

南海北部边缘壳内低速层发育特征与尖灭成因

黄文凯

(中国地质调查局广州海洋地质调查局,广州 510075;国土资源部海底矿产资源重点实验室,广州 510075)

摘要:研究表明,南海北部边缘广泛存在壳内低速层,且往海盆方向逐渐尖灭消失。认识壳内低速层为何尖灭是研究南海形成演化不可或缺的环节之一。通过总结前人对华南沿海及南海北部地壳结构调查的成果,对比了南海北部与华南大陆壳内低速层的分布特征,并解释了区域地震剖面等资料,探讨了南海北部边缘壳内低速层的尖灭的原因,认为大型断裂带为壳内低速层提供热散失的渠道,使未彻底固化的早期熔融层冷却固化的过程加速,从而使低速层尖灭消失。研究对认识南海北部深部地壳结构、边缘海形成演化过程有重要意义。

关键词:南海北部边缘;壳内低速层;发育特征;尖灭成因

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.08001

地球物理探测资料表明,中国大陆地壳特别是构造活动区的地壳多具有 3 层结构的特点,在地壳中、上部常存在一个低波速、低阻(高导)的结构层^[1],即壳内低速层。前人研究成果表明壳内低速层的分布,与壳内熔融、地热、火山、强震活动等剧烈地质运动都有着紧密的联系,在台地、张裂带、大陆活动边缘、褶皱带、俯冲板片内等大地构造单元均可发现成因各异的壳内低速层,同时,壳内低速层的成因和成矿、构造活动、强震活动、等均有密切的关系^[2-10]。

我国青藏、川滇、华北等地区均发现大陆壳内低速层的存在,华南大陆和南海北部壳内低速层也广泛分布,且往南海海盆方向逐渐尖灭消失。有学者认为该壳内低速层消失与新生代张裂、前新生代强烈挤压作用相关^[9],但总体上对于壳内

低速层的尖灭成因研究较少,缺乏统一、全面的论述和认识。本文收集华南沿海内陆连县—博罗—港口、云霄—安溪、福州—惠来三线的地震探测资料,以及南海北部的 OBS、OBH、OOS 等深部地壳结构调查的成果,对南海北部壳内低速层尖灭区域的地震剖面进行解释,通过海陆壳内低速层对比分析,探讨南海北部边缘壳内低速层尖灭的成因。研究成果对认识南海北部深部地壳结构、边缘海形成演化过程有重要意义。

1 区域地质背景

南海是东亚大陆边缘的重要组成部分,是西太平洋最大的边缘海之一,因其独特的构造特征和地理位置,一直都是国内外地球科学研究的热点。南海北部边缘是华南地块与南海海盆的交界,是中国海上油气勘探的重点地区。本文研究区位于南海北部边缘,105°~120°E,16°~25°N 之间,涵盖了华南大陆边缘,南海北部陆架、陆坡区,新生代盆地主要分布有莺歌海盆地、琼东南盆

收稿日期:2017-05-20

基金项目:海洋地质保障工程资助项目(GZH201100205)

作者简介:黄文凯(1986—),男,硕士,工程师,主要从事海洋区域地质调查与研究。E-mail:kevinwonghkw@outlook.com

地、西沙海槽盆地、珠江口盆地、西北次海盆以及中央海盆北部(图 1)。

地貌上,华南沿岸为低山丘陵地形,山体总体为 NE 走向,区内广泛出露古生代—前古生代地层和岩浆岩、部分中—新生代盆地地层,以及中生代花岗岩。断层海岸和火山岩海岸发育^[10]。南海北部陆架西起北部湾,东止台湾海峡,长 1 425

km,最大宽度 310 km,具有中部宽、东部和西部窄的特点;陆架外缘的坡折带水深差异较大,但大部分都在 100~300 m 之间。陆坡地形崎岖不平,起伏较大,由台湾东南端向西延伸至西沙海槽,在水深为 3 400~3 700 m 处与深海平原的分界。陆坡呈 NE 向展布,全长约 1 350 km,宽 143~342 km,由西至东逐渐缩窄,面积约 213 000 km²^[11]。

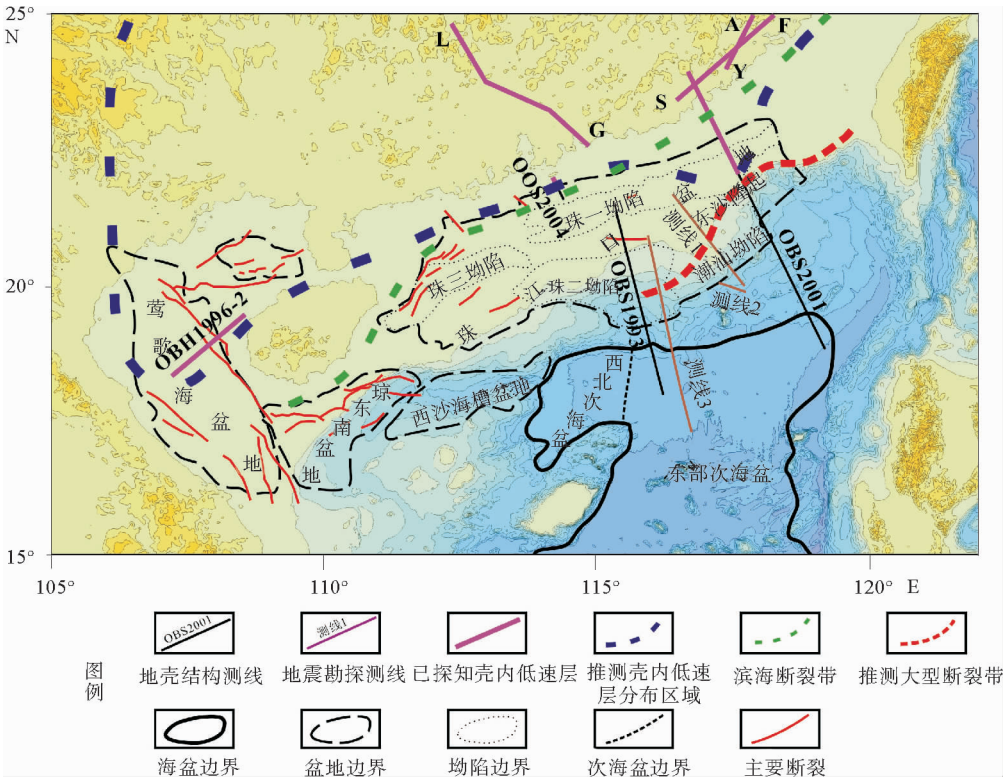


图 1 南海北部构造单元划分(据[12]修改,地壳结构测线位置据文献[13])

