

三维地壳结构数据库设计及模型构建

——以青藏高原东北缘地震层析成像数据为例

葛伟鹏^{1,2}, 袁道阳^{1,2}, 张元生^{1,2}, 何文贵^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘要:通过对青藏高原东北缘地震层析成像数据的分析与研究,结合现今地学三维建模技术和软件,详细阐述了基于 ArcGIS 的 MultiPatch 数据格式的地壳三维数据库及建立的青藏高原东北缘三维地壳结构实体(Solid)模型的主要技术思路和实现过程。重点讨论了地学三维建模理论、地震层析成像数据的存储方法和三维模型建立的技术路线,总结出由基础数据到青藏高原东北缘三维地壳结构模型的技术处理方法。

关键词: ArcGIS; 地质数据库; 实体模型; 青藏高原东北缘; 三维地壳结构模型; 地震层析成像

中图分类号: P315.391.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)01-0026-07

Database Design and Modeling of 3D Crustal Structure: Based on the Seismic Tomographic Data in the Northeastern Margin of Tibetan Plateau

GE Wei-peng^{1,2}, YUAN Dao-yang^{1,2}, ZHANG Yuan-sheng^{1,2}, HE Wen-gui^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Through the study and analysis on the seismic tomographic data in the northeastern margin area of Tibetan Plateau, the methodology of crustal 3D database as based on MultiPatch format in ArcGIS and the crustal solid structure model of the northeastern margin of Tibetan Plateau with the modern 3D modeling software and technology are presented. It emphasizes the 3D Geosciences modeling theory, the storage methodology of seismic tomographic data and the main technology of 3D solid model. Then, the main methodology is summarized from the fundamental seismic tomographic data to 3D crustal structure model of the northeastern margin of Tibetan Plateau.

Key words: ArcGIS; Geodatabase; Solid model; The northeastern margin of Tibetan Plateau; 3D Crustal structure model; Seismic tomography

0 引言

地壳上地幔精细结构信息的获取是当前地球科学前沿最活跃,最具挑战性的研究内容之一。区域地震走时层析成像反演是用来研究地球三维结构的有效方法。在青藏高原东北缘及祁连山—河西走廊等地区已开展了许多天然地震层析成像反演工

作^[1-3],本文所使用的地震层析成像数据充分利用了甘肃省地震台网和邻省区部分地震台站所记录到的地震资料,经过地震重新定位、地震层析成像研究青藏高原东北缘地区的地壳速度结构^①。

应用所获得的精细结构信息建立地壳上地幔三

收稿日期:2009-06-14

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2007692);中国地震局国家“十五”重大建设项目“兰州市活断层探测与地震危险性评价”(1-4-28-1);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LZ2011017

作者简介:葛伟鹏(1981-),男(汉族),山西稷山人,助理研究员,硕士,研究方向为3S技术在活动构造中的应用研究。

① 张元生,姚同福.兰州地区地壳三维速度结构研究[R].中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地内部报告,2005.

维结构模型,也是现代计算机技术尤其是 GIS 技术在地球科学研究及应用中一项较复杂、较先进和较直观的以实现地壳深部信息在任意方向的横断面上进行地壳波速差异的展示技术,对于地学工作者来说仍然是一个挑战,这主要是因为存在着在资料整理过程中对资料认识与理解程度的问题和在建立空间数据库的过程中对数据应用深度与数据整合深度的问题。

本文将从地学三维建模理论、地震层析成像数据存储、技术路线和三维地壳结构模型实现四个方面讨论三维地壳结构数据库的设计与模型构建,介绍青藏高原东北缘地区地壳结构模型的技术路线和实现过程。

1 地学三维建模理论

地学三维建模(3D Geosciences Modelling, 3D GM)^[4]是加拿大工程地质学家 Simon Houlding 于 1994 年提出的,主要利用地质勘探与工程设计数据来进行地质体及地下三维建模的过程。地学三维模型可泛指一切使用计算机和非计算机等技术建立起来的、按一定比例缩小了的的地学模型,如军事沙盘模

