

www.geojournals.cn/georev

# 走向构造地质学健康发展之路

## ——我国构造地质学有关问题及未来发展方向探讨

童亨茂[1)],侯泉林[2)],陈正乐[3)],柴育成[2)],张进江[4)],刘俊来[5)],侯贵廷[4)],林伟[6)],张波[4)],颜丹平[5)],王根厚[5)],李亚林[5)],陈宣华[8)],张会平[7)],闫全人[2)],刘少峰[5)],张青[3)],吴春明[2)],于福生[1)],陈虹[3)],刘汇川[1)],卫巍[6)],张进[9)],郭谦谦[2)]

1)中国石油大学(北京)地球科学学院,北京,102249;
2)中国科学院大学地球与行星科学学院,北京,101408;
3)中国地质科学院地质力学研究所,北京,100191;
4)北京大学地球与空间科学学院,北京,100871;
5)中国地质大学(北京)地球科学学院,北京,100083;
6)中国科学院地质与地球物理研究所,北京,100191;
7)中国地震局地质研究所,北京,100191;8)中国地质科学院,北京,100037;
9)中国地质科学院地质研究所,北京,100037

**内容提要**:半个多世纪以来,我国构造地质学教学和科学研究均取得了长足发展,但也出现了一些问题。为了促进学科发展,让构造地质学走上健康发展之路,构造地质与地球动力学专业委员会组织召开了"构造地质学有关问题及未来发展方向"研讨会。本文为该研讨会成果的简要总结,内容包括:①构造地质学概念、理论和方法理解和应用中存在的部分问题;②构造地质学教学存在的一些问题及建议;③构造地质学未来发展方向;④走构造地质学健康发展之路。供有关部门和人员参考。

**关键词**:构造地质学;存在问题;发展方向;健康发展之路

20世纪80年代以来,我国构造地质学(指Structural Geology and Tectonics,下同)事业发展迅速,教学和科学研究均取得了长足发展,培养了一批卓有成效的专业人才,取得了一系列成果(论文、著作等)。然而,教学和科研中也出现了一些问题,如:①不同人对同一术语和概念、同一理论和同一方法的认识和理解不尽相同,导致一些认识上的争议和误解;②研究成果和实际应用脱节程度相对严重,对生产实践的指导作用较弱;③引领国际前沿的研究成果总体较少。

为促进学科发展,让构造地质学走上健康发展之路,由构造地质与地球动力学专业委员会发起,中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室承办,中国科学院大学、北京大学、中国地质大学(北京)、中国地质科学院地质力学研究所协办的"构造地质学有关问题及未来发展方向"讨论会,就存在的问题展开了深入讨论,并达成一些共识。供有关科研人员和科研院校参考。

## 1 构造地质学术语、理论和方法理解和应用中存在的问题

由于构造地质学新理论和新方法的不断提出和快速发展、以及槽台学说在我国的影响还比较深远,不同人对同一术语和概念、同一理论和同一方法的认识和理解不尽相同,导致一些认识上的争议和误解,笔者等认为很有必要进行系统的研讨和梳理。需要指出的是,以下认识仅简单指出了存在的问题,并非是对有关概念、理论和方法的详细解剖。

### 1.1 山脉与造山带

目前有不少人对山脉和造山带的理解存在偏差

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41272160,42172258)的成果。
收稿日期:2022-06-09;改回日期:2022-09-10;网络首发:2022-10-20;责任编辑:刘志强。Doi:10.16509/j.georeview.2022.10.031
作者简介:童亨茂,男,1967年生,博士,教授,主要从事盆地构造分析,构造物理模拟实验等方面的研究;Email:tonghm@cup.edu.cn。

和误区,表现为山脉和造山带常有混用(侯泉林,2018;侯泉林等,2021)。

板块构造理论问世前有关造山带的概念缺乏大地构造环境的制约,存在着外延过宽的缺陷(侯泉林,2018)。Şengör(1990)提出了关于造山作用和造山带的新的定义:造山作用(Orogeny)是汇聚板块边缘大地构造作用的总和,造山带(orogen)是汇聚板块边缘大地构造作用形成的带状地质体(Şengör,1990,1992;Stern,2002)。这个定义是目前学术界普遍接受和认可的(侯泉林,2018)。

按此定义,造山带强调的是板块汇聚作用过程,关键是具有汇聚板块边缘复杂的岩石—构造组合(Bird and Dewey, 1970; Ando et al., 1984; Snyder and Barazangi, 1986; Hamblin and Christiansen, 2003; Kummerow et al., 2004; Rebesco et al., 2004; Lüschen et al., 2006; Kashubin et al., 2006; Acton et al., 2011; Zhao Wenjin et al., 2011; Deville et al., 2015; Xu Qiang et al., 2015; Paul and Mitra, 2017; Singh et al., 2017, 2021; Teixell et al., 2018; Chevrot et al., 2018; Malusà et al., 2021),尤其是蛇绿混杂带或高压相系变质岩(李继亮,1992; Hsü, 1995; 肖文交等,2017),它可以有也可以没有高耸的山脉(后期被剥蚀夷平);而山脉(mountain)强调的是现时的地貌状态,关键是有高程差,是地理学/地貌学名词,是差异隆升作用造成的,可以形成于任何构造环境,可以没有也可以有汇聚板块边缘的岩石构造组合(侯泉林,2018)。山脉形成的地质作用可以用“成山作用”(mountain building)一词。

山脉与造山带是既有交集又不重合的两个不同概念,不可混淆,也不存在所谓的板内/陆内造山带(侯泉林,2018)。位于我国境内不同时期的造山带均形成于当时的板块边界(侯泉林,2018)。