Fig. 1 Map of tectonic units in northern South China Sea (modified from references [12,13])

1.1 地壳厚度特征

研究表明,华南大陆莫霍面埋深从北至南由 35 km 减薄到 29 km,最薄处为 26 km(图 2),地壳厚度变化较小,可识别典型的上地壳、中地壳、下地壳 3 层陆壳结构。华南陆区一般上地壳厚度为 8~12 km,主要由花岗岩组成;中地壳厚度为 8~10 km;下地壳厚度为 10~18 km。上、中地壳厚度合计约 18~20 km,比下地壳厚度略大^[14,15]。

与陆区相比,南海北部地壳厚度明显减薄,且厚度多在 12~26 km 之间变化,总体呈 NW—SE,陆架至海盆减薄的趋势。西部地壳厚度为 26~30km,其中两处较薄,一是珠江口盆地珠三坳

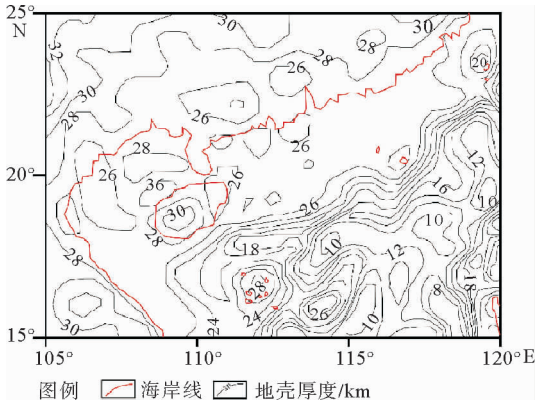


图 2 华南沿海大陆及南海北部地壳厚度图(据文献[18])

Fig. 2 Crustal thickness map of southern China coast and northern south China Sea (from reference[18])

陷,约 23~24 km;另一处是西沙海槽,海槽中部莫霍面埋深最浅,地壳厚度最薄,地壳厚度从海槽中部向两侧增加,由 8 km 逐渐增加到 25 km 以上,其中下地壳厚度未见显著增厚,上地壳厚度变化剧烈,增厚明显,沉积基底面呈较为复杂的形态,且半地堑、半地垒发育,海槽两侧的地壳结构大致呈对称分布,局部见有下地壳高速层^[14]。海区中部地壳厚度从陆架向海盆区递减,由 26 km 减薄至 8 km,上地壳厚度为 8~10 km。东部外陆架的莫霍面埋深为 30 km,向海盆逐渐变浅为 11 km。其中东沙隆起位于珠江口盆地中部,中央隆起带东段,介于珠一、珠二凹陷之间(图 1),走向 EW—NE 向,呈弧形长条状展布。东沙隆起附近海区地壳厚度变化剧烈,在隆起中心区域地壳厚度达 28 km,至海盆边缘迅速减薄至 16 km。而莫霍面等深线与海水等深线较吻合,且均大致呈 NE 向排布^[16-21]。

1.2 断裂构造

研究区内断裂构造非常发育。早期发育的断裂具有规模大、切割深度大、活动期次多等主要特点,在空间展布上纵横交错,构成盆地基底复杂的格局。研究区内断裂按走向分类,主要有 NE—NNE、NW—NWW 及 EW 向 3 组,各组断裂在不同的地区发育密度不同、活动的开始和持续时间也有所差异^[11]。其中 NE—ENE 组形成时间最早主要为正断层,平面上呈雁行状排列,其具有断面陡、断距大、规模大等特征。正断裂成群产出,上盘的地块通常呈现阶梯式下落的样式。部分断层以同生断层的形式发育,控制了断层两盘地层的沉积,使断层上盘的地层厚度远大于下盘;少数断裂新近纪早期仍有活动,切割了晚新生代沉积层(图 3)。

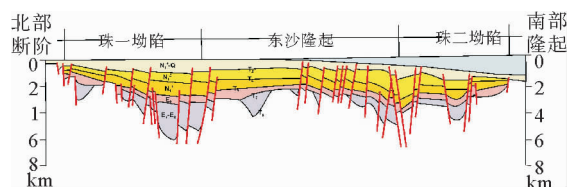


图 3 珠江口盆地断裂系发育特征(据文献[11])

Fig. 3 Characteristic of fault sets of

Pearl River Mouth Basin (from reference [11])

南海北部构造活动较强烈的地区是滨海断裂与东亚系或北西向断裂的交汇带,该带沿 20~60 m 水深线展布,宽达 70 km^[22,23]。其东北端与福建沿海地带的 NE—NNE 走向的近岸海域断裂带,其东北面与福建沿海地区的近岸 NE—NNE 向断裂带相接,向西南沿着南澎列岛—红海湾口—担杆岛—上下川岛—海陵岛—一线南部的海域分布,大约在等深线 30~50 m 区间内,总体走向 NE50°—70°,长达 1 000 km 余^[24]。滨海断裂带分隔了南海北部边缘和华南沿海 2 个地质单元,并将南海北部陆缘地震带的强震活动控制^[25]。