型、地下掩体模型、地质模型和水利工程模型等,其中包括基于 3D GMS 建立的三维地质模型(3D Geological Model, 3D GM)^[5]。以下从三维空间构造模型分类方法论述现今空间数据研究的三维模型,如表 1 所示。

由表 1 可知,三维空间模型可以大体分为面模型、体模型和混合模型。面模型主要由众所周知的 TIN、DEM、Grid 等组成,也包括了 Section(断面)模型。这个模型的数据在 ArcGIS 的早期版本中并不常见,在 ArcGIS 9.0 及后续版本中给出了相关断面模型描述;而在石油行业或者专业的三维地质分析软件中比较常见,诸如 GMS、GOCAD 等软件内就可以利用钻孔数据建立钻孔剖面图,即 Section 数据模型来描述钻孔数据。体模型中应用比较广泛的模型就是 Octree(八叉树)模型、Solid(实体)模型和 GeoCellular(地质细胞)模型等,在 GMS(Groundwater Modeling System)软件中主要以 Solid 模型来建立近地表下水动力学或者钻孔数据的三维空间模型。混合模型包含了不规则三角网与结合实体几何混合模型、不规则三角网与八叉树混

表 1 3D 空间模型分类

面模型 (Facial Model)	体模型(Volumetric Model)		混合模型 (Mixed Model)
	规则体元	非规则体元	
不规则三角网(TIN)	结合实体几何(CSG)	四面体格网(TEN)	TIN-CSG 混合
格网(Grid)	体素(Voxel)	金字塔(Pyramid)	TIN-Octree 或 Hybrid
边界表示模型(B-Rep)	八叉树(Octree)	三棱柱(TP)	WireFram-Block 混合
线框(Wire Frame)或相连切片(Linked Slices)	针体(Needle)	地质细胞(Geocellular)	Octree-TEN 混合
断面(Section)	规则块体(Regular Block)	非规则块体(Irregular Block)	
断面-三角网(Sectoin-TIN)		实体(Solid)3D Voronoi 图	
多层 DEMs		广义三棱柱(GTP)	

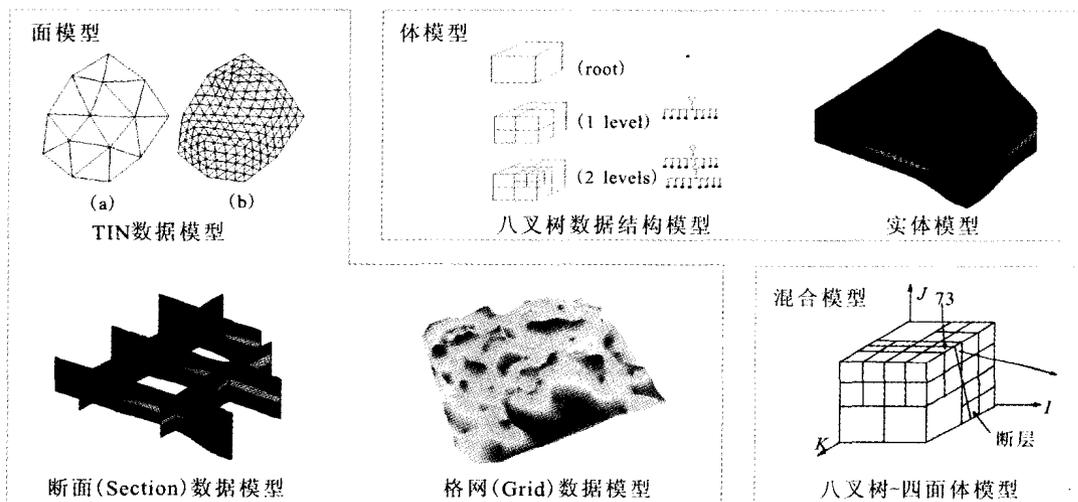


图 1 三维空间数据模型示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of 3D Spatial Data Model.

