

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.033>



论大地构造学的发展

万天丰

中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 大地构造学是研究地球物质在时间和空间演化的学问,是构造地质学的一门重要的分支学科,是一门涉及知识面很宽的学问.大地构造学需要朝定型、定向、定时、定位和定量的研究方向前进,需要通过“行万里路,读万卷书”,经过长期的知识积淀才可能进行扎实的研究,以便逐渐接近科学的真理.槽台假说是一种过时的认识.板块构造学说起源于海洋地球物理调查,它是一个仍在继续发展中的大地构造学说,强调各个岩石圈板块是以水平运移为主的,但是其动力学机制则至今尚未完全解决,仍在探索之中.

关键词: 槽台假说;板块构造学说;动力学机制;岩石圈;大地构造学.

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2019)05-1526-11

收稿日期: 2018-12-06

A Review of Geotectonics

Wan Tianfeng

School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Geotectonics study is concerned with the evolution of earth materials in the time and space, and it is an important branch of the structural geology, which is related with many domains in the science. The future geotectonics must focus on quantitative studies of fixed type, orientation, time, position, which involves lots of travelling for field work, lots of reading for literature research, and lots of knowledge accumulated over a long period of time, in the pursuit of the science and the truth. The geosyncline and platform hypothesis has been out-of-date. The plate tectonics originated from oceanic geophysical survey is a developing tectonic theory, mainly emphasizing the horizontal movement of tectonic plates. However, the dynamic mechanics of plate tectonics has never been solved completely till now and remains an issue to be worked out.

Key words: geosyncline and platform hypothesis; plate tectonic theory; dynamic mechanics; lithosphere; geotectonics.

1 大地构造学的兴起与发展

当代的大地构造学是研究岩石圈组成、结构、运动(包括变形和变位)和演化的一门综合性很强的构造地质学学科.美国则在学科分类中把大地构造学与构造地质学并列在一起.大地构造学,按说应该是研究整个地球的组成、结构、运动和演化的.但是,受技术手段和研究方法的局限,要实现这个目标,还要走很漫长的道路.大地构造学目前还是以地质学方

法为主来研究的,因而其实还不能真正研究整个岩石圈,更不用说整个地球.实际上,其重点研究的只是地球表层几十千米之内岩石圈的组成、结构、运动、历史演化和动力学机制.随着近几十年来地球物理学和地球化学方法的引入和多种新技术、新方法的运用,大地构造学正在逐渐地扩展其研究的精度、深度、广度与时间尺度.

大地构造学研究的重点不仅仅是岩石圈的构造变形(deformation),而且还包括地块的变位(dis-

作者简介: 万天丰(1938-),男,教授,博士生导师,北京市教学名师,主要从事构造地质学和大地构造学的教学与科研工作.
E-mail: wan-tianfeng@163.com

引用格式: 万天丰,2019.论大地构造学的发展.论大地构造学的发展.地球科学,44(5): 1526-1536.

placement)及其演化历史、运动变化与动力学机制,为此必须将各种岩石建造(沉积、岩浆与变质)的特征与改造(变形与变位)结合起来进行综合分析,一定要把宏观与微观的研究结合起来,把地质学、地球物理学、地球化学、数学和各种现代测试方法技术的最新成果结合起来进行综合性的分析研究。

大地构造学是20世纪30年代由前苏联学者最早提出来的。Tectonics一词是引自希腊语,译成俄语为“Тектонические”。当时,其基本学术观点还是槽台假说。之后大地构造学这一术语,被欧美和我国学者所赞同和发展。直到1970年以来,很多学者才开始运用板块构造学说来重新探讨大地构造学问题。

研究大地构造学,不仅要求研究精深,而且要求知识广博,必须要有足够的知识积淀才可能进行。随着地球科学的迅猛发展,现在一般认为构造地质学与大地构造学研究应该做到“五定”,即定型、定向、定时、定位和定量。

