构造解析、地质学研究范式与理论创新



——藏东南侧向碰撞带构造演化研究实践

杨天南1),薛传东2)

1) 中国地质科学院地质研究所,北京,100037; 2) 昆明理工大学地球科学系,云南昆明,650093

内容提要:运用板块构造理论解释造山带地质演化是当前地质学研究的难点,也是地质学基础理论创新的可能方向。包括印度-欧亚大陆侧向碰撞带在内的国内、外造山带构造演化尚未取得共识,大多表现为"大量高质量数据与诸多充满争议的演化模型共存"。产生这些争议的主要原因包括"高质量数据"的时、空分布样式未受足够重视、以及部分关键地质体物理属性鉴别存在争议。这些问题为地质学发展与理论创新留下了巨大的空间。持续10多年西南三江造山带区域地质填图、构造解析揭示了侧向碰撞带构造格架、地壳变形历史,提出了印度-欧亚大陆碰撞新的三阶段模型。这一研究实践表明,严格按照"构造解析方法"体现的"三步骤"研究范式开展区域地质填图是造山带理论创新的基础与保障。区域地质填图是造山带研究中难度最大的工作之一,要求填图人员必须具备广泛、坚实的地质学理论基础,以及运用基础理论解决实际问题的能力。

关键词:构造解析;三步骤研究程序;三江造山带;理论创新;区域地质填图

地球可视为一架巨型"机器",地质学研究这架 "机器"的运作过程与运作机理(Carlson et al., 2011)。地球演化历史长达 45 亿年,绝大部分演化 过程记录在各类岩石中。因而,地质学在很大程度 上是一门研究地球历史的科学,主要有两项研究内 容:① 观察、解释正在发生的地质作用过程(内力地 质作用、外力地质作用);② 挖掘岩石中各类古老地 质作用的记录(古生物、矿物、岩石、构造、地球化学 异常、地球物理异常等),理解、重塑古地质作用的发 生机制与过程。前者揭示各类现代地质作用过程、 以及这些地质作用过程形成的典型地质记录;后者 基于前者的研究结果,观察各类历史地质记录,探究 古老地质作用过程(地质学中的"将今论古"原则; Hutton's words: "The present is the key to the past"; Kearey et al., 2009)。两者相互促进,共同 提高对地球这架"机器"运行机理的理解。

地质学研究对象规模宏大,内部物质单元的空间关系和时间演化复杂。各个分支学科的研究工作多少都有点像"盲人摸象"。纵使"大象"身体各个部位的形态都被摸准了,合理重组这些"身体部位"的

空间样式依然困难重重,更何况摸准"大象"各个"身体部位"本就不容易。不同规模的地质单元,大者如板块、岩石圈圈层,小者如单个矿体、矿物等,均具有特定物质组成和结构,以及特定的排列组合方式。因而,在地质学研究中始终应该特别注重相关地质过程所形成物质记录的时、空间分布样式及相互关系。可以说,在某一特定区域内,各个时代具有不同物理属性地质体的空间分布、交切关系即是这一区域的地质演化历史。

鉴于此,虽然地质学不同学科的研究对象(目标地质体,或不同地质体的各种物理、化学属性)不同,要想揭示任一地区、任一研究对象的形成、演化历史均需完成三个循序渐进的步骤,缺一不可:①鉴别目标地质体各部分的物理属性、确定形成时代(至少是相对时代);②确定各个时代具有不同物理属性地质体的空间分布样式及其交切关系;③依据"将今论古"原则,基于现有理论模型、综合多学科数据探讨目标地质体形成过程。通过大地构造相分析重塑造山带构造演化历史(Robertson, 1994)是这一思路的具体体现;肇始于20世纪初、成熟于20世纪

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 92055206, 42163007)资助的成果。

收稿日期:2022-04-27;改回日期:2022-05-03;网络发表日期:2022-05-12;责任编辑:蔡志慧。

作者简介:杨天南,男,1966年生。研究员,从事造山带变形、变质与成矿作用研究。E-mail: yangtn@cags.ac.cn。

50 年代的构造解析方法 (Structural analysis method;如 Hobbs et al.,1976)更是这一"三步骤研究程序"的典型代表。

从 2009 年至今,我们持续在西南三江造山带开 展区域地质填图、遵循前人建立的构造解析方法开 展详细构造解析,在区域构造演化方面取得了诸多 进展(Yang Tiannan et al., 2012, 2014, 2021; Liao Cheng et al., 2020; Liang Mingjun et al., 2022) 我们在长期研究实践中发现,从地质学研究范式角 度看,引发三江造山带构造演化争议的主要原因有 三个:① 研究程序不完整,主要表现为上述"三步骤 研究程序"第二阶段缺失或不完善,如部分研究基于 单个观察点、或有限几个观察点的地球化学分析数 据讨论大范围区域构造演化;② 部分关键地质体形 成时代(包括相对时代)解释错误;③ 部分关键目标 地质体物理属性鉴别错误(大部分由于未遵循"将今 论古"原则所致)。这些问题在国内、外造山带研究 中普遍存在,为地质学理论创新留下了很大空间。 为此,本文将从"构造解析方法"入手,探讨与地质学 研究范式相关的一些问题,以三江造山带为例,分析 若干构造演化方面产生争议的原因,以期引发同行 们更深入的讨论。此外,区域地质填图在完善地质 学研究范式方面具有无可替代的作用,本文还将根 据我们多年填图实践,简要讨论区域地质填图与地 质学理论创新之间的关系。

1 构造解析方法与地质学研究范式

地壳变形是造山作用的重要表现形式之一。 "地质构造"(下文简称"构造")专指自然界由变形造 成的岩石、矿物或矿物晶格重新排列显示的几何形 态 ("A geologic structure is a geometric configuration of rocks; structural geology only deals with structures created during rock deformation"; Fossen, 2010), 是特定时间段内岩 石或矿物形态发生持续改变(递进变形, Progressive deformation)、并逐步累积(有限应变, Finite strain) 的几何效应。岩石或矿物发生变形是相对于其内部 质点的初始排列方式(原生构造)而言的。因而,能 否鉴别地质构造还取决于我们是否足够了解各类岩 石中的初始(原生)构造("Being able to recognize tectonic deformation depends on our knowledge of primary structures"; Fossen, 2010)。比如,西南三 江造山带内上三叠统三合洞组灰岩中的部分同沉积 阶段形成的垮塌褶皱常被错误地解释成区域构造变 形形成的倒转褶皱。

通过构造地质学研究揭示地壳变形的时、空分 布样式(不同构造幕的应变场, strain field),结合岩 石学、地球化学、地球物理等多学科数据重建造山带 构造演化历史,是造山带研究的基本法则。肇始于 20世纪初、成熟于20世纪50年代的构造解析方法 (Structural analysis method; 如 Hobbs et al., 1976)到目前依然是揭示古老造山带构造变形历史 的唯一有效手段。其基本程序为:通过野外区域地 质调查,观察、测量各类构造及构造组合的几何形 态、空间展布样式;描述岩石变形过程、构建变形历 史;结合岩石学、年代学、地球化学、地球物理数据, 建立地壳变形与造山过程的动力学关联。按此程序 开展研究已经构建了诸多造山带地壳变形的经典模 型,如阿尔卑斯(如 Schmid, 2004)、阿巴拉契亚山 脉(如 Hibbard, 2004),极大加深了对告山带构告 演化的认识。

构造解析包括循序渐进的三个步骤:描述性 (Descriptive analysis)分析(即文献中常见的"几何学分析,Geometrical analysis";Fossen, 2010)、运动学分析(Kinematic analysis)、动力学分析(Dynamic analysis; Davis et al.,2012)。

1.1 描述性分析

描述性分析主要在野外完成,目的是鉴别各类构造及其组成要素(包括物理实体要素、几何要素),分辨构造与原生构造,测量、统计构造要素的产状,形成构造地质学数据体系(Structural data-set);通过编制平面、剖面图对构造数据开展综合分析、完成构造归并、分组,展现构造的三维几何形态(Hobbs et al.,1976; Ragan, 2009; Fossen, 2010; Davis et al.,2012)。长期积累的地表地质调查数据、变形模拟实验数据、地球物理深部探测数据、以及钻孔数据比较全面地揭示了自然界存在的构造类型、几何样式、内部组成要素及组合方式,并形成了相当完整的分类体系(如 Ramsay, 1967; Hobbs et al.,1976; Ramsay et al.,1983, 1987; Passchier et al.,2005; Trouw et al.,2010),为描述性分析奠定了坚实的理论基础。

1.2 运动学分析

运动学分析的本质是推断单一构造或构造组合内不同部位岩石/矿物(质点)之间的错动(相对迁移)方向以及距离。虽然前人已经建立了大部分经详细描述、系统分类的构造或构造组合的运动学标志(Ramsay, 1967; Hobbs et al., 1976; Ramsay et

al., 1983, 1987; Passchier et al., 2005), 但"运动学 分析"这一概念的存在本身就暗示并不是所有构造 的运动学解释都是一目了然、独一无二的。因而,我 们更趋向于将"运动学分析"归入"科学解释 (Interpretations)"而非"科学数据(Data or observations)"的范畴。在西方学术界,"科学解释" 也称为"Educated guesses",亦即基于现有知识体 系的合理推测。与描述性分析相比,运动学分析更 依赖于对构造变形理论的深刻理解。虽然科学研究 要求严格区分"观察"与"解释",但在野外地质调查 全过程中,"解释"几乎无处不在,两者具有同等的重 要性 ("Good scientific work requires that one separates observations from interpretations, which equally holds for geologic mapping"; van der Pluijm et al.,2004)。好在部分经过长期重复验证的"地质 解释"已经成为不需要讨论的"定律"(如地层初始水 平律、地层叠置律等;构造领域的 B 型褶皱成因,逆 冲断层的弓箭法则,皱褶-逆断层组合的运动学特点 等);少部分难以决断的"解释"则遵循 KISS(Keep it simple, stupid!)法则(该法则也称奥卡姆的剃 刀;Occam's Razor)。