合模型、线框与块体混合模型和四面体格网与八叉树混合模型等。由图1可见几种常见三维空间数据模型的示意图。

2 地震层析成像数据存储

一般情况下,各种探测数据均以一维或者二维数据结构存储于 Geodatabase 中,并没有涉及到三维数据的表达。例如钻孔数据虽存储在空间数据库中,但由于钻孔表格的数据结构没有提供三维显示的能力,只是在二维的基础上实现高程值的分类显示以实现岩性或者其它维度的表达。这就需要在 Geodatabase 的设计中采用新的数据类型加以实现三维数据结构。

在 ArcGIS 平台中所提供的数据格式中通常有我们所熟悉的二维数据格式: Point(点)、Polyline(线)、Polygon(面)和 MultiPoint(多点)。但是对于虚拟现实的三维数据格式而言,2004 年 ESRI 公司在 ArcGIS 的 9.0 版本中给出了相关的数据模型,给出了存储并直接使用三维数据要素的 MultiPatch(多片)格式^[6]。ArcGIS 平台的空间数据格式可以分为 Points、2D Polyline、2D Polygon、3D Point、3D

polygon、3D line,其中属于 MultiPatch 的 3D Point、3D polygon、3D line 三种数据格式可以表示三维模型中的部分元素。实现二维几何图到三维实体几何图的转变,这对地学数据的可视化研究来说是一个非常大的进步,尤其是在描述和表达地表下通过地球物理探测等得到深地壳探测数据与深浅构造关系解释等的应用过程中。

在地球学研究中,诸如地层、地壳深部探测数据、孕震体、地下流体等这些要素完全能在 Geodatabase 里面与二维地图相关要素整合在一起。在 ArcGIS 中已经有了非常实际或者抽象的符号,同时也可以根据需求建立基于行业的三维显示符号,如可以建立地学中常用的岩层和岩性符号、钻孔符号、断层性质符号等,应用这些三维符号可以实现地学的虚拟现实。应用 ArcGIS 提供的 MultiPatch 格式来存储地球物理探测数据和近地表构造数据,将进一步提高地球物理探测数据空间三维的表达能力。在 ArcGIS 平台中,由上述可知其 Geodatabase 包含了二维数据、三维数据和信息表文件。图 2 详细给出了三大数据类型与 Geodatabase 的关系。

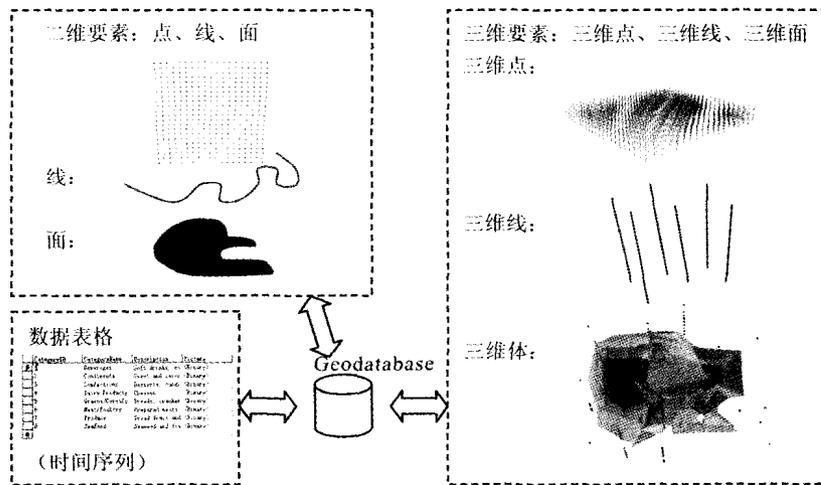


图 2 深浅构造关系涉及到的 ArcGIS 要素组织结构图

Fig. 2 Structure chart of ArcGIS features referred to deep and shallow tectonic relationship.

