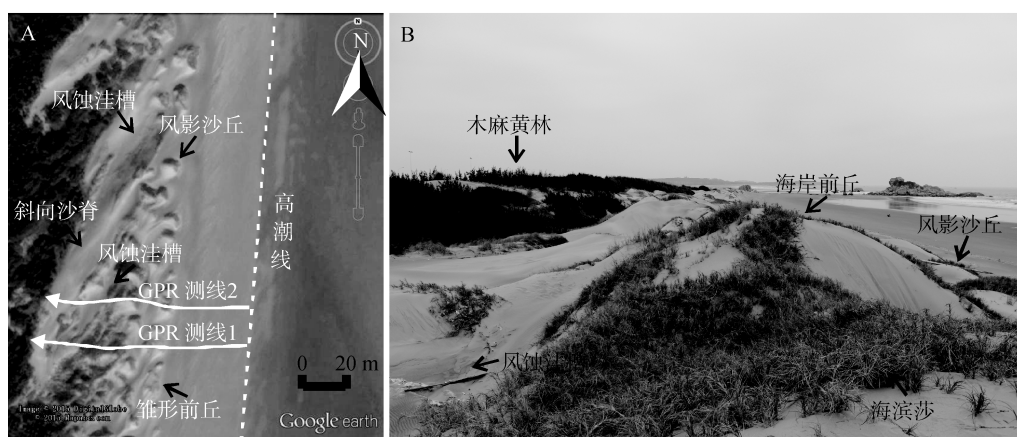


图 3 研究区 GPR 测线(A)及海岸景观(B)

Fig. 3 (A) GPR lines and (B) coastal landscape of the study area

采用的探地雷达(GPR)为加拿大探头与软件公司(Sensors & Software Inc., SSI)生产的 pulseEKKO PRO 探地雷达。为了确定雷达波在研究区砂体中的传播速度, 选取了一块地形较为平坦的沙丘表面, 运用共中心点法(Common Mid-Point, CMP)进行测量(图 4A), 起始收发距(接收机与发射机之间的距离, 亦称天线间距)为 0.5 m, 发射机与接收机以 0.1 m 的

步长同步向外挪动, 测得雷达波速为 0.14 m/ns。

在研究区沿东西方向布置了两条 GPR 测线(图 3A), 两条测线的走向均垂直现代海岸线, 同时与研究区年合成风向成 65°~70°交角, 即与 NE、ENE 向岸风以及 SSW 离岸风大致成 65°~70°。其中, 测线 1 由高潮线开始自东向西依次横穿海滩、锥形前丘和斜向沙脊等地貌类型, 止于人工木麻黄防风固沙林

带前缘, 长度约 100 m; 测线 2 在测线 1 以北约 20 m 处, 大致与测线 1 平行, 由高潮线开始自东向西依次横穿海滩、锥形前丘、风蚀洼槽和斜向沙脊等地貌类型, 止于人工木麻黄防风固沙林带前缘, 长度约 97 m。沿着上述两条 GPR 测线, 采用反射法(Reflection survey)进行探测(图 4B), 天线频率为 200 MHz、天线间距为 0.5 m、步长为 0.1 m。在进行 GPR 探测

的同时, 运用美国天宝(Trimble)公司生产的 R8GNSS RTK(Real time kinematic)测得了测线 1 和测线 2 精细的高程变化信息, 用于 GPR 剖面的地形校正。在室内, 运用 EKKO_View 2 和 EKKO_View Deluxe 软件对采集的 GPR 数据进行了数字滤波、增益调适、地形校正等处理, 获得了两幅 GPR 图像(图 5A、图 6A)。