1.3 动力学分析

动力学分析关注构造变形的物理学机理 (Means, 1976),包含两个层面。

动力学分析的第一个层面考虑单一构造或构造 组合的成因以及造成这些构造或构造组合的局部应 力状态,试图运用力学原理,从应力(Stress)与应变 (Strain)的协变关系(流变学本构方程)角度解释各 类构造的力学(Mechanic)成因。基于构造的定义, 这里的应力专指构造应力(Tectonic stress, 关于岩 石圈中的应力与构造应力的差别参见 Fossen, 2010)。前人已经构建了大部分构造、或构造组合与 应力张量(Stress tensors)之间的动力学关系,如 Anderson(1951)划分的构造应力类型;库仑准则 (Coulomb, 1773; Mohr, 1900);最大有效力矩准 则(Zheng Yadong et al., 2004)等。将特定区域内 不同位置的所有同一阶段形成的构造所展现的应力 张量标注于平面地质图中,则形成区域应力场(也称 应力张量场;万天丰,1988)。揭示造山带内几个关 键位置、不同阶段的应力场就有可能展现整个造山 带的构造应力状态的时、空变化,从而为重塑造山带 演化历史奠定基础。

动力学分析的第二个层面探究引发造山带地壳 变形的应力来源。造山带构造变形的实质是地质单 元内部不同部位或不同地质单元之间运动状态的改变。从造山带动力学、乃至整个地球动力学(Geodynamics)角度,我们实际上更关注的是力(Force)与地质体运动状态改变之间的联系、力的属性与不同构造之间的对应关系、以及力的来源。比如,近水平挤压(压力,Push)作用将引发部分地质体加速运动(逆冲作用),被加速的地质体受前方地质体阻碍则造成地质体缩短弯曲(B型褶皱作用),从而形成褶皱-逆冲断层组合;被加速运动的地质体受其下方地质体的阻碍作用则在下方地质体内形成牵引构造。张力(Pull)作用将形成张性裂隙,乃至于裂谷等大型构造。

当我们分析某一特定区域内应力与构造之间的 动力学关联时,通过详实的描述性构造分析、运动学 分析建立的构造地质学数据体系大致可以取得相当 可靠的结论。但仅仅根据构造地质学数据体系来探 究造山带动力学演化过程,即引发地质体运动状态 改变的力的来源,则远远不够。实际上,岩石圈热状 态的改变、地形-地貌的变化均可能造成岩石圈应力 状态的改变。比如,大陆碰撞作用造成的山体隆升 形成的重力势差就可以引发山体周缘大范围地壳缩 短(如中新世之后的青藏高原; Clark et al., 2000); 大部分裂谷的成因与地幔柱活动相关(Zieglera et al.,2004)。因而,探讨造山带规模构造演化相关的 力的来源,需要综合盆地分析、地层学、地质年代学、 地球化学、地球物理等地质学各学科资料(van der Pluijm et al.,2004)。而从全球尺度看,板块运动的 驱动力到现在为止依然是板块构造理论的盲点之一 (Kearey et al. ,2009).

1.4 构造解析方法体现的普适性地质学研究范式

从上述简要介绍可以看出,除了保证观察、测量的客观、准确之外,构造解析方法还体现如下几个基本原则:

(1)强调数据体系的完整性:构造地质学中的三个基本概念,"构造样式"(Structural style)、"构造组合"(Structural association; Hobbs et al.,1976)、"构造层次"(Structural level; Mattauer, 1984)体现了构造地质学研究对数据完整性的基本要求。鉴别任一构造样式(类型)不单需要根据其几何形态数据,还需次级构造类型与组合方式、各类构造要素的产状数据,典型者如 Coe et al. (2010)推荐给野外地质学工作者的褶皱分类方案。"构造组合"指形成于同一构造幕、密切共生的多个构造样式的顺序排列。因而,确定一个构造组合除了鉴别该组合内各种构

造类型之外,还需确定不同类型构造之间具有应变兼容性、(成因上的)力学合理性。而不同构造层次则是在地壳不同深度(温度、压力条件)、岩石以特定主导性变形机制形成的一系列构造组合的综合体现。显然,探讨构造层次除了构造数据外,还需要能够限定变形温-压条件(主导性变形体制)的数据。

- (2)强调数据的时、空变化规律:构造由力作用于岩石而形成。力是矢量,由大小与方向共同定义。任一变形幕形成的各类构造或构造组合均呈现特定的空间排列顺序。在构造解析的几何学、运动学分析阶段,唯有对同一幕次的构造、构造组合的空间分布样式(Pattern)具有充分了解,才能得到合理解释。此外,强调构造数据的时、空分布样式实际上也体现了构造解析对数据完整性的高要求。
- (3)强调研究过程的循序渐进:前已述及,完整的构造解析由循序渐进的三个步骤组成,第一阶段的几何学分析形成构造地质学基础数据体系;以几何学数据为基础开展第二阶段的运动学分析;最后的动力学分析是前面两个阶段的综合分析。
- (4)强调"将今论古"原则:构造解析的不同阶段大都需要利用力学实验、活动构造研究揭示的基本原理来解释各类构造。比如,描述性分析所用的构造样式的划分、构造要素的描述有大量的模拟实验(如 Riedel 的泥饼剪切实验,转引自 Davis et al.,2012)、理论计算依据(Biot,1959; Biot et al.,1961)。开展运动学、动力学分析必须充分遵循"将今论古"原则。
- (5)强调"数据综合"分析:与地质学其他分支学科数据(如地球化学数据)一样,单一构造存在多解性(俗称"小构造吵吵闹闹")。完整的构造解析数据可以极大地降低区域构造的多解性;综合考虑其他地质学分支学科数据,则可将多解性降低到足可接受的程度。在运用构造解析结果探讨造山带构造演化过程中,造山带盆地分析数据的重要作用已得到众多研究实例的证实(如闫臻等,2008)。

与岩石变形形成的构造一样,根据热力学第二定律,其他地质作用过程也是导致体系熵(Entropy)增加的(关于对热力学相关变量深入浅出的讨论,参考 Anderson, 2005)、自动发生的、单向的动力学过程,其形成的地质记录同样存在特定的时、空排列顺序。比如两个相邻矿物之间发生反应,将形成由化学势差控制的、按一定方向顺序排列、由不同矿物组成的若干条带所展现的后成合晶冠状体结构

(Symplectite corona;例如 Yang Tiannan et al., 2004);变质相带、矿体矿物组合分带、岩浆岩地球化学异常分带等的顺序排列也是地质体有序排列的典型例子。因而,构造解析方法展现的上述原则适用于绝大部分地质学各个分支学科。违反这些原则可能是造成诸多地质学争议的主要原因。与西南三江造山带新生代构造演化相关的若干学术争议颇具典型意义。

2 西南三江造山带区域地质填图与构造解析实践

2.1 印度-欧亚大陆侧向碰撞带及关键科学问题

从白垩纪开始至今,印度大陆向 NNE14°方向 持续迁移,在约50 Ma、25 Ma 时出现两次迁移速率 骤降(Molnar et al., 1988; Copley et al., 2010; van Hinsbergen et al., 2011)。从晚白垩世一古近纪开 始,印度大陆挤入欧亚大陆内部达 2000 km(Molnar et al., 1975; Mattauer et al., 1999), 在印度大陆北 缘以北形成正向碰撞带、印度大陆东缘以东形成侧 向(斜向)碰撞带。高度耦合的地表地质数据与深部 地球物理数据显示,正向碰撞带遭受持续不断的近 南北向挤压,形成以近东西走向压性构造(褶皱-逆 断层组合、小型周缘前陆盆地)为主(Kapp et al., 2005, 2007)、以局部张性、走滑构造为辅的总体构 造格局。而侧向碰撞带的构造演化相对复杂,目前 尚存较大争议,这些争议综合体现为如下两点:① 地球物理数据展示的岩石圈深部结构与地表地质研 究揭示的构造格架不吻合;② 大部分地表地质研究 结果没有反映侧向碰撞带逐步向北生长的历史进程 (详细评述见 Yang Tiannan et al., 2021)。

西南三江造山带位于侧向碰撞带北段。从2009年开始,我们完成了五条横穿三江造山带的徒步路线地质调查,两幅1:5万、两幅1:2.5万区域地质填图、以及系统性的年代学、岩石地球化学分析测试。通过这些工作,我们重塑了三江造山带新生代构造格架(Yang Tiannan et al.,2021),初步解决了地质、地球物理数据不耦合的问题;较完整揭示了侧向碰撞带的变形历史,探讨了侧向碰撞带向北逐渐生长的过程(Yang Tiannan et al.,2021; Liang Mingjuan et al.,2022)。在长期学习、研究过程中,我们发现了若干与研究范式相关的问题,很可能正是这些问题引发了相关学术争议。下文将针对部分问题展开初步讨论,以供国内、外同行批评指正。

