

Synthetical Geophysical Near-Surface Survey Method Application and Analysis in Complex Mountain Seismic Prospecting

Guilin Li^{1,2}, Xing Gao³, Hong Liu⁴, Penggui Jing², Houcheng Yin², Wei Wang³

¹Institute of Tibetan Plateau, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²China Petroleum South Company, Chengdu

³State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System,
Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, CAS, Beijing

⁴Institute of Geology & Geophysics, China Academy of Sciences, Beijing

Email: liguilin65@sina.com

Received: Sep. 14th, 2011; revised: Oct. 9th, 2011; accepted: Oct. 28th, 2011.

Abstract: In connection with the southern region of complex near surface condition of geological and geophysical characteristics, we made comprehensive geophysical near surface structure survey combination experimental research, and summarized a set of targeted of complex surface structure survey method technology in the south area through many geophysical methods. Through combined methods and synthetical explain, to establish a more accurate near-surface velocity and lithology structure model, provide seismic data acquisition excitation and receiving factors, and provide reliable data for static correction processing. In Nanpanjiang and KaiLi regions seismic prospecting, it gives better guidance to the design for well depth and location, and has obtained a better effect to improve signal-to-noise ratio and resolution of Seismic data.

Keywords: Near-Surface Surveys; Geophysical Method; Velocity Model; Physical Model; Complex Mountain

综合地球物理近地表调查技术在复杂山地区地震资料 采集中的应用分析

李桂林^{1,2}, 高星³, 刘洪⁴, 敬朋贵², 殷厚成², 王伟³

¹中国科学院青藏高原研究所, 北京

²中石化勘探南方分公司, 成都

³资源与环境信息系统国家重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京

⁴中科院地质与地球物理研究所, 北京

Email: liguilin65@sina.com

收稿日期: 2011年9月14日; 修回日期: 2011年10月9日; 录用日期: 2011年10月28日

摘要: 本文针对南方地区复杂近地表条件的地质、地球物理特点, 进行综合地球物理近地表结构调查方法组合试验, 通过多种地球物理技术手段联合应用分析, 总结了一套有针对性的南方复杂山地区表层结构调查方法技术组合。通过多种方法的组合使用和资料的联合解释, 建立较准确的近地表速度及岩性结构模型, 为地震资料采集的激发、接收因素选择提供依据, 也为静校正处理提供可靠的资料, 在南盘江和凯理地区的实际应用中较好的指导了井深及井位设计, 对提高地震资料信噪比和分辨率取得了较好的效果。

关键词: 近地表调查; 地球物理方法; 速度模型; 物性模型; 复杂山地

1. 引言

近地表调查是油气地震勘探中一项十分重要的基础工作, 特别是在复杂地表地质条件下, 常采用多种

地球物理方法进行综合分析。地球物理常用的手段包含了浅层折射、浅层反射、微测井、地质雷达(GPR)、陆地声纳、初至波层析反演、浅井 VSP、微电法测井、高频电磁法等方法^[1-3]。油气地球物理近地表调查的任

务是确定近地表低降速带的厚度和速度,建立近地表物性模型和近地表速度模型。了解近地表岩石的性质、地表起伏、边坡稳定性、潜水面深度和介质含水性等因素对地震采集资料质量的影响。随着地震勘探向复杂、困难地区的不断深入,复杂的近地表结构已经成为制约地震资料采集质量的一个瓶颈问题。我国南方山地区,地域广阔,地表起伏较大,不同地段岩石出露情况有较大差异,既有灰岩、又有砂泥岩出露,这种复杂性导致任何单一方法无法完全解决表层结构问题,需要联合运用多种近地表调查手段,进行综合近地表调查,才有望建立精细的近地表模型^[4]。本文针对南方地区复杂近地表条件的特点选择合适的表层结构调查方法,进行多种手段协同的联合调查研究,通过多种方法的搭配使用和资料的联合解释,为地震采集激发、接收因素的选择提供依据,也为静校正提供可靠的资料。

2. 复杂山地区常用的近地表调查技术方法

在地震勘探中,一般采用单井或双井微测井和小折射方法,但在复杂地表区,特别是南方山地区,这些方法对解决复杂地表地质条件下的激发问题和静校正问题,仍然有一定的局限性。近年来,用于近地表探查的物探方法主要为地震、测井、电法、电磁法等方法。

2.1. 地震及测井方法

常用的地震及测井方法有浅层反射、浅层折射、微测井、陆地声纳、初至波层析反演等方法。1) 浅层反射法近地表调查技术。又称小反射,利用反射地震波,确定浅层不同反射层的速度及厚度。该方法目前在工程勘察领域应用广泛,其探测深度可从几米到几百米深度。工程上应用的浅层反射地震方法为避开干扰,一般采用多次覆盖、最佳窗口、最佳偏移距的方法。对于复杂地表区的近地表探查,因其探测深度要求比常规工程地震深度要大,不能完全套用最佳窗口等方法。2) 浅层折射法近地表调查技术。又称小折射,用折射波法,通过直达波和折射波时距曲线,确定低降速带的折射界面深度、速度。小折射观测已经成为求取野外静校正量的一种常规方法,目前从技术发展上看已日趋成熟。3) 微测井近地表调查技术。微测井