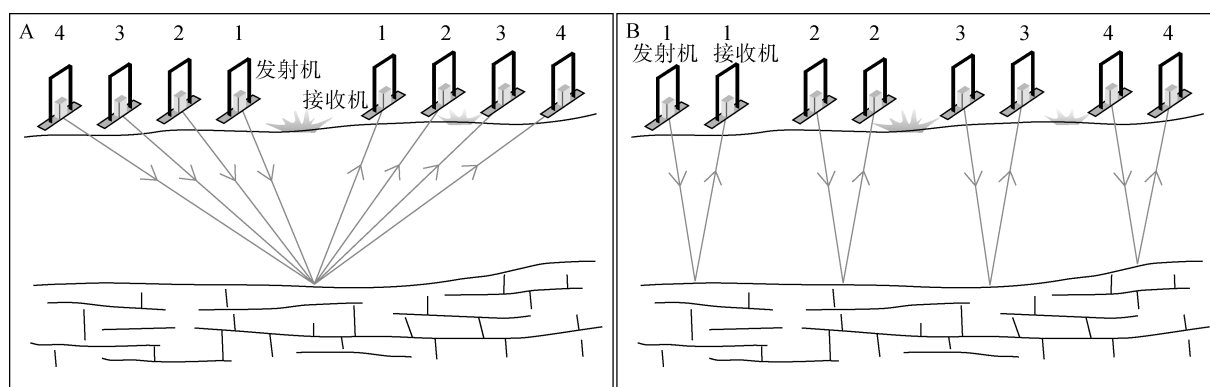


图 4 共中心点法(A)及反射法(B)示意

Fig. 4 (A) Common mid-point (CMP) survey and (B) reflection survey

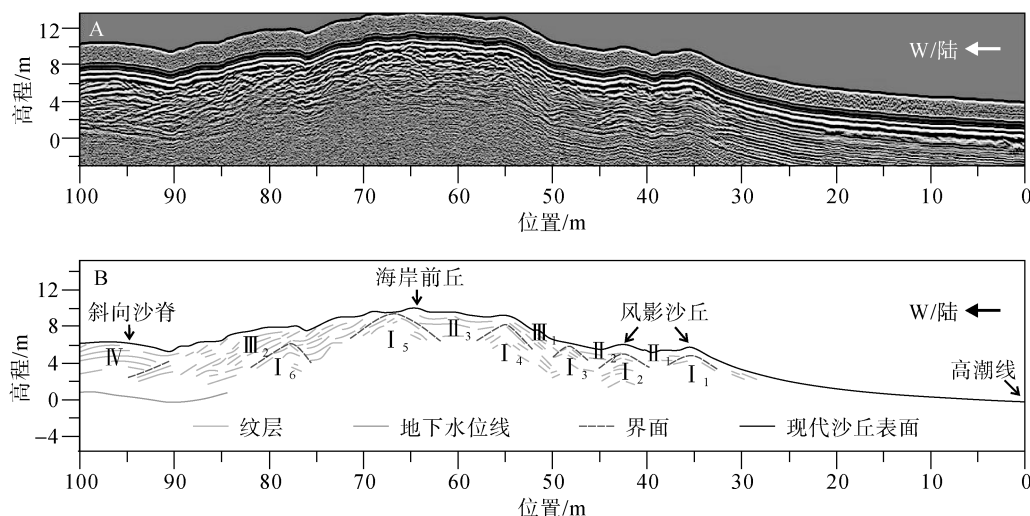


图 5 测线 1 GPR 剖面(A)及解译的沉积构造(B)

Fig. 5 (A) GPR profile of Detection-line 1 and (B) its corresponding sedimentary structure image

由于探测区海岸沙丘为防沙重点保护区域, 缺少人工挖沙形成的沙丘剖面, 但我们前期在福建漳浦六鳌半岛海岸抛物线沙丘沉积构造研究中, 附近人工挖沙遗留的沙坑剖面所显示的层理展布特点, 很好地印证了探地雷达探测结果的可靠性^[35]。