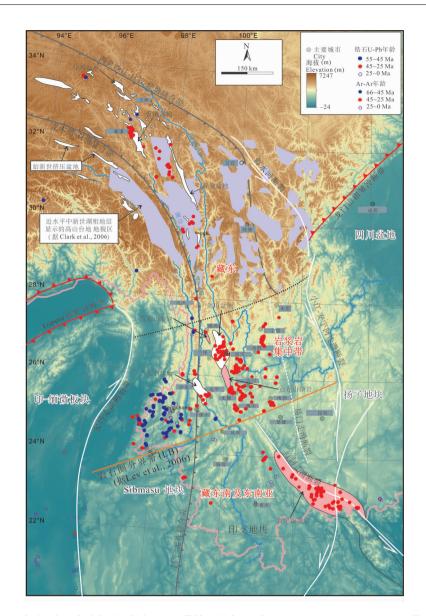


图 1 印度-欧亚大陆侧向(斜向)碰撞带构造格架图(据 Yang Tiannan et al., 2021 修改)

Fig. 1 Cenozoic tectonic framework of the oblique collision belt (modified after Yang Tiannan et al., 2021)

2.2 数据体系的完整性:新生代岩浆岩时、空分布与侧向碰撞带构造格架

假定印度-欧亚大陆碰撞始于 60 Ma (Hu Xiumian et al.,2016),晚于 60 Ma 的岩浆岩广布于印度-欧亚大陆碰撞造山带的不同部位,但空间分布极不均匀。由于受地块逃逸模型(Tapponnier et al.,1982)的深刻影响,学界普遍认为侧向碰撞带内的新生代岩浆岩的形成与大型走滑构造密切相关(如 Chung Sunlin et al.,2005),并以此为出发点探讨了多种成岩模型,产生了诸多争议。

得益于近年来科研支持力度的大幅提高,西南 三江造山带内业已发现的几乎所有新生代岩体、火 山岩均完成了年代学研究,部分岩体甚至被研究了 多次,发表了数据基本相同,但成岩模型迥异的论文。这一研究状况表明,将现有新生代年代学数据按其样品位置标注于任一地理底图上就可以清晰显示其时、空分布样式。基于这一想法,我们尝试完成了上文提及的地质学研究程序第二个步骤的工作,收集了近年发表于国内外文献中的新生代岩浆岩年代学数据,并将其标注于地理底图上(图1)。从这一"区域填图"结果(Yang Tiannan et al.,2021)可以发现:①超过50%的年代学样品点位于北北东走向,长约450 km、宽约250 km的一个带状区域内,我们称其为新生代岩浆岩集中带;②年龄大于40 Ma的样品主要位于这一岩浆岩集中带的西段,而东段的岩浆岩年龄大多为35 Ma左右;③该岩浆岩

集中带的南界与著名的藏东南岩石圈地球物理分界 线相重合(这条界线分隔具有不同地震波各向异性 的岩石圈; Lev et al., 2006; Sol et al., 2007), 而北 界大致与龙门山断裂带的西南方向延伸线一致。该 岩浆岩带南界与龙门山断裂带不完全相连。根据 GPS 数据指示的上地壳物质迁移速度场(Zhang Peizhen et al., 2004), 以及基于 GPS 数据进行的上 地壳变形分析(Liang Shiming et al., 2013),我们推 测,这可能与始于中新世且持续至今的上地壳蠕变 有关。这一时、空分布样式清晰表明,新生代岩浆活 动与"NNW 向大型走滑构造"没有任何动力学关 联;甚至可以推测,根本不存在"NNW 向大型走滑 构造"。如果侧向碰撞带深部存在隧道流,其流动方 向也应该是 NEE 而非 NNW 方向。事实上,侧向碰 撞带内岩石圈不同深度的地球物理异常带的走向为 NEE-SWW、SEE-NWW、或 E-W(如岩石圈力 学属性的各向异性, Chen et al., 2014; 地震波速异 常带, Li et al., 2008; Wei et al., 2013, 2016; Wu et al.,2019)而非 NNW 向。

新生代岩浆岩集中带的南、北界线还代表了具 有不同构造属性新生代盆地的分界线。Wu Zhenhan et al. (2008)提出的中新世超级大湖盆沉 积岩仅分布在岩浆岩集中带北界以北地区,这些沉 积层目前依然表现为近水平地貌,保留于藏东高山 之巅(图 1; Clark et al., 2006; Whipple et al., 2018),表明高原腹地从中新世开始基本没有再记录 地壳缩短,近水平南北向挤压力与重力势差已达到 了平衡。而岩浆岩集中带内的中新世盆地则显示为 典型的小型挤压盆地(Clark et al., 2006)。我们多 年的野外调查、分析测试并没有在新生代岩浆岩集 中带以南发现始新世挤压盆地,侧向碰撞带内最南 侧的始新世挤压盆地是剑川盆地(Liao Cheng et al.,2020)。目前看来,新生代岩浆岩集中带的南界 代表了始新世具有不同构造属性地质体的分界线。 因而,新生代岩浆岩集中带将侧向碰撞带划分成三 个次级构造单元,其北为藏东,记录了与高原主体大 致相同的新生代地质历史;其南为藏东南,受印度-欧亚大陆碰撞作用影响程度较低;而两者之间为以 新生代岩浆岩集中带为主体的岩石圈过渡带。这一 新生代构造格局的形成反映了侧向碰撞带向北逐渐 生长的过程(Yang Tiannan et al., 2021)。这一新 的构造单元划分方案与地球物理探测揭示的岩石圈 深部结构的空间变化相吻合。

从上述研究实例可以看出,确定目标地质体的

时、空分布样式是划分构造单元、揭示目标地质体成因的基础。根据单个侵入体、或某一较小区域内多个侵入体的年代学、地球化学数据构建整个造山带的构造演化模型(如古板块俯冲极性),由此必将衍生出无法调和的学术争议(俗话说的"大构造胡说八道")。

2.3 研究程序的循序渐进:地层时代的误植与有效 的构造解析

褶皱与断层是造山带中最常见的两种构造类型。但在三江造山带构造地质学研究实践中,褶皱构造基本被忽视,而断层构造则被明显规模扩大化、研究简单化,具体表现为若干"深大断裂"的提出。仔细阅读现有西南三江造山带 1:20 万地质图及地质报告(笔者认为其目前依然是该造山带最好的基础地质填图成果),可以发现,地质图图面布满断层,将地质体切割成规模不等、形态各异的团块或条带,而地质图及相应地质报告几乎没有着墨于褶皱构造。这不是造山带的常见情况。可以预见,以这些地质图为基础构建的构造演化模型不可能与实际相符合。

我们完成了两幅1:5万区域地质调查,编制了 80 km×20 km 范围、横穿兰坪盆地的廊带地质图 (Liang Mingjuan et al., 2022),发现造成断层泛滥、 褶皱缺失的主要原因在于部分地层(相对)时代解释 错误(时代误植)。通过区域地质调查、辅以大量年 代学测试,我们重建了兰坪盆地地层柱状图(图 2; 兰坪盆地的新定义参考:梁明娟,2016)。对兰坪盆 地构造解析结果影响最大的地层时代误植是原侏罗 纪。在兰坪盆地的不同部位,多个时代的地层被解 释成了侏罗系,由此消弭了本该存在的褶皱构造、凭 空解释出了很多断层;相邻地质图内的部分断层被 有意相连,从而人为制造出若干区域性深大断裂(典 型者如"澜沧江深大断裂"、"兰坪盆地中轴断裂";具 体见下文)。这些"深大断裂"还被用于解释成矿物 质来源、成矿物质迁移通道等,进而误导了矿床学研 究及成矿预测。下面试举两个构造解析实例,两者 一起可以清晰揭示斜向碰撞带的构造样式及地壳变 形历史。

2.3.1 始新世永平盆地的发现及侧向碰撞带中新 世构造变形

通过沿澜沧江两岸详细路线地质调查,辅以锆石年代学研究,我们发现云南永平县城西约 30 km的永保桥地区发育一套始新世浊积岩,出露厚度超过 2000 m(未见顶),东侧不整合覆盖在白垩系红层

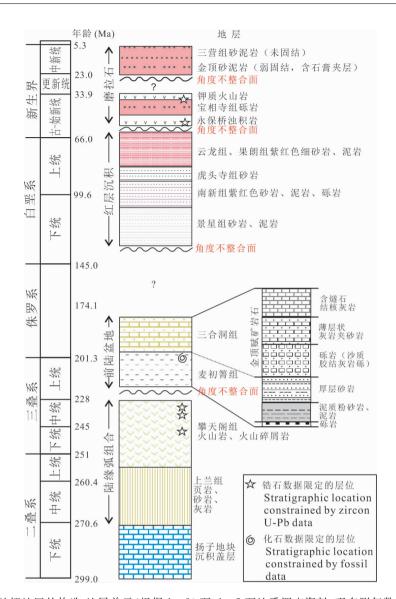


图 2 兰坪地区的构造-地层单元(根据 1:20 万、1:5 万地质调查资料、现有测年数据编制)

Fig. 2 Tectonostratigraphic units of the Lanping area

(compiled based on 1:200000 and 1:50000 geological survey data and available geochronological data)

