

doi:10.3799/dqkx.2015.031

# 基于地表地质调查剖面网络基础上的复杂造山带 三维地质调查与建模方法

王国灿<sup>1,2,3</sup>, 徐义贤<sup>4</sup>, 陈旭军<sup>3</sup>, 郭纪盛<sup>3</sup>, 郁军建<sup>3</sup>,  
龚一鸣<sup>3</sup>, 肖 龙<sup>3</sup>, 刘修国<sup>5</sup>, 花卫华<sup>5</sup>

1. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学全球大地构造研究中心, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

4. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

5. 中国地质大学信息工程学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 三维地质填图是一项探索性很强的开拓性工作, 目前尚无成熟经验可循. 对于地球物理和钻探资料相对有限的复杂造山带成矿带地区, 区域性的三维地质结构的揭示更具挑战性. 结合西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质填图实践, 提出造山带基岩三维地质填图的基本思路, 对具有一定幅面一定比例尺的区域三维地质填图与建模的方法技术进行了总结, 提出针对造山带区域的“基于地表地质调查剖面网络基础上的地质—地球物理—钻孔联合约束的三维地质调查方法体系”, 探索实践“基于地表地质调查剖面网络基础上的三维地质建模技术方法”, 强调建模的数据基础来自地表基础地质调查的系统路线剖面和实测剖面, 即以地表实测地质路线为基础结合地球物理和钻探资料向下合理延拓, 从而实现“区域三维地质填图”概念上的三维地质结构的数字表达.

**关键词:** 造山带; 三维地质调查与建模方法; 地表地质调查; 地质—地球物理—钻孔联合约束.

**中图分类号:** TE132

**文章编号:** 1000-2383(2015)03-0397-10

**收稿日期:** 2014-09-08

## Three-Dimensional Geological Mapping and Visualization of Complex Orogenic Belts

Wang Guocan<sup>1,2,3</sup>, Xu Yixian<sup>4</sup>, Chen Xujun<sup>3</sup>, Guo Jisheng<sup>3</sup>, Yu Junjian<sup>3</sup>,  
Gong Yiming<sup>3</sup>, Xiao Long<sup>3</sup>, Liu Xiuguo<sup>5</sup>, Hua Weihua<sup>5</sup>

1. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Centre for Global Tectonics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

5. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Three-dimensional geological mapping is a pioneering job in frontiers without much experience. It is far more challenging to work out three-dimensional geological structure in a square area with certain scale for complex orogenic and metallogenic belts, where geophysical and drilling data are relatively limited. In this paper, we put forward a framework of the three-dimensional geological mapping and visualization for bedrocks of orogenic belts based on our three-dimensional geological mapping practice in the northwest Karakoram, western Junggar. We emphasize that the basic data involved in visual modeling for a certain square area and scale are primarily based on the network of systematic surface geological sections and then the extension for the deep geological bodies which are based on

**基金项目:** 中国地质调查局项目“西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质调查试点”(No. 1212011220245); 新疆1:25万铁厂沟镇幅(L45C002001)与克拉玛依市幅(L45C003001)区调修测项目(No. 1212011120502).

**作者简介:** 王国灿(1963—), 教授, 博士生导师, 主要从事区域地质、构造地质学教学与研究. E-mail: wgcan@cug.edu.cn

**引用格式:** 王国灿, 徐义贤, 陈旭军, 等, 2015. 基于地表地质调查剖面网络基础上的复杂造山带三维地质调查与建模方法. 地球科学——中国地质大学学报, 40(3): 397-406.

geological-geophysical-drilling united constraints. With the combination of surface geological sections and geophysical/drilling data, three-dimension geological texture from surface to certain depths at a certain confidence level can be traced. That is to say that three-dimensional numerical models of geological structures can be constructed by utilizing the rich data of classical “surface regional geological mapping” with the combination of geophysical/drilling data.

**Key words:** orogenic belt; three-dimensional mapping and visualization; surface geological investigation; geological-geophysical-drilling united constraint.

## 0 前言

随着地质探测技术的发展,人们对地球深层次地质结构构造的认识得到不断深化,计算机成图技术使得实现三维地质结构的表达成为可能(Turner, 1992; Guiziou *et al.*, 1996; Courrioux *et al.*, 2001; Jachens *et al.*, 2001; 朱庆, 2004; Malolepszy, 2005; 吴立新和史文中, 2005; 王明华和白云, 2006; 潘懋等, 2007; 李舒等, 2008), 而全球能源资源短缺的严峻形势使得人们对地球深部地质找矿的需求越来越迫切, 人类对地下空间的开发和利用也对地下结构的认识提出了更高要求. 在这种形势下, “从传统走向现代、从单一走向综合, 从二维走向三维”已经成为国内外基础地质调查工作的趋势(吕鹏等, 2013).

21 世纪以来, 美国、法国、英国、加拿大及澳大利亚等西方发达国家从不同方面相继开展了一系列不同形式的三维地质调查工作, 从目前的研究来看, 可以概括为以下 4 个方面: (1) 以现有平面地质图数据资料为基础, 综合已有的地球物理和钻探等资料, 依托类似的软件, 通过构建系列剖面栅栏, 实现一定深度的地质结构三维可视化. 在这方面代表性的是英国地质调查局于 2009 年实施 2012 年完成的覆盖全国的深度 1.5~6.0 km 的三维地质模型的构建. 这方面的工作重点在于实现地质结构的三维可视化, 其深部地质解释的可信度难以评估. (2) 试图通过实施系列地球物理或钻探的实际探测工作, 实现一定深度区域三维地质结构的揭示. 早在 2000 年澳大利亚就开始实施玻璃地球计划(Glass-Earth), 拟通过物探、钻探和计算机模拟技术的结合, 实现澳大利亚大陆 1 km 内的地壳及其地质过程的“透明”化, 增强发现巨型矿床的能力; 法国地质研究与矿产局(Bureau of Geological Research and Mineral, BGRM)从 2011 年也开始实施拟建立旨在描绘地下数公里地质结构的法国地质参考平台(The French Geological Reference Platform). 需要说明, 这一方面的工作投入巨大, 精度的要求没有统一规范, 工作

富有极大的探索性和挑战性, 因此, 这方面的进展国际上实际上也是举步维艰, 如澳大利亚在 2000 年实施的玻璃地球计划仅实施了 3 年便于 2003 年就夭折终止. (3) 旨在重点揭示岩石圈尺度乃至整个地球圈层尺度结构的大型探测计划. 如美国的地球透镜计划(EarthScope), 欧州的欧洲深部探测计划(EuroProbe), 加拿大的岩石圈探测计划(LithoProbe). 这类计划重点在于揭示大尺度的地球深部结构和大陆演化, 而无缝的三维地质模型的构建并非其主要目的. (4) 直接面向市场用户需求具有明确的现实意义的三维地质探测和建模. 这类工作开展最为广泛, 也是目前国际上三维地质调查工作的主体, 如美国针对圣安德烈斯断层区的大比例尺三维地质模型系列图件, 包括断裂随时间变形的三维复原再造. 但这类工作没有系统性, 缺乏国家层面上的规范统一.