### 1.2 角度不整合与造山运动和造山幕

造山幕(orogenic episode)又称褶皱幕(folding episode)、构造幕(tectonic episode)。这一概念最早是由 Stille 于 1924 年提出来的,其含义是地槽转变为褶皱带的过程中整个地槽区、乃至全球所有的地槽区都是近于同时发生的,而且造山幕是根据地层间的角度不整合来确定的(侯泉林,2018)。他 1924 划分了 25 个全球造山幕,1940 增加到 42 个,1955 增加到 50 个。60 年代地球科学革命开始就没再继续数下去。

板块构造理论认为,从大洋岩石圈的俯冲到大陆岩石圈的碰撞,以及其后的持续碰撞造山作用是一个连续的过程(Hamblin and Christiansen,2003;侯泉林,2018)。在此过程中,可以形成经历变形和遭受剥蚀的高地(山脉),也可同时形成接受沉积的洼地(盆地),也就是说在同一次造山作用过程中会形成若干个角度不整合,而且一个地方遭受剥蚀形成角度不整合和另一个地方接受连续沉积可以是同时进行的,并不存在统一的角度不整合。角度不整合的成因也是多种多样的,同一个角度不整合的不同位置可能是穿时的。因此,造山作用过程中不存在幕式造山,角度不整合也不与任何所谓造山幕有对应关系(侯泉林,2018)。

板块构造理论取代槽台学说之后,地槽、深大断裂、全球性的造山幕、造山运动(如加里东运动、燕山运动、喜马拉雅运动)等术语已不应再使用,规范的地质学教科书中也没有了这些概念(侯泉林,2018)。加里东期、燕山期、喜马拉雅期之类术语仍被广泛使用,其含义仅代表时代概念。

### 1.3 蛇绿岩与缝合带

大洋岩石圈从其在洋中脊处形成到在俯冲带处消亡,是一个连续过程(Hamblin and Christiansen, 2003),不同时代的蛇绿岩仅表示不同时代的洋壳碎块以不同方式就位于混杂带中或其周边,任一蛇绿岩块的时代只代表该洋壳残片的形成时代,既可以就位于俯冲阶段也可以就位于碰撞阶段(Bird and Dewey, 1970; Acton et al., 2011; Ando et al., 1984)。因此,蛇绿岩的形成时代和就位时代与大洋闭合、两侧大陆发生碰撞的时间没有直接联系,不能代表碰撞造山的时代(侯泉林,2018)。最年轻的蛇绿岩可作为大洋闭合和碰撞事件发生的下限,但往往有较大误差。

蛇绿岩就位有多种方式,不同的就位方式会导致其位置不同,而且在俯冲阶段及碰撞造山作用过程中还可能经历远距离推覆(Deville et al. 2015; Chevrot et al., 2018),因此蛇绿岩出露位置并不一定能代表缝合带的位置。

### 1.4 高压变质与俯冲作用及碰撞作用

(超)高压变质是指低地温梯度(高的 $P/T$ 值,即高压变质相系)下的变质作用,而非高的 $P$ 绝对值,如麻粒岩的变质压力可能超过蓝片岩和榴辉岩,但因中等的 $P/T$ 值而属中压变质相系;蓝片岩和榴辉岩因其高的 $P/T$ 值而属于高压相系变质。

俯冲板片因其较低的温度,具有高的 $P/T$ 值,所以高压变质也称为俯冲带变质,也就是说高压变

质与俯冲作用密切相关。碰撞过程因其正常地温梯度(中等 $P/T$ 值),主要为巴洛式区域变质,而不是高压(相系)变质。高压变质与碰撞作用密切相关的观点是个误区。

俯冲带可以将混杂带中的任何物质包括其中的陆壳物质碎片携带至深部发生高压变质,然后再折返就位,此时碰撞作用并未发生,如北美弗朗西斯科增生杂岩中有大量的榴辉岩和蓝片岩,而太平洋远未闭合。尽管大洋板块俯冲阶段大陆物质(陆壳物质碎片)可以被深俯冲,但是大陆板块碰撞阶段不会发生(超)高压变质。另外,与会者有人指出由于浮力效应,低密度的大陆板块不可能发生深俯冲。

所以高压变质作用(即俯冲变质作用)与碰撞事件并无关联,因此也不能用高压变质峰期年龄来确定碰撞时间。

另外,俯冲带是强烈的构造变形带,存在很大的构造差异应力,按照静岩压力(三轴等压)状态下测算的俯冲带变质压力不能反映真实的深度(计算深度会偏大很多)。这方面有待深入研究。

### 1.5　构造形迹与区域构造作用方向的不当关联

确定一个构造变形期区域主应力方向是构造解析的基本工作,主要是通过构造形迹(断层、褶皱、节理和劈理)的展布方向来实现,但目前经常出现构造形迹与区域构造作用方向不当关联的问题,其中断层的不当关联问题最为严重。

现有的断层构造解析多基于均匀介质的变形理论(如库伦准则和 Anderson 断层模式),但实际地质体是非均质的(其中先存断裂的存在是地质体非均质最显著的表现方式,Byerlee,1978;Morley,2002;Morley et al.,2004,2007;童亨茂等,2009,2013,2018)。库伦准则和 Anderson 断层模式(Anderson,1951)这些经典构造基础理论在实际应用中具有显著的局限性(Tong Hengmao et al.,2010;Tong Hengmao and Yin An,2011),这是断层与区域构造作用方向不当关联的源头。

