

# 基于 GPR 图像的福建海坛岛北部海岸冲积扇沉积构造及其成因的初步研究

赖海成<sup>1,2</sup> 李志忠<sup>1,2,3</sup> 靳建辉<sup>1,2,3</sup> 邓涛<sup>1,2</sup> 姜锋<sup>1,2</sup>  
于晓莉<sup>1,2</sup> 苑秀全<sup>1,2</sup> 申健玲<sup>1,2</sup> 龚松柏<sup>1,2</sup>

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

**摘要** 福建海坛岛北部海岸发育一座覆盖淡灰黄色风成砂层、相对高度达30 m的大沙山,外貌很像风成大沙丘,但同时又具有冲积扇形态。其成因和沉积环境有待考证,而探明大沙山内部沉积构造是判别其成因的主要途径之一。在野外考察的基础上,运用探地雷达(GPR)对大沙山内部沉积构造进行探测,获得约20 m深度范围内的沉积构造图像数据。结果表明:大沙山中上部发育由棱角状砾石或粗砂细砂组成的沉积旋回和沟槽沉积构造,显示出冲积扇上部的沉积构造组合特点;中下部层面中交替呈现弧形沉积构造,大沙山南侧发育有向南倾斜 $28^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的前积层理。结合大沙山西侧冲沟剖面沉积构造、大沙山表面的棱角状砾石特征以及现代风沙地貌分布规律,初步认为大沙山是山前多期沟谷洪流携带的碎屑物沉积形成的冲积扇残余堆积体,沉积间隙受海岸带风沙活动影响。

**关键词** 探地雷达 冲积扇 沉积构造 海岸带 福建海坛岛

**第一作者简介** 赖海成 男 1992年出生 硕士研究生 地貌过程与环境演变 E-mail: laihaicheng2015@163.com

**通讯作者** 李志忠 男 教授 E-mail: lizz@fjnu.edu.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 0 引言

冲积扇是山麓带由于坡降变缓,河流水流分散,流速减慢,河流所携带的大量碎屑物质堆积于山前形成的扇状地貌堆积体<sup>[1]</sup>。通常认为发育在干旱、半干旱地区的冲积扇称之为“干旱扇”、洪积扇或“干三角洲”,在湿润气候区山麓地带发育的河流冲积扇称之为“湿地扇”<sup>[2]</sup>。冲积扇在记录区域气候变化、反映新构造运动和重建古地理环境方面具有重要研究价值,关于冲积扇的地貌特征、沉积构造、发育机制及古地理意义,历来都是地质地貌学和沉积地层学的重点研究内容之一,在国内外取得大量的经典研究成果<sup>[3-10]</sup>。与内陆地区相比,海岸带作为大气、海洋、陆地三大圈层耦合作用的地带,沉积环境有明显差异,在物质来源和动力条件方面有很大不同,因此海岸带冲积扇可能具有独特的地质地貌发育过程和沉积构造特点,但国内外有关海岸带发育的冲积扇研究较少。

传统冲积扇沉积构造研究主要借助于露头、地震

波勘测和结合测井研究。但较好的露头并不常见,地震波勘测适合较大尺度的宏观构造特征研究,测井剖面缺乏完整的连续性信息。探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是用高频电磁波探测地区过程中产生连续地层剖面雷达图像的一种地球物理探测方法,通过对雷达图像数据的处理和解释,可以重建探测地区的内部沉积构造<sup>[11-12]</sup>。因其无损、便捷、分辨率高等优点,国外众多学者已广泛运用于探测目的体的内部构造<sup>[13-17]</sup>。例如, Mills *et al.*<sup>[13]</sup>运用 GPR 探测美国卡罗莱纳州的一处高山山麓带的冲积扇,结果显示连续反射面可以指示沉积单元接触面、埋藏土壤或地下水; Bristow *et al.*<sup>[14]</sup>系统性介绍了 GPR 在地层研究中的优势以及冲积扇中的应用; Leopold *et al.*<sup>[15]</sup>运用 GPR 探测纳米比亚河谷堆积体,得出了四个河谷沉积和地层结构的 GPR 图像,进一步解释了河谷沉积特性; Kostic *et al.*<sup>[16]</sup>以 GPR 为主要研究手段对德国内卡河流域第四纪河流沉积进行探测,得出了以一个侵蚀不整合面隔开的两个沉积单元,并结合钻孔

收稿日期: 2015-06-29; 收修改稿日期: 2015-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271031, 41301012); 国家自然科学基金委员会—福建省人民政府促进海峡两岸科技合作联合基金(U1405231) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41271031, 41301012; National Natural Science Foundation of China-Joint Foundation for Promoting Scientific and Technological Cooperation between two sides of the Straits of Fujian Gov. CN, No. U1405231]

资料分析出两个沉积单元分别是辫状河流沉积和曲流河沉积; Barnhardt *et al.*<sup>[17]</sup> 使用 GPR 调查美国尼斯阔利河三角洲的形态和地层演化, 解译出两个河流沉积相。