(景星组、南新组、虎头寺组、云龙组、果朗组)之上,我们称其为永平盆地(具体数据参阅 Yang Tiannan et al.,2021)。其中火山碎屑岩夹层锆石测年结果显示,盆地充填物下段沉积时代在 48~40 Ma 左右。依据细致的野外构造要素观察、测量,平面、剖面图测制,以及几何学、动力学分析,我们构建了如图 3 所示的三维构造几何模型。从图中可以看出,长约 10 km 的剖面范围可以划分为 4 个具有不同构造样式的构造域。D-1、D-4 构造域显示典型的、略有区别的穹-盆构造样式;D-2 构造域地层单斜,零散发育窗帘式褶皱(Curtain folds),地层倾向、倾角沿走向变化显示少量倾竖式穹-盆构造;D-3 构造域由两个大型倒转褶皱、大量小型不对称褶皱及小

型逆断层、S型花岗质糜棱岩组成复杂构造组合。详细的显微构造观察发现,S型糜棱岩的应变主要集中在石英条带中,大量长石以及少量石榴子石、电气石均没有记录明显变形。这一显微结构特点,结合面理产状,表明糜棱岩化作用发生在岩体侵位期间或侵位后尚未冷却阶段。锆石测年结果显示,糜棱岩化花岗岩结晶时间在23~18 Ma,而斑点状片岩(角岩)、斑点状片麻岩(高级角岩)白云母⁴⁰ Ar/³⁹ Ar坪年龄为16 Ma(Yang Tiannan et al.,2021)。这些数据表明,上述四个构造域内不同构造样式均形成于23~16 Ma 期间;印度-欧亚大陆侧向碰撞引发的近东西向挤压是永平盆地变形的原因。

基于构造层次观念(在20世纪中后期表现为

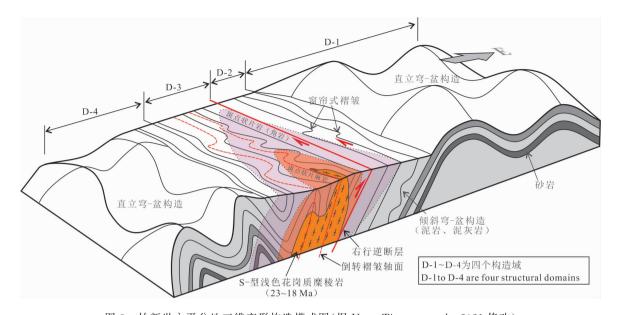


图 3 始新世永平盆地三维变形构造模式图(据 Yang Tiannan et al.,2021 修改)
Fig. 3 Cartoon showing the 3D structural geometry of the Eocene Yongping basin, SE Tibet
(modified after Yang Tiannan et al.,2021)

"变质程度与地质体时代正相关"这一固定论观念)以及当时测年手段的匮乏,在1:20地质图中,D-3构造域内发生强烈变质、变形的岩石被划归前寒武界上部或下古生界崇山群,D-1、D-4构造域内的浅色砂岩被划归白垩系景星组,D-2构造域内的页岩、泥灰岩被划归侏罗系花开佐组。其间的接触关系只能用大型断层予以解释。这就是"澜沧江深大断裂"的由来。

D-3 构造域显示的构造样式被称为(倒转)褶皱式穹隆构造,在实皆断裂附近的侧向碰撞带内十分常见(Bertrand et al.,2003),很可能是侧向碰撞带压扭性构造应力与同变形花岗岩侵位共同作用的产物(Yang Tiannan et al.,2021)。目前普遍认为,实皆断裂代表了印度大陆与欧亚大陆的分界线(Mattauer et al.,1999)。

2.3.2 兰坪地区白垩系红层的变形期次与构造样式

通过1:5万区域填图(图4)及细致的构造解析,我们在兰坪地区鉴别出两期构造变形(构造数据体系及讨论见 Liang Mingjuan et al.,2022)。

早期变形记录在白垩系景星组、南新组、虎头寺组、云龙组、果朗组中,主要表现为大型开阔褶皱,局部发育倒转穹隆构造与逆断层组合。褶皱轴迹、逆断层断面走向近南北。有意思的是这两种构造组合样式的空间分布关系表现为斜列的"倒转穹隆-逆断层对"零星分布于"开阔褶皱"组成的区域背景中(图

5)。这种构造样式及构造样式的组合尚未见有文献报道,我们将其解释成经典"倒转褶皱-逆冲断层"组合的初始形态,表明在大陆碰撞的早期阶段,相比于正向碰撞带,位于侧向碰撞带内的兰坪地区经历了较小规模的地壳缩短。这期构造被始新统宝相寺组砾岩角度不整合覆盖,表明变形发生在白垩纪之后、始新世之前。

晚期变形构造主要表现为近南北向逆断层十近东西向掀斜走滑断层的组合(图 4; Thrust-and-tear fault association; 见 Davis et al., 2012), 其变形时代与中新统金顶砂泥岩沉积同时(关于非正式地层单位"中新统金顶砂泥岩"见下节内容), 始于中新世早期, 很可能持续到现今。需要特别指出的是, 这些逆断层的规模都不大, 但数量众多, 弥散状发育于整个兰坪盆地及其周缘地质体中, 显示了相当均匀的地壳缩短。

上述两期构造变形数据,结合新生代盆地数据、岩浆岩年代学、地球化学数据、以及包括古地磁在内的地球物理数据,可以合理重建印度-欧亚大陆的碰撞过程(具体见 Yang Tiannan et al.,2021; Liang Mingjuan et al.,2022)。显而易见,通过区域地质调查确定地层时代(至少是相对时代)、地层序列是开展有效构造解析的基础。

2.4 "将今论古"原则、地质体物理属性解释的合理 性与金顶锌铅矿矿区地质

金顶超大型锌铅矿床是东亚地区目前正在开采

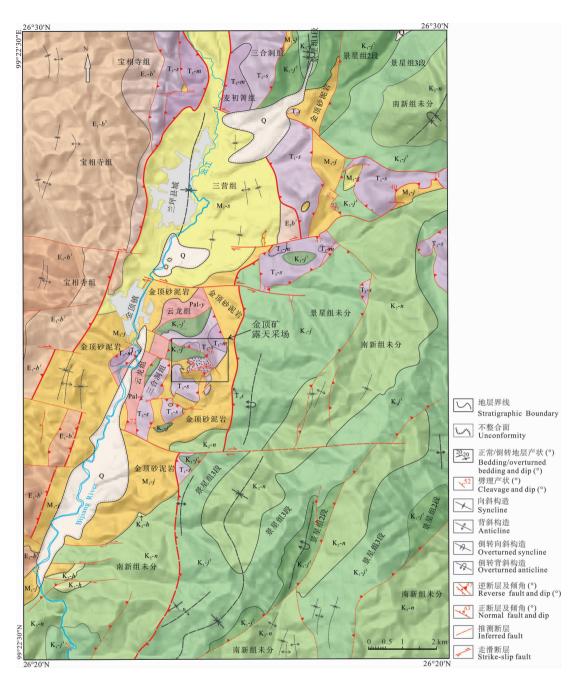
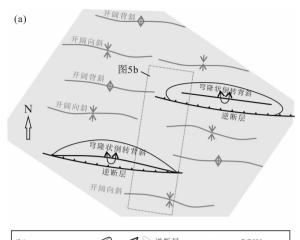


图 4 以金顶铅锌矿为核心的兰坪地区地质图(据 Liang Mingjuan et al.,2022 修改。金顶超大型矿床位于测区中部)
Fig. 4 Geological map of the Lanping area (modified after Liang Mingjuan et al.,2022; the supergiant Jinding
Zn-Pb deposit is located in the center of the map)

的最大 MVT 锌铅矿床,广受国内外矿床学界关注。由于矿区地层时代误植、以及部分沉积岩属性被不合理解释(Kyle et al.,2002; Leach et al.,2017),致使其控矿构造一直存在争议,进而限制了对成矿过程的合理理解。金顶矿区发生时代误植并严重影响了构造解析的地层单位主要有两个:一套具有特殊沉积结构的上三叠统浅海相角砾岩以及中新统金顶含石膏层砂泥岩(我们新建的非正式填图单位);有趣的是,这两者均被不合理地解释成了古近系云

龙组。

根据对云龙县城附近标准剖面的观察,以及1:20万地质报告的详细描述(云南省区域地质调查队,1979),云龙组由"棕红色钙质泥岩、粉砂岩,间夹同色细砂岩组成,(单)层厚小于1 m","普遍发育条纹状水平纹层","底部见棕红色无分选泥砾岩,砾石外形不规则,其间见少量鳞片状镜铁矿及石膏"。这套地层形成于典型的陆相湖泊环境。野外调查还发现,云龙组(及果朗组,两者在野外很难区分)泥



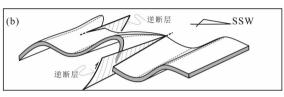


图 5 斜列式短轴穹状倒转背斜十逆断层组合与开阔褶皱空间关系模式的平面图(a)和三维立体图(b) (据 Liang Mingjuan et al.,2022 修改)(注意:构造线走向已恢复到形成时的初始状态,根据现有古地磁数据(如杨向东等,2020),在45~25 Ma期间,岩石圈过渡带顺时针旋转了约90°)

Fig. 5 Cartoons showing the plane (a) and 3D (b) geometries of the structural association consisting of en échelon aligned overturned dome-and-thrust pairs within a background of open folding (modified after Liang Mingjuan et al., 2022) (notification; the strikes of

the structural lines are the primary ones, which were clockwise rotated for about 90° during 45~25 Ma according to the paleomagnetic data of Yang Xiangdong et al., 2020)