我国三维地质填图工作刚刚起步. 以小比例尺揭示岩石圈乃至更深地球层次结构与演化的三维地质探测采取以于 2008 年启动的“深部探测技术与实验研究专项”计划(即 SinoProbe 计划)为代表(董树文等, 2010), 该计划的实施一方面大大促进了我国地球深部探测技术的发展, 另一方面也使人们对中国大陆地壳和岩石圈乃至更深层次的地球深部的结构、构造及演化的认识达到了空前的高度. 在区域性或大比例尺的三维地质结构探测和建模方面, 21 世纪以来, 油田、矿山勘探以及工程部门以大量钻孔岩芯测井资料、地球物理资料或井巷开挖揭示资料等为基础对重点油气勘探区、矿体或工程体的三维地质结构建模和表达进行了很好的尝试, 并取得良好的成果(吴键等, 2005; 李良平等, 2007; 张宝一等, 2007; 罗智勇和杨武年, 2008; 崔廷主和马学萍, 2010; 毛先成等, 2010; 陈超和陈广峰, 2012; 邵燕林等, 2012); 中国地质调查局前期以 MapGis 为软件平台, 针对城市经济区的三维地质建模和可视化表达也进行了初步的尝试(朱良峰等, 2004; 尚建嘎和刘修国, 2006).

三维地质调查的目标是揭示深部地质结构, 而深部地质结构约束条件的好坏直接关系到三维地质

调查的效果. 本文重点讨论的是区域中大比例尺的三维地质调查方法与技术, 即 1 : 250 000 及更大比例尺的区域三维地质调查. 上述我国前期尝试的区域性或大比例尺的三维地质结构建模的共同特点是深部地质结构或深部目标地质体有大量的钻孔和(或)地球物理勘探资料的良好约束. 但是, 对绝大多数基岩区特别是复杂造山带区域而言, 露头信息丰富, 但钻孔资料有限, 地球物理勘探的资料也很匮乏, 在这类地区进行基础性的三维地质调查、重新安排大量的钻探和地球物理勘探工作因高成本而不太现实, 而成矿带往往与造山带关联, 是未来深部地质找矿的主要区域. 因此, 如何在有限的深部地质资料基础上开展基岩区三维地质调查特别是按一定比例尺标准幅面的区域三维地质填图成为亟待解决的重要探索性难题.

在中国地质调查局的总体工作部署和支持下, 从 2012 年开始, 我们针对铜金多金属矿集区的西准噶尔克拉玛依后山地区开展了 1 : 250 000 比例尺的三维地质填图试点探索. 通过 3 年的工作, 我们提出针对造山带区域的“基于地表地质调查剖面网络基础上的地质—地球物理—钻孔联合约束的三维地质调查与建模方法技术体系”, 即以地表地质调查为基础、以地质—地球物理—钻孔联合约束下的模型为指导、以地质体结构规律为延拓依据的三维地质填图方法. 本文重点总结复杂造山带区域三维地质填图与建模的思路和方法技术体系, 具体的深部地质结构的约束方法详见本专辑郁军建等(2015)另文专述.

## 1 造山带基岩三维地质填图的基本思路

从西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质填图实践, 我们深感造山带地区地质结构的复杂性, 对于地球物理和钻探资料相对有限的复杂造山带成矿带地区, 要获得一个结构相对合理并具有较好可信度的基岩三维地质结构模型, 我们遵循的基本工作思路概括如下.

### 1.1 瞄准关键深部地质矿产问题

三维地质填图主要是对深部地质结构的揭示, 但限于深部地质资料信息掌握的有限性, 我们很难做到对深部地质结构的全要素的揭示. 因此, 三维地质填图应该本着有所为、有所不为的原则, 应该在地表地质调查基础上对关键的深部地质矿产问题进行

清理, 以刻画测区基本三维地质结构为目标. 三维地质填图质量的优劣取决于我们对拟定的关键深部地质矿产问题解决的程度.

通过对克拉玛依后山地区三维地质填图实践, 笔者认为, 对一个确定比例尺的填图区域(1 : 250 000或 1 : 50 000)需要刻画以下基本的深部地质信息.

#### 1.1.1 主要地层单元或侵入岩单元的三维分布

与平面地质图一样, 三维地质结构也需要刻画地质实体在三度空间上的延展, 因此, 需要对不同地质单元(填图单元)的深部延伸作出有效的判识. 这里我们强调对“主要”地层单元或“主要”侵入岩单元地质实体的深部延展进行界定, 取决于我们对不同地质实体深部结构的判识程度.

#### 1.1.2 主要构造延伸及其空间配置

它包括主体褶皱构造或主干断裂构造的三维延伸和空间配置. 对于成矿带来说, 应该特别强调与铜、金、铁等多金属矿有关的主要断裂构造的三维延伸及其空间配置.

#### 1.1.3 特殊地质体或地质要素的深部延伸

一些重要的特殊地质体或地质要素, 比如造山带地区的蛇绿岩带、具有特殊物性结构的矿体(如铁矿).

#### 1.1.4 特殊地质结构关系

比如不同构造带之间的结构关系或盆山结构关系等, 一般与主干断裂的判识相关联.