福建海坛岛北部海岸发育一座覆盖淡灰黄色风砂层、相对高度达 30 m 的大沙山。大沙山位于 NNE 盛行风向的迎风海岸带, 同时又位于君山北坡山麓地带, 其外貌很像风成大沙丘, 但同时又具有冲积扇形态。在山海环抱的海岸带尤为壮观, 在高分辨率的卫星影像上突兀醒目。那么, 大沙山是风力作用堆积形成的? 还是山地沟谷洪流冲积形成的? 迄今未见有研究报道。本文通过实地地质地貌考察, 并进行了 GPR 探测和图像解译, 以期对大沙山的成因进行初步分析。这将有助于深入理解我国华南海岸古地理环境的演变规律, 并丰富我国海岸带动力地貌过程和冲积扇沉积构造的研究。

## 1 研究区概况

### 1.1 地质地貌

大沙山位于福建海坛岛的北端, 行政区划上属于平潭县流水镇磻水村, 东临台湾海峡, 南部紧靠君山北坡, 君山为海坛岛最高峰, 海拔 435 m (图 1)。海坛岛位于福建省武夷—戴云隆褶带东侧沿海地带, 即闽东南沿海变质带。自燕山运动起, 发生强烈的断裂活动、大规模火山喷发和岩浆侵入, 并伴随着强烈的断裂活动, 至燕山运动晚期形成基本格局, 确定了海坛岛地质基础、地貌轮廓。新生代地壳运动, 尤其是

第四纪海平面变化的影响, 导致陆海一系列的升降运动, 海坛岛地质地貌进一步演化成型。构成海坛岛基底的岩石类型, 主要是中生代侵入岩和火山岩, 即以花岗岩和闪长岩为主的燕山早期与晚期的侵入岩和以英安岩、流纹岩、英安质晶屑凝灰岩等为主的火山岩。白垩纪火山喷发, 由安山质岩屑晶屑凝灰熔岩、英安质晶屑凝灰熔岩、晶屑熔结凝灰岩、凝灰岩等为主的石帽山群火山岩构成君山主体, 即君山实际上是白垩纪一系列火山喷发作用形成的一座古火山锥<sup>[18]</sup>。在海湾低地和平原, 广泛分布第四系海相沉积, 平地、台地则覆盖着第四纪风成砂<sup>[19]</sup>。

海坛岛地貌类型主要有丘陵、台地、滨海平原、湖泊、滩涂和海岸<sup>[19]</sup>。其中, 丘陵主要分布在岛的东北、西北、南部三片, 总面积 15 km<sup>2</sup>, 占岛上陆地面积的 42%; 台地由残积、风积和海积组成, 土层厚, 顶部平缓, 呈波状起伏, 总面积 16.9 km<sup>2</sup>; 滨海平原由风、海堆积物发育而成, 总面积 132.3 km<sup>2</sup>; 海坛岛海岸蜿蜒曲折, 岸线长达 448 km, 具有基岩、沙质、泥质等海岸类型。其中, 基岩海岸分布于岛屿中半岛、岬角等突出部, 其特点是岸线曲折, 基岩裸露, 海岸狭窄, 海蚀明显。沙质海岸分布在海坛湾、坛南湾和长江澳等地区, 岸线比较平直, 海岸带低平, 潮间带宽阔。

### 1.2 气象水文

海坛岛属于湿润亚热带季风气候特征。年平均气温 19.0℃~19.9℃。年降水量 900~1 200 mm, 从西北向东南递减, 3—9 月降水量约占全年 82%, 5—6 月份的梅雨降雨量占全年降水量的 34.2%, 7—9 月

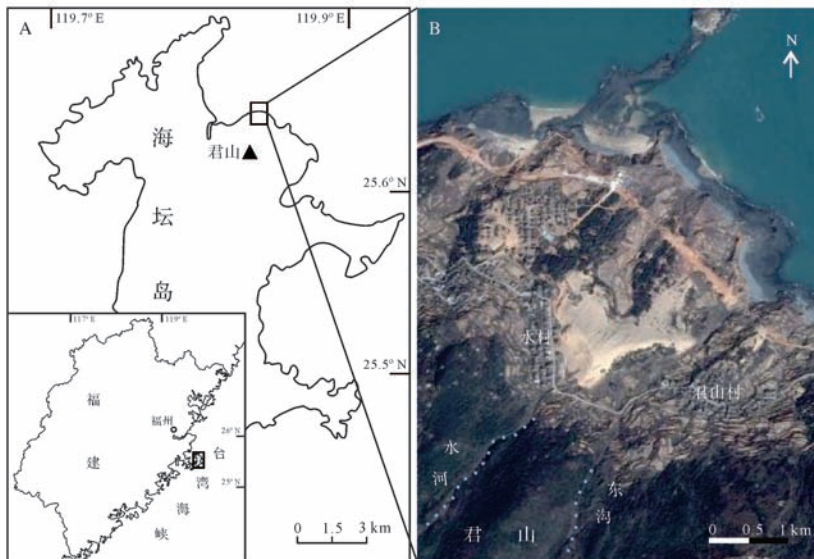


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographic location of the study area