3 结果分析与讨论

图 5A 为测线 1 的 GPR 剖面(增益类型为 AGC6),

图 5B 为解译得到的研究区海岸沙丘沉积构造图。从图 5 可知, 西侧高程 0 m 附近存在一条连续的、强振幅的雷达反射波同向轴, 表明该界面上下介质的理化性质存在较大差异。据 Bristow 等^[4]、Pedersen 等^[5]、Shukla 等^[36]对海岸风沙沉积不同类型雷达相的归纳和解译, 解译为地下水位线。地下水位线以下可能受介质含水量增加、导电性增强的影响, 雷达信号较弱, 无明显的沉积构造信息。

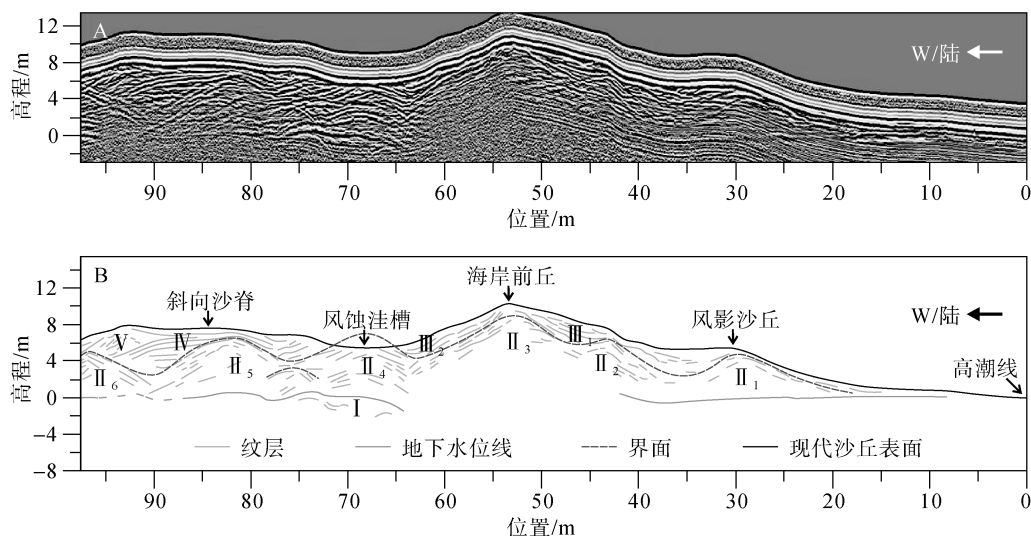


图 6 测线 2GPR 剖面(A)及解译的沉积构造(B)

Fig. 6 (A) GPR profile of Detection-line 2 and (B) its corresponding sedimentary structure image

地下水位线以上发育多组倾向相背的交错层理(图 5B I₁~I₆), 交错层理倾角很大, 达 30°~45°, 可能是海岸沙丘内部叠覆发育的层理构造, 很大的层理倾角和海岸带早期草灌丛沙丘上植物固定作用发育的向上弯曲的弧形层理有关, 其中部分是早期发育的两壁较陡的风蚀洼槽被后期风沙充填后显示的倾角。Clemmensen^[37]在研究丹麦海岸风影沙丘的沉积构造时认为, 这种由两组倾向相背的前积纹层构成的交错层理是海岸风影沙丘特有的沉积构造类型。关于其成因, 据 Carter 和 Hellemaa 等^[38]对爱尔兰、芬兰海岸沙丘沉积构造类型与沉积环境的研究, 这种交错层理指示了充足的沙源供给、加积型沙丘表面、宽阔的海滩、海岸进积和植被扩张, 这与长乐海岸历史变迁特点和现代海岸环境是一致的。

如前所述, 长乐海岸带地势平坦开阔, 位于闽江河口南部, 沿岸流带来大量泥沙, 海滩砂供给充足, 年均风速大, 强劲的向岸风和离岸风随季节交替变化发育沙丘两侧倾向相背的前积纹层。中国河北昌黎海岸带发育的典型海岸沙丘带, 也和丰富的沙源、平坦开阔的地形条件以及强劲的向岸风作用有关^[39]。