岩、粉砂岩层面上广泛发育波痕、泥裂、雨痕、虫迹等暴露环境沉积的典型标志。从云龙组的分布区域看,其代表的湖盆规模还不小(目前尚未见详细的区域沉积相分析相关报道)。对比现代湖相沉积作用地质记录(见 Leeder, 2011),形成于这种大型湖泊环境里的细砂岩、泥岩发生急剧相变的可能性很小。实际上,金顶矿区广泛存在与标准剖面完全一致的云龙组(图 4)。

金顶锌铅矿的主要赋矿围岩为一套厚层、块状砾岩、石英砂岩以及中、薄层状砂屑灰岩组合;这套组合之上为弱固结砖红色砾岩、砂岩、泥岩组合,砾岩与砂岩之间常见盐丘化石膏夹层(图 6)。赋矿围岩中的砾岩以及赋矿围岩之上的弱固结含石膏岩石以往均被解释成云龙组;石英砂岩被解释成白垩系景星组,而灰岩则被划归上三叠统三合洞组。这些

"不同时代的岩块"紧密接触,其间的接触关系只能解释成大型断层构造(即所谓的"沘江大断裂"或"兰坪盆地中轴大断裂")。

通过对位于金顶矿区以东约 10 km 的弥沙-象图路线详细地质调查,我们发现,赋矿围岩中的砾岩位于三合洞组灰岩之下,由石英砂岩夹薄层灰岩组合经不同程度同沉积变形(Syn-sedimentation deformation)而成,发育各类同沉积构造(如滑塌褶皱、小型同沉积正断层、不同程度的同沉积角砾化),形成完整的同沉积构造体系(梁明娟,2016)。我们暂且将这套发生强烈同沉积变形的岩石与中薄层灰岩一起,划归上三叠统三合洞组。其中的灰黑色灰岩、灰岩角砾普遍富含硫化氢(敲击后现臭鸡蛋味)。在此需要特别指出的是,前人用于指示三合洞组已经发生倒转、进而提出大型逆冲推覆构造的倒转褶皱,实际上是局部发育的同沉积滑塌褶皱。

覆盖在赋矿围岩之上的弱固结砖红色含石膏层砾岩(底部)、砂岩、泥岩(顶部),我们将其定义为"金顶砂泥岩",其向上与中新统中晚期三营组渐变过渡。在金顶矿区周围,金顶砂泥岩覆盖在不同地层单位之上。当其覆盖在白垩系红层之上时,底部的砾岩由紫红色砂岩、泥岩鹅卵石组成。而当其覆盖在上三叠统钙质岩石之上时,底部砾岩层则由外形极不规则、大小不一的灰岩、钙质砂岩、砾岩米级巨砾被中沙、粗砂胶结而成;更重要的是,砾岩层的底面极度不平整,局部显示明显的古喀斯特地貌(图6)。因而,金顶砂泥岩开始沉积时,盆地基底极不平整、沉积相变剧烈;出现石膏夹层后,沉积相趋于稳定。目前尚无直接证据指示金顶砂泥岩的确切沉积时代,综合其他区域资料,我们推测金顶砂泥岩从中新世早期开始沉积(Liang Mingjuan et al.,2022)。

上述新认识,结合区域构造解析结果(见上文2.3节)以及前人对成矿时代的新认识(如 Yalikun et al.,2018),我们推测,金顶矿床的控矿构造为始于中新世早期、近东西向地壳缩短形成的逆断层-掀斜走滑断层组合,成矿作用与金顶砂泥岩沉积作用近同时发生。至于石膏的成因、具体成矿过程尚需进一步研究。

显而易见,依据"将今论古"原则合理解释各类 岩石、区分初始构造与变形构造应成为矿区地质研 究的基本原则。

2.5 应变兼容性、地质-地球物理数据的融合:印度-欧亚大陆碰撞过程新模型

前已述及,侧向碰撞带研究中存在的一个重大



图 6 金顶矿区架崖山矿段露天采场照片,显示金顶砂泥岩出露特点

Fig. 6 Field photograph of the open mining pit of the supergiant Jinding Zn-Pb deposit showing the relationship between the lower Miocene Jinding Formation and its basement

科学问题是根据地球物理数据与地质学数据获得的 认识互相不匹配。实际上,地质学不同分支学科数 据之间的匹配程度也不高(如 2.2 节描述的新生代 岩浆岩时空分布,沉积盆地的时空分布,主要构造线 方向)。有趣的是,现有构造地质学数据的内恰性也 存在问题,表现在不同区域间应变兼容性的缺失。

由于地壳岩石组成、结构的不均匀,造山过程中 地壳不均匀变形是常态(应变分解,Strain partition), 任何单一构造幕形成的应变场都是不均匀的,表现 为构造样式的空间变化。甚至均匀介质的塑性变形 也不均匀,常呈现网格状强变形带(糜棱岩带)与透 镜状弱变形域的组合(Ramsay, 1980)。若要保持 变形介质的连续性不被破坏,这些构造样式的组合 必须符合如下要求:任何与两个具有不同应变状态 的地质体接触界面平行的切面上的应变椭圆应该具 有相同的形态,即两个地质体内与其间界面平行方 向的应变张量保持不变。这就是应变兼容(Straincompatibility; Ramsay et al., 1983; Fossen, 2010)。在中、下地壳及更深层次,任一地质体均被其 他地质体围限,缓慢的构造变形几乎不可能破坏介质 连续性。因而,任何中、深层次的构造组合均应符合 应变兼容原则。在浅表层次,不同变形程度(即不同 构造样式)岩石之间往往会出现各种形态、产状的裂 隙,从而协调不兼容的应变(Ramsay et al.,1983)。

GPS 测量展现的青藏高原周缘现代地表变形 (Zhang Peizhen et al.,2004; Liang Shiming et al.,2013)尚且显示很高的大范围应变兼容性,但是,根据现有构造研究数据构建的西南三江造山带始新世一中新世构造样式或模型,则存在明显的应变兼容性缺失。表现在如下两个方面:

(1)大型剪切带不同分段之间的应变兼容性缺 失:最典型者当属著名的更新世(30~25 Ma)红河-哀牢山大型左行走滑剪切带。该剪切带被认为始于 东构造结,往SSE 方向延伸超过 1000 km,进入南 海(Schärer et al., 1990)。所谓的"红河-哀牢山剪 切带"从北往南依次由雪龙山、点苍山、哀牢山、Day Nui Con Voi 四个长轴走向 NNW 的长条状变质杂 岩体组成;其间为未变质沉积岩、火山岩。所有大型 左行走滑的证据均来自这四个杂岩体,而变质杂岩 体之间的沉积岩、火山岩的变形则表现为近东西向 挤压形成的开阔褶皱与逆断层组合(Liao Cheng et al.,2020),与兰坪盆地记录的第二期构造(Liang Mingjuan et al., 2022) 一致,由此展现的应变不兼 容如图 7 所示。前人已经意识到了这一问题,并提 出了七个不同模型(Leloup et al., 1993; Jolivet et al., 2001; Searle, 2006; Anczkiewicz et al., 2007; Zhang Bo et al., 2014; Yan Jiaxin et al, 2021)试图 解决应变兼容性问题。

(2)地块边缘剪切带与地块内部褶皱构造的应变兼容性缺失:除了红河-哀牢山剪切带不同部位应变不兼容外,西南三江造山带各个地块内部的变形与其边界的变形也不兼容。目前学界普遍接受的西南三江造山带始新世-更新世构造格架以若干发育于地块边界的大型走滑剪切带为特点,基本没有考虑地块内部变形,甚至根据地块逃逸模型推测,与大陆碰撞相关的地壳变形集中在地块边界,地块内部变形可忽略。我们通过详细地质填图、构造解析揭示的兰坪盆地内部构造样式及变形历史与盆地两侧边界的大型走滑构造明显无法兼容(图7)。

上述明显的应变兼容性缺失令我们怀疑,兰坪

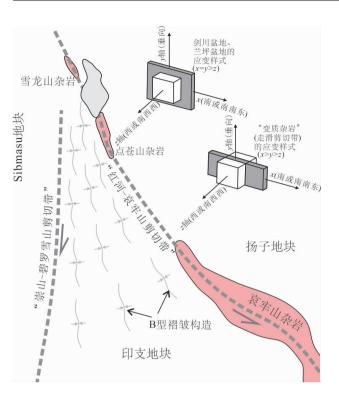


图 7 基于现有认识编制的印支地块边缘"大型走滑剪切带" 不同分段以及地块内部应变样式示意图

Fig. 7 Cartoons showing the difference in strain patterns of different parts of the Indochina block and its boundaries

盆地(或称地块)两侧的大型剪切带是否存在?剪切带内的"糜棱岩"究竟是什么?前述永平始新世盆地横跨位于兰坪盆地西缘的"崇山-碧罗雪山剪切带",其中的花岗质糜棱岩是"褶皱式穹隆"(Bertrand et al.,2003)的核部,并非形成于大规模走滑作用(Yang Tiannan et al.,2021)。至于兰坪盆地东缘的点苍山糜棱岩,我们已经获得了一些有效证据表明其并不是糜棱岩,目前正在完善证据链。

综合新生代岩浆岩,沉积盆地的时空分布样式(图 1),构造解析结果(图 3、4、5),现有地球物理数据(如 Zheng et al.,2020),我们重塑了印度-欧亚大陆碰撞的三阶段模型,较以往模型更好解释了现有地质、地球物理、地球化学数据(图 8;Yang Tiannan et al.,2021; Liang Mingjuan et al.,2022)。