是一种非常成熟而又十分有效的近地表结构调查方法,其优点是可以直接将表层岩性、电性、速度及深度联系起来。采用井中-地面或地面-井中或井-井方式的激发-接收系统,使地震波由地面(或者穿过低降速带的井眼)传播到穿过低降速带的井眼(或者地面),地震波在不同介质中传播速度的差异引起初至波到达时间的变化,由此计算近地表岩层的速度、厚度,准确确定虚反射界面。在设计采集激发井深时避开此界面,可使激发产生的地震波不受虚反射的影响。由于激发-接收方式的不同,又可以分为深井微测井、地面微测井、露头微测井等多种类型;根据井数的多少,微测井可以分为单井微测井、双井微测井和多井微测井等。4) 陆地声纳近地表调查技术。陆地声纳的基本原理与地震勘探相同,是一项宽频、源检距很小接近于自激自收的探测技术。通过调查可以得到频带较宽(0 Hz~1000 Hz)的近地表地震剖面,该方法使用方便,通过剖面的解释,能比较清晰的反映地下介质的分布状态。由于受地形的影响很小,陆地声纳能够通过垂直叠加提高信噪比,适于解决浅层静校正问题。5) 初至波层析反演技术。初至波层析反演技术是建立复杂地表区表层速度结构的有效方法。利用直达波、折射波、回转波甚至绕射波等初至波旅行时间,突破了常规折射波处理方法层状介质假设的限制,适合于地形起伏和速度横向变化剧烈的近地表地质条件。随着高密度连续小反射、小折射地震采集技术的发展,用微测井结果约束的层析反演技术在近地表结构调查方面的实用性、准确性都得到了提高。

2.2. 电、电磁方法

常用的电、电磁方法有微分电测深、瞬变电磁测深、高密度电阻率法、探地雷达等方法。1) 微分电测深近地表调查技术。类似于直流电测深法,识别电阻率界面,薄层分辨能力较高。采用强大的人工场源激发,数据采集品质较高。近年来随着高精度、智能化、灵活可靠数字式仪器的不断涌现,在野外观测可采用时间域、空间域多次叠加和覆盖等拟地震工作方法技术,瞬变电磁勘探的工作效率、观测精度、探测能力均得到了很大提高,而成为非地震勘探的一种主要方法。2) 瞬变电磁测深近地表调查技术。采用交流测深,能对中、浅层进行高分辨率电阻率成像。3) 高密度电

阻率法近地表调查技术。能有效地进行多种电极排列方式的扫描测量, 测量地下一定深度的电阻率分布情况, 可以获得关于近地表地电断面结构特征的地质信息。4) 探地雷达近地表调查技术。和其它雷达的工作原理相似, 发射高频宽带电磁波脉冲, 在不同电性介质的界面产生反射等现象, 通过记录剖面的处理、解释, 分析脉冲反射波特征, 可以获取地层结构和地下目标信息, 对浅表层结构纵横向变化规律有一个整体的了解。探地雷达向地下介质发射一定强度的高频电磁脉冲(几十兆赫至上千兆赫), 电磁脉冲遇到不同电性介质的分界面时即产生反射或散射, 地质雷达接收并记录这些信号, 再通过进一步的信号处理和解释即可了解地下介质的情况。对于空气与探测介质间的阻抗差而言, 电磁波远远小于声波。地质雷达反射信号的振幅与反射系数成正比, 在以位移电流为主的低损耗介质中, 反射系数可表示为:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 分别为上下介质的相对介电常数, 对近

地表检测而言, ϵ_1 为低速层的相对介电常数, ϵ_2 为低速层的相对介电常数。由上式可知, 反射信号的强度主要取决于上下介质的电性差, 电性差越大, 反射信号越强。对低降速层与高速层而言, 它们之间存在明显的电性差, 可以预期低降速层底会有强反射出现。不同地层(上、中、下)之间所用材料也存在细微差别, 因此, 也可以得到较弱的反射信息。由于探地雷达技术与反射地震勘探的相似性, 其数据处理方面都采用与 CMP 地震测量数据相同的处理技术, 大多数的反射数据地震处理技术和软件可直接用于探地雷达数据处理和解释。

3. 复杂山地区地表特征及近地表调查技术组合

针对南方砂泥岩出露区、碳酸盐岩出露区以及山前带等复杂近地表条件的地质、地球物理特点, 选择合适的表层结构调查方法, 进行多种技术手段联合应用的探索研究。复杂山地区的近地表地球物理调查方法及其组合见表 1。

Table 1. Near surface geophysical survey methods and their combination in complex mountain area
表 1. 复杂山地区的近地表地球物理调查方法及其组合

工区类别	地形及岩性特征	方法及技术组合	应用条件
砂泥岩出露区	多是复杂山地, 地形险恶, 山高、沟深、坡陡、起伏大, 地表岩性变化频繁, 低降速带厚度、速度变化大; 山顶、山坡风化严重, 部分地区严重缺水, 地震波衰减严重, 激发接收条件差。	小反射	地形起伏不大, 存在波阻抗界面
		小折射	存在折射面, 地形变化不剧烈, 允许排列展布
		微测井	适应各种类型条件
		高密度电法	适应各种类型条件
碳酸盐岩出露区	喀斯特地貌, 岩石直接出露地表, 风化层极薄, 地表速度很高, 不存在低降速带; 地表缺水激发条件差, 出露地层往往有较大的倾角, 风化程度差异大, 表层速度结构模型十分复杂, 横向变化剧烈, 散射尤其严重, 地震资料的信噪比很低。	微测井	适应各种类型条件
		高密度电法	适应各种类型条件
		探地雷达	存在电磁性差异
		微测井 + 高密度电法	小折射、小反射效果不理想的地区
山前带	垮塌严重、河谷砾石层巨厚, 潜水面深度极不稳定, 且一般埋藏较深, 致使低降速带的形态及速度变化频繁而剧烈, 激发接收条件较差。	微测井	适应各种类型条件
		高密度电法	适应各种类型条件
		探地雷达	存在电磁性差异
		微测井 + 小折射	山前带局部地形变化不甚剧烈的地段
		微测井 + 高密度电法	小折射、小反射效果不理想的地区