### 1.2 基于坚实的地表地质调查

从地壳—岩石圈的尺度上看, 一定比例尺的区域三维地质填图依然是近地表层次, 瞄准的是地下几公里范围内的三维地质结构, 在探测深度范围内构造层次或构造变形相并没有根本的改变, 因此地表地质信息与深部地质结构往往存在诸多的关联性. 实际上传统的地表地质填图(地质图)本身就蕴含着丰富的三维地质结构信息. 因此, 针对深部地球物理资料和钻孔资料相对匮乏的造山带成矿带地区, 从揭示深部地质结构需求的角度进一步强调地表地质调查对三维地质填图的重要性具有十分重要的现实意义. 地表地质关系是否揭示清楚会直接影响到对其深部地质信息的判识. 充分理解地表地质结构对理解深部地质结构的重要性具有重要的直接和间接指导意义. 因此, 遵从地质学特别是构造地质学几何学和运动学(包括构造二维—三维平衡)基本规律合理推断地质单元界面、断层及一些标志体等地质要素的深部延展仍然应该是我们进行一定深度和一定比例尺深部地质填图的最基本思考.

以西准噶尔克拉玛依后山地区为例, 该区广泛

分布早石炭世—晚石炭世早期一套碎屑浊积岩系,前人对划分的希贝库拉斯组、包古图组和太勒古拉组的3个岩石地层单元的层序关系长期争议。我们从沉积示顶构造、构造—地层格架、古生物和同位素年代学多方面地表地质调查证据重新核定了它们之间的地层层序,即由老到新为希贝库拉斯组—包古图组—太勒古拉组(张雷等,2014;纵瑞文等,2014),从而保证了无论是二维地质结构还是三维地质结构都必须满足的地层关系的正确性和可靠性;再如,准噶盆地与西准噶尔造山带之间的盆山结构关系,前人根据横过盆山结合部的地震反射资料提出高角度走滑花状构造边界和低角度无根逆冲推覆边界两种不同构造关系(何登发等,2004;管树巍等,2008;张越迁等,2011),我们对白碱滩一带盆山结合部的详细的地表构造解析和放大比例尺的填图结果表明,邻近盆地的断裂构造主体倾向北西,但也出现较多倾向南东的高角度逆断层,断面倾角主要为中高角度;褶皱轴面多为高角度倾斜,既有倒向山外,也有较多倒向山内;因此我们认为,盆山结合部虽存在有向盆地方向的冲断,但不存在向盆地方向的大规模低角度逆冲推覆,我们新获得的重磁电地球物理勘探资料也揭示盆山结合部断层主要为高角度断层。这一认识对测区三维地质模型的构建具有重要指导意义。

### 1.3 地表地质调查、深部地球物理和钻探的紧密结合

强调坚实的地表地质调查为基础,绝不否认深部地球物理勘探和钻探工作的重要性。地表地质构造分析所反映的深部地质结构是否合理需要得到地球物理勘探或钻探资料的验证和指导。与地表地质构造分析对深部地质结构的约束一样,深部地球物理资料和钻探资料也是三维地质结构深部延展的重要约束条件。这就要求地表地质调查必须与深部地球物理和钻探工作紧密结合,这种结合表现在:(1)必须对已有地球物理资料和钻探资料进行充分收集和分析,并加以充分利用,任何涉及揭示深部地质结构的信息都应该在三维地质填图框架下加以充分的挖掘和使用;(2)根据三维地质填图对揭示深部地质结构的基本要求,应该围绕关键深部地质矿产问题,适度合理部署地球物理勘探和钻探工作。

### 1.4 地表地质调查、深部地球物理和三维建模多学科紧密结合与协同创新

三维地质填图的数字表达,即三维地质结构建模涉及到现代计算机技术应用。因此,三维地质填图

工作的开展要求地表地质调查、深部地球物理和三维建模多学科的紧密结合与协同创新,具体表现在:

(1)三维地质填图是地表地质调查人员与地球物理勘探人员对三维基础地质矿产问题的联合攻关。

(2)三维地质建模工作要求以地质为主导的地质、地球物理人员在建模过程的全程参与。三维地质建模工作特别是复杂造山带成矿带的三维地质建模既是地质专业型很强的基础地质工作,也是计算机实际运用的计算机技术工作。建模过程中,计算机人员难以把握三维地质结构的空间延展,而地质、地球物理人员可能对建模软件工具的掌握有限。特别是现阶段三维建模软件尚不成熟,建模软件开发人员也需要针对地质、地球物理人员提出的三维地质建模需求对软件升级与改进。

## 2 基于地表地质调查基础上的地质—地球物理—钻孔联合约束的三维地质调查方法

### 2.1 地表地质信息的应用

地表地质信息对一定深度深部地质结构的约束具有举足轻重的作用。地表的产状信息、地层层序关系与厚度、褶皱形态、断层性质及其位移以及地质剖面是否达到平衡都是从地表往深部延拓的重要约束条件。我们在进行克拉玛依后山地区三维地质调查过程中,充分利用地表约束地下的理念,通过系列地表路线或剖面地质调查信息推断和约束深部地质结构,并最终达到对深部地质结构的三维展示。

为了有效约束地质体的三维延伸,有必要对重点区带进行放大比例尺的精细解剖,以点推线带面,将精细解剖成果扩展到全区。我们在实施西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质填图时,根据三维地质填图的要求和地球物理勘探剖面的布置,选择与地球物理勘探剖面相匹配的主干剖面和若干针对特殊地质体或成矿区的短剖面,开展地质构造剖面实测,剖析剖面区段的构造发育和时空关系。另外,为了在二维空间控制剖面上地质体的空间走向和可能的三维延伸,开展以实测剖面为中心,向两侧各延伸约2~3 km的走廊带的1:50 000地质填图。对三维地质调查涉及的诸如蛇绿岩的就位方式和盆山关系等关键地质问题部署了重点区块的1:50 000~1:10 000的大比例尺构造解剖,包括在白碱滩一带部

署约200 km<sup>2</sup>针对盆山关系和克拉玛依蛇绿混杂岩带就位过程的1:50 000重点解剖区;在宝贝一萨尔托海一带部署部署约200 km<sup>2</sup>针对达尔布特蛇绿构造混杂岩带深部延展及与两侧石炭系地层构造关系的1:50 000重点解剖区;在包古图一带部署约30 km<sup>2</sup>针对包古图含矿斑岩体的深部延展的重点解剖区。通过这些地表详细的解剖工作,结合面上地质构造信息,为实现对地质体三维结构的有效控制提供准确的地表地质信息,并为地球物理资料解释和三维地质结构建模奠定坚实的基础。