(1)定型。是指在研究中首先要弄清构造变形的类型,这是最为基础的一项工作,这也是构造形态学研究的主要内容。

(2)定向。是指在构造研究中一定要在三度空间中,弄清构造变形的伸展、挤压或剪切—走滑的方向以及地块的增厚或减薄,从具有明确方向性的运动变化中来认识构造变形。而不能仅仅是从平面或单方向地去认识构造变形,不能像有的学者那样,只是单纯地谈伸展或挤压构造,而不考虑三度空间中各个方向的变形,那样是很不正确的,也是不符合事实的。例如,东西向的水平挤压作用可以派生近南北向的伸展,或NW和NE向的剪切作用,以及地质体的增厚。构造变形从来都不是随机分布的,也不是按照“正态分布”的规律演化的。而是有着明确的定向性的,张、压、剪3种变形方式,在不同方向上的作用力是可以互相转化的。绝对不能像有的学科那样,在研究中完全不考虑岩石运动变化的方向性。总之,方向性是构造形态学和运动学研究中的一个重要内容。

(3)定时。首先要根据参与构造变形的地层层序与角度不整合接触关系,弄清各期构造变形的相对次序与相对地质年龄以后,才利用各种同位素测年方法,较准确地求得构造变形的同位素年龄数据。在20世纪的前半期,由于没有同位素测年的研究方法,对于构造变形的形成年代不大好研究,因而产生一些混淆和错误是可以理解的。对于多期次活动的褶皱与断裂构造,更要谨慎处理,认真对比研究,切忌随便拿一个构造变形中所测的同位素年龄数据,

就以为一定能代表这个最主要的构造活动年龄数据。类似的错误已经多次发生,例如,在郯庐断裂带的断层滑动面上采集岩样,测得的同位素年龄从三叠纪(250 Ma)到近代都有,由此便引起了不少误解。其实这正好证明了该断裂带从三叠纪到近代存在着6次构造事件。这就需要通过断层两盘的其他大量构造变形资料,进行对比研究才能弄清断裂带各次活动的特征及其比较准确的构造变形年代(Wan *et al.*, 1996)。

(4)定位。构造地质学研究不仅要弄清构造“变形”,更要研究其“变位”,应该注意其所属的大地构造部位,以及由古地磁资料所推断的古纬度与古地磁方位。这是动力学研究的一个基础。脱离其大地构造部位的研究,势必容易造成“坐井观天”,进行错误的解释。有的构造地质学家就说:“构造地质学就是研究构造变形的!”,此种说法是很不全面的。构造变形只是构造地质学和大地构造学研究中的一个部分,当然是很重要的,也是一个基础的部分,但绝对不是全部内容。不能脱离地质体可能存在相当大幅度的变位,而只谈变形。只不过,目前只能对古生代以来的地块进行较好地定位,元古代及以前的定位,由于古磁性很弱和测年数据不能较准确,意见极为分歧,至今还不大好下结论。

(5)定量。构造地质研究发展到今天早已不能满足于定性研究和用“哲学思维”来分析、推理与假设了,已经到了必须大力加强定量研究的阶段,也即希望一切构造地质研究都要有定量的参数,如构造变形量,不同部位在不同时期的运移方向、位移量和位移速度,构造应力值大小(通常以最大与最小主应力值的差值来表述,也即反映了构造作用的强弱),变形时的温度、围限压力、埋深,变形时的同位素年代等。只有进行了定量研究,有了准确的数据,通过数值模拟,才能具有对深部与外围进行构造预测的价值,这就是定量的构造动力学研究的主要内容。这样才能对地质构造现象进行准确地、客观地记录与描述。应该说,能够进行定量研究与预测,这才是现代科学的重要标志。过去的大地构造研究只能做定性研究,这是不符合现代科学发展要求的。总之,应该努力把大地构造学从站在哲学角度来探讨的、经验性的、定性的学科,提高到现代科学的水准,其难度是很大的。