4. 综合地球物理近地表调查方法的应用效果分析

4.1. 南盘江地区的应用效果分析

南盘江地区地形崎岖、陡峭，除少数沟谷地段地表有耕地外，大部分为林木覆盖的坡地，地表腐植层较薄，且分布极不均匀。区内出露的地层主要为中下三叠统，是一套巨厚的盆地相浊流沉积，由砂岩、粉砂岩、泥岩及少量石灰岩频繁重复组合而成。由于受印支-喜山期多次逆冲推覆的影响，浅层结构相当复杂，地表岩层产状较陡，倾向 20°~60°左右，且变化较大。在该区做了陆地声纳法、探地雷达法、微分电测深法、高密度电法以及瞬态多点面波法等多种物探方法的试验^[5]。结果表明，利用陆地声纳法与微分电测

深法，可有效地划分出低速带、降速带的厚度和速度^[6] (图 1、图 2)，试验点微测井、陆地声纳成果和微分电测深曲线表明：微测井测得低速带下底界面埋深为 3 m，低速带速度为 605 m/s；降速带的底界面埋深为 20 m，速度为 3000 m/s。陆地声纳和微分电测深的解释结果是低速带的下底界面埋深 3.6 m，超低速带与低速带的平均速度为 576 m/s；降速带下底界面埋深 20.4 m，速度为 2973 m/s，其解释结果与微测井吻合较好。瞬态多点面波法和探地雷达法在本区的地球物理条件下，探测深度不够理想，只对部分浅层起到验证作用。

高密度电法具有具有电剖面法和电测深的特点，信息丰富，浅层电性分辨率高，抗干扰能力较强，勘探深度范围通常在几米至几百米^[7]。近年来，在该区开展了微测井和高密度电法联合应用进行地面地质调

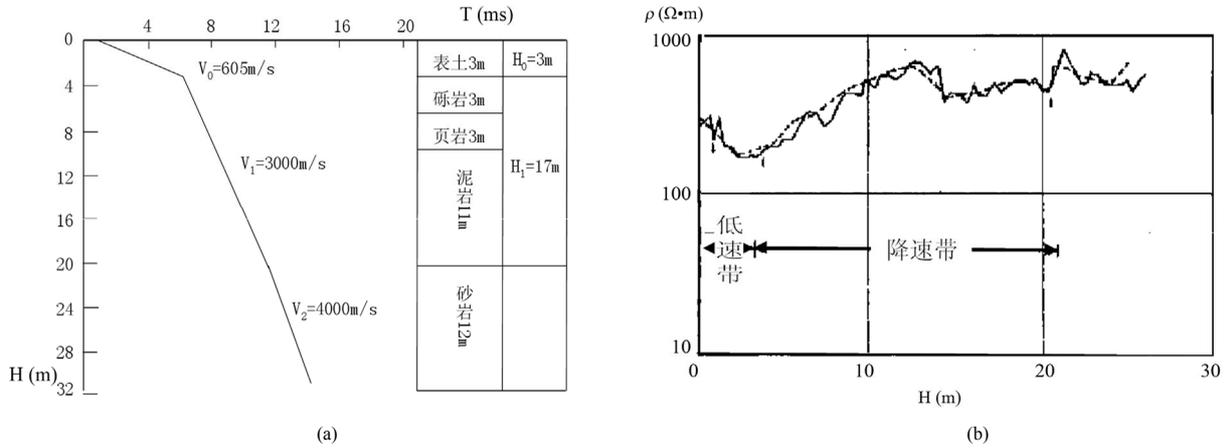


Figure 1. Micro logging result and differential electrical sounding curves contrast figure. (a) Micro logging result; (b) Differential electrical sounding curves, the solid line for the calculation results, the dotted line for smooth curve