而东沙隆起北缘与南缘均发育大型断裂带。由一系列 NE、ENE、WNW 以及 E—W 向断裂所组成的东沙隆起北缘断裂带,其主断层的最大断距达 2 km 以上;而南缘断裂带呈 ENE—NE 向弧形展布,从海底开始错断层位直达古近系基底,最大断距超过 1 500 m。同时,燕山期花岗岩和喜山期玄武岩在东沙隆起及其周缘普遍发育^[20]。

2 壳内低速层分布及特征

2.1 华南大陆及南海北部边缘内低速层分布

华南沿海及南海北部边缘地壳结构的研究工作已经开展了 40 余年^[14]。前人主要利用地球物理勘探的方法研究华南的地壳结构。研究区内地壳总体上包括陆壳 3 层结构,上地壳厚度由北向南逐渐减薄,海区最薄处仅有 1~2 km。上地壳底部存在一个从华南沿海陆壳向东南延伸的壳内低速层,该层可延至南澳岛东南约 150 km 的陆架区,其埋深为 10.0~20.0 km,厚度为 2.5~4.0 km,层速度为 5.5~5.9 km/s,与上下地层速度相比分别低 0.5 km/s。下地壳厚度基本稳定。

自 20 世纪 90 年代以来,海底地震仪等探测技术发展迅速,南海的海底地震仪、海陆联测和地壳结构研究都取得重大的进展。根据海陆地震探测工作所获得的资料,得到华南沿海与南海北部陆坡壳内低速层的分布情况(图 1)。

其中,华南内陆 3 条测深剖面(福州—泉州—汕头一线^[3]、云霄—安溪一线^[26]、连县—博罗—惠东—港口一线^[27])(图 4)表明。南海北部沿海

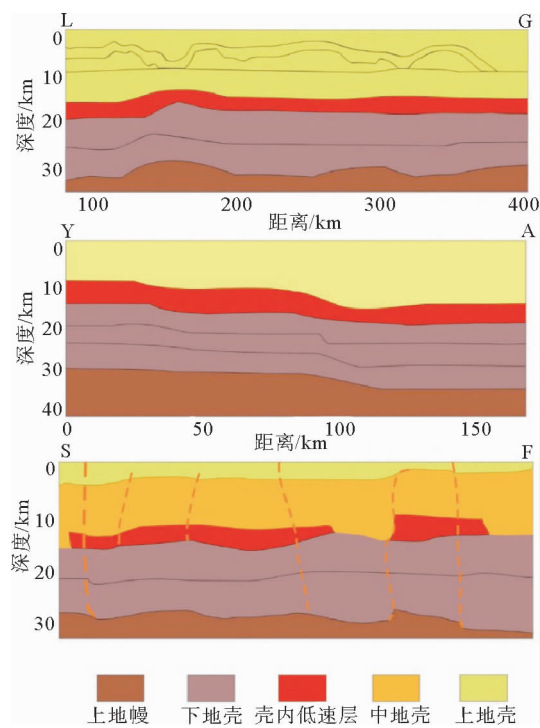


图 4 华南内陆地震测线剖面 (据文献[3,26,27]修改)
Fig. 4 Seismic profile in Southern China Continent
(modified from references[3,26,27])

内陆地壳结构从上到下层次分明,具典型 3 层陆 X 壳结构。其中上地壳的纵速度为 5.2~6.2 km/s,厚度在 1.5~10 km 之间,福建一带上地壳厚度较薄,岩石密度为 2.72~2.82 g/cm³,为断裂所切割;中地壳厚度在 5~10 km,地震波速度为 5.8~6.4 km/s;密度 2.84 g/cm³。

在中地壳底部埋深约为 15~20 km 处存在壳内低速层。壳内低速层厚 3~4 km,纵波速度 5.5~5.9 km/s 之间,与上下层位速度差在 0.3~0.8 km/s 之间;下地壳埋深 20~35 km,厚度在 10~15 km 之间,地震波速为 6.6~7.06 km/s,密度为 2.94~3.07 g/cm³;下地壳底界为莫霍面。

南海北部属陆壳结构。其中上地壳较薄,从北向南呈减薄趋势,最薄处只有 1~2 km,地震波速 5.3~6.2 km/s^[28,29]。于测线 OBH1996-2^[16](图 5)、OBS-2001^[19,20](图 6)中可见,上地壳底部存在壳内低速层,深度范围 7.0~20.0 km、速度为 5.5~6.0 km/s、厚度为 2.5~6.0 km,其与上界面地层速度相比低 0.5~1.2 km/s,与下界面地层速度相比低 0.4~0.5 km/s。下地壳厚度总体变化较少,局部存在平均厚度为 3~5 km 的壳下高速层。

2.2 华南沿海壳内低速层尖灭特征

综合前述资料,通过对比南海北部与华南大陆壳内低速层的分布特征,确认壳内低速层在 SE 方向上的延伸,且其深度范围一般在 7.0~18.0 km、速度为 5.5~6.0 km/s、厚度为 3.0~6.0 km、上下地层速度差约为 0.4~1.2 km/s 等各主要特征均较一致,可认定二者为同一条壳内低速层。此壳内低速层有部分尖灭于南海北部海岸带附近,部分尖灭于东沙隆起一带。