## 2.2 理论及概念模型的作用

根据地表地质观察所获得的地质综合模型对地表约束深部的三维地质结构构建具有重要的指导意义。比如逆冲推覆体系、伸展构造体系和走滑构造体系均具有不同的断裂构造组合型式和深部结构特点,通过地表地质构造分析确定的构造变形体系或综合构造模型无疑对地表地质构造往深部延拓具有重要指示意义。

西准噶尔克拉玛依后山地区分布有系列断层围限的奥陶—泥盆纪的蛇绿构造混杂岩系,野外地表地质填图显示它们弥散分布于两侧时代相对较新的石炭系岩系中,蛇绿混杂岩系主体边界断层及内部构造面理多高角度倾向北西或近直立产出,在两侧石炭纪地层沉积时期,蛇绿混杂岩不具备构造古地理分割意义,那么这些较老的蛇绿混杂岩系如何与两侧较新的石炭系地层发生构造并置直接关系到蛇绿混杂岩系的深部延展以及大面积分布的石炭系下伏基底属性的判识,从而影响到对测区三维地质结构的认识。对具有代表性的克拉玛依后山地区的达尔布特蛇绿混杂岩系和克拉玛依蛇绿混杂岩系内部及其与两侧围岩构造边界的详细构造解析揭示,不同蛇绿混杂岩带的构造就位可概括为右旋走滑剪切控制下的拉出。另外,区域构造时空演化分析说明,晚石炭世西准噶尔地区发生重要的汇聚变形事件,洋盆彻底闭合,早石炭世—晚石炭世早期总体为残余盆地浊积岩系堆积,下伏为宽泛的古生代活动大陆边缘增生体系及残余洋盆体系。晚石炭世陆块斜向汇拢洋盆汇聚闭合导致下伏的增生体系或残余洋盆通过斜向拉出就位于上覆相对较新的地层系统中。由此,我们推断蛇绿混杂岩两侧大面积石炭系地层下伏基底的物质属性主要也应为古生代活动大陆边缘的增生杂岩或残余洋盆(图1)。这样一种综合模型的认识也得到系列地球物理勘探结果的支持,从而对构建蛇绿岩系的深部延展以及石炭系下覆岩系的地质构

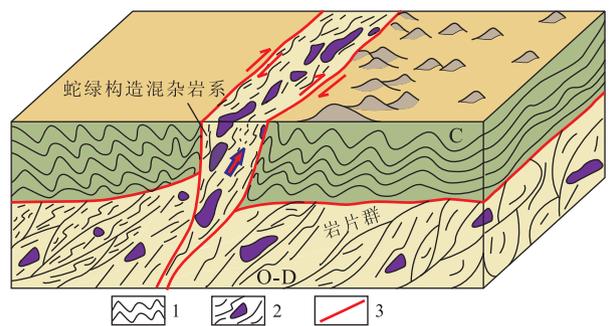


图1 西准噶尔克拉玛依后山地区石炭系下伏基底及蛇绿混杂岩系右旋楔入概念模型

Fig. 1 Conceptual model of the underlying basement of Carboniferous and the right lateral wedge-thrusting pattern of the ophiolitic melange in the north mountain areas of the Karamay, western Junggar

1. 褶皱变形的石炭纪残留海盆浊积岩系;2. 奥陶纪—泥盆纪蛇绿构造混杂岩系,紫色团块示残留大洋岩圈地幔超镁铁岩岩块;3. 断层

成推断提供了重要的理论和概念模型基础。

## 2.3 地球物理约束

区域三维地质填图的理想状况应该是具有一定网度的地球物理勘探资料,但现实情况是造山带地区地球物理资料往往十分有限,这就要求对有限地球物理资料所揭示的深部信息的充分挖掘和利用。有限地球物理资料信息的挖掘体现在2个方面:(1)地球物理勘探资料直接揭示了沿勘探剖面线或勘探区域的深部地质结构信息,其地质解析结果应该直接参与地质建模;(2)地球物理勘探工作所揭示的深部地质结构信息帮助验证和修改完善以地表地质观察所建立的三维地质综合模型,从而指导区域性的三维地质结构建模。

以西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质填图为例,依据地表地质观测资料我们推断克拉玛依后山地区达尔布特、克拉玛依等蛇绿混杂岩系是通过右旋旋转压缩楔入的产物,大面积分布的石炭系基底主要为古生代活动大陆边缘增生体系及残余洋盆体系,这样的结论得到系列重磁电地球物理剖面勘探资料的佐证,并揭示石炭系深度一般不超过8 km,石炭系基底主要为蛇绿构造混杂岩也与西准噶尔山区相对盆地的高重力地球物理场相吻合,不同组成之间的构造边界断层在建模探测深度范围主要以高角度往下延伸。部署的若干地球物理勘探剖面(4条)不仅反映了剖面线沿线的三维地质结构,并且对构建测区有关石炭系与蛇绿混杂岩系之间构造关系及蛇绿混杂岩系深部延展的三维地质结构模型也起到重要作用,从而对相关的系列路线三维地质剖面

表 1 深部地质信息约束条件分级评价标准

Table 1 Evaluation criteria for the deep geological information constraint classification

约束条件	高	较高	中	较低
地表地质信息	与地表地质观测资料有直接联系,地表观测资料详实可靠	有正确的理论或概念模型为依据,与地表地质信息关联性较好	有一定的理论或概念模型为依据,与地表地质信息有一定关联,但存在一定的不确定性	理论或概念模型不确定,地表地质信息与深部关联性不确定,推测性大
地球物理信息	有地球物理勘探结果约束	有可借鉴的地球物理探测资料	有可借鉴的地球物理探测资料,但推测性较大	与地球物理信息关联较弱
钻孔约束	有钻孔控制	有钻孔资料借鉴		