图 1. 微测井成果和微分电测深曲线对比图。(a) 微测井成果；(b) 微分电测深曲线实线为计算结果，虚线为平滑曲线

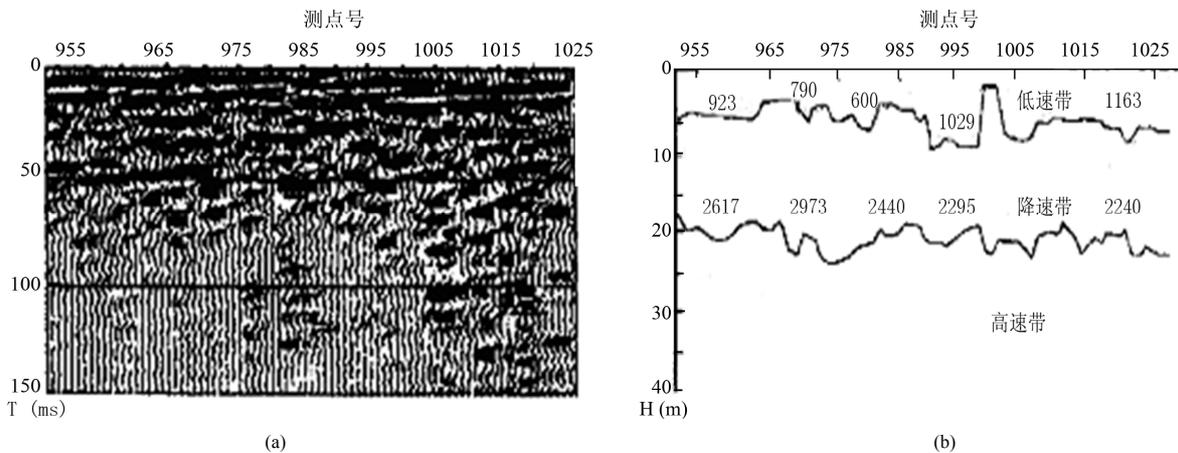
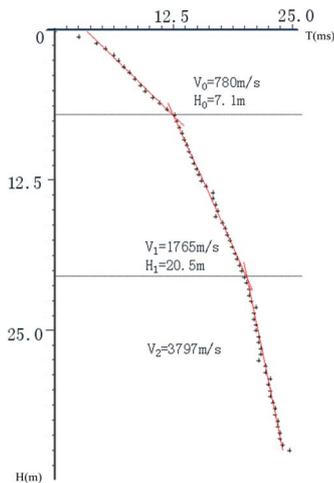


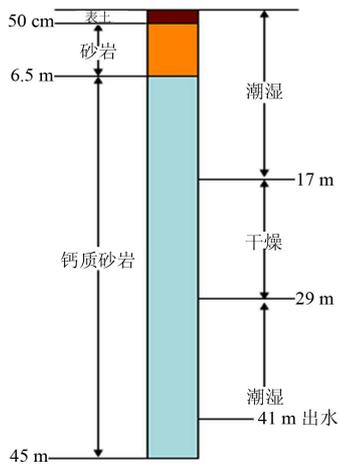
Figure 2. Land sonar similar t_0 time profiles and interpretation result. (a) Land sonar similar t_0 time profiles; (b) Interpretation result

图 2. 陆地声纳似 t_0 时间剖面及解释成果。(a) 陆地声纳 t_0 时间剖面；(b) 解释成果

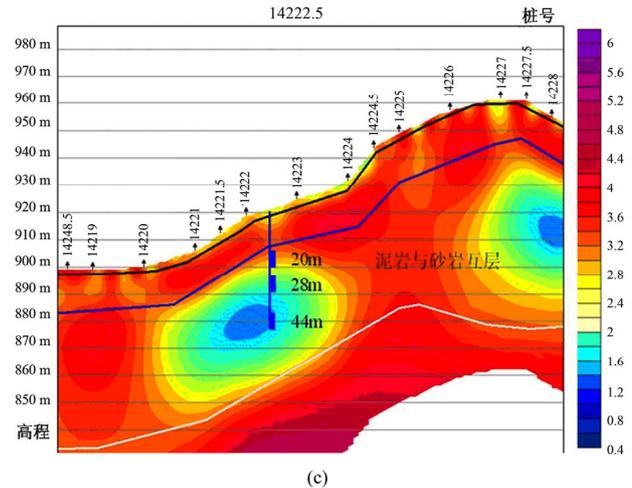
查工作。将地表地质调查观测的地层岩性和产状标于高密度电法剖面上,根据电阻率与波速的正相关关系,高速度模型对应高电阻率,低速度模型对应低电阻率,对高密度电法反演剖面进行了定性的标定,并做了分层解释,表明浅表层电性结构分层与低降速带分层基本吻合,其建立的近地表物性模型与钻录井成果解释吻合较好(图3),根据分析成果,低电阻率一般为含水层,相对低电阻率一般为潮湿层,高电阻率一般为干燥层。在该点进行井深试验,设计井深20 m、28 m、45 m,药量14 kg,见表2。



(a)



(b)



(c)

Figure 3. Micro logging, lithology logging and high-density electrical method results contrast figure. (a) Micro logging result; (b) Well drilling chart; (c) High-density electrical method result
图3. 井深试验设计参数表。(a) 微测井成果图; (b) 钻井录井图; (c) 高密度电法成果图

原始单炮记录固定增益显示(图4),45 m 井深激发能量最强,20 m、28 m 记录相对较差。对最深目的层进行定量分析(图5),45 m 井深能量最强,信噪比最高,主频、频宽均大于20 m 和28 m。可见,同是高速层中激发,低电阻率和相对低电阻率地层中激发资料好于高电阻率地层激发资料。

4.2. 凯里地区的应用效果分析

凯里工区全部为山地,大部分区域相对高差为50~200 m,地表植被多为密集灌木,水稻田、树林、旱地。出露地层为寒武系~下二叠统,地层岩性变化大,主要为各种类型的灰岩、白云岩、泥岩、页岩、砂岩及其互层。此外工区内地形起伏较大,沟谷发育,加之地层岩性多变,风化层厚度变化大,低降速带速度、厚度变化大,表层结构复杂。在该区做了浅层地震、高密度电法、瞬变电磁法、高频电磁法、微测井等多种物探方法的试验。结果表明,浅层地震剖面分辨率较高,对不同岩性特征的界面反应明显(图6),试验段浅层地震剖面图中明显反应出200 ms 以内存在一些较连续的同向轴,表明有较明显的反射层存在。