所以,很多著名的构造地质学家都是人到中年之后,在有了较多的知识积淀以后,才能成为大地构造学家。例如,20世纪60年代,当时全国东部地区已

有 1:100 万地质图资料,在此基础上,兴起了研究中国大地构造学的高潮,几大学派百花齐放,百家争鸣,当时我校有些年轻教师就曾敦促马杏垣教授竖起我校大地构造学派的大旗.由于此时马先生是研究前寒武纪地质构造的专家,对于古生代以来的地质构造还缺乏系统的研究,马先生就断然地拒绝了他们的建议.直到晚年,他才撰写并出版了《中国岩石圈动力学纲要》专著及中国大地构造图(马杏垣,1987,1989).由此可见,他对于大地构造学研究的严肃态度.

马先生一贯特别强调:想要搞好构造地质学研究,必须首先要从扎实做好野外地质工作入手,以后才可逐渐扩大、深化地质学的研究领域.他曾多次带领笔者等青年教师在北京西山的南大寨、大灰厂、门头沟和雁翅等地进行野外地质构造研究,向我们展示了他扎实研究地质构造的工作态度与方法(图 1).在他晚年的时候,在回忆过去时,他曾对笔者说:“我对地质学的主要贡献就是:大力创导并加强了野外地质基本功的训练”.事实的确如此,长期以来,我校毕业生的野外地质基本功和实际工作能力,总体来看就是比较高的.这确实应该归功于马先生的创导,这就是马先生对于我校建设的重要贡献.

王鸿祯先生,在年轻时候是研究珊瑚化石的专



图 1 1963 年夏季马杏垣先生(左 3)在北京西山的南大寨断裂带指导青年教师进行野外地质构造研究

Fig.1 In the summer of 1963, Mr. Ma Xingyuan (left 3) instructed young teachers to conduct field geological structure research in the southern Dazhai fault zone in the West Mountain of Beijing

图 1 中左 1 为笔者;左 2 为常志忠老师,当时他在北京大学地质系任教;背对着镜头的可能是谭应佳老师



图 2 1996 年马杏垣先生(右)与王鸿祯先生(左)在中国地质大学(北京)构造地质教研室所举办的构造地质研讨会上握手、留影(后面为谭应佳老师)

Fig.2 Mr. Ma Xingyuan (right) and Mr. Wang Hongzhen (left) shook hands and took photos at Tectonic Geology Seminar held by Department of Tectonic Geology of China University of Geosciences (Beijing) in 1996 (with Tan Yingjia at the back)

家.所以,当时他的一对双胞胎女儿,就取名为:“王珊,王瑚”.经过长期的知识积累,晚年他就成为一位著名的历史大地构造学家(图 2).

不过,也有少数学者在晚年变成一个乱说一气的、所谓的“大地构造学家”,他们只愿意做“大胆假设”,而从来不想进行扎实的研究,更不去“小心求证”.例如,一会儿说:中国大陆是从日本分离出来的,一会儿又改说:日本是从中国分离出去的.当被大家问得张口结舌时,就用他流利的英语来搪塞.他用与基本事实完全违背的认识,去说:太平洋西侧发育着“弧后盆地”,建立了所谓的“沟弧盆体系”.他在飞机上看见中国东部有不少山脉,就说整个中国东部都是“造山带”等,而完全不顾亚洲和中国大陆构造演化的基本地质事实.

总之,大地构造学绝对不是仅仅靠“个人聪明的逻辑思维”就能掌握并发展的,而必须长期扎实地研究,如古人所说的要“行万里路,读万卷书”,以事实为依据,不断修正自身的错误认识,在有了深厚的知识积淀后才可能研究得好.