最近的研究表明,在有先存断裂的情况下发生的构造作用,可以形成先存构造复活断层、先存构造相关断层以及与先存构造无关的断层(Tong Hengmao et al.,2014)。其中先存构造复活断层、先存构造相关断层的走向主要受控于先存构造的走向(McClay and White,1995),不能反映区域构造作用方向,只有与先存构造无关的库伦断层才能反映区域作用方向(Tong Hengmao et al.,2014)。若不分析断层的成因类型,很容易造成断层和区域构造作用方向的不当关联问题。尤其是中国,由于多期构造作用形成的先存构造普遍存在(童亨茂等,2018),斜向伸展和斜向挤压作用十分普遍,更容易造成这种不当关联。

在区域构造作用方向保持不变的情况下,在递进变形过程中,由于先存构造复活断层、先存构造相关断层和先存构造无关断层的发育是此消彼长的,断层的长度加权平均方向是不断发生旋转的(Tong Hengmao et al.,2014)。这需要特别注意,这种断层方向的旋转不能判定为区域构造作用方向的旋转(童亨茂等,2013,2018)。

另外,拉伸线理与剪切带运动方向往往并不平行;还有应变分配(strain partitioning)会造成逆冲推覆构造走向与走滑断层走向平行,主压应力($\sigma_1$)与走滑断层垂直等情况。若仍按传统构造地质学观念去分析会有较大风险,甚至造成误导。

### 1.6　断层活动期次与构造作用期次的不当关联

确定一个地区的构造变形期次也是构造解析的基本工作。按照库伦准则和 Anderson 断层模式(Anderson,1951),断层活动期次与构造作用期次是一一对应的,通过断层活动期次的分析就可以确定构造作用的期次。但在实际应用中,经常忽略库伦准则和 Anderson 断层模式仅适用于均匀介质这一假设前提,这是断层活动期次与构造作用期次的不当关联的源头。

在有多个先存构造的条件下,在一次构造作用过程中,不同先存构造复活断层(以及相关褶皱)的形成次序有先有后、持续的时间有长有短,即存在多种断层活动期次(Tong Hengmao et al.,2014)。因此,不同先存构造复活断层的活动期次不能直接反应构造作用的期次,只有与不同期次的先存构造无关的断层才能反映构造作用期次(童亨茂等,2018)。

### 1.7　断层平—剖面组合型式与构造应力机制的错误关联

常见的构造应力体制(状态)包括伸展应力体制($\sigma_1$ 直立)、走滑应力体制($\sigma_2$ 直立)和挤压应力体制($\sigma_3$ 直立),按照 Anderson 断层模式,分别发育正断层、走滑断层和逆冲断层(Anderson,1951)。随着走滑应变椭圆的提出,明确走滑作用可以派生出各种类型的断层,包括正断层、逆断层、张剪断层(R 破裂)和压剪断层(P 破裂)。

上述是传统观念对断层性质及平—剖面组合型式与构造应力机制进行关联的基础认识,认为只要

出现走滑断层以及走滑变形的平—剖面组合型式(如雁列构造、梳状构造、花状构造等),就认为是走滑应力体制,这实际上是一错误的认识。

随着变换断层(transfer fault)概念的提出(Morley et al., 1990),特别是本世纪以来三维地震资料的大量应用,发现裂陷盆地(伸展应力体制)和压陷盆地(挤压应力体制)内存在走滑断层以及走滑变形的平—剖面组合型式(Arreola and Morandi, 2005;Morley et al., 2007;童亨茂等,2018),表明走滑断层及走滑变形的平—剖面组合型式不是走滑应力体制的专有产物(童亨茂等,2018)。如渤海湾盆地和北部湾盆地是中国比较典型的新生代裂陷盆地,但在渤海海域地区发育一系列的走滑断层以及典型的走滑变形的平—剖面组合型式,北部湾盆地的二号断层带发育了盆地尺度的雁列构造带。

裂陷盆地和压陷盆地内发育的走滑断层均是变换断层,起传递应变(位移)的作用,其形成与先存构造直接或间接相关(Morley, 2007;童亨茂等, 2018)。

### 1.8 构造地球动力学数值模拟目前存在的一些问题

力学概念应用到构造数值模拟时,有些公式或概念是有适用条件的,如金属结构力学中用的泛米塞斯力就不能应用到地质数值模拟。在构造数值模拟中加入水的作用目前处于尝试阶段,模型过于简单等效化。

目前普遍存在重方法手段、轻地质模型的问题。实际上构造数值模拟的根本问题还是构造地质学问题,模型的构建、力学参数的选取、边界条件的设置、变形本构关系的设定等都要以地质模型为基础。地质模型建立不好,后面的模拟就是基础不牢的“沙雕”。

值得注意的是,数值模拟是一种论证手段,是仿真的数值推理,不能作为证据,证据还是基于地质观测。

## 2 构造地质学教学存在的一些问题及建议

构造地质学教学存在的问题引起了与会专家的热议,并进入了深入的讨论,其中学生方面、教师方面、以及课程设置和师资队伍建设方面的问题进行了比较集中的讨论,提出了一些建设性意见和建议。

学生方面,基础理论(包括对基本概念的理解不够透彻和基本理论的认识比较模糊)和动手能力(如野外基本功及构造图件的编制)等方面还需要进一步加强,在提升学生对地质学的兴趣和创新能力方面还需下更大的功夫。

教师方面,也提出了一些建议:① 授课的思路和方式需要更新,如构造地质学讲褶皱分类,学生认为繁琐,无趣。② 对构造地质学的基本概念和基本理论理解应更加准确和深化,对构造变形的物理过程和力学机理(物理本质)的讲解应深入浅出、引人入胜。③ 进一步突出授课重点。构造地质学(structural geology)的重点是断裂(断层和节理)、褶皱、劈理等,其中断层是重中之重;大地构造学(tectonics)的重点是板块构造理论。④ 随着学科发展及时更新教学内容。这方面在大地构造的课程中比较突出,如有的老师还用较大篇幅讲解槽台学说和其他已过时的大地构造观点;⑤ 讲课中应充分利用实物教具和动画演示。如果没有直观的实物教具和三维动画配合,同学们很难理解构造变形的三维结构和演化过程。