青藏高原东北缘地区三维地壳结构的空间数据集主要是由一系列描述二维和三维地表下对象的矢量要素类组成。地壳三维结构模型的设计涉及到各种二维和三维数据的组织和数据库设计方法。图 3 中的 UML(Unified Modeling Language)数据模型图主要表述了地震波速层数据组织方法,其它探测数据的组织方法与之类似。

图 3 所示的 UML 数据模型图描述了青藏高原

东北缘地区地壳三维速度结构研究过程中数据组织的方法,即分别建立继承于 Feature 要素类的虚拟类 Seismic Tomography Feature,及继承于 Seismic Tomography Feature 类的 Seismic Tomography Point、Seismic Tomography Volume、Seismic Tomography 3D Line 和 Seismic Tomography Section 等四个虚拟类。其中 STID 和 STCode 分别显示了每一个层析成像格网点的 ID 和显示码。由于

在层析成像的数据组织过程中需要实现两个数据组织方法,即:在波速范围一定的情况下获取地壳的精确深度和在地壳深度一定的情况下获取相应的波速值。所以在上述四个虚拟类中,Seismic Tomography Point 派生出 Seismic Tomography Point D 和 Seismic Tomography Point V 两个分别代表深度为恒值和速度为恒值的情况,其它三个虚拟类与之

相似。

Seismic Tomography Layer V 和 Seismic Tomography Layer D 继承于 Object 类,通过 CASE 工具将生成数据库表结构,将存储在某一速度间隔内的深度变化范围和在某一定深度间隔内的速度变化范围。

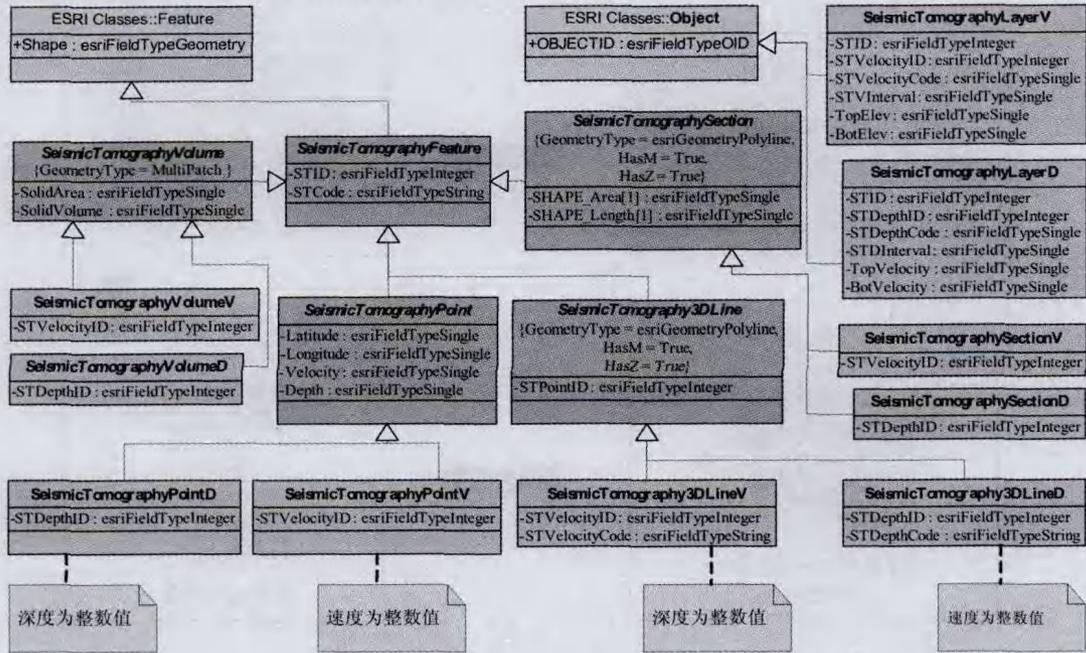


图 3 地壳层析成像 UML 数据模型

Fig. 3 UML data model of crust tomographic imaging.