3 地质学发展新阶段的区域地质填图 与地质学理论创新

3.1 造山带(暨地质学)研究现状

西南三江造山带新生代构造演化由印度-欧亚大陆碰撞所引发,并没有遭受后期构造的叠加与改造。如此年轻的造山带的构造演化尚且存在巨大争议,更遑论古老的造山带了。上述西南三江造山带

新生代构造演化的争议表明,探究造山带的地质演 化机理依然任重而道远。

科学(研究)是个动态过程(Science is a dynamic process),不仅仅观察自然,更重要的是综 合观察结果,构建模型(理论)以解释自然;科学通过 获得新数据修正旧模型得以螺旋式进步,形成科学 发展的"数据-模型"环(Data-model loop; Davis et al.,1998)。就地质学而言,创新主要存在于两个方 面:① 新矿物、岩石类型、新构造样式、新观察手段 的发现,这必然产生新模型;② 综合不同分支学科 数据,扩展数据体系,修正旧模型,以更合理地解释 更广泛的地质现象。地质学发展到现阶段,新岩石 类型、新构造样式的发现已经很难(但并非不可能), 发展新的观察手段(新技术)无法预测;而综合现有 多学科数据,构建更合理的新模型则难度小的多。 此外,现代地质学起源干近200年前的西方,我国地 质学会成立于100年前。经过一个多世纪持续向西 方学习、努力追赶,我国地质学界已经掌握了现代地 质学基本概念、基本理论、研究方法,具备了地质学 理论创新的知识储备。

国内、外造山带研究现状、存在问题与西南三江 造山带新生代构造演化研究现状基本一致,大多表现为"大量高质量的多学科数据与诸多充满争议的 模型共存"。这一研究现状综合体现在用板块构造 理论解释造山带地质演化时遇到的极大困难,以及 由此产生的对板块构造学说的疑虑。虽然尚有大量 问题需要解决(吴福元等,2019),板块构造理论依 然是目前最为合理的地质学理论。

3.2 造山带区域地质填图与地质学理论创新

针对任一造山带,可否构建可被地学界(各分支学科)普遍接受的演化模型?综合不同造山带演化模型,能否提炼出一个普适于大陆构造演化的理论模型?试图回答这些问题,可能是现阶段地质学理论创新的一个方向。关键问题是:如何才能提炼被学界普遍接受的造山带演化模型?

前已述及,基于热力学基本原理,所有地质过程产生的地质记录均展现出特定的时、空排列样式。不论是作为一个整体的造山带(如大地构造相分析,Robertson,1994),还是造山带内任一地质单元(如蛇绿岩)莫不如此。对地质作用记录(如岩石、构造)现有认识的修正、发现新的地质作用记录类型,其基础都是揭示相关地质记录的内部组成、各部分的物理属性、及其时空分布样式。而从三江造山带的地质演化的研究实践看,阻碍提出合理构造演化模型

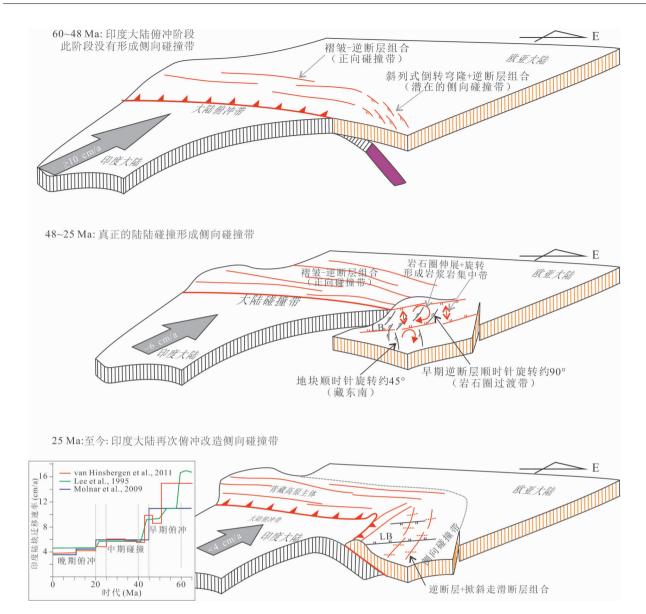


图 8 印度-欧亚大陆三阶段碰撞过程示意图(据 Yang Tiannan et al., 2021; Liang Mingjuan et al., 2022 修改) Fig. 8 Cartoons showing the indenting process of India into Eurasia (modified after Yang Tiannan et al.,

2021; Liang Mingjuan et al., 2022)

本模型很好地解释了左下插图所示印度大陆向北迁移速率的两次骤降、碰撞期岩浆岩空间分布(见图 1)、地壳变形样式的时空变化规律、岩石圈深部地震波结构、以及中新世岩浆岩地球化学特点的突变(如 Guo Zhengfu, 2019)等

This model well explains the twice slowdowns in the migration velocity of the India continent, the spatial distribution of the Cenozoic plutons (see Fig. 1), the spatial variation in crustal deformation, the seismic structures of the lithosphere, and the sudden change in geochemical features of igneous rocks at Early Miocene (i. e., Guo et al., 2019)

的主要障碍在于缺乏对地质体时、空分布样式的详细分析,次要原因是部分关键地质体物理属性被不合理解释。这种状况显然既非三江造山带所独有,更不仅仅存在于我国地质学界。比如,我们注意到最近 20 多年来发表的论述造山带内蛇绿岩成因的文章,大多基于争议不断的"彭罗斯会议"定义(Anonymous, 1972)、根据模型给某些岩石单元赋予其构造(物理)属性,从而将所谓"蛇绿岩套"内不

同岩性单元之间的界线解释为断层。最近几年我们在三江造山带以及伊朗扎格罗斯造山带对若干"典型蛇绿岩"的初步观察表明,造山带中所谓"蛇绿岩套"的岩石组成、内部结构远比文献描述的复杂多样。常见的不合理解释包括:将浅变质石英细砂岩或火山热液成因的燧石解释成硅质岩、简单地将玄武岩中的球形构造解释成枕状构造,而决然不考虑陆相玄武熔岩常发育类似的舌状构造(Lobe

structure; Gill, 2010)。显而易见,造山带演化相关的基础理论创新还有很大的空间。

区域地质填图是揭示地质记录时、空变化规律的有效手段。简单而言,区域地质填图就是客观地将一定区域内的地质要素数据表达在地理底图上,由此展现地质要素的时、空分布样式,及其交切关系。这些数据既包括编图者自己通过区域地质调查获取的数据,也应包括前人获得的数据;既可以是综合地质调查数据,也可以是各个分支学科的专项数据。因而,区域地质填图是重现造山带、以及造山带内任一构造单元所包含地质体物理属性、地质体时、空分布样式的有效手段,是保证造山带演化理论创新的基础。更重要的是,通过"区域地质填图"可以帮助我们发现现有数据体系之间的矛盾(如前文提及的应变兼容性),从而发现关键科学问题。

地质学研究类似于"盲人摸象",各个点上的观察、取样分析如同"盲人触摸大象身体某个点";连续剖面观察或许能帮助我们弄清"大象某个身体部位的形态";唯有通过区域地质填图方能确定各个身体部位的空间排列样式,从而形成比较符合实际的"大象"总体形貌。诚然,区域地质填图不能够保证获得终极结论("真理"从来都不是科学追求的目标,实际上连"事实"都不是,"There are no facts in science"; Davis et al.,1998; White, 2013)。但是,通过区域地质填图至少可以构建更合理的地质体演化模型(这就是地质学理论的创新),从而避免"小构造吵吵闹闹,大构造胡说八道"。

通过洋底区域地质填图发展并完善了板块构造理论,典型实例包括区域性洋底地貌调查发现洋中脊(Macdonald, 1982)及区域性古地磁调查发现洋壳磁异常条带(Mason et al., 1961; Raff et al., 1961; Vine et al., 1963)。作为现代地质学发展与成熟的标志、但已进入历史故纸堆的槽台理论同样是区域地质填图的产物。我们相信,区域地质填图还将在今后的地质学理论创新中起到奠基性的作用。

3.3 造山带区域地质填图的难点与基本原则

从上面的讨论可以看出,造山带填图是地质学研究中最重要的基础性工作之一,也是难度最高的工作之一。从我们在三江造山带的填图实践看,主要难点有二:① 在野外正确鉴别(实际上是合理解释)各类岩石、构造;② 如何把握"观察"(Observation)与"解释"(Educated guess)之间的"度"。第一点很容易理解,第二点则需要多费点笔墨。

正如 Davis et al. (1998)、White (2013)等已经指出的那样,"科学不存在事实"。实际上,我们平时常用的岩石、构造的命名、分类都是地质学家经过长期研究、获得了普遍认可的"解释"。单个岩石、构造尚且如此,由多种岩石、构造组合而成的复杂岩石单元(如各类杂岩或填图单位)、构造单元(如各类"相",包括但不限于沉积相、变质相、大地构造相)则包含更高的"解释"成分。麻烦之处还在于,"解释"是随着科学的发展而逐渐演化的。如何把握"事实",即约定俗成的"解释"是区域地质填图人员时时需要面对的问题。若在填图过程中发现"事实"出现问题,则可能正是创新的开始。

要想克服上述两个困难,填图人员必须"见多识广",通过持续不断地理论学习提高理论素养、通过长期实践强化"理论联系实际"的能力是唯一解决之道(An old motto in geology states that, "A good geologist is an old geologist")。目前,国内区域地质调查学界普遍存在一种幻想,试图寻找针对各种特殊地质演化地区的针对性填图方法(典型者如混杂带填图)。这种做法在地质学发展的初始阶段颇有意义,但在亟需造山带演化理论创新的今天则很可能会起到反作用。须知,所谓的"特殊地质演化"本身就是一种"解释",具有太过强烈"针对性"的区域地质填图只会强化固有的"解释",而不利于地质理论的创新。岩石不言,构造不语,静待慧眼识之。

致谢:在成文期间,与韩宝福教授、刘福来研究员、闫臻研究员进行了建设性的深入讨论,使本文受益匪浅。审稿人的批评意见完善了本文。

References

Anczkiewics R, Viola G, Muntener O, Thirlwall M F, Villa M, Q Nn Q. 2007. Structure and shearing conditions in the day Nui Con Voi massif: implications for the evolution the Red River shear zone in northern Vietnam. Tectonics, 26: 344~346.