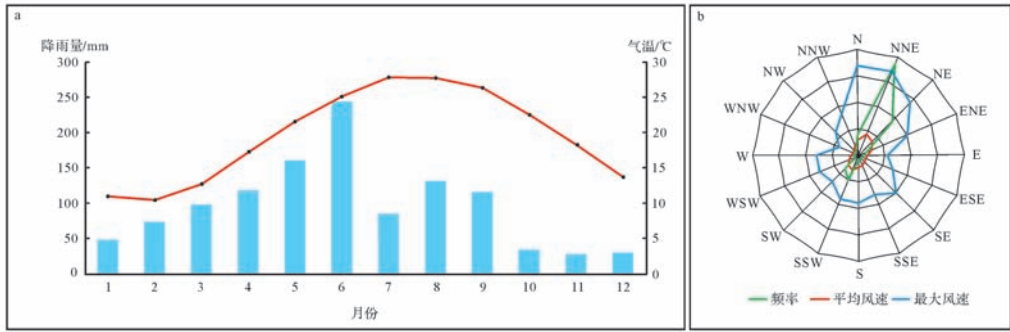


图2 海坛岛降雨量—气温与风况

Fig.2 Precipitation-temperature and wind condition of the Haitan Island

份台风雨量虽然只占全年降水量的 27.7% (图 2A), 但可以造成海坛岛丘陵沟谷洪流暴涨暴落。风向年变化规律是冬季 NNE 风和夏季 SW 风的季节更替, 且 NNE 风频率高、风速大, 为研究区盛行风向 (图 2B)。

潮汐类型属正规半日潮, 近海潮周期为 12 小时 25 分钟左右, 涨潮历时和落潮历时几乎相等, 平均潮差为 3.92 m, 潮差相对较大。海坛岛海域潮流变化较为复杂, 浅海的涨潮由东向西, 或东北向西南, 落潮相反, 主要是来复潮, 个别是直线流。水深 40 m 以内的沿岸流域的潮流为西北、东南流<sup>[20]</sup>。

由于独特的地形条件, 海坛岛高低丘陵上发育的冲沟大多为比降大、流程短的冲沟, 流程稍长的冲沟也大部分集中在君山上。除了常年有较强的春夏降水, 由于地处台湾海峡, 濒临太平洋, 每年海坛岛都会遭受数次不同程度的台风暴雨强降雨过程, 高低丘陵冲沟内往往形成暴涨急泄的沟谷洪流。海坛岛地层, 除第四纪松散沉积物外, 均为中生代侏罗纪和白垩纪的火山岩, 及燕山早期和晚期的侵入岩。因此, 大气降水渗入地下, 在上述地层形成三类含水岩组: 基岩裂隙水、风化残积岩网状裂隙水、第四纪松散岩孔隙潜水及承压水。

## 2 材料与方法

### 2.1 地质地貌野外考察

大沙山地处君山北坡围椅状山麓带 (图 1B), 毗邻的君山北坡发育有两条冲沟, 分别为西沟和东沟, 因西沟水量大又称磻水河。磻水河山区长度约 750 m, 纵比降约 12.5°; 东沟山区长度约 950 m, 纵比降约 13°。大沙山最高海拔为 86 m, 平面形态大致呈 V 字形, 靠磻水村一侧西翼, 翼长约 365 m, 宽约 150 m; 靠君山村一侧东翼, 翼长约 385 m, 宽约 120 m。大沙山

北部迎风坡坡度为 10°~20°, 向海向北倾斜 (图 3A, E)。坡面上发育多条 NE—SW、N—S 走向的深浅不一的沟槽 (图 3B)。北坡中下部还发育大小不等的多个灌丛沙堆, 这些灌丛沙堆为由海向陆 NNE 风沙流遇到灌丛植被阻拦而堆积形成的。灌丛沙堆迎风坡稍显陡峭, 植被生长较好, 而背风坡坡度较缓, 发育顺风向南延伸的沙尾<sup>[21]</sup>。北坡坡面上分布有大量棱角状砾石和粗砂细砂。其中, 砾石直径从 10~100 cm 不等, 颜色主要为灰黑色, 少量呈灰褐色和灰绿色, 见有气孔和流纹构造, 岩性主要是英安质晶屑凝灰岩 (图 3C), 与构成君山的主要岩石类型一致。大沙山南坡较缓, 从地貌特征上看, 应为区域 NNE 盛行风作用下形成的落沙坡, 坡度约 25°~35° (图 3A)。大沙山西侧陡峭, 为受到冲沟洪水下切侵蚀作用形成的谷坡 (图 3D)。坡面中上部, 见有向北倾斜的灰黑色砾岩层, 砾石大小混杂, 尖棱角状、棱角状, 交替夹有波状层理的粗砂细砂层, 局部呈现透镜体, 整体上构成向北呈缓坡倾斜的平行层理, 倾角 5°~10°, 表现为棱角状巨砾和粗砂细砂构成的沉积旋回。冲沟剖面的下段, 以高角度斜层理为主, 呈现棕红色, 为海坛岛北部迎风海岸带常见的“老红砂”。

### 2.2 探测方法和数据处理

为进一步查明大沙山内部的沉积构造空间展布特点, 我们于 2014 年 4 月采用探地雷达方法进行了实地探测。探地雷达为加拿大探头与软件公司 (Sensors & Software Inc., SSI) 生产的 pulseEKKO PRO 探地雷达设备。采用剖面法测量模式, 即将发射天线和接收天线以固定间隔距离沿测线同步移动<sup>[11]</sup>。在大沙山东翼布置了三条探测剖面 (图 3E)。其中, 两条测线平行于大沙山东翼北坡表面的沟槽、垂直于脊线; 一条平行于大沙山东翼脊线、垂直于表面沟槽。