3 三维地壳结构模型建立技术路线

青藏高原东北缘地区地壳三维数据整合的最终目标将是通过尽可能多的地球物理探测数据和地质调查数据建立一个完整的地壳三维模型及地球岩石圈三维基础模型,结合地壳三维速度结构研究建立本地区的地质三维模型。

具体方法即根据地震层析成像方法得到不同深度的离散点波速数据,并选用适当的速度间隔建立速度等值线,并建立 Grid 数据层,然后应用上面图 2 所提到的方法建立速度间隔内的 Solid 对象,实现按照速度值分层的深地壳三维可视化模型。那么,基于平面几何体到三维实体对象的转变方法可描述如下:

(1) 将测量数据存储在以 MultliPatch 要素的空间数据库,建立虚拟钻孔数据;然后应用数据转换工具将在 Geodatabase 中的数据转换为 GMS 或者 EQUIS Geology 程序的数据格式;接着在应用程序

中读入虚拟钻孔数据并在数据涉及的空间范围内建立 TIN 数据,应用 TIN 数据建立基于应用程序的 Solid(三维实体)数据;将 Solid 数据导出为 XML 交换文件;最后在 ArcGIS 中应用 Arc Hydro Tools 9.0 将 XML 数据转换并存在 GeoVolumn 数据文件中。

(2) 在三维网格创建的工具中,生成 Solid(三维实体对象)的基本方法为在基本的平面几何体(二维网格)上通过在垂直维度上向上或者向下扩展而得到,并可在 Geodatabase 或者 Shapefile 数据格式以 MultiPath 实体要素的形式创建和存储。

在建立青藏高原东北缘地区三维地壳结构模型过程中,所应用到的与 ArcGIS 结合比较紧密的三维建模软件主要为 Arc Hydro Groundwater Data Model(地下水建模插件)^[7]。三维实体生成功能主要实现了在基本的平面几何上在垂直方向上通过拉伸生成三维实体。这种方法与在 ArcScene 中三维显示相同,但不同的是可以将创建好的三维数据存

储在的三维实体要素中(multipatch)为以便数据读取和共享。

由图 4 所描述的探测数据三维整合技术主要体现了三维模型设计过程和实现方法,可以根据此方法建立青藏高原东北缘地区地壳三维结构整合的数据模型。首先是建立与三维模型相适应的 UML 数据模型,这需要考虑许多方面的内容,比如哪种数据需

要二维数据格式来存储而哪种数据需要三维数据格式来存储,但主要体现在三维数据的存储方面;其次是将设计的三维数据 UML 模型通过 CASE 工具转换为一个基于关系型的空的地理数据库中;最后将是测量得到的三维数据存储入空的地理数据库以完成建库工作。

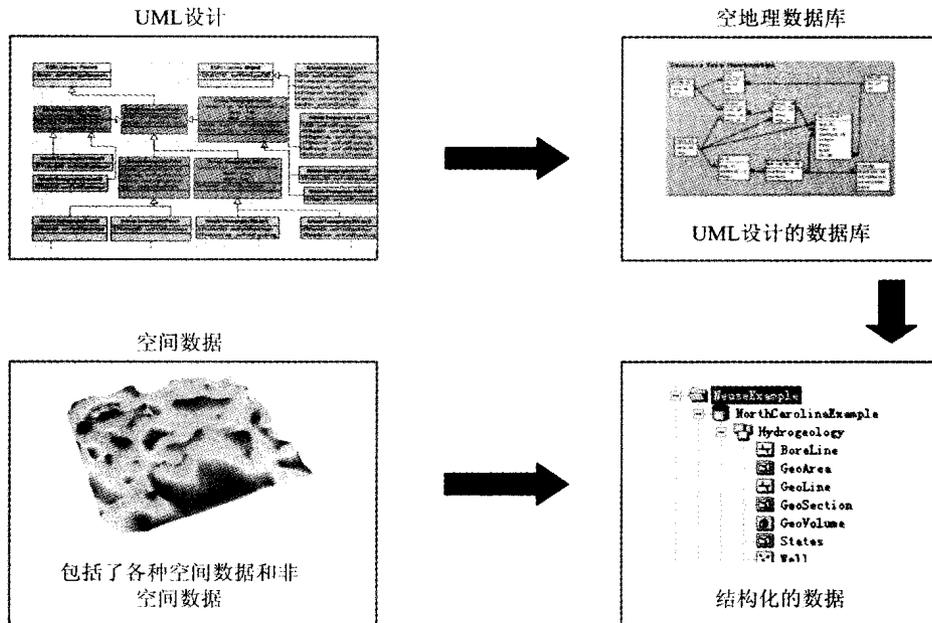


图 4 地壳三维数据模型设计过程

Fig. 4 Design process of crustal 3D data model.