Table 2. Well depth test design parameter table
表2. 井深试验设计参数表

井深(m)	药量(kg)	岩性	含水性	地层	电阻率对数值
20	14	钙质砂岩	干燥	降速层	2.8
28	14	钙质砂岩	干燥	高速层	2.0
45	14	钙质砂岩	含水	高速层	1.6

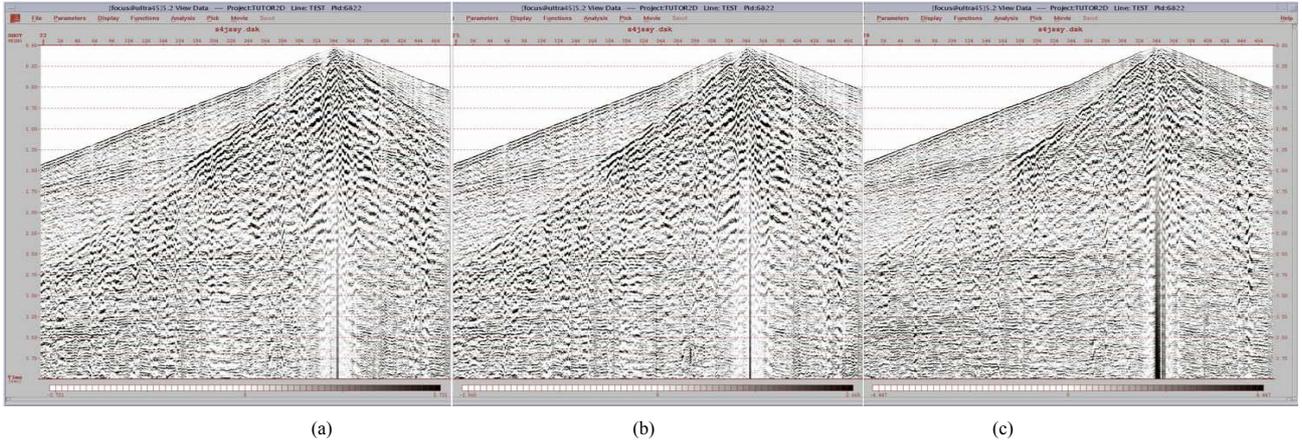


Figure 4. Original shot gathers with fix gain. (a) Well depth 20 m, dynamite weight 14kg; (b) Depth 28 m, dynamite weight 14 kg; (c) Well depth 45 m, dynamite weight 14 kg

图 4. 原始单炮记录固定增益显示图。(a) 井深 20 m, 药量 14 kg; (b) 井深 28 m, 药量 14 kg; (c) 井深 45 m, 药量 14 kg

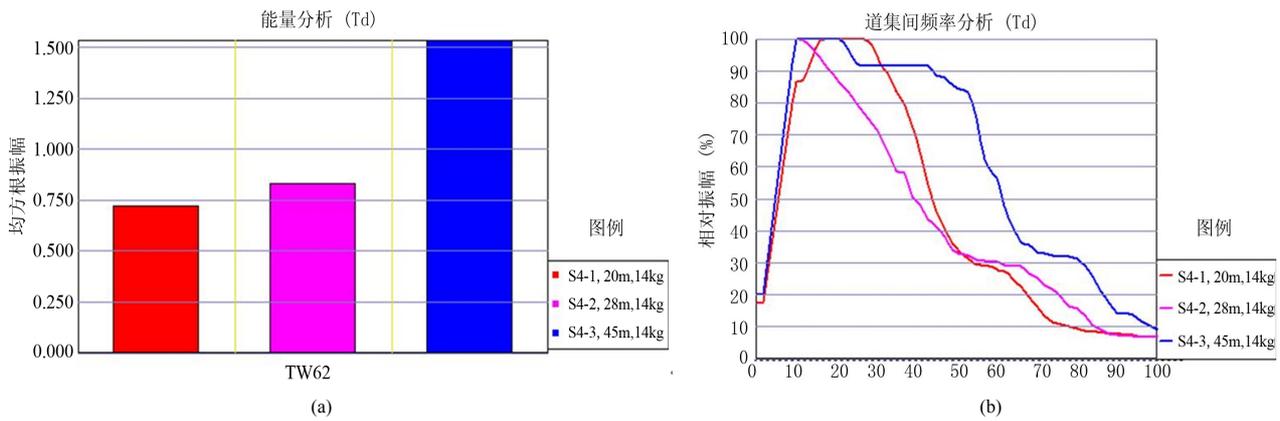


Figure 5. Quantitative analysis chart of original shot gathers. (a) Energy analysis; (b) Frequency analysis