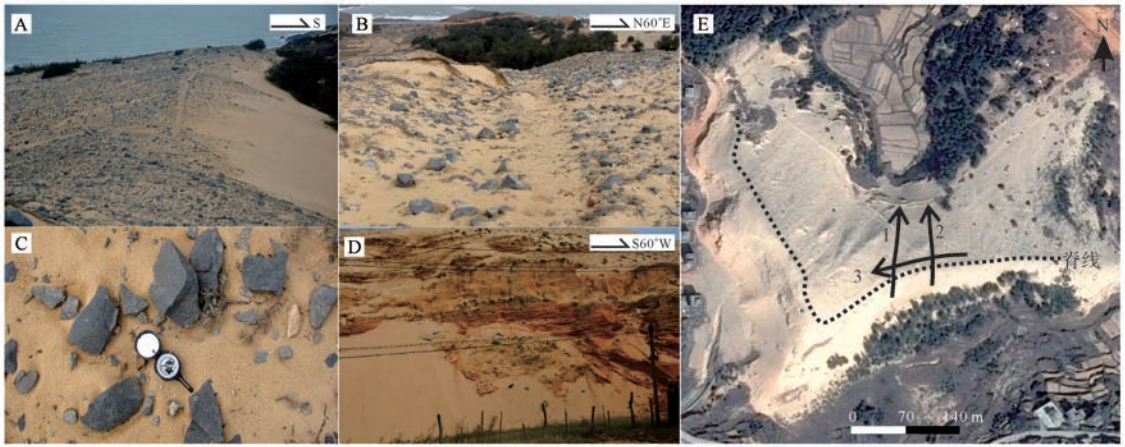


图3 大沙山地质地貌特征和 GPR 测线布置

A. 南坡落沙坡; B. 表面沟槽; C. 砾岩; D. 西侧谷坡剖面; E. GPR 三条测线

Fig.3 Geomorphic feature and GPR lines of the great sandy hill

其中,探测剖面1总长98 m,呈NNW—SSW方向,从落沙坡坡脚翻越沙山脊,沿北坡沟槽沟底至迎风坡坡脚;探测剖面2大体上平行于探测剖面1东侧布设,总长99 m;探测剖面3总长99 m,呈NEE—SWW方向。通过上述交叉布置探测线,应当能够获得大沙山东翼沉积构造的三维展布特征。

本次探测频率为100 MHz的天线。参数设置:天线间距为1 m,天线移动步长为0.2 m,探测时窗为340 ns,脉冲电压为400 V,探测深度约20 m。由于电磁波传播速度受到探测对象介电常数的影响,本文依据前人测定和研究区实际情况,选择干砂中的传播速度 $0.1 \text{ m/ns}^{[22-24]}$ 作为本次探测剖面深度计算依据。为了对探测剖面进行地形起伏校正,以确保后期图像处理能获得真实的地层产状,我们沿GPR探测线,采用美国Trimble公司生产的R8GNSS RTK(Real time kinematic)设备同步进行了地形高程测量,系统误差为 $\pm 10 \text{ cm}$ 。

室内数据处理中,使用pluse EKKOTM软件进行增益处理,数字滤波处理,高程距离修正等。探测数据经过高程距离修正后,探地雷达图像就能真实的反映大沙山沉积构造的实际产状,如层面和层理的倾向、倾角等。三条探测剖面的原始图像及解译结果见图4~6。其中,横坐标表示测线从起点到终点的距离,纵坐标左侧表示大沙山高程,纵坐标右侧表示雷达波传播的双程走时。

### 3 结果分析

在图4~图6表面,均出现两个强烈反射界面,上

层反射界面是空气波、下层反射界面是地面波。空气波是天线发射的电磁波,经空气直接接收所形成;地面波是空气与大沙山表面介电常数差异所引起的反射波。总的来看,GPR对探测对象快速成像可提供其内部构造、地层信号等丰富信息。图4~6三幅图像,清晰地显示了大沙山东翼近地表面约20 m深度的内部沉积构造信息。

#### 3.1 测线1 GPR 图像解译

测线1 GPR 图像(图4A)和解译(图4B)可以看出,从起始点开始10 m处至终点存在三条连续、亚平行、强振幅反射面,反射面倾向均为NNE,即向海方向倾斜,倾角约 $15^\circ$ 。根据层理展布特点分析,这些强反射面上下的沉积构造和沉积环境有明显变化,因此可划分为层面,依次对应为a、b和c三个层面(图4B),其中水平距离58~73 m处b层面过渡为大尺度弧形层理。在层面之间广泛发育一系列不连续、波状起伏、倾角大体平行的层理,从西侧谷坡剖面考察(图3D)可知,这些层理是大沙山内部由棱角状巨砾或粗砂细砂构成的沉积旋回和大体上平行展布的波状层理。因此,层面应当是棱角状巨砾、粗砂屑堆积为特征的底砾沉积,记录了一次大范围的侵蚀沉积事件,层面之间为粗砂细砂混杂的碎屑构成的具有波状层理的洪积沉积构造。

测线1起点至水平距离10 m、海拔80~85 m近表面处,发育一组斜层理(图4B),倾向SSW,即向君山方向倾斜,倾角约 $30^\circ$ ,倾角大体上平行于大沙山南坡活动的滑落面。这是向岸风作用下,大沙山迎风坡表层风沙被吹扬向南移,并翻越大沙山山脊所形成