4 青藏高原东北缘三维地壳结构模型实现

关于地震层析成像方面的研究,周民都、张元生等已经给出常规的二维平面解释。本文将主要分析空间上的二维平面地震层析成像数据,通过线性插值的方法对地震层析成像数据进行预处理,然后将处理后的数据展布在三维空间,并加上时间维度以表现历史强震目录与弱震目录的时空演化特征,以此推断上地表结构与深地壳间的关系,给出研究地区的地壳三维结构模型。

图 5 给出了青藏高原东北缘地区三维立体模型。三维模型的建立应用了强震目录、弱震目录、数字高程模型等数据。在空间范围上包含了河西走廊东段、青藏高原东北缘地区和甘东南地区。在这一区域内分布着多条全新世以来活动的断裂,也包含了多条深大断裂如东昆仑东段断裂。其范围为: $99^{\circ}00' \sim 108^{\circ}00' E, 32^{\circ}00' \sim 38^{\circ}00' N$ 。

地震层析成像数据包括了射线穿过数量数据和速度数据,其中射线穿过数量数据的格式为经度、纬度、射线数、深度。由射线数量可确定空间范围内的地震层析成像的精度,具体可分为 $0.1 \sim 3, 3 \sim 300, 300 \sim 600, 600 \sim 1442$, 根据需要可将 0 或者 $0.1 \sim 3$ 的空间范围去除掉。速度数据的格式为经度、纬度、速度、深度。原始数据按深度分为四层: $0 \sim -5 \text{ km}, -5 \sim -10 \text{ km}, -10 \sim -15 \text{ km}, -15 \sim -20 \text{ km}$, 范围为: $98^{\circ}27' \sim 106^{\circ}46' E, 31^{\circ}12' \sim 38^{\circ}49' N$; 由于在原始数据的处理过程中按深度 5 km 的方式将 $0 \sim 20 \text{ km}$ 分为四层,那将使得每层的速度为唯一值,所以在深度方向上按平均值定义格网插值的初始深度: $-2.5 \text{ km}, -7.5 \text{ km}, -12.5 \text{ km}, -17.5 \text{ km}$ 。由初始深度按线性插值方法分别在 -2 km 到 -18 km 的范围内取整数值的深度计算得到不同深度、不同格网点的速度值并通过数据转换方法转换为 shapefile 数据格式,根据数据库建设的需求再转换为 Geodatabase 数据格式;对 shapefile 格式的数