图 5. 原始单炮记录定量分析图。(a) 能量分析; (b) 频率分析

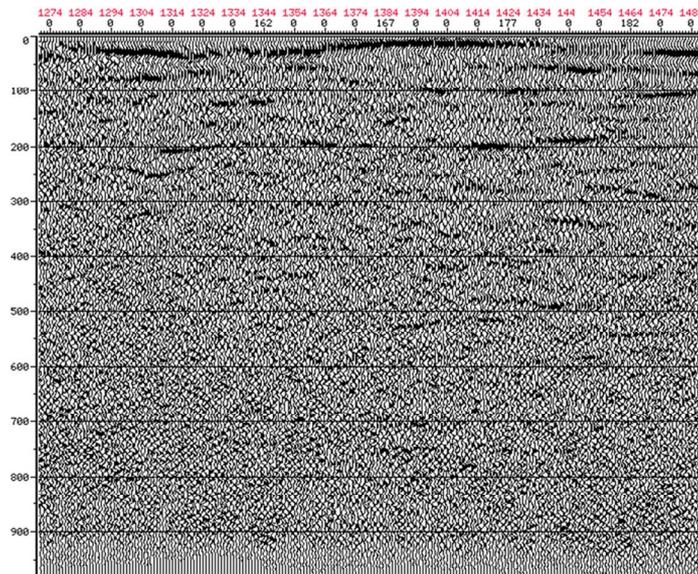


Figure 6. Seismic reflection profile of 082 line test part

图 6. 082 线试验段地震反射部分剖面

对采集资料进行了初至波层析反演(图 7), 可见, 横向上速度分段的现象不明显, 反应沿线速度变化不大, 分布较均匀; 在纵向上有明显的分层现象, 反应纵向上存在低降速带, 根据以往经验来划分低降速带, 其划分标准为: 低速带 ≤ 1000 m/s, 1000 m/s $<$ 降速带 ≤ 3500 km/s。

三种电法探测深度不同, 高密度电阻率法反应 40 米内的表层电性特征^[7](图 8), 根据电阻率与波速的正相关关系: 高速度模型对应高电阻率, 低速度模型对应低电阻率, 对高密度电法反演剖面进行了标定和分解释释(图 9), 可见, 高密度电法资料与微测井资料相互吻合, 低降速带范围为: $V < 4000$ m/s, 对应视电阻率: $\rho < 120 \Omega \cdot \text{m}$, 深度 $H = 7$ m。瞬变电磁法反应 300 米以内的浅层电性特征(图 10), 高频电磁反应 1000 米以内的中深部电性信息(图 11), 从表层到中深层, 探测能力各有侧重, 能够相互补充。高密度电法电阻率剖面相比瞬变电磁法反演剖面和高频电磁法电阻率反演剖面对地表地层电性分辨率更高, 同时电性特征也更复杂^[8]。在 082 线表层整体表现为高阻的背景格局, 每一电性段内电性分布也不均匀, 反应局部地层岩性、风化程度及含水率等因素不一致。电阻率在横向上对岩性、含水性的变化灵敏, 该区试验结果表明, 电阻率反映了岩性差异、介质的含水性与低降速带厚度, 即碳酸盐岩为高电阻率, 石英砂岩为相对的高电

阻率, 泥页岩为相对的低电阻率。与浅层地震层析反演剖面对比, 较厚的低降速带表现为相对的低阻。因此可提供不同深度的岩性资料, 为地震勘探激发井深设计提供可靠的资料。

依据速度与岩性、岩性与电阻率的关系, 建立岩石电阻率剖面与速度的关系, 将电阻率剖面转换为速度剖面。根据研究, 电阻率与波速在一定程度上存在正相关关系, 法斯特公式即体现了这种相关关系^[9]:

$$v = k \sqrt[3]{H} \sqrt[3]{R}$$

式中: v 为波速, k 是一个与岩石性质有关的经验常数, α 、 β 与地层有关的经验常数, H 为深度, R 为电阻率。

利用法斯特公式对 082 线试验段(9700~12,700)的高频电磁法资料进行了拟速度转换(图 12), 从转换后的拟速度剖面分析, 本区低降速带分布较厚, 低降速度 ≤ 3500 m/s, 与地震层析反演、微测井结果基本吻合, 利用微测井约束层析反演速度与非震成果建立综合速度模型。综合速度模型用于地震资料静校正处理明显好于常规静校正处理资料(图 13)。

5. 结论与认识

1) 南方地区地表条件和近地表结构的复杂性, 导致任何单一方法都无法完全解决表层结构问题, 需要

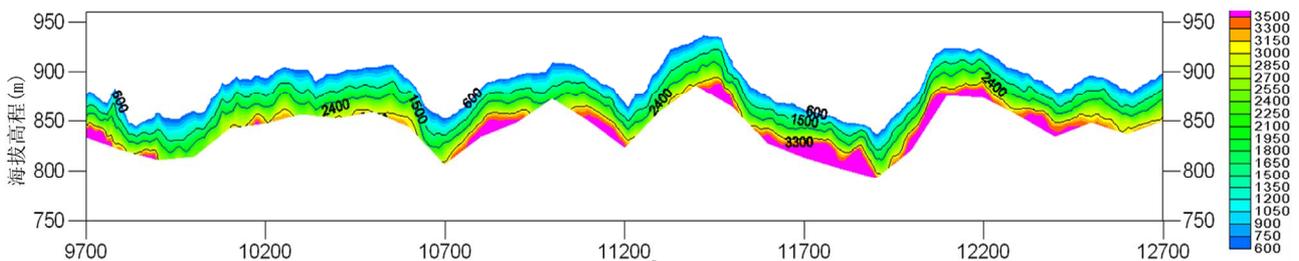


Figure 7. Seismic CT profile of 082 line
图 7. 082 线地震层析反演剖面图

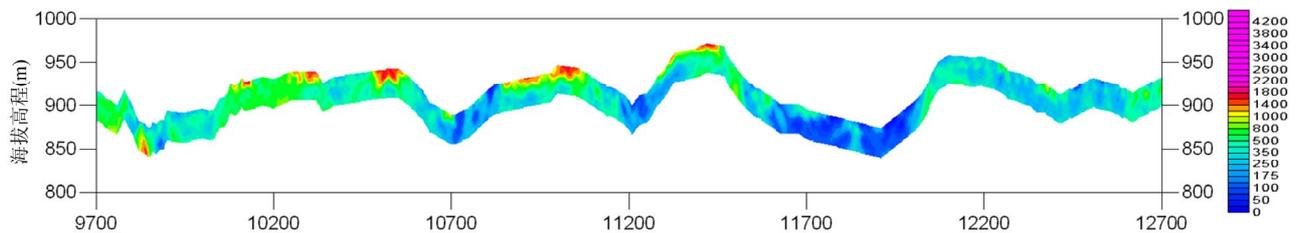


Figure 8. Resistivity section of 082 line with high-density electrical method
图 8. 082 线高密度电法电阻率剖面图