沙丘交错层理之间常见水平层理(图 5B II₁~II₃), 同时下伏沙丘外侧叠覆发育大规模的倾向相背的交错层理, 层理倾角也达到 30°~45°(图 5B III₁、III₂), 表明早期的海岸沙丘发育之后, 被更为年轻的海岸风沙加积覆盖。测线 1 西段上部存在若干组较大规模的、趋于水平的雷达反射波同向轴, 是上

风方向风蚀洼槽中吹蚀出的风沙在该处堆积形成的层理类型(图 5B IV)。

此外, 测线东侧高潮线附近的海滩内部沉积构造信息缺失, 可能是因为此处靠近潮间带, 砂体含盐量和含水量均较大, 导电性强, 电磁波强烈衰减, 接收机接收到的雷达反射信号微弱。Hede 等^[40]在丹麦西兰岛东南部 Feddet 滩脊系统上的 GPR 探测结果也显示在靠近海岸的地带由于受到盐水入侵的影响, 雷达反射信号因雷达波强烈衰减而显得十分微弱。

图 6A 为测线 2 的 GPR 剖面(增益类型为 AGC6), 图 6B 为解译得到的研究区海岸沙丘沉积构造图。大体上与测线 1 探测结果类似, 高潮线附近的海滩内部沉积构造信息缺失, 可能是因为此处靠近潮间带, 砂体含盐量和含水量均较大, 导电性强, 电磁波强烈衰减, 接收机接收到的雷达反射信号微弱。

高程 0 m 附近存在一条连续的、强振幅的雷达反射波同向轴, 解译为地下水位线。地下水位线以下可能受介质含水量增加、导电性增强的影响, 雷达信号较弱, 仅在局部地方出露波状的雷达反射波同向轴, 解译为波状交错层理(图 6B I), 可能是波浪和潮汐作用下形成的海滩沉积。

地下水位线以上的雷达反射波同向轴复杂多样, 表征复杂多样的海岸沙丘沉积构造。与测线 1 探测结果类似, 发育多组倾向相背、呈弧形上凸的交错层理组合, 层理倾角同样达到 30°~45°(图 6B II₁~II₆), 推测可能是海岸带早期发育的草灌丛沙丘的内部层理构造, 其中相当部分是现代继续发育、长轴方向平行

盛行风向的风影沙丘。测线 2 剖面上常见弧形下凹的雷达反射波同向轴, 解译为大型槽状交错层理(图 6B III₁、III₂), 这可能是在向岸风和离岸风交替作用下, 沙丘两侧背风坡季节性交替变化, 背风坡风沙下滑在丘间地早期发育的风蚀洼槽基础上形成的充填构造。测线 2 西段上部存在若干组较大规模的、趋于水平的雷达反射波同向轴, 是上风方向风蚀洼槽中吹蚀出的风沙披覆在下伏沙丘上部所形成的层理类型(图 6B IV)。此外, 测线 2 最西端的交错层理较为破碎(图 6B V), 可能是受植物的影响形成的。

综上所述, 长乐海岸沙丘是在亚热带湿润的海洋性季风气候条件下和晚全新世接近现代海平面背景下形成的。根据两条 GPR 测线探测结果显示, 研究区海岸地貌环境经历了明显的进积演变过程。早期为滨海浅水, 海岸进积之后海水向东退缩, 裸露的海滩上部发育植被, 植物截留海岸风沙形成若干草灌丛沙丘(风影沙丘), 草灌丛沙丘不断接受风沙堆积而生长壮大, 在强劲的向岸风和离岸风交替作用下, 草灌丛沙丘之间通过沙丘背风坡风沙的滑落充填作用相互连接在一起。孤立的草灌丛沙丘相互连接在一起构成了海岸前丘带, 海岸前丘之后的有些沙丘上部遭受风力侵蚀形成风蚀洼槽, 有些沙丘被来自上风方向风蚀洼槽中吹蚀出的风沙所覆盖而形成斜向沙脊。