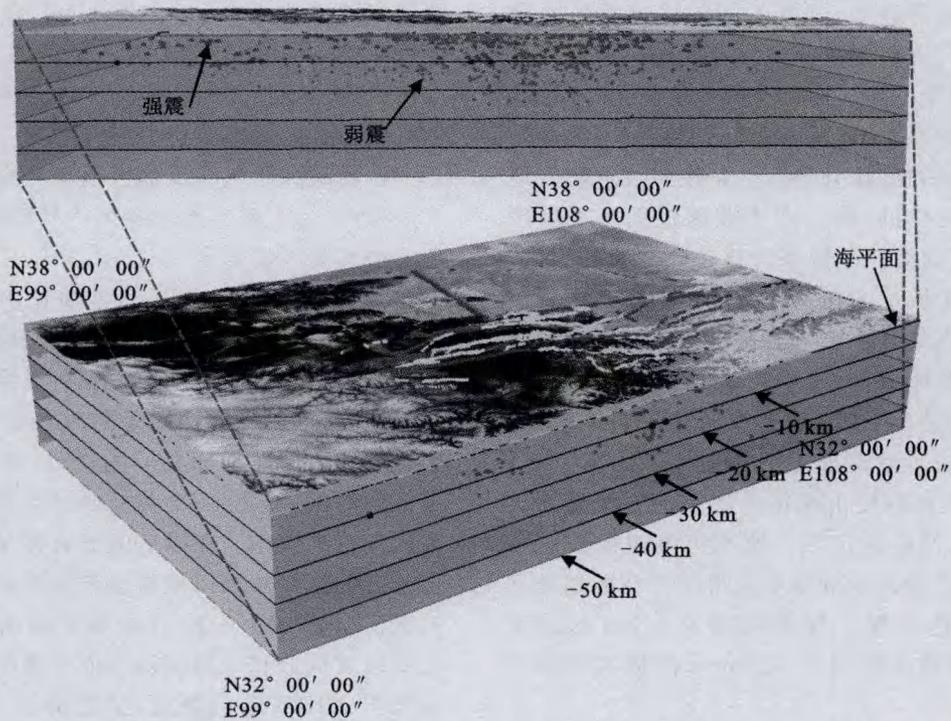


图 5 青藏高原东北缘地区强震、弱震三维分布图

Fig. 5 Strong and weak earthquakes scattergram for the northeast margin of Tibet Plateau.

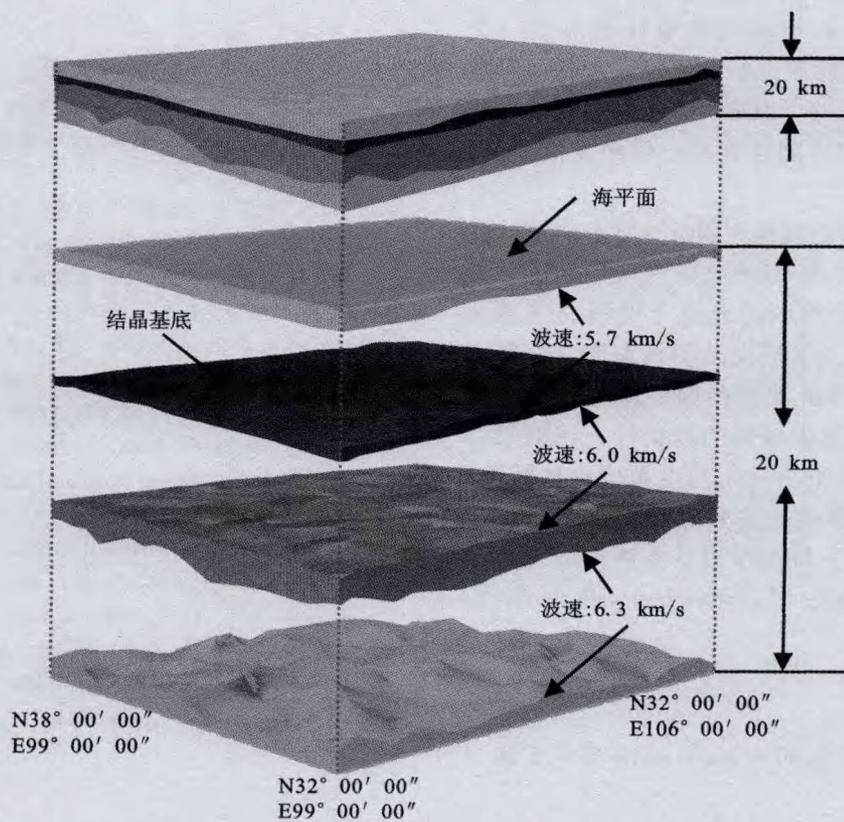


图 6 层析成像地震波速度分层深度变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the layered depth variances of seismic wave velocity through computerized tomography.