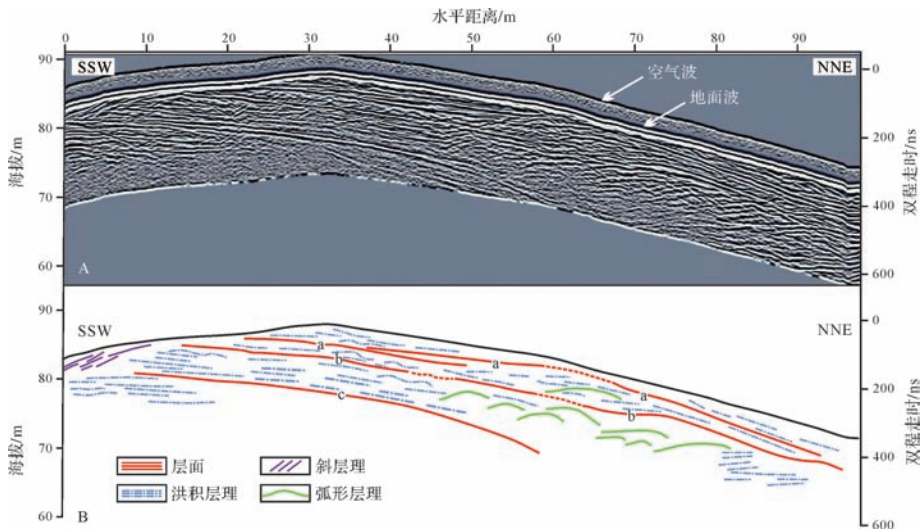


图4 测线1GPR 图像及其解译

Fig.4 The interpretation of ground penetrating radar image of Line 1

的落沙坡前积层理。

测线1从58 m 起始向北开始广泛出现向上凸起的反射波组(图4B),即弧形层理,形状呈现为北侧倾角较陡南侧倾角平缓,且南侧可见多层近似水平或缓倾斜的细纹层。因为这些弧形层理处于探测剖面右端,与现代大沙山表面普遍发育灌丛沙堆的位置相当,所以可以初步判定是埋藏的灌丛沙堆沉积构造。

### 3.2 测线2GPR 图像解译

测线2GPR 图像(图5A)和解译(图5B)可以看出,整个探测剖面有5条连续、亚平行、强振幅的反射面,倾向均为NNE,即向海方向倾斜,倾角约15°,划分为a、b、c、d和e共5个层面(图5B)。层面之间同

样广泛发育一系列不连续分布、大体平行延伸的波状层理。同测线1的观察分析,层面为由棱角状砾石、粗碎屑堆积形成的底砾层,其间所夹的波状细层为粗砂细砂碎屑构成的洪积层理。

测线2起点至5 m、海拔67~72 m 处发育清晰的平行的斜层理(图5B),倾向为SSW,倾角约为30°。因为所处位置为大沙山背风坡下部,大体接近剖面所见的“老红砂”出现的位置,所以可以初步判定为古沙丘落沙坡的前积层理。

测线2右侧水平距离80~95 m、海拔60~75 m 处,出现较多向上凸起的反射波组(图5B)。从向上弯曲的层理组合特征、所出现的地貌部位等综合判断,应当是埋藏的灌丛沙堆的沉积构造影像。

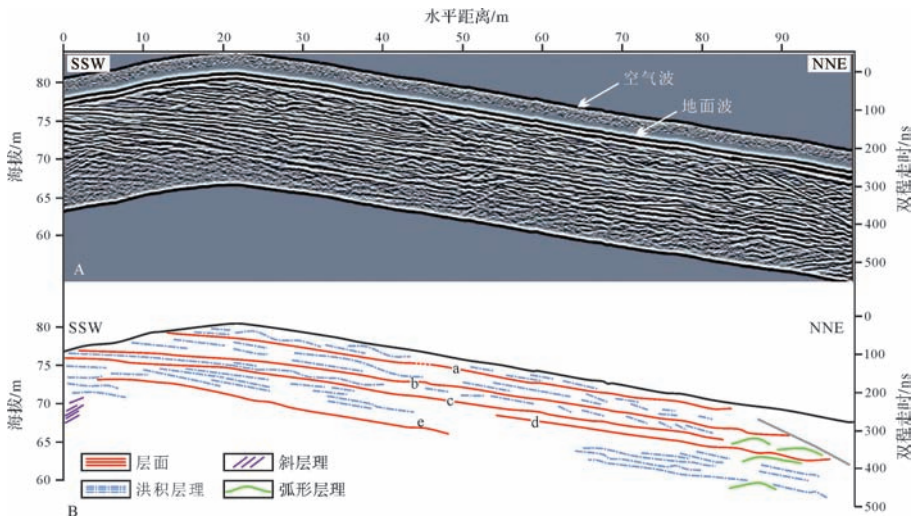


图5 测线2GPR 图像及其解译

Fig.5 The interpretation of ground penetrating radar image of Line 1

### 3.3 测线 3GPR 图像解译

测线 3GPR 图像(图 6A)和初步解译(图 6B)可分辨出 5 条连续、近于水平的强振幅反射面, a、b、c、d 和 e 5 个层面(图 6B), 结合前述横剖面探测结果, 这些层面应当是棱角状砾石和粗砂构成的底砾岩层, 且被大幅度波状起伏的槽状层理断开。这类沉积构造很可能是冲积扇上半部常见的由低黏度水流所形成、分选不好的砾石和砂呈透镜体状所呈现的沉积构造影像。此外, 层面之间, 还分布众多小型的波状细层, 应为洪水不断冲刷—充填和频繁游弋改道所形成的垄槽组合层理, 这与现代大沙山北坡普遍发育的垄岗状地形起伏特点是一致的。