课程设置和师资队伍建设还需进一步加强:① 加强对《大地构造学》的课程建设,有些地质类高校和院系在与地质相关的许多专业中没有开设《大地构造学》。以板块构造理论为核心的《大地构造学》是地质类专业特别重要的基础课程。板块构造理论的创立是地质学的一场革命,是地质学史上最突出的成果,已成为现代地质学研究的范式。50 年过去了,如果不能很好地理解和掌握板块构造理论,对以后学习和工作中的影响会是比较显著的。② 以板块构造理论为核心的《大地构造学》的师资队伍尚需进一步加强。③ 重视对年轻教师的培训和培养。④ 加强教学研讨和交流。有专家认为,可将大学或研究生的《大地构造学》课程改为《板块构造学》。

## 3 构造地质学未来发展方向

构造地质学的未来发展方向是本次会议的重点议题之一,经深入研讨,与会代表形成了如下共识。

### 3.1 充分利用新技术观测手段及数据

20 世纪以来,探测(如三维地震、CT、GPS、超显微、激光扫描等)和数据处理(人工智能、CAD、超算系统等)新技术高速发展。充分利用这些新技术手段及产生的数据,可以为构造地质学的发展带来新的机遇和资料支撑。

### 3.2 构造解析、物理模拟、数值模拟和测试分析的紧密结合

到目前阶段,利用单一的技术方法以及构造很难产生高质量的成果,构造解析、物理模拟、数值模

拟和测试分析的紧密结合是构造地质学研究和未来发展的重要趋势,这一点值得构造地质研究人员和相关部门的重视。尤其是构造物理模拟实验,自 20 世纪末期以来继 McClay 等(McClay and Ellis, 1987;McClay,1990)的开创性工作后,已成为构造机理研究的基本手段。

### 3.3　多学科交叉是构造地质学学科增长的重要方向

从科学哲学角度看,包括构造地质学在内的地质学并不构成完全独立之自然学科,其方法论和认识论多借鉴于物理学、化学和数学等基础自然学科(侯泉林,2021)。构造地质(structural geology)是研究岩石/矿物对应力作用的响应,包括物理响应和化学响应(侯泉林等,2021);大地构造主要研究岩石圈的形成演化及地球各圈层的相互作用,其本质也是物理过程和化学过程。研究其物理化学过程及其机理,并进而用数学方法进行表达,是构造地质学未来发展的方向(泉林等,2021)。其中构造应力化学、地质力学(Geomechanics,构造和力学结合的学科,不同于李四光的大地构造学派)、流变构造学等在未来有很大的发展空间(泉林等,2021)。

### 3.4　构造地质研究向深地和深空发展

随着深地、深空探测技术的高速发展和资料的不断积累,为构造地质研究向深地和深空发展提供了条件。目前地质科学家已经意识到,固体地球、生物圈和大气圈是协同演进的,其中构造过程是重要纽带;太阳系中的不同行星演化具有相关性。这一认识为构造地质研究向深地和深空发展指明了方向。

### 3.5　断层带在时—空(由地表到上地幔)中全过程行为的研究和探索

断层是构造变形最基本的方式,断层分布和活动与人类的生活(包括资源、灾害、工程、环境)息息相关。断层研究是一古老的课题,Anderson 于 1905 年创立的 Anderson 断层模式也已有一个多世纪,不能适应非均质和各向异性地质条件,因此断层在时—空中全过程行为的研究仍是一个新的课题。

20 世纪 60 年代以来,随着地震探测技术的发展,断层研究从地表(露头)深入到地下;20 世纪 90 年代以来,随着三维反射地震技术的高速发展和在工业(特别是油气工业)中的应用,上地壳断层带的结构和演化过程被逐渐揭示。而对于断层在时—空中全过程行为的研究还存在很多问题:如①深源地震探测表明,断层活动可以深入到地幔深部(最深可达 700 km),而从地幔深部——地表,断层在不同深度域如何活动和转换?②基于实际资料不同类型断层带从深部到浅部三维结构模型的建立;③断层从韧性——脆性域及不同力学层(如结晶岩、砂岩、泥岩、碳酸盐岩、膏盐岩层等)间的活动差异性表现及如何实现其间的转换?④在多期构造活动中的断层作用研究具有很大的深化空间;⑤断层稳滑和粘滑的力学机理及其控制因素定量模型的建立;⑥ 慢地震的发育机理及其与断层活动的关系等。

### 3.6　构造地貌学未来具有很大的发展空间

构造作用对地貌(包括古地貌)具有控制作用的认识由来已久,地表过程、景观演化与构造存在相互作用,但总体还处在比较初级的阶段。随着与沉积作用相关的矿产资源(特别是油气)勘探的不断深入以及人类对环境的要求不断提升,对地貌(含古地貌)分布特征和演化规律认识的要求和期望不断提升,这给构造地貌学的发展带来新的机遇和数据支撑。

### 3.7　构造地质学在地质灾害预测和防治、成矿作用与资源勘探以及工程地质领域未来具有很大的应用前景和发展空间

地震和滑坡是破坏力最大的两个地质灾害,但其预测和防治一直没有得到很好的解决。地震和滑坡问题从本质上讲是构造地质学问题,只有从构造机理研究出发,结合其他技术手段,地震和滑坡的预测和防治才有可能取得根本性的进展。最近的研究发现,无论是板块边缘还是大陆内部,地震多发生于先存构造带及其附近;滑坡的产生也往往与先存断裂和薄弱带有关。这样地震和滑坡预测所依据的基础理论必须突破库伦准则,应用和发展先存构造条件下的断层作用理论,其预测和防治才有可能产生突破性的进展。