关于研究区下伏滨海沉积层的发育年代, 在“福州海侵期”, 长乐东部沦为海湾。当时的海岸线在二刘-沙塘坂-渡桥-鹤上-古槐一线, 作为当时海侵的证据之一, 至今在长乐岭南还残留有标高 20 m 的向风带浪蚀平台。此后又逐渐开始海退, 闽江输沙和岸上陆源来沙逐渐在北起坛头汶石经大宏、厚东、碧岭、沙堤、凤洋直至梅花一带形成了一条沙堤, 过梅花、湖南、漳港直至文武砂形成一条砂嘴^[26]。约在距今 2500 年前, 研究区已由滨海转化为潟湖和滨海沼泽环境^[21, 41]。GPR 探测剖面揭示的下伏海滩沉积层主要就是在这个时期形成的。

自汉代以来, 长乐海岸不断向东进积, 清朝时, 海岸线向东推进至研究区西侧^[30]。因此, GPR 探测剖面揭示的上部海岸沙丘的年代非常年轻, 可能是清朝末年以来, 在出露地表的沙滩脊的基础上形成的。当然, 这一结果还需 OSL 测年、¹⁴C 测年等绝对年代的进一步验证。

4 结论

1) 研究区海岸沙丘沉积构造类型主要有海滩沉

积和风沙沉积两大类。其中, 下伏沉积构造类型主要是产状平缓的波状交错层理, 反映了早期潮间带波浪作用下的海滩沉积作用。上部沉积构造类型主要是风成的大倾角交错层理以及局部的水平层理。

2) 上部广泛发育的倾向相背的大角度交错层理, 反映了研究区海岸带丰富的沙源、宽广低平的海滩、植被不断扩张的进积海岸沉积地貌环境特征。倾向相背的交错层理, 反映了向岸风和离岸风交替变化作用下的风沙沉积, 而较大的层理倾角反映了海岸带较为普遍的植物固定风积作用的沉积环境特点。

3) 从沉积序列分析, 研究区的海岸环境经历了早期的滨海浅滩到晚期的海岸沙丘带两个阶段, 反映了海岸向东的进积过程中, 外力作用由波浪作用为主演变为风沙沉积作用为主。若干草灌丛沙丘相互连接在一起构成了海岸前丘带, 海岸前丘之后的有些沙丘遭受风力侵蚀形成风蚀洼槽, 有些沙丘被来自上风方向风蚀洼槽中吹蚀出的风沙所覆盖而形成斜向沙脊, 显示了海岸风沙活动的多样性与复杂性。

4) 从本次探测结果分析, 雷达波遭遇海洋盐信号会发生强烈衰减, 因此 GPR 不太适合探测海滩的沉积构造, 但却是探测海岸风沙沉积构造的良好手段。

参考文献:

- [1] Pye K. Coastal dunes[J]. *Progress in Physical Geography*, 1983, 7(4): 531-557.
- [2] 王颖, 朱大奎. 海岸沙丘成因的讨论[J]. *中国沙漠*, 1987, 7(3): 29-40.
Wang Ying, Zhu Dakui. An approach on the formation causes of coastal sand dunes[J]. *Journal of Desert Research*, 1987, 7(3): 29-40.
- [3] 吴正, 黄山, 胡守真, 等. 华南海岸风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
Wu Zheng, Huang Shan, Hu Shouzheng, et al. Research on the landforms of the wind-drift sand in south China coast[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [4] Bristow C S, Chroston P N, Bailey S D. The structure and development of foredunes on a locally prograding coast: insights from ground-penetrating radar surveys, Norfolk, UK[J]. *Sedimentology*, 2000, 47(5): 923-944.
- [5] Pedersen K, Clemmensen L B. Unveiling past aeolian landscapes: a ground-penetrating radar survey of a Holocene coastal dunefield system, Thy, Denmark[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 177(1): 57-86.
- [6] González-Villanueva R, Costas S, Duarte H, et al. Blowout evolution in a coastal dune: using GPR, aerial imagery and core records[J]. *Journal of Coastal Re-*