Anderson E M. 1951. The Dynamics of Faulting. Edinburgh: Transactions of the Edinburgh Geological Society.

Anderson G. 2005. Thermodynamics of Natural System (2nd Edition). Cambridge: Cambridge University Press.

Anonymous. 1972. Penrose field conference on ophiolites. Geotimes, 17: $24 \sim 25$.

Bertrand G, Rangin C. 2003. Tectonics of the western margin of the Shan plateau (central Myanmar); implication for the India-Indochina oblique convergence since the Oligocene. Journal of Asian Earth Sciences, 21; 1139~1157.

Biot M A. 1959. On the instability of folding deformation of a layered viscoelastic medium under compression. Journal of Applied Mechanics, 26: 393~400.

Biot M A,Odé H, Roever W L. 1961. Experimental verification of the folding of stratified viscoelastic media. Geological Society of America Bulletin, 72: 1621~1630.

Carlson D H, Plummer C C, Hammersley L. 2011. Physical Geology: Earth Revealed (Ninth Edition). New York: The

- McGraw-Hill Companies, Inc.
- Chen Bo, Liu Jianxin, Kaban M K, Sun Ya, Chen Chao, Du Jinsong. 2014. Elastic thickness, mechanical anisotropy and deformation of the southeastern Tibetan Plateau. Tectonophysics, 637: 45~56.
- Chung Sunlin, Chu Meifei, Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Lo Chinghua, Lee Tungyi, Lan Chingying, Li Xianhua, Zhang Qi, Wang Yizhao. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. Earth-Science Reviews, 68: 173~196.
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. Geology, 28(8): 703~706.
- Clark M K, Royden L H, Whipple K X, Burchfiel B C, Zhang X, Tang W. 2006. Use of a regional, relict landscape to measure vertical deformation of the eastern Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research, 111: F03002.
- Coe A L, Argles T W, Rothery D A, Spicer R A. 2010. Geological Field Techniques. Hoboken; Wiley Blackwell.
- Copley A, Avouac J P, Royer J Y. 2010. India-Asia collision and the Cenozoic slowdown of the Indian plate; implications for the forces driving plate motions. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 115; B03410.
- Davis G H, Reynolds S J, Kluth C F. 2012. Structural Geology of Rocks and Regions (Third edition). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Davis W E, DeJesus E X, Baublitz M, Racioppi J V, Rubio B, Schoch R M. 1998. Conceptual Physical Sciences (sixth Edition). New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Fossen H. 2010. Structural Geology. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gill R. 2010. Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide. Hoboken: Wiley-Blackwell.
- Guo Zhengfu, Wilson M. 2019. Late Oligocene-early Miocene transformation of postcollisional magmatism in Tibet. Geology, 47: 776~780.
- Hibbard J P. 2004. The Appalachian Orogen-An essay. In: van der Pluijm B A, Marshak S, eds. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. New York: Norton & Company, Inc., 582~591.
- Hobbs B E, Means W D, Williams P F. 1976. An Outline of Structural Geology. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Hu Xiumian, Garzanti Eduardo, Wang Jiangang, Huang Wentao, An Wei, Webb A. 2016. The timing of India-Asia collision onset-facts, theories, controversies. Earth-Science Review, 160: 264~299.
- Jolivet L, Beyssac O, Goff B, Avigad D, Lepvrier C, Maluski H, Thang T T. 2001. Oligo-Miocene midcrustal subhorizontal shear zone in Indochina. Tectonics, 20: 46~57.
- Kapp P, Yin An, Harrison T K, Ding Lin. 2005. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet. Geological Society of America Bulletin, 117: 865 ~878.
- Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, Heizler M, Ding Lin. 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet. Geological Society of America Bulletin, 119: 917~932.
- Kearey P, Klepeis K A, Vine F J. 2009. Global Tectonics (Third edition). Hoboken: Wiley-Blackwell.
- Kyle J R, Li Ning. 2002. Jinding: a giant Tertiary sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan, China. SEG Newsletter, 50: 8∼16.
- Leach D L, Song Yucai, Hou Zengqian. 2017. The world-class Jinding Zn-Pb deposit: ore formation in an evaporite dome, Lanping basin, Yunnan, China. Mineral Deposits, 52: 281 ~296.
- Leeder M. 2011. Sedimentology and Sedimentary Basins: from Turbulence to Tectonics (Second Edition). Hoboken: Wiley-Blackwell.
- Leloup P H, Harrison T M, Rybson F J, Chen Wenji, Li Qi,

- Tapponnier P, Lacassin R. 1993. Structural, petrological and thermal evolution of a Tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan. Journal of Geophysical Research, 98 (B4): 6715~6743.
- Lev E, Long M D, van der Hilst R D. 2006. Seismic anisotropy in Eastern Tibet from shear wave splitting reveals changes in lithospheric deformation. Earth and Planetary Science Letters, 251: 293~304.
- Li Chang, van der Hilst R D, Toksöz M N. 2006. Constraining P-wave velocity variations in the upper mantle beneath Southeast Asia. Physics of Earth and Planet Interior, 154; 180~195.
- Liang Mingjuan. 2016. Filling the Lanping basin: response to the Neotethyan tectonics in the Sanjiang Orogenic belt). Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liang Mingjuan, Yang Tiannan, Xue Chuandong, Xin Di, Yan Zhen, Liao Cheng, Han Xue, Xie Zhipeng, Xiang Kun. 2022. Complete deformation history of the transition zone between oblique and orthogonal collision belts of the SE Tibetan Plateau; crustal shortening and rotation caused by the indentation of India into Eurasia. Journal of Structural Geology, 156: 104545.
- Liang Shiming, Gan Weijun, Shen Chuanzheng, Xiao Genru, Liu Jing, Chen Weitao, Ding Xiaoguang, Zhou Deming. 2013. Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 118: 5722~5732.
- Liao Cheng, Yang Tiannan, Xue Chuandong, Liang Mingjuan, Xin Di, Xiang Kun, Jiang Lili, Shi Pengliang, Zhu Wenbin, Wan Liangchun, Tang Jing, Yu Jing, Wu Pinglei. 2020. Eocene basins on the SE Tibetan Plateau; markers of minor offset along the Xuelongshan-Diancangshan-Ailaoshan Structural System. Acta Geologica Sinica (English Edition), 94(4); 1020~1041.
- Macdonald K C. 1982. Mid-ocean ridges: fine scale tectonic, volcanic and hydrothermal processes within a plate boundary zone. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 10: 155~190.
- Mason R G, Raff A D. 1961. Magnetic survey off the west coast of North America, 32° N latitude to 42° N latitude. Geological Society of America Bulletin, 72: 1259~1266.
- Mattauer M. 1984. Crustal Deformation. Translation by Sun T, Zhang D A. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Mattauer M, Matte P, Olivet J L. 1999. A 3D model of the India-Asia collision at plate scale. Geodynamics, 328: 499~508.
- Means W D. 1976. Stress and Strain: Basic Concepts of Continuum Mechanics for Geologists. New York: Springer.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia; effects of a continental collision. Science, 189; 419~426.
- Molnar P, Pardo-Casas F, Stock J. 1988. The Cenozoic and late Cretaceous evolution of the Indian Ocean basin; uncertainties in the reconstructed positions of the Indian, African, and Antarctic plates. Basin Research, 1: 23~40.
- Passchier C W, Trouw R A J. 2005. Microtectonics. New York: Springer.
- Raff A D, Mason R G. 1961. Magnetic survey off the west coast of North America, 40° N latitude to 52° N latitude. Geological Society of America Bulletin, 72: 1267~1270.
- Ragan D M. 2009. Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques (Fourth edition). Cambridge: Cambridge University Press.
- Ramsay J G. 1967. Folding and Fracturing of Rocks. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Ramsay J G. 1980. Shear zone geometry: a review. Journal of Structural Geology, 2: $83 \sim 99$.
- Ramsay J G, Huber M I. 1983. The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 1: Strain Analysis. London: Academic Press.
- Ramsay J G, Huber M I. 1987. The Techniques of Modern