## 4 讨论

综上所述, 本文运用 GPR 探测图像揭示了福建海坛岛君山北麓大沙山内部沉积构造特征, 结合大沙山地质地貌考察和剖面观察, 关于大沙山沉积构造的成因可以讨论如下:

### 4.1 GPR 图像揭示的冲积扇沉积构造特征

研究表明, 冲积扇沉积类型可划分为泥石流沉积、河道沉积、漫流沉积和筛状沉积, 这些沉积发生的位置和沉积物特征是不同的<sup>[25]</sup>。本次两横一纵三条 GPR 测线获得的三幅 GPR 探测图像, 揭示了礫山大沙山内部沉积构造的三维展布特征, 总体上反映出了冲积扇上部的河道沉积、漫流沉积的特点, 同时受到海岸带风力作用的影响。

三条测线清晰记录了 3~5 个层面。横剖面上(图 4, 5), 延伸较平直, 两两层面之间大体平行, 并向北倾斜, 倾角 15°~20°, 与大沙山表面坡度基本一致,

层面之间常见不连续的波状层理, 为冲积扇中上部洪水沟槽底部常见的波痕。但各个层序的厚度向海方向的变薄趋势不明显, 应当是本次探测横向范围较短所致; 纵剖面上(图 6), 层面大致呈水平不连续分布和交替波状起伏的沉积构造组合, 具有横向楔状叠覆的槽状的泥石流沉积构造特征, 这与大沙山表面的洪水沟槽与沟槽之间的砾石沙垄起伏特点类似(图 3B)。这些层面是以砾石粗砂为主构成的洪水沉积底砾层, 为君山北坡洪流携带砾石粗砂碎屑物质, 在坡麓地带快速堆积形成的洪积层理。洪积层理是冲积扇表面广泛发育的沿放射状沟槽展布的层理构造, 这种沉积构造是由结构和成分各不相同的洪积层叠覆而成的成层性构造, 为冲积扇独有且由洪积作用形成, 代表一次大的洪水爆发<sup>[26]</sup>。大沙山西侧谷坡剖面(图 3D), 清晰显示了洪水冲积作用形成的底砾层—砾石粗砂层和粗砂细砂构成的多个沉积旋回。因此, 本次探测深度内, 记录了研究区 3~5 次(期)较大范围的山前古洪流沉积事件。

### 4.2 GPR 图像揭示的风成沉积构造

测线 1 和测线 2 尾端广泛发育弧形上凸的抛物线沉积构造。前人研究发现, 风成的灌丛沙堆层理为倾斜层理, 其特点是以沙丘顶部为中心, 分别向迎风坡和背风坡倾斜, 倾角自下而上逐渐变大<sup>[21]</sup>, 总体上构成弧形上凸的沉积构造特点。由于这些弧形层理出现的位置位于大沙山向海一侧, 即大沙山北坡(迎风坡)的坡脚, 而现代大沙山表层尤其是坡脚地带广泛发育众多风成灌丛沙堆。因此, 可以认为这些弧形层理可能是埋藏灌丛沙堆沉积构造的反映。在冲积扇中下部冲积层和风积层的互层出现, 是由于冲积扇

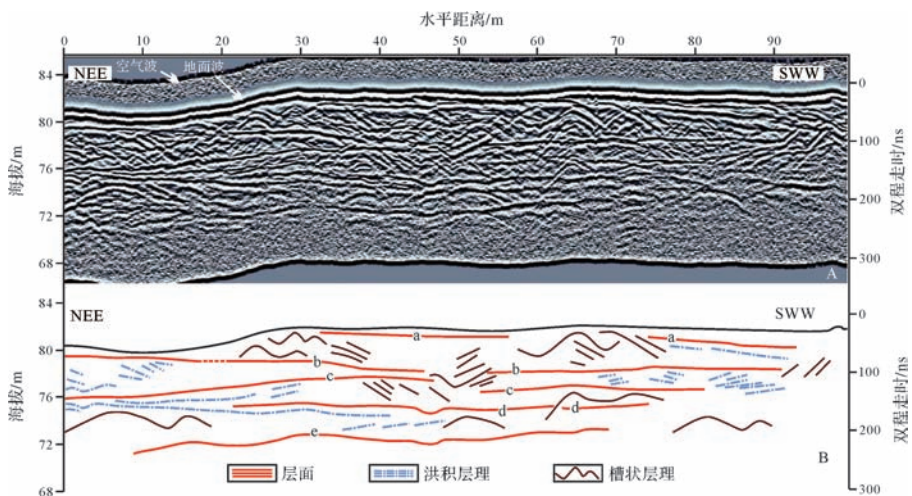


图 6 测线 3 GPR 图像及其解译

Fig.6 The interpretation of ground penetrating radar image of Line 3

表面的河槽沉积作用地点间断地发生侧向转移、并周期性受到海岸风沙沉积作用的结果。

测线 1 和测线 2 起始点处发育简单的斜层理(图 4,5),倾向 SSW、倾角约 30°,这是风成沙丘落沙坡常见的层理类型,是在垂直大沙山脊走向的向岸风力作用下,沙丘砂或大沙山迎风坡风沙向陆前移过程中在落沙坡发育的前积层理<sup>[1]</sup>。