- search, 2011, 64: 278-282.
- [7] Tamura T, Bateman M D, Kodama Y, et al. Building of shore-oblique transverse dune ridges revealed by ground-penetrating radar and optical dating over the last 500 years on Tottori coast, Japan Sea[J]. *Geomorphology*, 2011, 132(3): 153-166.
- [8] Trivedi D, Devi K, Buynevich I, et al. Interpretation of dune genesis from sedimentological data and ground penetrating radar (GPR) signatures: a case study from Ashirmata dune field, Mandvi beach, Gujarat, India[J]. *International Journal of Geosciences*, 2012, 3: 772-779.
- [9] Buynevich I V, Asp N E. Dune advance into a coastal forest, equatorial Brazil: A subsurface perspective[J]. *Aeolian Research*, 2010, 2(1): 27-32.
- [10] Dougherty A J. Extracting a record of Holocene storm erosion and deposition preserved in the morphostratigraphy of a prograded coastal barrier[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 86: 116-131.
- [11] 蔡爱智, 蔡月娥. 中国海岸风沙沉积的成因与特征[J]. *中国沙漠*, 1983, 3(3): 1-10.
Cai Aizhi, Cai Yue'e. A study of depositional causation and characteristics of coast aeolian sand in coast areas in China[J]. *Journal of Desert Research*, 1983, 3(3): 1-10.
- [12] 朱震达. 湿润及半湿润地带的土地风沙化问题[J]. *中国沙漠*, 1986, 6(4): 1-12.
Zhu Zhenda. Phenomena of blowsands and their impacts on lands in humid and subhumid zones[J]. *Journal of Desert Research*, 1986, 6(4): 1-12.
- [13] 吴正, 吴克刚. 中国海岸风沙研究的进展和问题[J]. *地理科学*, 1990, 10(3): 230-236.
Wu Zheng, Wu Kegang. Progress and problem on research of coastal aeolian erosion in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1990, 10(3): 230-236.
- [14] 董玉祥. 中国的海岸风沙研究: 进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 26-35.
Dong Yuxiang. Coastal aeolian research in China: progress and prospect[J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(2): 26-35.
- [15] 董玉祥. 中国海岸风沙地貌的类型及其分布规律[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 99-104.
Dong Yuxiang. The coastal aeolian geomorphic types and their distribution pattern in China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(4): 99-104.
- [16] 李从先, 陈刚, 杨红君. 福建海岸的风成沉积[J]. *中国沙漠*, 1989, 9(4): 8-18.
Li Congxian, Chen Gang, Yang Hongjun. Eolian deposits in coastal zones of Fujian Province[J]. *Journal of Desert Research*, 1989, 9(4): 8-18.
- [17] 张文开, 李祖光, 汪榕光. 长乐沿海风成沙沙色与红化作用研究[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 1990, 7(1): 98-104.
Zhang Wenkai, Li Zuguang, Wang Rongguang. A study of the color and red coloration of aeolian sand in Changle coastal zone[J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science)*, 1990, 7(1): 98-104.
- [18] 陈方, 李祖光, 张文开, 等. 长乐东部沿岸风沙沉积物的粒度分布特征[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 1991, 7(2): 84-91.
Chen Fang, Li Zuguang, Zhang Wenkai, et al. The characteristics of the grain size distribution of the surface eolian sands along the coastal area of Changle[J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science)*, 1991, 7(2): 84-91.
- [19] 陈方, 李祖光, 汪榕光, 等. 长乐东部沿海及海坛岛风沙地貌发育条件分析[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 1992, 8(4): 93-99.
Chen Fang, Li Zuguang, Wang Rongguang, et al. A preliminary approach to the contributing factors of coastal eolian landform along the coastal area of Changle and Haitan Island[J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science)*, 1992, 8(4): 93-99.
- [20] 张文开. 长乐东部风沙地貌及其开发利用[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 1994, 10(2): 81-88.
Zhang Wenkai. The landforms of eolian lands in the east of Changle and their utilize[J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science)*, 1994, 10(2): 81-88.
- [21] 张文开, 李祖光. 福建长乐海岸沙丘形成发育及其区域分布特征[J]. *中国沙漠*, 1995, 15(1): 31-36.
Zhang Wenkai, Li Zuguang. The formation, growth and regional distribution characteristic of coastal dunes in the Changle County, Fujian Province[J]. *Journal of Desert Research*, 1995, 15(1): 31-36.
- [22] 陈方, 蔡明理, 李祖光, 等. 长乐东部沿海海岸风沙区域分异探讨[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1995, 31(3): 487-494.
Chen Fang, Cai Mingli, Li Zuguang, et al. A discussion on the regional divergence of eolian sand along the coastal area of Changle[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences Edition)*, 1995, 31(3): 487-494.
- [23] 陈方, 朱大奎. 闽江口海岸沙丘的形成与演化[J]. *中国沙漠*, 1996, 16(3): 227-233.
Chen Fang, Zhu Dakui. Dune formation and evolution along the south coast of Minjiang Estuary[J]. *Journal of Desert Research*, 1996, 16(3): 227-233.
- [24] 陈方, 贺辉扬. 海岸沙丘沙运动特征若干问题的研究——以闽江口南岸为例[J]. *中国沙漠*, 1997, 17(4): 355-361.
Chen Fang, He Huiyang. Research of several problems on movement characteristics of coastal dune sand--an