据按地震波速进行分类,选取不同的波速间隔并确定较佳的间隔对数据进行分类。本文在数据处理过程中,为提高地壳三维结构模型的精度,在深度方向上实现了等间距为 1 km 的深度波速数据。

由上所论述的波速分类方法是按照波速随着地壳深度变化而变化的,将会产生波速范围的不精确性;若根据指定的波速范围来计算相应波速的深度,就可以建立基于波速的在深度维度上变化的层析成像地震波速数据集。由于波速与地壳的物质组成在一定程度上是相关的,那么可通过波速的精确分层数据来建立研究地区地壳三维结构的实体模型。综上有两种方法对地震波速数据进行处理,分别是:

(1) 在特定的深度上根据上述差值方法计算出相应的波速值,然后指定某个速度范围内的波速数值计算此波速范围内的深度变化特征。在数据处理过程中通过差值实现了深度间隔为 1 km 的波速值,然后对波速数据按照 0.02 km/s 的波速间隔进行处理。

(2) 在深度方向上对某个特定波速进行连续差值,计算出 0~20 km 上每个特定波速范围内的精确深度。与第一种方法比较则可以得到更精确的深度值,可以在每一个网格内精确地计算出每一个 Solid 实体深度范围,能够更精确地建立青藏高原东北缘地区地壳三维模型。但这种方法必须在给出某个特定的波速范围内方能计算确定的深度值,有局限性。

由图 6 所示的层析成像地震波速度分层深度变化示意图主要是通过 ArcGIS 技术并应用地震层析成像数据来实现研究地区的地壳上地幔的三维结构,建立了本地区的三维地壳结构模型图。一般认为速度为 5.7~6.0 km 波速范围内所对应的深度为结晶基底,所以对层析成像的数据按上述的第二种方法进行处理并抽取出这个速度范围内的数据。同时将这些二维数据格式的数据存储在 Geodatabase 中;并通过上述三维模型建立方法来处理数据得到三维数据,存储在 MultiPatch 中,并在 ArcScene 中显示。

5 结论与讨论

本文重点讨论了如何基于 ArcGIS 程序实现二

维到三维模型的转变和三维 UML 数据模型及三维数据库等 GIS 技术建立青藏高原东北缘地区地震层析成像三维地壳结构模型。该三维地壳结构模型也将成为目前本地区科学研究中的一项基础资料。

在青藏高原东北缘地区地壳三维结构模型的建立过程中,由于部分地球探测的基础数据还未整理,还无法实现诸如地层年代学、岩石学、地球化学、重力异常、磁场异常、地层、盆地演化历史、古生物学、地震图像或者地壳物理属性、地震等数据的整合,因此三维模型建立仅使用地震层析成像数据。由于诸如深地震折射/反射探测等数据与已获取到的地震层析成像数据是相辅相成的,所以可以利用地震层析成像数据来建立一个非精确的青藏高原东北缘地区地壳三维模型。在以后的研究将尽可能完整地整合所有的探测数据以使得青藏高原东北缘地区地壳三维模型更加精细化,并根据青藏高原东北缘地区主要地质构造和地震探测剖面位置图、地质剖面图、地质图、DEM、遥感数据、钻孔资料、地球化学等可以约束近地表地层结构的数据建立近地表三维地质模型,加以讨论深部结构、深浅构造关系和时间演化等。

【参考文献】

- [1] 李清河,张元生,涂毅敏,等.祁连山—河西走廊地壳速度结构及速度与典型的联合解释[J].地球物理学报,1998,41(2):197-209.
- [2] 张元生,周民都,荣代璐,等.祁连山中段地区三维速度结构研究[J].地震学报,2004,26(3):247-255.
- [3] 周民都,张元生,石雅鏐,等.青藏高原东北缘地壳三维速度结构[J].地球物理学进展,2006,21(1):127-134.
- [4] 肖乐斌,钟耳顺,刘纪远.等.三维 GIS 的基本问题探讨[J].中国图象图形学报,2001,6(9):843-848.
- [5] 吴立新,沙从术.真三维地学模拟系统与水利工程应用[J].南水北调与水利科技,2003,1(2):20-25.
- [6] EDN. ESRI Developer Network[EB/OL]. <http://edn.esri.com/>
- [7] Gil Strassberg. Arc Hydro: GIS for Water Resources; Arc Hydro Tools[EB/OL]. <http://www.crwr.utexas.edu/gis/archydrobook/ArcHydroTools/Tools.htm>
- [8] GEON(The Geosciences Network): A Collaborative Research Project to Create Cyberinfrastructure for the Geosciences[EB/OL]. <http://www.geongrid.org/>