2 关于槽台假说

地槽地台假说(geosyncline and platform hypothesis)是近一百多年来,在大地构造学假说中影响最大的一种学术思想.1857 年霍尔在论述北美地质演化史的专著中,最早提出了槽台假说,他认为地

壳运动主要是受垂直运动控制,地壳此升彼降,造成振荡运动,而水平运动则是其派生的或次要的,运移量较小的。驱动力则主要是地球物质的重力分异作用,地壳上升造成隆起,地壳下降则造成凹陷。主要的构造单元有地槽和地台两类。地槽区是地壳活动强烈的地带,地槽发展初期以速度不均匀的下沉为主,接受巨厚沉积,并有基性岩浆活动。沉积物则以陆源碎屑为主,随着下沉的幅度加大,碎屑沉积物由粗变细,乃至出现海相碳酸盐类沉积。后期受到强烈的挤压、抬升,沉积物又由细变粗,并形成强烈褶皱和断裂。地槽经过强烈隆升运动后,可形成造山带。其后,活动性减弱,经长期剥蚀夷平后,最后才逐渐转化为地台。地台区则是地壳较稳定的区域,升降速度和幅度都较小,构造变动和岩浆活动也较弱。由于其前身是由地槽转化而来,故其下部为紧闭褶皱和变质结晶基底;上部沉积了较薄的沉积盖层,常形成宽缓的褶皱,构造形态比地槽区的简单得多。当沉积盖层被剥蚀、以致大面积出露古老的褶皱、变质结晶基底时则称为地盾。槽台假说认为:构造运动具有强弱交替的旋回性和阶段性。稳定期构造运动比较和缓,主要表现为缓慢升降运动;活跃期的构造运动和岩浆活动等都比较频繁,主要表现为强烈褶皱和隆起,形成巨大的山系,故也称造山运动。构造运动的旋回性决定了地壳演化的阶段性。此假说认为:全球可以同时发生比较强烈的和影响广泛的构造运动,就称之为构造运动期或造山幕(Stille, 1924)。

针对我国槽台演化的特征,黄汲清等(黄汲清, 1960;黄汲清等,1965, 1977)发展了槽台假说,认为地台还可以“活化”,提出了“准地台”和“准地槽”的概念,后来他和许多学者更进一步发展了槽台假说,提出了关于槽台演化的“手风琴式构造”(黄汲清和陈炳蔚,1987)和“开合构造”(姜春发等,1992;姜春发,1994;杨巍然,1992;张抗,1998)等。

槽台假说与岩石圈板块构造学说的相同点:都认为在地球上存在着构造活动性相对稳定的地区(地台或板块)与相对活动的地带(地槽—造山带、俯冲带、海沟—岛弧系或板块碰撞带),认为地球都具有历史演化的阶段性与运动变化的观点,并且都认为构造演化自古以来都是在不断演变的,两者均认为在构造作用强烈时,可造成强烈的构造变形—岩浆—变质作用。因而,有些学者就宣称:槽台假说与岩石圈板块构造学说基本上是一样的,根本不存在什么差异。槽台假说的稳定地块是基本上不会发生大幅度运移的;而板块构造所说的相对稳定的地块

是可以大幅度地运移的。例如中朝板块与扬子板块在早古生代早期(约 500 Ma)都位于 15°S 左右的古特提斯洋内,而到二叠纪晚期它们都运移到了北半球的低纬度处,发生了不等量的向北运移。更不要说,印度大陆板块的中心参考点,在白垩纪以来发生了极大幅度的向北水平运移,从 45°S 运移到 15°S,运移了约 3 000 km(万天丰,2011)。