- example from the south coast of Minjiang Estuary[J]. *Journal of Desert Research*, 1997, 17(4): 355-361.
- [25] 石谦, 蔡爱智, 张金城. 闽江河口砂入海后的再搬运[C]//中国海洋工程学会. 第九届全国海岸工程学术会议论文集. 北京: 海洋出版社, 1999: 221-230.
Shi Qian, Cai Aizhi, Zhang Jincheng. Re-transportation of the sands of Minjiang Estuary[C]// China Ocean Engineering Society. Proceedings of the 9th national conference on coastal engineering. Beijing: China Ocean Press, 1999: 221-230.
- [26] 刘建辉. 长乐东部海岸沙丘的沉积与移动特征研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
Liu Jianhui. A study on sedimentary and moving characteristics of sandy dunes in the eastern coast, Changle, Fujian[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [27] 刘建辉, 郭占荣, 雷怀彦, 等. 福建长乐东部海岸沙丘风蚀坑研究[J]. *台湾海峡*, 2008, 27(2): 230-236.
Liu Jianhui, Guo Zhanrong, Lei Huaiyan, et al. A study on coastal dune blowouts in east coast of Changle[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2008, 27(2): 230-236.
- [28] 董玉祥, 马骏, 黄德全. 福建长乐海岸横向前丘表面粒度分异研究[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 813-819.
Dong Yuxiang, Ma Jun, Huang Dequan. Distribution model of grain size on coastal transverse foredune at Changle in Fujian Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 813-819.
- [29] 杨锐. 长乐东部海岸沙丘特征与成因研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
Yang Rui. A study on formation and characteristics of sandy dunes in the eastern coast, Changle, Fujian[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.
- [30] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报(2014)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China river sediment bulletin (2014)[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015.
- [31] 福建省地方志编纂委员会. 福建省历史地图集[M]. 福州: 福建省地图出版社, 2004.
Local Chronicles Compilation Committee of Fujian Province. Historical atlas of Fujian Province[M]. Fuzhou: Fujian Provincial Map Publishing House, 2004.
- [32] 福建省气象局. 福建省长乐气候资料(1951-1980)[R]. 福州: 福建省气象局, 1981.
Fujian Provincial Meteorological Bureau. Climatological data of Changle, Fujian(1951-1980)[R]. Fuzhou: Fujian Provincial Meteorological Bureau, 1981.
- [33] 福建省气象局. 福建省北茭气候资料(1951-1980)[R]. 福州: 福建省气象局, 1981.
Fujian Provincial Meteorological Bureau. Climatological data of Beijiao, Fujian(1951-1980)[R]. Fuzhou: Fujian Provincial Meteorological Bureau, 1981.
- [34] 靳建辉, 李志忠, 胡凡根, 等. 全新世中晚期福建海岸沙丘记录的海岸环境与人类活动[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 751-765.
Jin Jianhui, Li Zhizhong, Hu Fangen, et al. Mid-Holocene coastal environment and human activities recorded by a coastal dune in Fujian Province, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 751-765.
- [35] 邓涛, 李志忠, 靳建辉, 等. 探地雷达在福建漳浦海岸抛物线沙丘沉积构造探测中的应用[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 882-889.
Deng Tao, Li Zhizhong, Jin Jianhui, et al. Application of ground penetrating radar to the sedimentary structure detection of a coastal parabolic dune in Zhangpu, Fujian, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(4): 882-889.
- [36] Shukla S B, Patidar A K, Bhatt N. Application of GPR in the study of shallow subsurface sedimentary architecture of Modwa spit, Gulf of Kachchh[J]. *Journal of Earth System Science*, 2008, 117(1): 33-40.
- [37] Clemmensen L B. Storm-generated eolian sand shadows and their sedimentary structures, Vejers Strand, Denmark[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1986, 56(4): 520-527.
- [38] Hellemaa P. The development of coastal dunes and their vegetation in Finland[J]. *Fennia*, 1998, 176(1): 1-157.
- [39] 傅启龙, 沙庆安. 昌黎海岸风成沙丘的形态与沉积构造特征及其成因初探[J]. *沉积学报*, 1994, 12(1): 98-105.
Fu Qilong, Sha Qing'an. Morphology sedimentary structural characteristics and genesis of the Changli coastal dunes, Hebei Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(1): 98-105.
- [40] Hede M U, Bendixen M, Clemmensen L B, et al. Joint interpretation of beach-ridge architecture and coastal topography show the validity of sea-level markers observed in ground-penetrating radar data[J]. *Holocene*, 2013, 23(9): 1238-1246.
- [41] 程乾盛. 福建长乐全新世地层划分与对比的探讨[J]. *福建地质*, 1989, 8(2): 100-109.
Cheng Qiansheng. A discussion on the stratigraphy of Holocene series in Changle, Fujian[J]. *Geology of Fujian*, 1989, 8(2): 100-109.