的制作及进一步的建模具有重要的指导意义。

## 2.4 钻探约束

钻探资料能对深部地质结构进行直接刻画,是最可靠的深部地质信息。钻探资料也有利于对以地表地质资料推测的深部地质结构或地球物理资料进行地质解释结果进行验证或修正,因此是三维地质调查中十分重要的约束条件。然而,对于成矿带基岩区区域三维地质填图来说,受钻探工作的高成本投入的限制,以三维地质填图为目的的钻探工作的部署需要十分慎重,一般需要针对地表地质推断和地球物理资料地质解释所揭示的重要异常和关键问题进行适量的钻孔验证或标定。对调查区内已有的钻探资料应该广泛收集和充分利用,并成为十分重要的约束条件参与模型的构建。如克拉玛依后山地区包古图含矿斑岩体的找矿勘探前期投入了较多的勘探工作(Shen *et al.*, 2009),对 V 号含矿斑岩体的钻孔基本约束了岩体地下 1 000 m 以浅的三维地质结构,呈现为由北向南斜向上侵位的三维形态。对该岩体我们开展了面积型大地电磁测深,我们发现含矿斑岩体地下约 600 m 以浅的含矿部分对应低阻,以下的无矿部分转为正常的高阻,而高阻岩浆管道与南部的 VI 号无矿高阻岩体管道相连,而揭示包古图一带系列小型岩体是深部更大岩体的不同岩枝。有限的钻孔资料帮助我们对包古图一带岩体深部三维结构的理解和建模。

有关利用各种地表地质信息、地球物理信息以及钻探信息对深部地质结构要素的约束方法详见本专辑郁军建等(2015)另文专述。

需要强调的是本文主要讨论具有一定幅面、一定比例尺(1:50 000~1:250 000)的造山带区域三维地质填图方法体系,对这种比例尺范围的区域三维地质填图来说,其主要目的是为深部地质找矿提供基础地质背景资料,而人们所能企及的地质找矿勘探深度一般在 2 km 以浅。因此,区域三维地质填图要求达到的深度一般是地下 2 km 以浅。比例尺略

小的 1:250 000 区域三维地质填图需要解决一些更大尺度的区域地质结构问题,其涉及的深度需根据实际地质状况适当加深。以西准噶尔克拉玛依后山地区的 1:250 000 三维地质调查为例,我们强调主要目标地质体约束 2~5 km 以浅,部分重要目标地质体为 10 km,如蛇绿混杂岩系。

与深度相关的是区域三维地质填图的精度问题。本文强调区域三维地质调查要以坚实的地表地质调查为基础,深部三维地质结构约束好坏在很大程度上取决于地表地质调查,因此,从揭示一定深度的三维地质结构来说,地表地质调查的精度应该在现行区域地质调查精度规范要求基础上适当加大,并且需要部署针对关键深部地质问题的放大比例尺的解剖。对于深部地球物理勘探和钻探工作的精度要求,我们强调最大限度的收集已有的地球物理和钻探资料。对地球物理勘探的基本要求应该是针对区域构造格架的基本控制和解决关键深部地质问题进行适度部署,不强调规范性的量的要求;钻探工作应以验证为目的少量部署,而不宜以控制深部地质体为目标。显然,对于一定区域,地表信息越丰富、深部地球物理资料越多、钻孔越多,则深部地质信息的约束条件就越好。因此,在三维地质结构模型中,我们可以根据不同目标地质体深部信息约束条件的优劣,定性分级反映目标地质体在不同深度的可信度。初拟的约束条件分级标准见表 1。

## 3 基于地表地质调查基础上的三维地质建模

一般的三维地质建模主要基于系列剖面上点上钻孔约束进行。从区域三维地质填图角度出发,我们强调基于地表地质调查基础上的三维地质建模是指构建三维地质模型的系列地质剖面基础来自地表路线地质调查剖面以及地表实测地质剖面,并结合

相关地球物理勘探资料和钻孔等约束条件,实现二维地质填图向三维地质填图的有机过渡.以路线地质调查为基础的三维地质建模方法的基本点可概括为:近地表地质资料利用不同比例尺地质填图的路线地质和实测地质剖面的填图成果,地质体的深部延展利用包括地表路线或剖面资料、地球物理资料以及钻孔资料所约束的各种深部地质结构信息进行合理的综合推断,从而建立若干地质—地球物理—钻探综合地质解析剖面,勾勒若干不同路线或实测剖面一定深度的地质结构关系,最后对不同剖面进行勾连,构建一定深度的三维地质结构模型.李超岭等(2003)研发的 DGSS 数字地质填图系统已经实现了二维平面地质填图 PRB(点—路线—地质界线)过程的数字化.基于 MapGIS 软件作为 GIS 平台,结合三维地质填图需求和特点,我们研发了全新的三维地质建模工具集,这一软件工具集能实现从二维到三维地质模型的全过程构建.以西准噶尔克拉玛依后山地区白碱滩一带的三维地质填图为例,具体方法和流程如下:

(1)以野外采集的路线信手剖面为基础,通过修改完善路线信手剖面,制作地表地质调查约束下的系列路线自然地质剖面 and 实测自然地质剖面,制图比例尺一般采用 1 : 10 000,形成约束地下约 200 m 以浅的近地表地质剖面网络数据(图 2).

(2)以近地表约 200 m 以浅的地质剖面网络系统数据为基础,根据地表地质产状关系,遵从地质学特别是构造地质学几何学和运动学(包括构造二维—三维平衡)的基本规律并在深部地球物理探测结果约束和钻孔资料充分利用的前提下,对主要地质单元(地层单元和侵入岩单元)分界面、断层和重要标志体等地质要素的深部延展进行合理的推断.西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质调查为 1 : 250 000 中

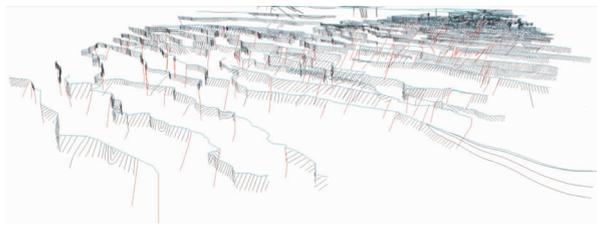


图 2 白碱滩一带(1 : 100 000 白碱滩幅基岩区)近地表地质剖面网络格架

Fig. 2 Network of near surface geological sections in Baijiantan bedrock areas of 1 : 100 000 Baijiantan map sheet

等比例尺,这一比例尺下主要目标地质体地质结构的刻画深度我们界定为地下 2~5 km,调查区海拔一般为 500~1 000 m.因此,我们在模型构建中,一般地质体的下延深度为海拔—3 000 m;深部信息控制较差区段适当变浅至海拔—2 000 m;一些重要目标地质体(如蛇绿岩或大型边界断裂)在有深部地球物理探测信息约束的前提下尽量适当下延.根据不同目标地质体深部延展信息约束条件的优劣,分级反映目标地质体在不同深度的可信度(表 1).最后形成三维地质结构剖面网络数据(图 3).