很多矿产资源(如油气、地下水、热液成因的金属矿产等)受控于构造,与断层的分布、性质、活动演化历史直接或间接相关。随着矿产资源的勘探不断向深部进军,勘探难度越来越大,简单地用传统的勘探方法往往难以取得很好的成效,揭示成矿机理、搞清矿产的分布规律和控制因素是未来矿产资源勘探取得突破的重要基础。构造地质学与受控于构造的矿产资源勘探紧密结合,一方面可以提升矿产资源的勘探成效,另一方面可以为构造地质学发展提供数据支撑,是未来构造地质学发展的重要方向。

## 4　走构造地质学健康发展之路

学科健康发展是欧美等发达国家科学家提出的

新的话题(NASEM,2008,2020),而“走构造地质学健康发展之路”也成为本次会议研讨的重要议题。与会代表就构造地质学健康发展之路及其实现途径展开了深入的研讨,并形成了以下认识。

### 4.1 构造地质学健康发展之路

构造地质学健康发展之路最根本的是学科可持续发展,具体表现为以下几个方面。

#### 4.1.1 具有支撑学科持续发展的资源

经费和资料(数据)是学科持续发展的支撑。构造地质学属于基础学科,经费主要来源于国家(国家自然科学基金委、科技部、教育部、地质调查局等部门),能持续获得国家相对稳定的经费支持十分必要。除此之外,与产业部门(如石油、煤炭、冶金、铁路等)的良好合作,获得经费支持和数据资料也十分重要。另外,倡导建立产业部门资料的解密制度(如产业部门取得的资料 20 年后可以共享)和国家共享数据中心,这可以很好地满足构造地质学持续发展的资料需求。

#### 4.1.2 建立和维护强有力的科学共同体

便于交流的平台、团结互助的合作环境、信息和资料共享的机制、学科影响力的扩展等对现代学科发展特别重要,这需要建立和维护强有力的科学共同体来实现和保障,这一点已达成共识。另外,与会代表一致同意恢复每年一次的“构造地质与地球动力学研讨会”,并倡导支持青年科学家的成长。

#### 4.1.3 人才培养的良好环境和机制

人才是学科发展的基础和核心。建立人才培养的良好环境和机制,能持续地吸引优秀青年学子加入构造地质学研究和教学队伍,并不断促进青年学者的健康成长。

#### 4.1.4 学科发展具有多样性

学科发展具有多样性是学科充满活力的标志。构造地质学科发展的多样性包括①学科方向的多样性;②人才结构和类型的多样性;③技术手段的多样性;④服务对象的多样性等。

#### 4.1.5 定量化技术和手段的充分应用

随着构造地质学的研究从①地表⟶深部⟶深空;②局部⟶全球;③宏观⟶显微;④脆性⟶脆韧性、韧性及脆—韧性结合;⑤定性⟶定量等方面发展,定量化技术和手段在构造地质学研究和教学中已不可或缺。充分应用定量化技术和手段是构造地质学健康发展的又一重要标志。

#### 4.1.6 与社会的广泛交流与服务

学科发展的最终目的是服务社会,包括满足社会对学科的需求及公众的好奇心,这需要通过与社会的广泛有效的交流、增强影响力来实现。构造地质学科与人类生活(资源、灾害、环境及公众的好奇心),学科的这一特点决定了构造地质学科在社会上产生广泛影响力的可能性,实现后对获取资源和公众支持也十分有利。

### 4.2 构造地质学健康发展之对策

在对构造地质学存在问题、未来发展方向及构造地质学健康发展之路研讨分析的基础上,根据我国的实际情况,与会专家就如何走上构造地质学健康发展之路建言献策,深入研讨,并取得了一些共识。

#### 4.2.1 加强构造地质学青年教师和研究人员的培训和交流

由于历史的原因,构造地质学教师队伍人员的水平参差不齐,不同人对同一概念(构造地质用语)、同一理论和同一方法的理解存在一定的差异,不光影响学科的发展,同时也影响学生的培养。通过青年教师和研究人员的培训和交流在一定程度上可以解决这一问题。建议由地质教育指导委员会、地质教育分会、构造地质与地球动力学专业委员会联合组织每年一次的青年教师和研究人员的培训,并倡导国内地质类高校的教师积极参加。

#### 4.2.2 建立构造地质学专业学生的分类培养模式

分类培养是本次要热议的话题,提议把从事基础科学研究和应用的学生进行分类培养,从事基础科学研究的学生少而精。建议我国有条件的地质相关院校设置 20 人左右的地质学强基班,采用本—硕—博一体化的培养模式,并设置不同的方向(构造地质学方向每年 5~6 人)。本科期间加强与地质学相关的数理基础(如立体几何、数理统计、线性代数、固体力学、流体力学等)和地质学基础课程,配置优秀教师,并配套能吸引优秀学生的政策。

#### 4.2.3 重视野外地质和地震资料解释及基本功训练

野外工作和三维地震资料解释分别是开展地表和地下构造分析的基础工作,这是取得原创性成果的基础。构造研究若没有扎实的野外工作和(或)三维地震资料解释来支撑,就难以充分利用天然实验室资源,也难以取得一流的成果。采集几块样品、做一些测试后套模式发表论文(业界戏称为“粉末地质学”),只能是跟踪研究而无法原创。重视野外地质和地震资料解释一方面需要政策,在项目申请、成果发表上支持,另一方面也需要观念(如价值观)的改变。