- Structural Geology. Volume 2: Folds and Fractures. London: Academic Press.
- Regional Geological Survey Team of Yunnan Province (RGSTYM). 1979. Yongping Area Geological Map and Geological Survey Report. Kunming: Bureau of Geology, Mineral Resources of Yunnan Province (in Chinese).
- Robertson A H F. 1994. Role of the tectonic facies concept in orogenic analysis and its application to Tethys in the Eastern Mediterranean region. Earth-Science Reviews, 37, 139~213.
- Schmid S M. 2004. Thetectonic evolution of the European Alps and forelands—an essay. In: van der Pluijm B A, Marshak S, eds. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. New York: Norton & Company, Inc., 510~524.
- Schärer U, Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Zhong D L, Ji S C. 1990. Intraplate tectonics in Asia: a precise age for largescale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China. Earth and Planetary Sciences Letters 97: 65~77.
- Searle M P. 2006. Role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia. Journal of Geological Society, London, 163; 1025~1036.
- Sol S, Meltzer A, Bürgmann R, van der Hilst R D, King R, Chen Z, Koons P O, Lev E, Liu Y P, Zeitler P K, Zhang X, Zhang J, Zurek B. 2007. Geodynamics of the southeastern Tibetan Plateau from seismic anisotropy and geodesy. Geology, 35: 563 ~566.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, Armijo R, Cobbold P R. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. Geology, 10(12): 611 ~616.
- Trouw R A J, Passchier C W, Wiersma D J. 2010. Atlas of Mylonites and Related Microstructures. New York: Springer.
- van der Pluijm B A, Marshak S. 2004. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. New York: Norton & Company, Inc.
- van Hinsbergen D J J, Steinberger B, Doubrovine P V, Gassmöller R. 2011. Acceleration and deceleration of India-Asia convergence since the Cretaceous: roles of mantle plumes and continental collision. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116: B06101.
- Vine F J, Matthews D H. 1963. Magnetic anomalies over oceanic ridges. Nature, 199: 947~949.
- Wan Tianfeng. 1988. Paleo-tectonic Stress Field. Beijing Geological Publishing House (in Chinese).
- Wei Wei, Zhao Dapeng, Xu Jiandong. 2013. P-wave anisotropic tomography in Southeast Tibet: new insight into the lower crustal flow and seismotectonics. Physics of Earth and Planet Interior, 222:47~57.
- Wei Wei, Zhao Dapeng, Xu Jiandong, Zhou Bengang, Shi Yaolin. 2016. Depth variations of P-wave azimuthal anisotropy beneath Mainland China. Scientific Reports, 6: 29614.
- Whipple K X, DiBiase R A, Ouimet W B, Forte A M. 2018. Preservation or piracy: diagnosing low-relief, high-elevation surface formation mechanisms. Geology, 45: 91~94.
- White W M. 2013. Geochemistry. Hoboken: Wily-Blackwell.
- Wu Fuyuan, Wang Jiangang, Liu Chuanzhou, Liu Tong, Zhang Chang, Ji Weiqiang. 2019. Intra-oceanic arc; its formation and evolution. Petrologica Sinica, 35(1): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Wu Tengfei, Zhang Shuangxi, Li Mengkui, Hong Min, Hua Yujin. 2019. Complex deformation within the crust and upper mantle beneath SE Tibet revealed by anisotropic Rayleigh wave tomography. Physics of Earth and Planet Interior, 286: 165~178.
- Wu Zhenhan, Barosh P J, Wu Zhonghai, Hu Daogong, Zhao Xun, Ye Peisheng. 2008. Vast early Miocene lakes of the central Tibetan Plateau. Geological Society of America Bulletin, 120: 1326~1337.
- Yalikun Y, Xue Chunji, Symons D T A. 2018. Paleomagnetic age and tectonic constraints on the genesis of the giant Jinding Zn-

- Pb deposit, Yunnan, China. Mineralium Deposita, $53:245\sim259$.
- Yan Jiaxin, Zhang Tieying, Liu Junlai, Chen Xiaoyu, Chen Wei, Dao Hainam. 2021. Lateral subhorizontal middle to lower crustal flow in response to continental collision: evidence from the Diancang Shan complex along the Ailao Shan-Red River belt, Southeastern Tibetan Plateau. Journal of Structural Geology, 143; 104234.
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Li Jiliang, Yan Quanren, Wang Tao, Chen Juanlu, Xu Xueyi. 2008. Restoring the original tectonic types of sedimentary basins in the orogenic belts. Geological Bulletin of China, 27 (12): 2001 ~ 2013 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tiannan, Xu Zhiqin, Leech M. 2004. Mass balance during retrogression of eclogite-facies minerals in the Rongcheng eclogite, eastern Sulu ultrahigh-pressure terrane, China. American Mineralogist, 89: 1525~1532.
- Yang Tiannan, Hou Zengqian, Wang Y, Zhang Hongrui, Wang Z L. 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic tectonic evolution of northeast Tibet: evidence from the Triassic composite western Jinsha-Garzê-Litang suture. Tectonics, 31: TC4004.
- Yang Tiannan, Ding Yan, Zhang Hongrui, Fan Jinwei, Liang Mingjuan, Wang X H. 2014. Two-phase subduction and subsequent collision defines the Paleotethyan tectonics of the southeastern Tibetan Plateau: evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry, and structural geology of the Sanjiang orogenic belt, southwest China. Geological Society of America Bulletin, 126: 1654~1682.
- Yang Tiannan, Yan Zhen, Xue Chuandong, Xin Di, Dong Mengmeng. 2021. India Indenting Eurasia: a brief review and new data from the Yongping basin on the SE Tibetan Plateau. Geosciences, 11: 518.
- Yang Xiangdong, Tong Yabo, Wang Heng, Pei Junling, Sun Xinxin, Wang Chenxu, Yang Zhenyu. 2020. The contributing factor of differential crustal deformation of the Lanping-Simiao terrane in the southestern edge of the Xizang (Tibetan) Plateau since late Eocene. Geological Review, 66: 853 ~ 871 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bo, Zhang Jinjiang, Liu Jiang, Wang Yang, Yin Cunyuan, Guo Lei, Zhong Dalai, Lai Qinzhou, Yue Yahui. 2014. The Xuelongshan high strain zone: Cenozoic structural evolution and implications for fault linkages and deformation along the Ailao Shan-Red River shear zone. Journal of Structural Geology, 69: 209 ~233.
- Zhang Peizhen, Shen Zhengkang, Wang Min, Gan Weijun, Bürgmann R, Molnar P, Wang Qi, Niu Zhijun, Sun Jianzhong, Wu Jianchun, Sun Hanrong, You Xinzhao. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. Geology, 32: 809~812.
- Zheng Yadong, Wang Tao, Ma Mingbo, Davis Gregory A. 2004. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults. Journal of Structural Geology, 26: 271~285.
- Zheng Tianyu, He Yumei, Ding Lin, Jiang Mingming; Ai Yinshuang, Mon C T, Hou Guangbing, Sein K, Thant M. 2020. Direct structural evidence of Indian continental subduction beneath Myanmar. Nature Communications, 11:1944.
- Zieglera P A, Cloetingh S. 2004. Dynamic processes controlling evolution of rifted basins. Earth-Science Reviews, 64: $1\sim50$.

参考文献

- Mattauer M. 1984. 地壳变形. 孙坦, 张道安译, 北京: 地质出版社
- 梁明娟. 2016. 兰坪盆地充填历史:三江造山带新特提斯构造演化的完整记录.中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 万天丰. 1988. 古构造应力场. 北京: 地质出版社.
- 吴福元,王建刚,刘传周,刘通,张畅,纪伟强. 2019. 大洋岛弧的前世今生. 岩石学报,35(1): $1\sim15$.
- 闫臻,王宗起,李继亮,闫全人,王涛,陈隽璐,徐学义. 2008. 造

山带沉积盆地构造原型恢复.地质通报,27(12):2001~2013. 杨向东,全亚博,王恒,裴军令,孙欣欣,王晨旭,杨振宇.2020. 青藏高原东南缘兰坪-思茅地体晚始新世以来差异性地壳变形 的成因讨论. 地质论评,66(4):853~872. 云南省区域地质调查队. 1979. 永平幅区域地质图及地质调查报告. 昆明:云南省地质矿产局.

Structural analysis, the geological way of knowing, and development of geosciences: the Cenozoic tectonics of the oblique collision belt, SE Tibet

YANG Tiannan*1), XUE Chuandong2)

- 1) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
- 2) Department of Earth Sciences, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China * Corresponding author: yangtn@cags.ac.cn

Abstract

Reconstructing tectonic evolution of any orogenic belts in term of plate tectonics has long been a challenge and a key-point in progress of geological sciences. No commonly widely accepted tectonic model of most orogenic belts including the oblique collision belt between India and Eurasia appeared so far. Such a situation is unusual in that there has already been a tremendous body of high quality geological data for each orogenic belt. We propose two possible reasons for such situation including the absences in detailed analysis of the temporal and spatial distribution of these data and a few misinterpretations of some key geological units. We have conducted detailed geological mapping and structural analysis in the Sanjiang orogenic belt, northern segment of the oblique collisional belt for more than ten years. This has enabled the identification of a new Cenozoic tectonic framework and the complete crustal deformation history of the oblique collisional belt, as well as a new India-Eurasia collision model consisting of three-stages. Our experience in the oblique collisional belt demonstrates that regional geological mapping strictly following the three-steps process as well-exhibited by the structural analysis method likely is the best way to improve our understanding of any orogenic belt. Unfortunately, effective geological mapping is one of the hardest job in our geological society, which requires the mappers are all well-educated and rigorously trained.

Key words: structural analysis; three-steps study process; Sanjiang orogenic belt; progress in geology; regional geological mapping