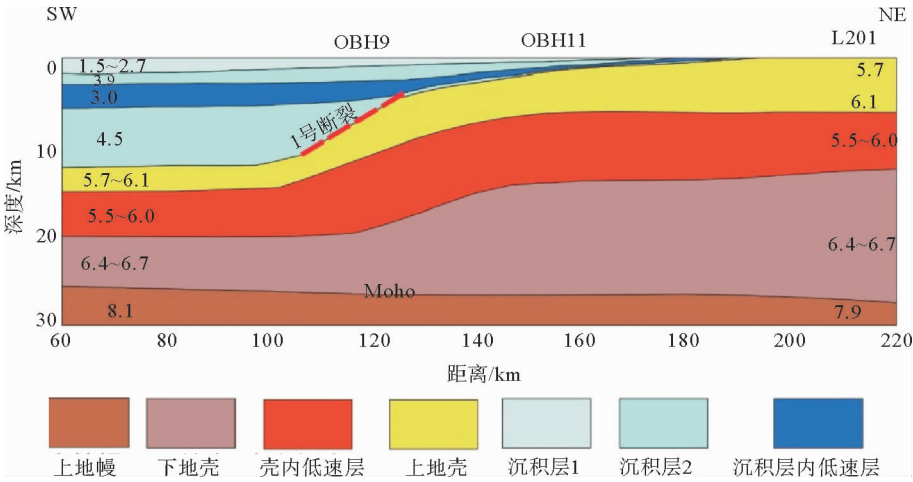


图 5 OBH1996-2 测线地震速度剖面 (据文献[17]修改)
Fig. 5 Seismic velocity profile of OBH1996-2 (modified from reference[17])

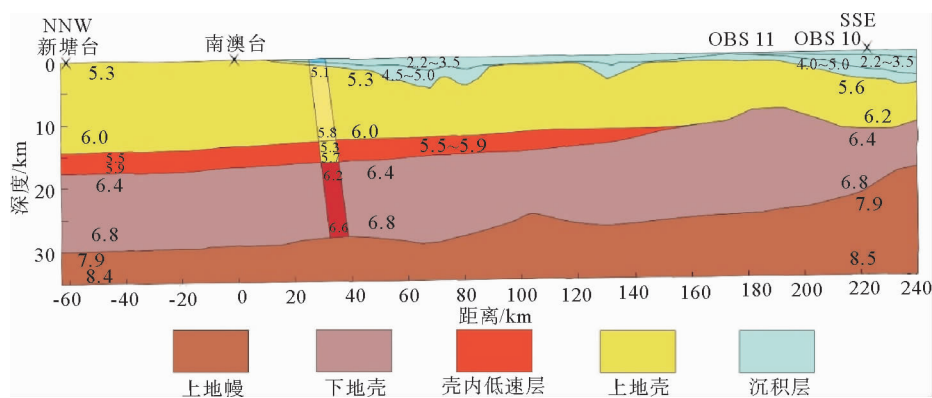


图 6 沿 OBS2001 测线北段地壳速度结构剖面(据文献[20]修改)

Fig. 6 Crustal velocity profile of the northern section of OBS2001 (modified from reference[20])

而根据华南大陆和南海北部的壳内低速层分布可以得到两条联合剖面,一是位于南海北部边缘东侧的 OBS2001 测线;另一条是 L—G 测线剖面、OOS2004 测线剖面、OBS1993 测线剖面的联合剖面。此两条剖面使华南沿海壳内低速层尖灭特征更加直观。

2.2.1 东部剖面:OBS2001

东部剖面(剖面位置见图 1)基于海底地震测线 OBS-2001 的成果资料编制^[19,20]。该剖面构建了南海北部边缘东部由陆到海的地壳结构(图

7)。剖面显示莫霍面深度从陆区约 30 km 向海区逐渐减薄至 16 km 左右,且在陆架及陆坡处减薄程度最强烈,莫霍面迅速抬升,对应位置的水深急剧增加,直至海盆处才渐趋于平缓;在上地壳下部(埋深 10.0~18.0 km)存在一层速度 5.5~5.9 km/s、厚度 2.5~4.0 km 的低速层,与上下地层速度相比分别低 0.5 km/s。此壳内低速层从华南沿海陆壳一直向东南延伸,直至南澳岛东南约 150 km 的陆架区,最终尖灭于东沙隆起处。

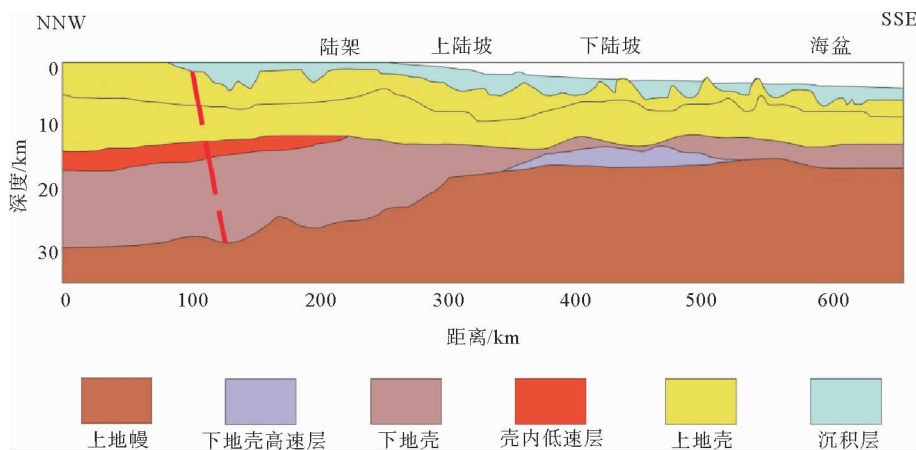


图 7 OBS2001 测线剖面图(据文献[19,20]修改)

Fig. 7 Seismic profile of OBS2001 (modified from references[19,20])

2.2.2 中部剖面:L-G-OOS2004-OBS1993

根据连县—博罗—港口测线(L—G 测线)、2004 年南海北部海陆地震联测(OOS2004 测线)和 1993 年海上 OBS 探测所获得的结构资料(OBS1993 测线),构建了南海北部边缘中部从陆

至海的地壳结构剖面图^[28](图 8,剖面位置见图 1)。图中可见莫霍面深度从海陆过渡带始逐渐抬升且幅度非常大,地壳厚度由陆上的 29 km 减薄至洋壳处的 13 km 左右。该剖面还显示在海陆过渡区域发育的滨海断裂带。上地壳底部的壳内