扎实的野外工作和三维地震资料解释功底是一

个反复实践、长期积累的过程,需要从基本功训练做起。对于强基班的学生,这方面的训练尤为重要。

#### 4.2.4　改变观念,拓展方向

随着新技术的不断应用和生产力的高速发展,行业对学科不断地提出新的需求和要求,包括对构造地质学在内的教师和研究人员不断地提出新的挑战。只有不墨守成规、走出舒适区,积极改变观念,不断拓展方向来迎接挑战,才能走向健康发展的道路,否则会面临被淘汰的风险。

观念改变中很重要的是价值观的改变,树立把创造知识、培养人才、服务社会成为作为自我价值实现最重要途径的理念。坐得住冷板凳、打牢基础、厚积薄发,才有可能取得一流的成果。

#### 4.2.5　增强社会服务意识,提高服务质量

服务社会(行业应用及满足公众的好奇心)是学科发展的原动力。构造地质学科揭示地球的结构及现场演化,同时与地震、滑坡等对人类破坏力最大的地质灾害,矿产资源勘探、自然景观的形成演化都密切相关,在行业应用及满足公众的好奇心方面具有很大的潜力。

增强社会服务意识,走出象牙塔,积极寻求与相关的产业部门(如石油、煤炭、水利、铁路、交通、冶金等部门)与国家机构(如国家应急管理部)交流与合作的机会,解决行业中与构造地质相关的关键问题(如低渗透砂岩、页岩油—气、煤层气等水力压裂高效破岩的机理,断层复活引发的井筒套管变形,油藏注气开发与地下储气库的盖层安全性预测和评价,与断层相关的矿产资源富集机理,热液矿藏中有效矿脉的预测,与断层活动相关的地基安全性定量评价、大型工程与断层相关的安全性预测和评价等方面问题),探索地震预测、滑坡体安全的定量预测与评价方面的问题。这些实际问题的解决,会在行业内和社会上产生重大影响,反过来会进一步促进构造地质学科的发展。

积极开展与媒体合作,对公众进行宣传和科普,特别是业内有广泛影响的构造地质学家能积极参与,编写有影响力的科普作品。

#### 4.2.6　充分利用我国优势的天然实验室资源,抓住构造地质学未来发展的机遇

中国在大地构造上处在全球一个很特殊位置,①全球正在作用的最强烈活动碰撞造山带主体位于中国境内;②正在作用的大陆碰撞远程效应区主体也在中国境内;③造山带和盆地从数量上、时代分布上、空间展布上和地质特征等方面具有世界其他地区不可比拟的优势;④陆内构造变形的强度、类型均为世界之最;⑤中国构造演化总体的复杂程度是世界其他区域不可相提并论的,这些都是我国未来构造地质学发展得天独厚的地域优势。充分利用这些占尽优势的天然实验室资源,就很有可能在造山带、盆地、陆内变形、叠加变形过程、大陆动力学等方面取得一些原创性的、举世瞩目的成果,这也是我国未来构造地质学发展的重大机遇。

#### 4.2.7　加强构造地质学学科共同体建设

科学共同体建设是现代学科发展的需要,如何加强构造地质学学科共同体建设也是这次会议热议的话题。提议①恢复构造地质与地球动力学年会;②加强各单位的交流与合作,优势互补;③提高实验室等学术平台的开放性;④托举优秀青年人才;⑤积极宣传和推广国内科学家的优秀成果。

## 参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

侯泉林. 2018. 高等构造地质学(第一卷):思想方法与构架. 北京:科学出版社:259.

侯泉林, LU Lucy Xi, 程南南. 2021. "构造地质学"发展方向的一些思考. 岩石学报, 37(8):2271~2275.

侯泉林. 2021. 高等构造地质学 第四卷 知识综合与应用. 北京:科学出版社:338.

李继亮. 1992. 碰撞造山带大地构造相// 李清波, 戴金星, 刘如琦等. 现代地质学研究文集(上). 南京:南京大学出版社:9~21.

童亨茂, 孟令箭, 蔡东升, 吴永平, 李绪深, 刘明全. 2009. 裂陷盆地断层的形成和演化——目标砂箱模拟实验与认识. 地质学报, 83(6):759~774.

童亨茂, 赵宝银, 曹哲, 刘国玺, 顿小妹, 赵丹. 2013. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统成因的构造解析. 地质学报, 87(11):1~17.

童亨茂, 范彩伟, 孟令箭, 赵宝银, 范晋煜. 2018. 中国东—南部裂陷盆地断裂系统复杂性的表现形式及成因机制. 地质学报, 92(9)1753~1765.

肖文交, 敖松坚, 杨磊, 韩春明, 万博, 张继恩, 张志勇, 李睿, 陈振宇, 宋帅华. 2017. 喜马拉雅汇聚带结构—属性解剖及印度—欧亚大陆最终拼贴格局. 中国科学:地球科学, 47(6):631~656.

Acton C, Priestley K, Mitra S, Gaur V. 2011. Crustal structure of the Darjeeling—Sikkim Himalaya and southern Tibet. Geophysical Journal International, 184 (2):829~852.

Anderson E M. 1951. The Dynamics of Faulting. 2nd edition. Edingburgh: Oliver and Boyd.

Ando C, Czuchra B, Klemperer S L, Brown L D, Cheadle M, Cook F A, Oliver J, Kaufman S, Walsh T, Thompson Jr J. 1984. Crustal profile of mountain belt: COCORP deep seismic reflection profiling in New England Appalachians and implications for architecture of convergent mountain chains. AAPG Bulletin, 68 (7):819~837.