(3)通过 MapGIS 软件平台下研发的三维建模工具,对系列三维地质结构剖面地质界面(包括断层面等)进行三维勾连,通过人工干预与自动连接成图相结合,处理各种常规地质体和特殊地质体的三维延伸,形成三维结构面模型和体模型数据体,最终实现建模数据源的三维可视化(图 4).

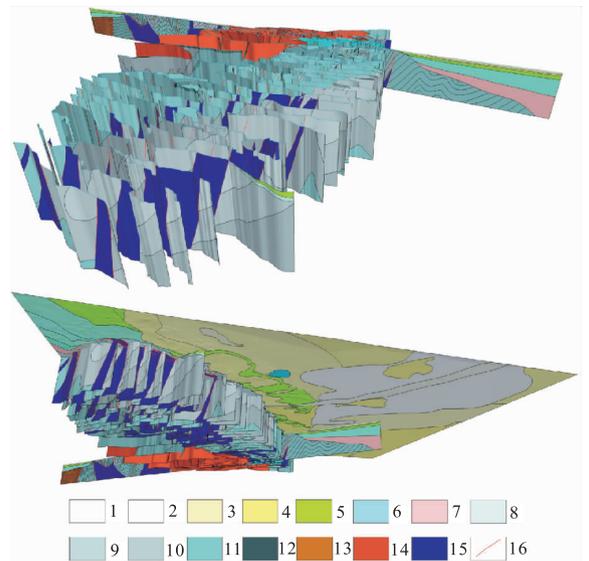


图 3 白碱滩一带(1 : 100 000 白碱滩幅基岩区)插入 1 号线地质—地球物理综合解释剖面的三维地质结构剖面网络格架

Fig. 3 Network of three-dimensional geological structure profile which inserts No. 1 geological-geophysical comprehensive interpretation section in Baijiantan bedrock areas of 1 : 100 000 Baijiantan map sheet

1. 全新统冲积(Qh<sup>pl</sup>); 2. 上更新统一全新统冲积(Qp<sub>3</sub>-h<sup>pl+ch</sup>); 3. 上更新统一全新统冲洪积(Qp<sub>3</sub>-h<sup>al</sup>); 4. 上更新统洪积(Qp<sub>3</sub><sup>pl</sup>); 5. 下白垩统吐鲁群(K<sub>1</sub>T); 6. 侏罗系; 7. 上三叠统小泉沟群(T<sub>3x</sub>); 8. 下石炭统太勒古拉组 c 段(C<sub>1</sub>t<sup>c</sup>); 9. 下石炭统太勒古拉组 b 段(C<sub>1</sub>t<sup>b</sup>); 10. 下石炭统太勒古拉组 a 段(C<sub>1</sub>t<sup>a</sup>); 11. 下石炭统包古图组(C<sub>1</sub>b); 12. 下石炭统希贝库拉斯组(C<sub>1</sub>x<sub>b</sub>); 13. 泥盆系; 14. 晚石炭世红山花岗岩体(γHS<sup>2</sup>); 15. 蛇绿混杂岩系; 16. 断层

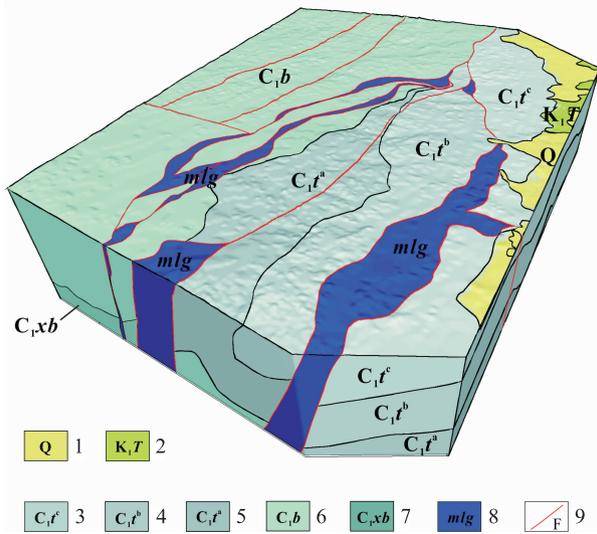


图 4 白碱滩盆山结合部三维地质结构初步模型

Fig. 4 A preliminary model of 3D geological structure in the basin-range junction area of Baijiantan

1. 上更新统洪积( $Qp_3^{pl}$ ); 2. 下白垩统吐古鲁群( $K_1T$ ); 3. 下石炭统太勒古拉组 c 段( $C_1t^c$ ); 4. 下石炭统太勒古拉组 b 段( $C_1t^b$ ); 5. 下石炭统太勒古拉组 a 段( $C_1t^a$ ); 6. 下石炭统包古图组( $C_1b$ ); 7. 下石炭统希贝库拉斯组( $C_1xb$ ); 8. 蛇绿混杂岩系; 9. 断层

## 4 讨论与思考

三维地质填图是一项探索性很强的开拓性工作,目前尚无成熟经验可循.已有的一些针对复杂造山带地区的三维地质建模往往也是基于平面地质图进行系列图切剖面来构架三维模型体(张思科等,2009),并非“区域三维地质填图”意义上的三维地质建模.国际上对三维地质填图的工作也主要集中在三维建模上面,即主要考虑将已经获取的地质资料利用计算机软件技术进行三维表达,而对按照一定比例尺、一定幅面的区域三维地质填图概念上的三维地质深部信息的获取并没有在方法学上形成规范.三维地质填图工作深部地质信息的获取应该是多方面的,包括地表信息、地球物理勘探信息和钻探信息.不同尺度、不同区域、不同目的三维地质调查对深部资料的获取的途径、方法的侧重点以及详细程度各不相同.