应该说,槽台假说其实已经过时,其很多有关大地构造学的假设和论断都与事实不相吻合,因而均遭否定。槽台假说在研究方法上,继承了早年的科学研究方法,特别注重分门别类地对各种级别的构造单元和各个演化阶段赋予特别的术语。这在科学发展的早期阶段是必要的,也是无可非议的。但是槽台假说的支持者老是套用前人的构造演化模式或热衷于创立新术语,而不太关注定时、定向、定型、定位和定量的构造演化,缺乏对其成因与动力学机制的研究。这从科学发展的现状与需求来看,显然是不相适应的。其实,在地质构造演化中,每一个地区无论是构造样式、规模大小、构造变形的岩石组合,还是形成时间、演化经历都是独特的、十分复杂的。如果仅仅采用这种不追求研究事物的独特性和运动变化的本质,而只是热衷于不断创立和使用新术语的研究方法,是很容易走向繁琐哲学的道路的。

槽台假说与岩石圈板块构造学说观点的不同是很明显的,详见表 1。

在上述认识的差异中,槽台假说影响最大、最重要的论点是认为全球具有统一的造山幕。20 世纪 90 年代早期,王鸿祯先生还曾要求笔者在论述构造演化阶段时,应该与生物地层演化的阶段一致起来,实际上就是认为:我国的构造演化阶段必须与全球的生物地层的演化阶段和造山幕一致起来。但是,等到 2000 年,笔者在开始编写《中国大地构造学》时,他就不再要求把中国的构造演化阶段与全球的一致起来。因为,他已经不再同意如 Stille(1924)所说的那样:全球都具有统一的、同时形成的造山幕了。事实上,各地区绝大多数的强烈构造变形基本上与地层划分阶段、气候突变、生物灭绝、海平面大幅度升降等都不同时发生。

对于水圈、大气圈和生物圈来说,全球几乎可以准同时地发生巨变及大量生物的灭绝,因而就可以用生物化石和沉积演化特征和同位素测年资料,编制出全球统一的地质年代表。但是构造事件及其阶段性则与此不同。各地区构造作用的高潮是通过缓慢的岩石变形而逐渐传递并减弱的,其传递速度为

表 1 槽台假说与岩石圈板块构造学说的不同点

Table 1 The difference between the geosynclines and platform hypothesis and lithosphere plate tectonic theory

地槽地台假说	岩石圈板块构造学说
以垂直运动为主,仅可派生少量的水平运动,基本上属于“固定论”的观点.因而,不相信地块可大幅度水平位移.	地球表层的水平位移量显著大于垂直位移量,可以大几倍到几十倍,是真正的“活动论”观点.
地槽的开合距离一般不超过 200 km.地球的周期性涨缩(或称垂直振荡)运动是其主要的控制作用.沉积特征的主要表现为海侵与海退.相邻的两个大陆地台之间,为浅海,即地槽.	两个大陆板块中间可以是古大洋.两个大陆板块原来可以相距甚远,甚至可达数千千米,例如分别处在南、北半球.板块也可发生转动、大幅度的水平运移、适量的垂直位移和相当强的构造变形.
地台运移的下界不清楚,当时也无法讨论.	岩石圈板块主要在富含超临界流体的、塑性较强的软流圈上发生水平运移,岩石圈内部还可以形成多个局部的、近水平的构造滑脱面.
垂直运动可派生极有限的水平位移,使原来的浅海地槽,以后发生汇聚、褶皱、回返,隆升形成造山带(Orogenic belt).	两个距离很远的大陆板块,经过水平运移,与大洋汇聚,造成洋陆间的俯冲带(海沟—岛弧带),以致形成强烈的构造变形(含板内变形)、岩浆活动和变质作用,也可形成陆陆碰撞带(collision zone).但是,当碰撞带内没有形成大规模的花岗岩浆侵入时,就不一定都形成山脉,也即不一定都能形成“造山带”.
地台的构造活动性很小,相对固定,仅以垂直升降运动为主.在我国由于发现地台内可以存在较强的构造变形,遂提出了地台活化的概念,热衷于构造单元详细的分类命名.	尽管早期曾认为板块是“刚性”的.但是,后来认识到板块可以有多种方向的水平运移量和较强的板内构造变形及较少的升降量.构造活动性比槽台假说所认为的要强烈得多.
全球可以同时发生比较强烈的、影响广泛的构造运动,就称为造山幕.	由于构造变形是在岩石圈内部通过岩石缓慢的塑性变形而逐渐传递并减弱的,因而全球绝对不存在统一的、同时形成的“造山幕”.各地强烈构造变形时期基本上与地层划分的阶段,气候突变,生物绝灭,海平面大幅度升降等都同时发生.