## 5 结论

(1) 三条 GPR 测线揭示了大沙山内部 20 m 的沉积构造。在横剖面上,主要是向北倾斜且大致互相平行的层面,倾角约 15°,与现代大沙山北坡坡度大体一致;在纵剖面上,以层面和波状起伏的槽状层理为特点,总体上显示为冲积扇上部特有的槽状的泥石流沉积构造。同时,三条测线记录了 3~5 次(期)较大范围的山前古洪流沉积历史。同时,两条横向 GPR 测线的两端不同程度显示了在 NNE 向岸风作用下形成的沉积构造:草灌丛沙堆的弧形层理和风成沙丘落沙坡发育的前积层理。

(2) 大沙山具有山麓冲积扇的典型地质地貌特征。大沙山北坡缓长,向北倾斜,表面相间分布 5~6 条砾石垄岗和宽浅沟槽,为冲积扇中上部常见的洪水侵蚀沟槽。在西侧谷坡剖面上,显示为砾石层和粗砂细砂层交替构成的、向北倾斜的层理,和大沙山北坡坡面倾向倾角一致,见曲流河床迁移时河床砾石充填形成的砾石和粗砂透镜体。总体显示为冲积扇的地貌和沉积构造特征,与上述 GPR 探测获得的内部沉积构造信息所揭示的地质地貌特征是吻合的。

(3) 大沙山南坡具有风成沙丘落沙坡的地貌特点,实际上是在冲沟谷坡基础上,向岸风吹扬北坡表面的风沙在背风坡沉降发育而成;大沙山北坡中下部广泛分布灌草丛沙丘,为海岸带风沙作用的产物;表面成层散布的棱角状砾岩和粗砂层,显示典型的风蚀特点。综上所述,海坛岛君山北麓的大沙山是侵蚀残余的冲积扇堆积体,在此基础上,经风力侵蚀和堆积作用雕琢形成现有的地貌形态。

## 参考文献(References)

- 1 里丁 H G. 沉积环境和相[M]. 周明鉴,陈昌明,译. 北京:科学出版社,1978:20-22. [Reading H G. Sedimentary Environments and Facies [M]. Zhou Mingjian, Chen Changming, Trans. Beijing: Science Press, 1978: 20-22.]
- 2 Galloway W E, Hobday D K. Terrigenous Clastic Depositional Systems [M]. New York: Springer, 1983: 29-59.

- 3 张纪易. 粗碎屑洪积扇的某些沉积特征和微相划分[J]. 沉积学报,1985,3(3):75-85. [Zhang Jiyi. Some depositional characteristics and microfacies subdivision of coarse clastic alluvial fans[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(3): 75-85.]
- 4 吴胜和,范峥,许长福,等. 新疆克拉玛依油田三叠系克下组冲积扇内部构型[J]. 古地理学报,2012,14(3):331-340. [Wu Shenghe, Fan Zheng, Xu Changfu, et al. Internal architecture of alluvial fan in the Triassic Lower Karamay Formation in Karamay oilfield, Xinjiang [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 331-340.]
- 5 Al-Farraj A, Harvey A M. Desert pavement characteristics on Wadi terrace and alluvial fan surfaces: Wadi Al-Bih, U.A.E. and Oman [J]. Geomorphology, 2000, 35(3/4): 279-297.
- 6 莫多闻,朱忠礼,万林义. 贺兰山东麓冲积扇发育特征[J]. 北京大学学报:自然科学版,1999,35(6):816-823. [Mo Duowen, Zhu Zhongli, Wan Linyi. The alluvial fans along the eastern foot of Helan Mountain [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1999, 35(6): 816-823.]
- 7 李新坡,莫多闻,朱忠礼. 侯马盆地冲积扇及其流域地貌发育规律[J]. 地理学报,2006,61(3):241-248. [Li Xinpo, Mo Duowen, Zhu Zhongli. Developments of alluvial fans and their catchments in Houma Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(3): 241-248.]
- 8 Hsu L, Pelletier J D. Correlation and dating of Quaternary alluvial-fan surfaces using scarp diffusion [J]. Geomorphology, 2004, 60(3/4): 319-335.
- 9 Jayko A S. Late Quaternary denudation, Death and Panamint Valleys, eastern California [J]. Earth-Science Reviews, 2005, 73(1/2/3/4): 271-289.
- 10 Giles P T. Investigating the use of alluvial fan volume to represent fan size in morphometric studies [J]. Geomorphology, 2010, 121(3/4): 317-328.
- 11 王惠廉. 探地雷达概论——暨专辑序与跋 [J]. 地球科学,1993,18(3):249-256. [Wang Huilian. An introduction to ground penetrating radar——preface and postscript to the current special issue [J]. Earth Science, 1993, 18(3): 249-256.]
- 12 Bristow C S, Bailey S D, Lancaster N. The sedimentary structure of linear sand dunes [J]. Nature, 2000, 406(6791): 56-59.
- 13 Mills H H, Speck M Ae. Ground-penetrating radar exploration of alluvial fans in the southern Blue Ridge Province, North Carolina [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 1997, 3(4): 487-499.
- 14 Bristow C S, Jol H M. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments [C]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 211(1): 1-7.
- 15 Leopold M, Völkel J, Heine K. A ground-penetrating radar survey of late Holocene fluvial sediments in NW Namibian river valleys: Characterization and comparison [J]. Journal of the Geological Society, 2006, 163(6): 923-936.
- 16 Kostic B, Aigner T. Sedimentary architecture and 3D ground-penetrating radar analysis of gravelly meandering river deposits (Neckar Valley, SW Germany) [J]. Sedimentology, 2007, 54(4): 789-808.
- 17 Barnhardt W A, Sherrod B L. Evolution of a Holocene delta driven by episodic sediment delivery and coseismic deformation, Puget Sound,