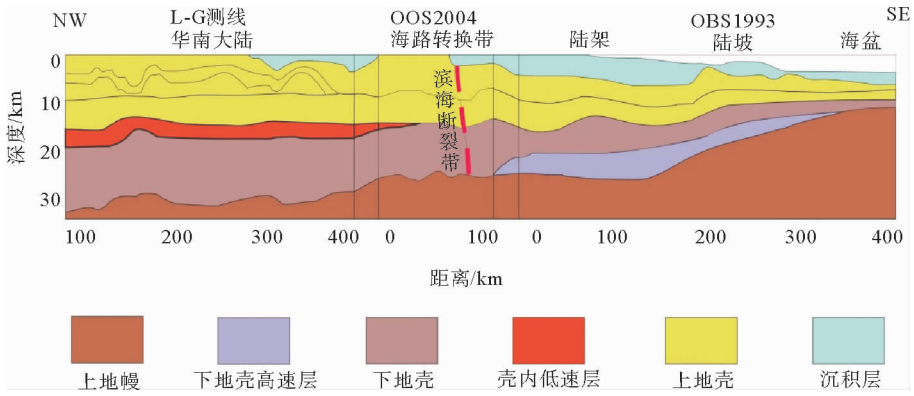


图 8 连县—博罗—港口测线—OOS2004 测线—OBS1993 测线剖面(据文献[30]修改)

Fig. 8 Combined seismic profile of L-G, OOS2004 and OBS1993 (modified from reference [30])

低速层在华南大陆连续发育,其纵波速度为 5.5~6.0 km/s,厚度为 3~6 km,该壳内低速层逐渐尖灭于滨海断裂带处附近。

通过对上述两条联合剖面的分析,得出南海北部边缘壳内低速层的大致分布情况。然而,壳内低速层分别尖灭于 OOS2004 测线与 OBS2001 测线的原因,是两者各有特性还是存在一定关系,仍需开展深入探讨。

3 壳内低速层尖灭处断裂带发育特征

3.1 滨海断裂带

对于华南沿海海陆过渡带,前人认为该处存在一条大型活动断裂带和地震带,并命名为滨海断裂带(图 1)。目前对滨海断裂带的认识主要通过地形地貌、地层变化、重磁异常、天然地震、卫星影象等方法进行^[31]。但由于滨海断裂带存在的地质地貌依据,多属推测性质,其确切位置一直存在争议^[24,25,32-36]。另外,在对滨海断裂带的构造属性问题上也存在许多分歧。自从 20 世纪 80 年代特提斯研究的兴起,前人认为海南岛与华南之间存在晚古生代的中特提斯分支洋,并根据华南沿海的带状重、磁异常特征,得出滨海断裂带为一碰撞结合带、中生代聚敛带或一定地质时期的古缝合线的结论^[37-39]。另外,有学者根据断裂成因、断裂性质及海陆沉积地层差异等因素认为,滨海断裂带是一条新生代早期的断裂,且根据基底性质分析,其为发育于华南加里东褶皱带内部的张

性断裂带^[11],起着裂解华南大陆的作用^[40,41]。

综合前人研究,滨海断裂带是一个上下连续的、绵延上千千米的低速破碎带,走向为 ENE,该断裂带属 ENE 至近 EW 向断裂系,倾向 S 至 E,为张性断裂构造带^[24,36,40-43]。以此断裂带为基准,向海方向沉积层逐渐发育,沿断裂带多次发生过 7 级大地震,是华南陆区正常型陆壳与海区减薄型陆壳的分界断裂。前文所述的海陆联测剖面(L-G-OOS2004-OBS1993 剖面、OBS2001N-S 剖面)均探测到滨海断裂带的存在。

3.2 沙隆起区断裂带

实测资料表明,东沙隆起区也发育大型断裂带。地震测线 1(图 9,测线位置见图 1)揭示新生界地震反射特征为高频,强振幅,连续性好,厚度薄。地层向 NW 方向倾斜,外形为楔状。其底界为振幅强、连续性好的双强轴反射界面。其下为中生界,中生界与新生界呈明显的角度不整合接触,其顶部遭强烈剥蚀现象明显。

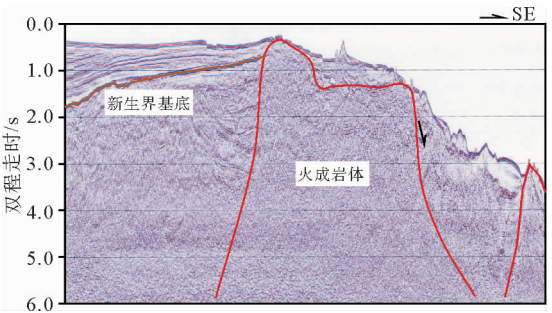


图 9 测线 1 测线剖面及解释

Fig. 9 Seismic profile and interpretation of line1

剖面中坡折带区域存在一处丘状火山岩体反射。该火山岩体沿断层侵入并向上切断各沉积层,并使与之接触的新生界基底界面向上弯曲。地震测线 2 揭示新生界地震反射特征与测线 1 相似(图 10,测线位置见图 1),但振幅较弱,为高频、中一强振幅、高连续性地震反射,其基底对中生界削蚀作用明显。中生界沉积厚度大,褶曲和断裂发育,地震反射界面波阻抗小,剖面中可见一丘状,顶界强振幅,内部杂乱反射的低隆起,为丘状火山岩体反射。该火山岩体沿断层侵入并切断各沉积层,并使与之接触的新生界基底界面向上弯曲。