几或十几 cm/yr.因而,各地区以致全球的构造事件的发生都是不同时的,其样式也是很不相同的.这一点在过去没有同位素测年的时候是不大好分辨的.

现在知道,全球各地区所有构造事件都只有地方性的意义.例如,早古生代晚期的加里东构造事件是北美与欧洲大陆板块碰撞的结果,在志留系与泥盆系之间形成角度不整合(图 3),其同位素年龄为 430~426 Ma (Brenchley and Rowson, 2006).

然而,我国的中朝板块,在早古生代晚期是处在古特提斯洋之中,几乎没有与其他板块碰撞,只有一点隆升与沉降的变化,主要是在中奥陶统和中石炭统之间(470~323 Ma)形成了沉积间断和地层的平行不整合;只是在其西南端产生了局部的碰撞作用,形成了上奥陶统与二叠系之间的角度不整合(谭永杰,1992).扬子板块的多数地区在早古生代晚期,也没有发生板块的碰撞作用,而只是形成了下志留统(433 Ma)与下泥盆统(约 400 Ma)之间的平行不整合接触关系(万天丰,2011).在扬子板块的西南部(广西一带)志留系与中下泥盆统之间形成角度不整合的地层接触关系,曾称之为广西运动.而在我国东南部的华夏板块则形成了中奥陶统低绿片岩系与中泥盆统砂岩之间(460~387 Ma)的角度不整合(万天丰,2011).综上所述,可以看出我国早古生代晚期的各个构造事件与欧洲的加里东构造事件绝对不是



图 3 英国加里东构造事件造成产状较平缓的下泥盆统老红砂岩盖在产状较陡立的志留系杂砂岩和页岩之上,形成角度不整合,也称为郝顿不整合(N. H. Trewin 摄制)

Fig.3 Caledonian tectonic event in the UK resulted in the sandstone and shale of Silurian with relatively vertical occurrence, which was covered by the old red sandstone of Lower Devonian with relatively gentle occurrence, and formed angular unconformity, also known as Holden unconformity (by N. H. Trewin)

同时形成构造变形及同样的地层接触关系,其动力学机制也是完全不同的.

在古生代晚期,欧洲发生了华里西(海西)构造事件,在德国南部据²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 测年结果,中欧地块与斯堪的那维亚(北欧)板块之间碰撞的同位素年龄

为 341~340 Ma(早石炭世)(Ferrara *et al.*, 1978; Kröner and Willner, 1998)。而在古生代晚期,我国绝大多数地区根本就没有发生过什么“海西期”的构造变形。只是在亚洲中部的巴尔喀什—天山地区晚古生代曾发生过 2 次构造事件,南北向(以现代磁方位为准)的碰撞作用是发生在晚泥盆世—早石炭世(385~323 Ma);而在晚石炭世—早二叠世(323~260 Ma)的断裂构造变形则主要表现为近东西向大幅度的右行走滑活动。中二叠世(272~259.8 Ma)是中朝板块的东部向北挤压、发生碰撞的关键时刻,在中朝板块的北缘形成了巴尔喀什—天山—兴安岭晚古生代碰撞带的东段(万天丰, 2018a)。