通过西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质填图试点研究,我们认为对于地球物理和钻探资料较少的造山带成矿带区域三维地质填图,地表地质调查仍然是最重要的基础.由于对地表反映深部地质信息提出了更高要求,因此相对于传统的地表地质调查,其工作需要更系统更全面,特别是要加强对深部

地质信息获取方面的地表地质调查.在工作部署上需要强化针对关键地质构造问题的解剖区和地球物理勘探线走廊带的重点调查;在路线调查工作中需要强化系统产状信息、构造形式和各种地质关系方面内容的调查以及路线信手剖面的系统详细准确绘制;在剖面实测方面,除了传统的地层剖面的实测外,需要强化控制区域地质构造格架的地质构造剖面的实测.在强化地表地质调查工作的基础上,也需要特别强调和重视地球物理勘探和钻探工作,其重要性表现在深部地球物理资料和钻探资料是三维地质结构深部延展的重要约束条件,地表地质构造分析所反映的深部地质结构的合理性需要得到地球物理勘探或钻探资料的佐证和指导.

另外,我们提出的基于地表地质调查基础上的地质—地球物理—钻孔联合约束的三维地质调查方法体系也体现在“基于地表地质调查基础上的三维地质建模”上面.与一般的三维建模方式不同,我们强调建模的数据基础来自地表基础地质调查的系统路线剖面和实测剖面,即以地表实测地质路线为基础结合地球物理和钻探资料向下合理延拓,从而实现“区域三维地质填图”概念上的三维地质结构的数字表达.

致谢:中国地质调查局和计划项目实施单位中国地质科学院地质研究所与西安地质矿产研究所对工作给予了大力支持和实际指导,组织进行了多次有益的讨论,得到肖庆辉、卢民杰、张智勇、毛晓长等有关专家学者的悉心指导,提出了许多建设性意见.除本文作者外,还凝聚了包括陈超、张胜业、罗银河、季军良等老师和纵瑞文、杨维、晏文博等参加项目的上百位师生的集体劳动和智慧.在此一并致以衷心感谢!

## References

- Chen, C., Chen, G. F., 2012. Application and Research of Three Dimensional Modeling in District Geologic Survey. *City Geology*, 7(1): 20–25 (in Chinese with English abstract).
- Courrioux, G., Nullans, S., Guillen, A., et al., 2001. 3D Volumetric Modelling of Cadomian Terranes (Northern Brittany, France): An Automatic Method Using Vorono Diagrams. *Tectonophysics*, 331(1–2): 181–196.
- Cui, T. Z., Ma, X. P., 2010. An Application of 3D Structural Modeling to Complex Fault-Block Reservoirs—A Case of the Lower Unit Reservoir of Sha-3 Member in Block Wei-95, Mazhai Oilfield, Dongpu Depression. *Oil & Gas Geolo-*