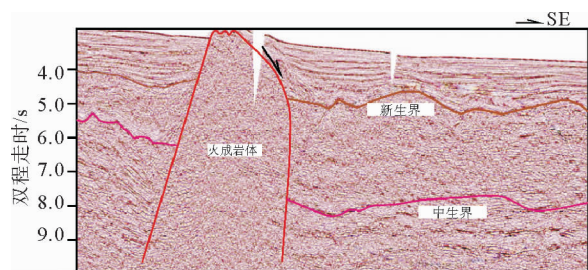


图 10 测线 2 测线剖面及解释

Fig. 10 Seismic and interpretation profile of line 2

在测线 1、2 两个剖面中,新生界沉积连续、完整,局部发育火山岩体,岩体和断层均切割新生代沉积层,并使沉积层在岩体边缘向上弯曲,据此推测火山岩形成时间为新生代。断层也曾有活动。同时岩浆通过一定的通道侵入或喷溢,通常这些通道就是深大断裂带。同时亦可推测,从东沙群岛往北东向延伸的强磁异常区可能是新生代频繁的火山活动所引起。

3.3 南海北缘中部洋陆过渡区断裂带

测线 3 剖面新生界地震反射特征为高频、中一强振幅、连续性好。陆架区与海盆区沉积厚约 2 000 m,陆坡区减薄明显。其底界为振幅强、连续性好的强反射界面,在陆坡区与海盆区为双强轴反射。剖面可见一系列倾向 SE 的大型正断层组(图 11)。主要分布在南海北缘的洋陆转换区域。总体上壳内低速层尖灭区域存在大量新生代断裂带。

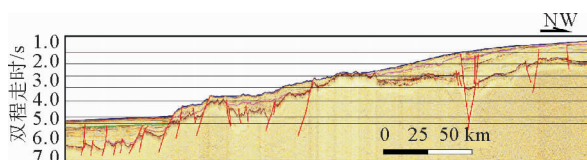


图 11 南海北部测线 3 剖面

Fig. 11 Seismic profile of line 3

4 壳内低速层尖灭成因探讨

“原地重熔—壳内对流”理论^[10,44-46]表明,从中生代的安第斯型大陆边缘发展到今天的弧盆体系,华南大陆边缘的地貌演化经历了 3 个不同的演化阶段^[11,15](图 12),即中生代末期的古华夏山脉阶段(图 12a),中生代早期的准平原阶段(图 12b)和中新世以来的海盆阶段(图 12c)。晚白垩世的陆壳熔融和构造运动导致了古华夏山脉的形成。该山脉在古近纪中期已基本被夷平,至渐新世已进入准平原阶段。古华夏山脉导致陆缘地壳减薄、莫霍面埋深变浅和区域性的重力升高。另一方面,本区地壳温度的整体下降,使形成于中生代壳内的岩浆层(壳内低速层)逐渐固结,盖层断裂则随着重熔界面(壳内岩浆层上界面)的下降而向下延伸,并在渐新世末切割到上地幔熔融层(壳下岩浆层)顶部^[47]。

在古华夏山脉被夷平的过程中,由于上部的沉积层乃至上地壳被剥蚀,上地壳底部的重熔层即壳内低速层的埋深逐渐变浅,从而增大此处的壳内低速层的热散失,加快了壳内低速层的冷却,令其固结。甚至于在古华夏山脉隆起极高的位置,即现南海各海盆处,夷平时整个上地壳乃至部分下地壳均被剥蚀。也就是莫霍面抬升越高处,古山脉隆起越高,剥蚀越多,重力调整后地势越低。同时上地壳底部的壳内低速层均冷却、固结,甚至暴露而剥蚀殆尽。即壳内低速层因冷却、固结,导致尖灭。因此,在经历重力调整后的现今,南海北部海区内已经基本无壳内低速层的存在^[10](图 12)。

海区内壳内低速层的零星存在(OBH1996-2、OBS2001 测线等),说明地壳隆起遭受剥蚀并非壳内低速层消失的唯一原因。(连县—博罗—港口)测线—OOS2004 测线—OBS1993 测线联合

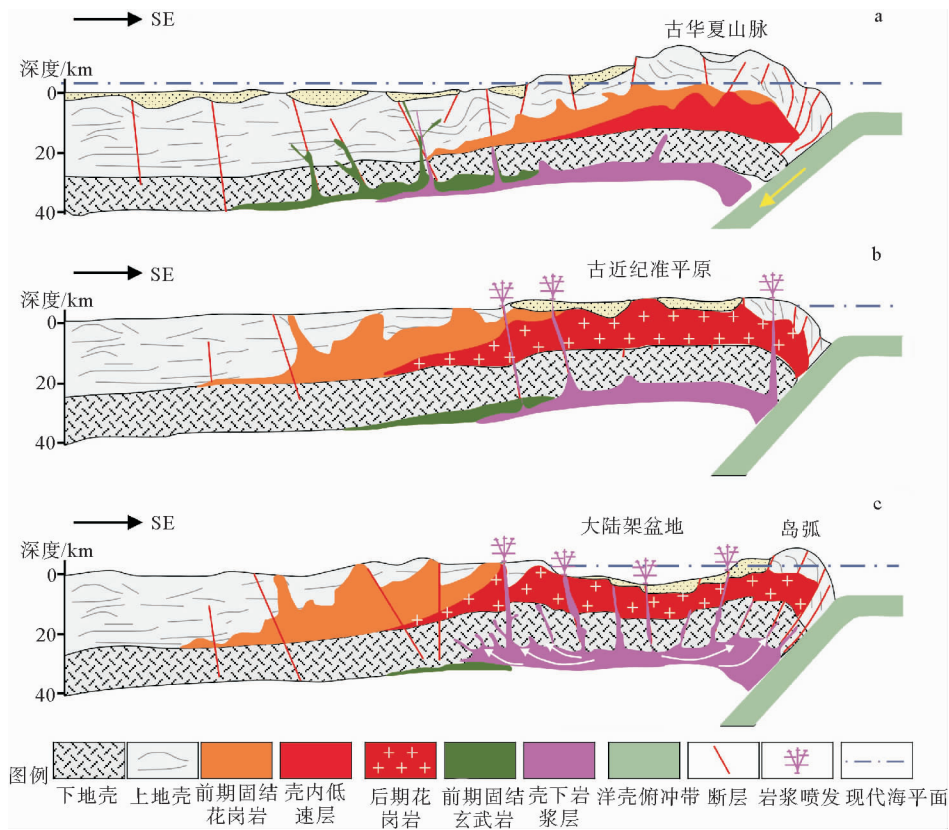


图 12 原地重熔理论有关边缘海成因示意(引自文献[10])