Sedimentary structure of coastal dunes and evolution of coastal environment in Changle, Fujian, China, by ground-penetrating radar

DENG Tao^{1,2}, LI Zhi-zhong^{1,2,3}, JIN Jian-hui^{1,2,3}, JIANG Feng^{1,2}, LAI Hai-cheng^{1,2}, SHEN Jian-ling^{1,2}, YU Xiao-li^{1,2}, YUAN Xiu-quan^{1,2}

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process (Fujian Normal University), Ministry of Education, Fuzhou 350007, China; 3. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Received: Jun. 14, 2016

Key words: ground-penetrating radar (GPR); coastal dune; sedimentary structure; coastal environment; Changle City

Abstract: The east coast of Changle City, Fujian Province, China, is famous for its marvelous coastal dunes. Located to the south of the Min River Estuary, it receives large volumes of sediment from the northeast wind waves and Zhemin coastal currents. Using two parallel lines perpendicular to the shoreline, we applied ground-penetrating radar as a non-invasive technology to determine the sedimentary structure of the coastal dunes. Some preliminary conclusions are as follows: (1) The coastal dunes mainly comprise two parts—wave-deposited beach sands at the bottom capped by aeolian sands, which present hummocky cross stratification and high-angle cross bedding mingled with horizontal bedding, respectively. (2) High-angle cross bedding dipped inversely corresponds to abundant sand sources, a wide beach, and vegetation expansion, which are the characteristics of a progradational coast. (3) On the basis of our sedimentary structure sequence analysis, we infer that two stages occurred in the coastal environment evolution: a shallow sea in the early times and the occurrence and development of coastal dunes.

(本文编辑: 刘珊珊)