- gy,31(2):198—205 (in Chinese with English abstract).
- Dong, S. W., Li, T. D., Gao, R., et al., 2010. International Progress in Probing the Earth's Lithosphere and Deep Interior: A Review. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 743—770 (in Chinese with English abstract).
- Guan, S. W., Li, B. L., Hou, L. H., et al., 2008. New Hydrocarbon Exploration Areas in Footwall Covered Structures in Northwestern Margin of Junggar Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 35(1): 17—22 (in Chinese with English abstract).
- Guiziou, J. L., Mallet, J. L., Madariaga, R., 1996. 3-D Seismic Reflection Tomography on Top of the Gocad Depth Modeler. *Geophysics*, 61(5): 1499—1510.
- He, D. F., Yin, C., Du, S. K., et al., 2004. Characteristics of Structural Segmentation of Foreland Thrust Belts—A Case Study of the Fault Belts in the Northwestern Margin of Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 91—101 (in Chinese with English abstract).
- Jachens, R. C., Wentworth, C. M., Gautier, D. L., et al., 2001. 3D Geologic Maps and Visualization: A New Approach to the Geology of the Santa Clara (Silicon) Valley, California. Digital Mapping Techniques '01, U. S. Geological Survey Open-File Report 1—223, 13—23.
- Li, C. L., Yu, Q. W., Yang, D. L., et al., 2003. Research on PRB Digital Mapping Techniques. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(4): 377—383 (in Chinese with English abstract).
- Li, L. P., Hu, F. S., Yin, L. H., 2007. On the 3-Dimensional Geological Modeling of Cretaceous System in the Ordos Basin. *Northwestern Geology*, 40(2): 109—113 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., Li, W. B., Song, S. P., 2008. Applied Research of the Three-Dimensional Geological Model Building. *Science Technology and Engineering*, 8(24): 6584—6590 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. Y., Yang, W. N., 2008. 3D Modeling and Visualization of Geological Bodies Based on Borehole Data. *Science of Surveying and Mapping*, 33(2): 130—132 (in Chinese with English abstract).
- Lü, P., Zhang, W., Liu, G., et al., 2013. Three-Dimensional Geological Mapping Progress of Important abroad Institution of Geological Survey. *Land and Resources Information*, (3): 13—18 (in Chinese).
- Malolepszy, Z., 2005. Three-Dimensional Geological Maps. In: Ostaficzuk, S. R., ed., *The Current Role of Geological Mapping in Geosciences*, NATO Science Series, 56: 215—224.
- Mao, X. C., Zou, Y. H., Chen, J., et al., 2010. Three-Dimensional Visual Prediction of Concealed Ore Bodies in the Deep and Marginal Parts of Crisis Mines: A Case Study of the Fenghuangshan Orefield in Tongling. Anhui, China. *Geological Bulletin of China*, 29(2—3): 401—413 (in Chinese with English abstract).
- Pan, M., Fang, Y., Qu, H. G., 2007. Discussion on Several Foundational Issues in Three-Dimensional Geological Modeling. *Geography and Geo-Information Science*, 23(3): 1—5 (in Chinese with English abstract).
- Shang, J. G., Liu, X. G., 2006. Study on 3D Space Information System of Domain Specific Urban Geology. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 23(Suppl. 1): 172—175 (in Chinese with English abstract).
- Shao, Y. L., He, Y. B., Xu, X. H., 2012. Structural Modeling under Complicated Geological Features—by Taking Dalinghe Oil Formation in Shu II District as an Example. *Journal of Oil and Gas Technology*, 34(2): 50—52 (in Chinese with English abstract).
- Shen, P., Shen, Y. C., Liu, T. B., et al., 2009. Geochemical Signature of Porphyries in the Baogutu Porphyry Copper Belt, Western Junggar, NW China. *Gondwana Research*, 16: 227—242.
- Turner, A. K., 1992. *Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems*. Springer, New York, 443.
- Wang, M. H., Bai Y., 2006. The Status Quo and Development Tendency of 3D Geosciences Modeling. *Soil Engineering and Foundation*, 20(4): 68—70 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Cao, D. Y., Deng, A. J., et al., 2005. 3D Geological Modeling on Studying Oilfield Geology. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 27(2): 52—55 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L. X., Shi, W. Z., 2005. On Three Dimensional Geosciences Spatial Modeling. *Geography and Geo-Information Science*, 21(1): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. J., Wang, G. C., Xu, Y. X., et al., 2015. Constraining Deep Geological Structures in the Three-Dimensional Geological Mapping of Complicated Orogenic Belts: A Case Study from the Karamay Region, Western Junggar. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(3): 407—418 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2015.032
- Zhang, B. Y., Shang, J. G., Wu, H. M., et al., 2007. Application of 3D Geological Modeling and Visualization in Solid Mineral Resource Estimation. *Geology and Prospecting*, 43(2): 76—81 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, L., Wang, G. C., Gao, R., et al., 2015. U-Pb Chronology of Carboniferous Detrital Zircons and Its Geological Implications in West Junggar. *Geotectonica et Metallogenia*, in press (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. K., Ni, J. Y., Gao, W. L., et al., 2009. Study on the Technology and Method of 3D Geological Modeling: A Case Study of the East Kunlun Orogenic Belt. *Journal of Geomechanics*, 15(2): 201-208 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Wang, X., Liu, J. S., et al., 2011. Wuerhe-Xiazijie Strike-Slip Structure and Petroleum Exploration Significance in Northwestern Margin of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 32(5): 447-450 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, L. F., Wu, X. C., Liu, X. G., 2004. Preliminary Study of 3D Urban Geological Information System. *Geography and Geo-Information Science*, 20(5): 36-40 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Q., 2004. A Survey of Three Dimensional GIS Technologies. *Geomatics World*, 2(3): 8-12 (in Chinese with English abstract).
- Zong, R. W., Gong, Y. M., Wang, G. C., 2014. Carboniferous Stratal Sequence and Its Palaeogeographical Evolution in Southwestern Junggar, NW China. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 216-233 (in Chinese with English abstract).
- 附中中文参考文献**
- 陈超, 陈广峰, 2012. 三维建模技术在区域工程地质勘查中的应用研究. *城市地质*, 7(1): 20-25.
- 崔廷主, 马学萍, 2010. 三维构造建模在复杂断块油藏中的应用——以东濮凹陷马寨油田卫95块油藏为例. *石油与天然气地质*, 31(2): 198-205.
- 董树文, 李廷栋, 高锐, 等, 2010. 地球深部探测国际发展与中国现状综述. *地质学报*, 84(6): 743-770.
- 管树巍, 李本亮, 侯连华, 等, 2008. 准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造油气勘探新领域. *石油勘探与开发*, 35(1): 17-22.
- 何登发, 尹成, 杜社宽, 2004. 前陆冲断带构造分段特征——以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例. *地学前缘*, 11(3): 91-101.
- 李超岭, 于庆文, 杨东来, 等, 2003. PRB数字地质填图技术研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(4): 377-383.
- 李良平, 胡伏生, 尹立河, 2007. 鄂尔多斯盆地白垩系三维地质建模研究. *西北地质*, 40(2): 109-113.
- 李舒, 李伟波, 宋世鹏, 2008. 三维地质建模的应用研究. *科学与技术*, 8(24): 6584-6590.
- 罗智勇, 杨武年, 2008. 基于钻孔数据的三维地质建模与可视化研究. *测绘科学*, 33(2): 130-132.
- 吕鹏, 张炜, 刘国, 等, 2013. 国外重要地质调查机构三维地质填图工作进展. *国土资源情报*, (3): 13-18.
- 毛先成, 邹艳红, 陈进, 等, 2010. 危机矿山深部、边部隐伏矿体的三维可视化预测——以安徽铜陵凤凰山矿田为例. *地质通报*, 29(2-3): 401-413.
- 潘懋, 方裕, 屈红刚, 2007. 三维地质建模若干基本问题探讨. *地理与地理信息科学*, 23(3): 1-5.
- 尚建嘎, 刘修国, 2006. 城市地质领域三维空间信息系统的开发研究. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 23(增刊1): 172-175.
- 邵燕林, 何幼斌, 许晓宏, 2012. 复杂地质特征下的构造建模——以辽河油田曙二区大凌河油层为例. *石油天然气学报*, 34(2): 50-52.
- 王明华, 白云, 2006. 三维地质建模研究现状与发展趋势. *土工基础*, 20(4): 68-70.
- 吴键, 曹代勇, 邓爱居, 等, 2005. 三维地质建模技术在油田基础地质研究中的应用. *地球科学与环境学报*, 27(2): 52-55.
- 吴立新, 史文中, 2005. 论三维地学空间构模. *地理与地理信息科学*, 21(1): 1-4.
- 郁军建, 王国灿, 徐义贤, 等, 2015. 复杂造山带地区三维地质填图中深部地质结构的约束方法——西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质填图实践. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(3): 407-418.
- 张宝一, 尚建嘎, 吴鸿敏, 等, 2007. 三维地质建模及可视化技术在固体矿产储量估算中的应用. *地质与勘探*, 43(2): 76-81.
- 张雷, 王国灿, 高睿, 等, 2015. 新疆西准噶尔石炭系碎屑锆石U-Pb年代学及其地质意义. *大地构造与成矿*, 待刊.
- 张思科, 倪晋宇, 高万里, 等, 2009. 三维地质建模技术方法研究——以东昆仑造山带为例. *地质力学学报*, 15(2): 201-208.
- 张越迁, 汪新, 刘继山, 等, 2011. 准噶尔盆地西北缘乌夏走滑构造及油气勘探意义. *新疆石油地质*, 32(5): 447-450.
- 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 2004. 城市三维地质信息系统初探. *地理与地理信息科学*, 20(5): 36-40.
- 朱庆, 2004. 三维地理信息系统技术综述. *地理信息世界*, 2(3): 8-12.
- 纵瑞文, 龚一鸣, 王国灿, 2014. 西准噶尔南部石炭纪地层层序及古地理演化. *地学前缘*, 21(2): 216-233.