- Washington, USA[J]. *Sedimentology*, 2006, 53(6): 1211-1228.
- 18 石建基. 福建平潭君山火山岩系地质特征及其形成时代的讨论[J]. *福建地质*, 1998, 17(1): 44-56. [Shi Jianji. Discussion on the geological characteristics and the time of the Junshan volcanic sequence in Pintan county, Fujian province[J]. *Geology of Fujian*, 1998, 17(1): 44-56.]
- 19 黄履思. 平潭县志[M]. 平潭: 平潭县志编纂委员会, 1990. [Huang Lǔsī. *Pingtān County Annals* [M]. Pingtan: Chengwen Press, 1990.]
- 20 田永青, 潘爱军. 台湾海峡西部近海潮汐特征[J]. *台湾海峡*, 2011, 30(4): 483-488. [Tian Yongqing, Pan Aijun. Tidal characteristics in offshore sea of western Taiwan Strait[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2011, 30(4): 483-488.]
- 21 武胜利, 李志忠, 肖晨曦, 等. 灌丛沙堆的研究进展与意义[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(5): 734-738. [Wu Shengli, Li Zhizhong, Xiao Chenxi, et al. Research progress on nabkhas and research significance[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(5): 734-738.]
- 22 Bristow C S, Pucillo K. Quantifying rates of coastal progradation from sediment volume using GPR and OSL: The Holocene fill of Guichen Bay, south-east South Australia[J]. *Sedimentology*, 2006, 53(4): 769-788.
- 23 Botha G A, Bristow C S, Porat N, et al. Evidence for dune reactivation from GPR profiles on the Mafutaland coastal plain, South Africa[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2003, 211(1): 29-46.
- 24 Havholm K G, Bergstrom N D, Jol H M, et al. GPR Survey of a Holocene aeolian/fluvial/lacustrine succession, Lauder Sandhills, Manitoba, Canada[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2003, 211(1): 47-54.
- 25 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. [Jiang Zaixing. *Sedimentology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.]
- 26 冯增昭, 王英华. 中国沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. [Feng Zengzhao, Wang Yinghua. *Sedimentology of China* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.]

## Unravelling the Sedimentary Structure of Coastal Alluvial Fan and its Origin in the Northern Haitan Island, Fujian, Using Ground Penetrating Radar

LAI HaiCheng<sup>1,2</sup> LI ZhiZhong<sup>1,2,3</sup> JIN JianHui<sup>1,2,3</sup> DENG Tao<sup>1,2</sup> JIANG Feng<sup>1,2</sup>  
YU XiaoLi<sup>1,2</sup> YUAN XiuQuan<sup>1,2</sup> SHEN JianLing<sup>1,2</sup> GONG SongBai<sup>1,2</sup>

(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)

**Abstract:** Alluvial fan could provide valuable information in recording local climate change, reflecting neotectonic movement and rebuilding paleogeographic environment. Compared with inland areas, coastal zone as the interface of three layers of atmosphere, ocean and land has distinct differences in depositional environment, resulting in unique material sources and dynamic condition. Thus, alluvial fan in coastal zone may have special geological landscape process and sedimentary structure characteristics. There is a great sandy hill which covered by grayish yellow eolian sand layer in the northern Junshan along the coast of Haitan island, Fujian Province. It seems to be a big aeolian dunes, but in fact alluvial fan shape. In this paper, we used the ground penetrating radar (GPR) to detect the internal sedimentary structure of the great sandy hill, and tried to find out its origin. Detection results show that in the middle-upper part of the great sandy hill, there developed sedimentary cycle composed of angular gravel or coarse to fine sand and groove depositional structure, which presents the depositional characteristics of traditional alluvial fan; in the middle-lower part of the great sandy hill, there developed curved depositional structure presented alternately in the layer. Based on the results, we also found that detecting depth of the alluvial fan record the wide range of three to five times of piedmont ancient flood sedimentary history. Combining the geological investigation in the great sandy hill, we assumed that the great sandy hill is the remnant of alluvial fan, which contains the characteristics of aeolian sediments along the coastal zone. The research is benefit for further understanding of the evolution of paleogeographic environment in the coastal zone of South China, and enriching the research of dynamic geomorphological processes on coastal zone and the sedimental structures of alluvial fan.

**Key words:** ground penetrating radar(GPR); alluvial fan; sedimentary structures; coastal zone; Haitan Island of Fujian