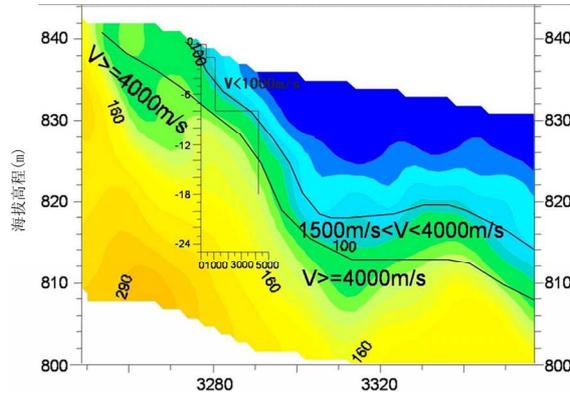


Figure 9. Micro logging data calibration in point of 3270 of 082 line with high-density electrical method
 图 9. 082 测线高密度电法剖面测点 3270 处微测井资料标定

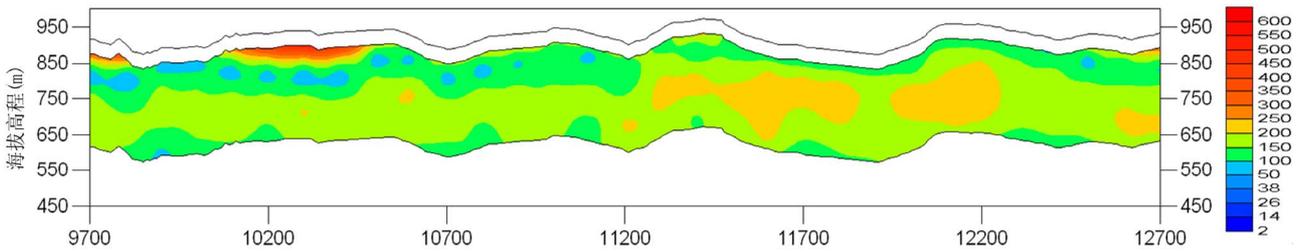


Figure 10. Resistivity section of 082 line with transient electromagnetic method
 图 10. 082 线瞬变电磁法电阻率剖面图

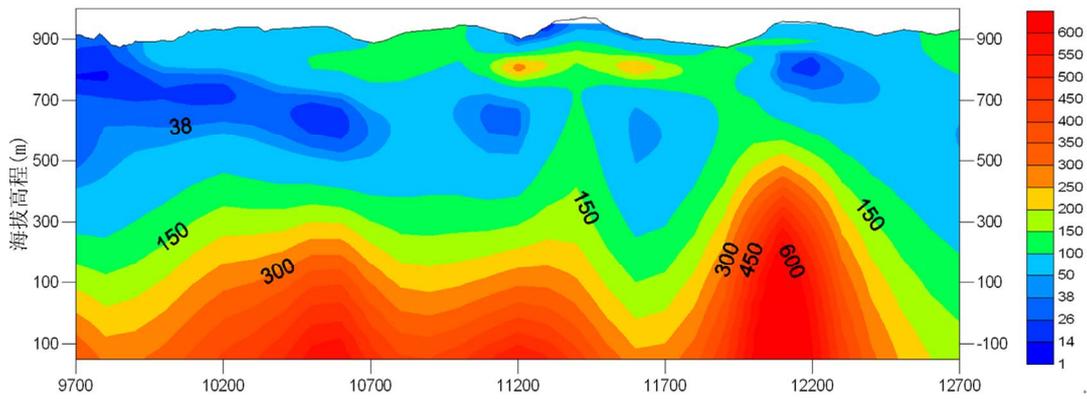


Figure 11. Resistivity section of 082 line with high frequency electromagnetic method
 图 11. 082 线高频电磁法电阻率剖面图

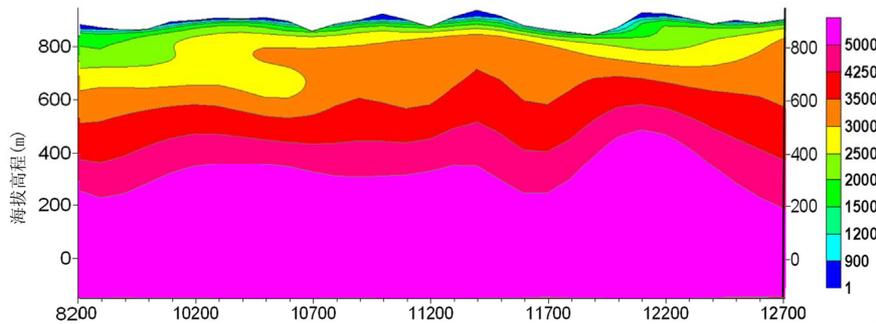


Figure 12. Analogous velocity profile of 082 line after converted
 图 12. 082 线转换后的拟速度剖面