Fig. 12 Forming schematic diagram of marginal seas in In-situ Melting Theory (from reference[10])

剖面显示从华南内陆延伸的壳内低速层逐渐向海岸过渡带尖灭;OBS2001 测线则显示自 NW 至 SE 延伸的壳内低速层尖灭于东沙隆起区域附近。因而,海陆过渡带及东沙隆起区域必有使壳内低速层的尖灭的特殊性。

上文中测线 1 及测线 2 剖面显示东沙隆起区域存在明显的新生代火山岩体喷出,指示该处存在可作为岩浆上涌通道的深大断裂带;测线 3 测线地震剖面显示的大量倾向 SE 的大规模新生代正断层组。

图 1 展示了本文在上述研究的基础上对东沙隆起附近大型断裂带位置的推测,该断裂带位于东沙隆起及潮汕坳陷南缘,大致呈 NE 向展布。而在前文所述测线中,亦探测出滨海断裂带。

根据“原地重熔—壳内对流”理论中有关边缘海盆形成与演化的研究,结合东沙隆起区域及南海北部的地震剖面解释认为,华南大陆边缘地壳系统内能降低,重熔层固化,上地壳断裂下切而在

东沙隆起附近形成大型断裂带。岩浆沿断裂带喷发(侵入)形成巨型火成岩体,并导致东沙隆起附近的正高磁异常带的形成。

在 L—G—OOS2004—OBS1993 的联合剖面中可见,从东北方 L—G 测线延伸而来的壳内低速层至 OOS2004 测线内已明显减薄,并最终尖灭于滨海断裂带附近。同时,OBS2001 测线中的壳内低速层尖灭于东沙隆起区域,根据本文研究可知,东沙隆起周边存在东沙隆起北缘断裂带、东沙隆起南缘断裂带等断距达 1 500 m 甚至 2 000 m 的大型断裂带。而壳内低速层即为壳内熔融层,其尖灭即为热量散失,温度下降,冷却、固结的表现。正是东沙隆起北缘断裂带、东沙隆起南缘断裂带、滨海断裂带等一系列大型断裂带令壳内低速层(壳内熔融层)遭遇灌入的海水(或空气等)而迅速冷却,并固结成岩。重熔层从液相(固—液相)重新回到固相,密度增大,地震波速增大。即这些大型断裂带为壳内低速层提供了热量散失的

渠道,因而壳内低速层于此处冷却固结而尖灭。

5 结论

通过对南海北部边缘及华南大陆地区开展的地壳探测剖面分析,确定华南沿海及南海北部边缘壳内低速层呈SE向延伸,其深度范围一般在7.0~18.0 km、速度为5.5~6.0 km/s、厚度为3.0~6.0 km、上下地层速度差约为0.4~1.2 km/s,二者为同一条壳内低速层。该壳内低速层有部分尖灭于南海北部滨海断裂带附近,部分尖灭于东沙隆起附近的深大断裂带。综合分析认为大型断裂带为壳内低速层提供热散失的渠道,使未彻底固化的早期熔融层冷却固化的过程加速,从而使低速层尖灭消失。

致谢:感谢中山大学陈国能教授和邱燕教授对本文研究工作的悉心指导!

参考文献:

- [1] 顾芷娟,郭才华,李彪,等.壳内低速高导层初步探讨[J].中国科学D辑:地球科学,1995,25(1):108-112.
- [2] Mohriak W U, Bassetto M, Vieira I S. Crustal architecture and tectonic evolution of the Sergipe-Alagoas and Jacufo basins, offshore northeastern Brazil [J]. Tectonophysics, 1998, 288: 199-220.
- [3] 廖其林,王振明,王屏路,等.福州—泉州—汕头地区地壳结构的爆炸地震研究[J].地球物理学报,1988,31(3):270-280.
- [4] 李扬鉴,张星亮,陈延成.大陆层控构造导论[M].北京:地质出版社,1996.
- [5] 邵学钟,张家茹,殷秀华.油气勘探与地壳深部构造研究[J].石油勘探与开发,1999,26(2):11-14.
- [6] 徐克定.中国南方大陆岩石圈结构分析[J].油气工业地质,2000,2(2):31-46.
- [7] 杨晓松,马瑾,张先进.大陆壳内低速层成因综述[J].地质科技情报,2003,22(1):35-41.
- [8] 张景廉,于均民.论中地壳及其地质意义[J].新疆石油地质,2004,25(1):90-94.
- [9] 赵明辉,丘学林,徐辉龙.华南海陆过渡带的地壳结构与壳内低速层[J].热带海洋学报,2006,25(5):36-42.
- [10] 陈国能,洛尼格拉佩斯.花岗岩成因:原地重熔与地壳演化[M].武汉:中国地质大学出版社,2009.
- [11] 邱燕.华南大陆边缘新生代构造地貌演化机制研究[D].广州:中山大学,2006.
- [12] 高红芳.南海北部陆缘东、西部新生代沉积盆地基底特征