所以,在我国各地继续使用加里东和海西(华里西)阶段或造山运动的术语都是很不妥当的,那是完全不适用于我国的构造术语。其实我们地质界的老前辈也并不完全坚持全球都有统一造山幕的结论:他们早就知道欧洲的阿尔卑斯运动,过去国内外许多学者曾以为是中—新生代形成的。2004 年笔者到阿尔卑斯地区野外考察时,才知道法意等国学者早已改变认识:阿尔卑斯地区板块碰撞仅仅发生在新生代。它与我国的构造事件完全不同,我们的老前辈早就改用印支、燕山和喜马拉雅等构造事件了。所以,构造事件的术语只能具有地方性的意义,而以生物地层演化为基础的地质年代表才是适合于全球通用的。在我国的很多地质教科书中,至今还在套用加里东、海西(华里西)和阿尔卑斯运动的术语是很不妥当的,那是一种很过时的认识。

3 板块构造学说的兴起和发展

大陆漂移假说,最早是由德国古气象学家魏格纳(Wegener, 1915)正式提出的。1911 年秋天,魏格纳在研究世界地图的时候发现:地球上大西洋两岸的大陆(主要是指南北美洲与欧洲、非洲之间)的海岸线存在着相似性,具有互相吻合的现象。经过一段时间的研究,他产生了大陆不是固定的,而是可漂移的想法。他认为,在很早以前,南北美洲和非洲、欧洲可能是连在一起的,后来因为发生了大陆漂移才分开。他还发现了大西洋两岸古生物种群、古冰川分布,古气候带以及地层、岩石、构造上是遥相呼应的。例如北美阿巴拉契亚到纽芬兰一带的褶皱山系与欧洲西北部苏格兰和斯堪的纳维亚半岛的加里东褶皱山系遥相对应,都属于早古生代晚期褶皱成山,具有很好的相似性。他认为:地球上所有大陆在中生代以

前曾经是统一的巨大陆块,可称之为泛大陆或联合古陆;中生代开始才分裂并漂移,并逐渐到达现在的位置。大陆彼此之间以及大陆相对于大洋盆地间存在大规模水平运动,他就称之为“大陆漂移”。大陆漂移假说认为:大陆漂移的动力机制与地球自转的两种分力有关,即向西漂移的潮汐力和指向赤道的离极力。较轻的硅铝质大陆地块漂浮在黏性的硅镁层之上,由于潮汐力和离极力的作用使泛大陆破裂并与硅镁层分离,而向西、向赤道作大规模水平漂移或在附近移动。魏格纳(Wegener, 1915)出版的一部专著中,对于上述观点加以发展和完善。人们几乎立刻就意识到了这个假说潜在的革命性,因为它要求对地理学与地质学的全部基础理论重新进行修订。

魏格纳的假说虽然很有创新性,但确实也还存在不少问题:例如,他推测的大西洋扩张速度可以达到每年几米的速度;他一直无法解释陆壳为什么能够在密度更大的硅镁层固体岩石上漂移;他所认为的因地球自转而发生潮汐力和指向赤道的离极力其实都太小,经过计算,发现那是很难造成固体大陆漂移的。20 世纪 20 年代期间,国际地科联的地球科学家们对大陆漂移假说进行了热烈的讨论和表决,绝大多数学者都投了反对票。但是,他的大陆可能发生大规模水平运移的设想,为后来板块学说的创立奠定了重要的思想基础。

第二次世界大战之后,美苏两大国出于军事战略的需要,为了便于核潜艇的航行与隐蔽,都秘密地展开了海洋调查。美国海军部把此项秘密任务交给赫斯(Hess, 1962)负责。他在二战时期曾历任美军巡洋舰的气象、声呐观测员和舰长。由他领导普林斯顿大学地球物理学家和美、欧许多年轻学者进行了长时期的海洋科学考察。他们不仅完成了美国海军部所急需的、用声呐探测全球海洋深度和洋底地形的任务,同时还采集洋底沉积物和玄武岩样品,进行了重力、地磁、地热以及地震等一系列的地球物理探测,以研究洋底的地质构造。因而,到 20 世纪 60 年代初期,全球海洋地球物理调查与地震台网(主要是为了监测各国的地下核试验)的研究共获得了 4 项重要的学术新成果,发现了:(1)大洋脊扩张带,(2)贝尼奥夫带(即大洋板块向大陆的俯冲带),(3)大洋中脊附近存在的转换断层,(4)普遍存在年龄相当新(不超过 200 Ma)的洋底沉积物和玄武岩等。以大量实测资料为基础,赫斯(Hess, 1962)和迪茨(Dietz, 1961)最早提出了海底扩张的设想,为板块构造学说奠定了基础。