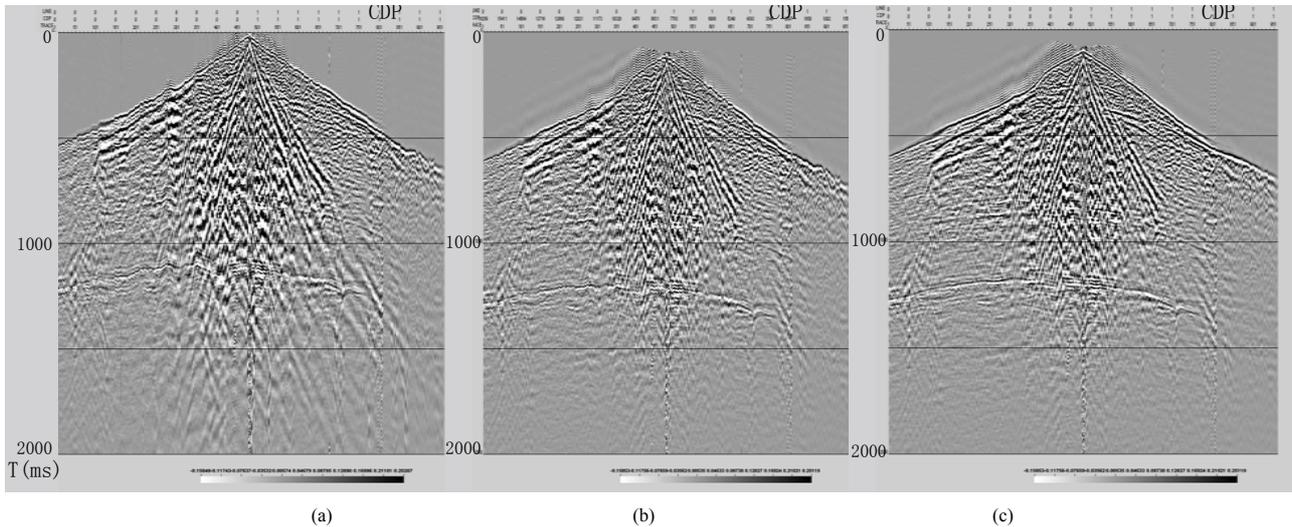


Figure 13. Comparison diagram of synthetic and conventional velocity model in shot gathers. (a) Filed data; (b) Conventional static correction; (c) Synthetic static correction

图 13. 综合速度模型与常规速度模型单炮记录静校正对比图。(a) 原始记录; (b) 常规静校正; (c) 综合静校正

联合运用多种近地表调查手段,进行综合近地表调查,才有可能建立精细的近地表模型。

2) 以微测井、地面地质调查、高密度电法为主联合进行近地表结构调查,微测井结构分层与高密度电磁法电阻率剖面基本吻合,在试验与生产应用中取得了较好的效果。

3) 电阻率的差异反应了近地表岩性与含水性的差异,高密度电法可查明近地表岩性、溶洞与含水裂隙的分布。在粘土、砂(泥)岩等低电阻率介质中激发比在碳酸盐岩等高阻抗介质中激发条件好;在碳酸盐岩裸露区,保持在含水的灰岩中激发比在不含水的灰岩中激发条件好。

4) 微测井资料与高密度电法资料的有效组合,可根据电磁法剖面,合理设计井位和井深,能有效改善记录品质,提高地震资料的信噪比和分辨率。

5) 浅层地震资料进行微测井约束初至波层析反演与高频电磁法资料进行拟速度转换成果基本吻合,电性剖面转换为速度剖面,可建立综合速度模型,用

于地震资料静校正及偏移处理取得一定效果。

参考文献 (References)

- [1] 杨振武, 查树贵. 复杂地区综合地球物理勘探方法技术应用[J]. 石油物探, 2003, 42(3): 417-421.
- [2] G. S. Baker, et al. Near-surface imaging using coincident seismic and GPR data. Geophysical Research Letters, 2001, 28(4): 627-630.
- [3] G. J. M. Moret, W. P. Clement, M. D. Knoll and W. Barrash. VSP travel time inversion: Near-surface issues. Geophysics, 2004, 69(2): 345-351.
- [4] S. H. Zhong. Obtaining near surface parameters for seismic statics by using differential electric sounding and land sonar. Applied Geophysics (Bulletin of Chinese Geophysical Society), 2003, 6: 27-31.
- [5] 夏训银, 徐新学, 张进国等. 综合物探方法在南盘江表层结构调查中的应用[J]. 勘察科学技术, 2004, 3: 59-62.
- [6] 钟世航. 浅层高分辨率勘查中的陆地声纳法[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(1): 31-37.
- [7] 赵光辉. 高密度电法勘探技术及其应用[J]. 矿产与地质, 2006, 20(2): 166-168.
- [8] 于生宝, 王忠, 嵇艳鞠等. 瞬变电磁法浅层探测技术[J]. 电波科学学报, 2006, 21(2): 284-288.
- [9] 李宝刚, 王伟锋, 陈业全, 张凡芹. 合成地震记录在塔中地区火山岩识别中的应用[J]. 石油物探, 2004, 43(3): 262-266.