Arreola M A, Morandi M. 2005. Structure of the rift basins in the central gulf of California: Kinematic implications for oblique rifting. Tectonophysics, 409:19~38.

Bird J M, Dewey J F. 1970. Lithosphere plate－continental margin

tectonics and the evolution of the Appalachian orogen. Geological Society of America Bulletin, 81 (4): 1031~1060.

Byerlee J D. 1978. Friction of Rocks. Pure and Application Geophysics, 116: 615~626.

Chevrot S, Sylvander M, Diaz J, Martin R, Mouthereau F, Manatschal G, Masini E, Calassou S, Grimaud F, Pauchet H. 2018. The non-cylindrical crustal architecture of the Pyrenees. Scientific Reports, 8 (1): 1~8.

Deville E, Mascle A, Callec Y, Huyghe P, Lallemant S, Lerat O, Mathieu X, De Carillo C P, Patriat M, Pichot T. 2015. Tectonics and sedimentation interactions in the east Caribbean subduction zone: An overview from the Orinoco delta and the Barbados accretionary prism. Marine and Petroleum Geology, 64: 76~103.

Hamblin W K, Christiansen E H. 2003. Earth's Dynamic Systems (Tenth Edition). New Jersey: Prentice Hall Inc.

Hou Quanlin. 2018&. Advanced Structural Geology (Volume 1). Thought, Method and Framework. Beijing: Science Press: 259.

Hou Quanlin, Lu Lucy Xi, Cheng Nanan. 2021&. Some thoughts on challenges and opportunities in structural geology and tectonics. Acta Petrologica Sinica, 37(8): 2271~2275.

Hou Quanlin. 2021&. Advanced Structural Geology (Volume IV). Knowledge Synthesis and Application. Beijing: Science Press: 338.

Hsü K J. 1995. The Geology of Switzerland: An Introduction to Tectonic Facies. Princeton: Princeton University Press.

Kashubin S, Juhlin C, Friberg M, Rybalka A, Petrov G, Kashubin A, Bliznetsov M, Steer D. 2006. Crustal structure of the Middle Urals based on seismic reflection data. Geological Society, London, Memoirs, 32 (1): 427~442.

Kummerow J, Kind R, Oncken O, Giese P, Ryberg T, Wylegalla K, Scherbaum F, Group T W. 2004. A natural and controlled source seismic profile through the Eastern Alps: TRANSALP. Earth and Planetary Science Letters, 225 (1~2): 115~129.

Li Jiliang. 1992#. The tectonic facies of the collision orogenic belt // Li Qingbo, Dai Jinxing, Liu Ruqi, etc. Collection of Modern Geology Research (Part 1). Nanjing: Nanjing University Press: 9~21.

Lüschen E, Borrini D, Gebrande H, Lammerer B, Millahn K, Neubauer F, Nicolich R, Group T W. 2006. TRANSALP—deep crustal Vibroseis and explosive seismic profiling in the Eastern Alps. Tectonophysics, 414 (1~4): 9~38.

Malusù M G, Guillot S, Zhao L, Paul A, Solarino S, Dumont T, Schwartz S, Aubert C, Baccheschi P, Eva E. 2021. The deep structure of the Alps based on the CIFALPS seismic experiment: A synthesis. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 22 (3): e2020GC009466.

McClay K R, Ellis P G. 1987. Geometries of extensional faults systems in model experiments: Geology, 15(3): 341~344.

McClay K R. 1990. Extensional fault system in sedimentary basins: a review of analogue model studies: Marine and Petroleum Geology, 7 (1): 206~233.

McClay K R, White M J. 1995. Analogue modeling of orthogonal and oblique rifting. Marine and Petroleum Geology, 12(1): 137~151.

Morley C K, Nelson R A, Patton T L. 1990. Transfer zone in the East African rift system and their relevance tohydrocarbon exploration in rift. AAPG Bulletin, 74: 1234~1253.

Morley C K. 2002. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia. Tectonophysics, 347: 189~215.

Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W S. 2004. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: examples from the rifts of Thailand. J Structural Geology, 26: 1803~1829.

Morley C K, Gabdi S, Seusutthiya K. 2007. Fault superimposition and linkage resulting from stress changes during rifting: Examples from 3D seismic data, Phitsanulok Basin, Thailand. J. Structural Geology, 29: 646~663.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine(NASEM). 2008. Origin and Evolution of Earth: Research Questions for a Changing Planet. http://www.nap.edu/catalog/12161.html.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine(NASEM). 2020. A Vision for NSF Earth Sciences 2020-2030: Earth in Time. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/25761.

Paul H, Mitra S. 2017. Three-dimensional crustal architecture beneath the Sikkim Himalaya and its relationship to active deformation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122 (10): 7860~7878.

Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, Wåhlin A. 2014. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations. Marine Geology, 352: 111~154.

Singh A, Ravi Kumar M, Mohanty D D, Singh C, Biswas R, Srinagesh D. 2017. Crustal structure beneath India and Tibet: New constraints from inversion of receiver functions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122 (10): 7839~7859.

Singh A, Saikia D, Kumar M R. 2021. Seismic imaging of the crust beneath Arunachal Himalaya. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126 (3): e2020JB020616.

Şengör A M C. 1990. Plate tectonics and orogenic research after 25 years: a Tethyan perspective. Earth-Science Reviews, 27: 1~201.

Şengör A M C. 1992. The Palaeo-Tethyan suture: a line of demarcation between two fundamentally different architectural styles in the structure of Asia. Island Arc, 1: 78~91.

Snyder D B, Barazangi M. 1986. Deep crustal structure and flexure of the Arabian plate beneath the Zagros collisional mountain belt as inferred from gravity observations. Tectonics, 5 (3): 361~373.