- 对比分析[J].南海地质研究,2008(00):23-34.
- [13] 夏少红,丘学林,赵明辉,等.南海共轭大陆边缘地壳结构及其类型特征[J].地球科学——中国地质大学学报,2011,36(5):877-886.
- [14] 姚伯初.南海北部陆缘的地壳结构及构造意义[J].海洋地质与第四纪地质,1998,18(2):1-16.
- [15] 邱燕,陈国能.华南大陆边缘新生代构造地貌演化机制研究[J].地质前缘,2011,18(1):32-38.
- [16] 姚伯初,曾维军,陈艺中,等.南海西沙海槽一条古缝合线[J].海洋地质与第四纪地质,1994,14(1):1-10.
- [17] 丘学林,施小斌,阎贫,等.南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展[J].自然科学进展,2003,13(3):231-236.
- [18] 郝天跳,刘建华,青颀.中国华南及其相邻海域一些重要断裂的地球物理证据[C]//李家彪,高抒.中国边缘海岩石层结构与动力过程.北京:海洋出版社,2003:28-33.
- [19] Wang T K, Chen M K, Lee C S, et al. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea [J]. Manuscript Submitted to Tectonophysics, 2006, 412: 237-254.
- [20] 赵明辉,丘学林,徐辉龙,等.南海北部沉积层和地壳内低速层的分布与识别[J].自然科学进展,2007,17(4):471-479.
- [21] 李洪博.珠江口盆地惠州凹陷及东沙隆起结构构造特征、演化及其与油气成藏关系讨论[D].武汉:中国地质大学,2010.
- [22] 刘以宣,卓家伦.从南海北部新构造运动特征试论该区地质环境稳定性[J].热带海洋,1984,3(3):55-63.
- [23] 徐杰,张进,周本刚,等.关于南海北部滨海断裂带的研究[J].华南地震,2006,26(4):8-13.
- [24] 刘以宣.南澳断裂带与滨海断裂带的基本特征及其活动性探讨[J].华南地震,1986,6(3):1-8.
- [25] 赵明辉,丘学林,夏骥原,等.南海东北部滨海断裂带的研究现状与展望[J].华南地震,2003,23(1):21-27.
- [26] 熊绍柏,金东敏,孙克忠,等.福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征[J].地球物理学报,1991,34(1):55-63.
- [27] 尹周勋,赖明惠,熊绍柏,等.华南连县—博罗—港口地带地壳结构及速度分布的爆炸地震探测结果[J].地球物理学报,1999,42(3):383-392.
- [28] 姚伯初,曾维军,陈艺中,等.南海北部陆缘东部的地壳结构[J].地球物理学报,1994,37(1):27-35.
- [29] 姚伯初,曾维军,陈艺中,等.南海北部陆缘西部的地壳结构[J].海洋学报,1994,16(3):86-92.
- [30] Xia S H, Zhao M H, Qiu X L, et al. Crustal structure in an onshore-offshore transitional zone near Hong Kong, Northern South China Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 37: 460-472.
- [31] 徐辉龙,叶春明,丘学林,等.南海北部滨海断裂带的深部地球物理探测及其发震构造研究[J].华南地震,2010,

- 30(supp): 10-18.
- [32] 陈恩民, 黄咏茵. 华南十九次强震暨南海北部陆缘地震带概述[J]. 华南地震, 1984, 4 (1): 11-32.
- [33] 刘以宣, 钟建强, 詹文欢. 南海北部陆缘地震带基本特征及区域稳定性初步分析[J]. 华南地震, 1994, 14(4): 41-46.
- [34] 徐起浩, 彭承光, 李运贵. 南澎列岛及其附近海域、岛屿的地震地质特征[J]. 华南地震, 1986, 6(3): 29-36.
- [35] 薛佳谋. 南澎大断裂的发育特征及其发震意义[J]. 华南地震, 1986, 6(3): 20-28.
- [36] 钟建强. 滨海断裂带之所在及其活动性初探[J]. 华南地震, 1987, 7(4): 1-7.
- [37] 李唐根, 邱 燕, 姚永坚. 大地构造特征[M]//刘光鼎. 中国海区及邻域地球物理特征. 北京: 科学出版社, 1992: 248-271.
- [38] 曾维军. 广州-巴拉望地学断面[M]//刘光鼎. 中国海区及邻域地球物理特征. 北京: 科学出版社, 1992: 272-288.
- [39] 周 蒂, 王万银, 庞 雄, 等. 地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(3): 209-218.
- [40] 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 等. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 845-852.
- [41] 赵明辉. 南海东北部海陆地震联测与滨海断裂带深部结构研究[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2004.
- [42] 夏少红, 赵明辉, 丘学林. 南海北部海陆过渡带地壳结构的研究现状及展望[J]. 华南地震, 2008, 28(4): 9-17.
- [43] 夏少红, 丘学林, 赵明辉, 等. 南海北部海陆过渡带地壳平均速度及莫霍面深度分析[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(4): 63-70.
- [44] 陈国能. 元素地球化学场及其地学意义[J]. 地球化学, 1998, 27(6): 566-574.
- [45] 陈国能, 张 珂, 邵荣松, 等. 原地重熔及其地质效应[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2001, 40(3): 95-99.
- [46] 陈国能. 岩石成因与岩石圈演化思考[J]. 地学前缘, 2011, 18(1): 1-8.
- [47] 王 晶, 陈国能, 邱 燕, 等. 壳内岩浆演化的盆地效应: 以中国东南部中生代盆地为例[J]. 地学前缘, 2011, 18(1): 24-31.

CHARACTERISTICS AND PINCH-OUT OF LOW VELOCITY LAYERS IN THE CRUST OF NORTHERN SOUTH CHINA SEA MARGIN

HUANG Wenkai

(Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China;
Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Low Velocity Layer (LVL) zones are commonly seen in South China and the Northern South China Sea (SCS) and pinch out towards the sea basin. It is indispensable to understand the cause of LVL pinch-out in order to disclose the origin and development of the SCS. This article summarized previous studies and compared the distribution of LVL in South China and the Northern SCS based on interpretation of seismic sections from related areas. The results suggest that large fault zones play key roles in LVL pinching out in the Northern SCS. LVL might release its heat along great fault zones, accelerate the process of consolidation of early fusion layer and at the same time make the LVL pinching out.

Key words: Northern Margin of South China Sea; low velocity layers; develop characteristics of LVL; pinch-out