Stern R J. 2002. Subduction zones. Reviews of Geophysics, 40 (4): 1~38.

Stille H. 1924. Grundfragen der Vergleichenden Tektonik. Berlin: Borntrager.

Teixell A, Labaume P, Ayarza P, Espurt N, de Saint Blanquat M, Lagabrielle Y. 2018. Crustal structure and evolution of the Pyrenean-Cantabrian belt: A review and new interpretations from recent concepts and data. Tectonophysics, 724: 146~170.

Tong Hengmao, Meng Lingjian, Cai Dongsheng, Wu Yongping, Li Xushen, Liu Mingquan. 2009&. Fault formation and evolution in rift basins ——Sandbox modeling and cognition. Acta Geologica Sinica, 83(6): 759~774.

Tong Hengmao, Zhao Baoyin, Cao Zhe. 2013&. Structural analysis of fault system origin in Nanpu sag, Bohai Bay basin. Acta Geologica Sinica, 87(11): 1~17.

Tong Hengmao, Fan Caiwei, Meng Lingjian, Zhao Baoyin, Fanjinyu. 2018&. Manifestation and origin mechanism of the fault system complexity in the rift basins in the east-south China- cases study of Nanbu and Weixinan sag. Acta Geologica Sinica, 92(9): 1753~1765.

Tong Hengmao, Cai Dongsheng, Wu Yongping, Li Xiaoguang, Li Xushen, Meng Lingjian. 2010. Activity criterion of pre-existing fabrics in non-homogeneous deformation domain. Science China (Earth Science), 53: 1~11.

Tong Hengmao, Yin An. 2011. Reactivation tendency analysis: A theory

for predicting the temporal evolution of preexisting weakness under uniform stress state. Tectonophysics, 503: 195~200.

Tong Hengmao, Koyi H, Huang S, Zhao Haitao. 2014. The effect of multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models. Tectonophysics, 626: 197~212.

Xiao Wenjiao, Ao Songjian, Yang Lei, Han Chunming, Wan Bo, Zhang Ji'en, Zhang Zhiyong, Li Rui, Chen Zhenyu, Song Shuaihua. 2017 #. Anatomy of composition and nature of plate convergence: Insights for alternative thoughts for terminal India-Eurasia collision. Science China Earth Sciences, 60: 1015~1039.

Xu Qiang, Zhao Junmeng, Yuan Xiaohui, Liu Hongbing, Pei Shunping. 2015. Mapping crustal structure beneath southern Tibet: Seismic evidence for continental crustal underthrusting. Gondwana Research, 27 (4): 1487~1493.

Zhao Wenjin, Kumar P, Mechie J, Kind R, Meissner R, Wu Zhenhan, Shi Danian, Su Heping, Xue Guangqi, Karplus M. 2011. Tibetan plate overriding the Asian plate in central and northern Tibet. Nature geoscience, 4 (12): 870~873.

# A path to the healthy development of structural geology and tectonics

## ——Discussion on related issues and future development directions of structural geology and tectonics in our country

TONG Hengmao[1)], HOU Quanlin[2)], CHEN Zhengle[3)], CHAI Yucheng[2)], ZHANG Jinjiang[4)], LIU Junlai[5)], HOU Guiting[4)], LIN Wei[6)], ZHANG Bo[4)], YAN Danping[5)], WANG Genhou[5)], LI Yalin[5)], CHEN Xuanhua[8)], ZHANG Huiping[7)], YAN Quanren[2)], LIU Shaofeng[5)], ZHANG Qing[3)], WU Chunming[2)], YU Fusheng[1)], CHEN Hong[3)], LIU Huichuan[1)], WEI wei[6)], ZHANG Jin[9)], GUO Qianqian[2)]

1) *College of Geosciences*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing*, 102249;

2) *College of Earth and Planetary Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing*, 101408;

3) *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing*, 100191;

4) *School of Earth and Space Sciences*, *Peking University*, *Beijing*, 100871;

5) *School of Earth Sciences and Resources*, *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing*, 100083;

6) *Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing*, 100191;

7) *Institute of Geology*, *China Earthquake Administration*, *Beijing*, 100191;

8) *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing*, 100037;

9) *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing*, 100037

**Abstract**: For more than half a century, teaching and scientific research of structural geology and tectonic have made great progress in our country, but some problems have also appeared. In order to promote the development of the discipline and put structural geology and tectonic on the road of healthy development, the Professional Committee of Structural Geology and Geodynamics organized a seminar on "Related Issues and Future Development Directions of Structural Geology and Tectonics". This paper is a brief summary of the workshop outcomes, including: ①problems existing in the understanding and application of the concepts, theories and methods of structural geology and Tectonics; ②problems existing in teaching activity of structural geology and Tectonics; ③the future development of structural geology and Tectonics; ④the path to the healthy development of structural geology and Tectonics. This paper aims to provide a review and reference for relevant researchers and departments.

**Keywords**: structural geology; existing problems; future development; a path to the healthy development

**Acknowledgements**: This work was supported by the Program of National Natural Science Foundation of China (Nos. 41272160,42172258). We'd like to thank the reviewers and editors for their valuable suggestions and hard work to this paper. Meanwhile, we'd like to express sincere appreciation to the State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum for funding the conference.

**First author**: TONG Hengmao, male, born in 1967, Ph. D., professor, mainly engaged in basin tectonic analysis, structural physical simulation experiment; Email: tonghm@cup.edu.cn

**Manuscript** received on: 2022-06-09; Accepted on: 2022-09-10; Network published on: 2022-10-20

**Doi**: 10.16509/j.georeview.2022.10.031　　**Edited by**: LIU Zhiqiang