与此同时,前苏联也由海军部门让军人化妆成渔民,在全球秘密进行了洋底声呐测深,最后编辑出版了相当精致的全球海洋地形图集(大一开本)。1969年北京在疏散人口、干部大量下放到农村劳动之际,外文出版社曾到我校推销此俄文版图集,每本仅售5元,笔者曾买了一本,后转赠给学校图书馆保存,现存于武汉校区。但可惜的是,前苏联没有同时进行更多的科学研究。

板块构造学说是在1950—1960年由美欧的许多科学家在海洋调查的基础上,共同努力、创立了“海底扩张”学说,以后才逐渐完善而建立起来。F.J.瓦因和D.H.马修斯等通过海底磁异常的研究(Cox, 1969),对海底扩张学说作了进一步论证。加拿大地球物理—地质学家威尔逊(Wilson, 1965)首先提出在大洋脊上存在“转换断层”的概念,并指出:连绵不断的构造活动带网络将地球表层划分为若干刚性的板块。1967—1968年法国地质学家麦肯齐(McKenzie and Parker, 1967)、勒皮雄(Le Pichon, 1968)与摩根(Morgan, 1972)等人提出的一种新的大陆漂移说,由此就奠定了岩石圈板块构造学说的基础。他们受到大洋脊发生张裂的启发,认为从海洋到大陆均可发生水平位移的观点,认为岩石圈是在富含超临界流体的软流圈(起初他们曾以为存在熔融的岩浆层和韧性的上地幔)上运移的。法国地质学家勒皮雄(Le Pichon, 1968)把现代地球的岩石圈划分为6个大板块,即太平洋板块、亚欧板块、美洲板块、印度洋板块、非洲板块和南极洲板块。其中,除了太平洋板块全部浸没在洋底之外,其他5个板块则都既有大陆,也有海洋。随着研究的深入,有的学者在这些大板块中更进一步划分出一些较小的板块。所有这些板块,都处在具有流变性质的上地幔软流圈之上运移。1968年,美国B.L.艾萨克斯、J.奥利弗和L.R.赛克斯进一步阐述了地震与板块活动之间的联系,并将这一新兴理论称作为“新全球构造”。1969年麦肯齐和摩根正式将上述新学说命名为“板块构造”。从此,板块构造学说就广为流传。

1970年以来,板块构造学说逐渐渗透到地球科学的许多领域。总之,板块构造学说是欧美地球科学家的集体创新和逐渐认识的成果。由于这个集体研究的成果已被大量实测数据资料所证实,因此将此新认识称之为“学说”是很恰当的。当然,此学说还有不少不完善的地方,有待进一步地研究。

板块构造学说是一门正在发展中的学说,是从研究洋底构造而逐渐发展起来。当时他们曾以为板

块都是“刚性”的。例如,北美板块的美国中部地区基本上都是水平岩层,几乎没有发生过什么构造变形,只有成岩节理,几乎没有构造节理。因而,很容易使人认为北美板块主体是具有刚性特征。其实从全球的多数板块来看,它们并不都是刚性的,而是不同程度地发育着板内塑性变形,中国大陆各地块的板内塑性变形就特别强烈,中生代以来曾发生过6次运动方向不同和类型多样的构造变形。他们还曾经以为软流圈内可能存在熔融的岩浆,经过大量的地震勘探,发现上地幔的纵、横地震波在软流圈内都能穿过,这证明软流圈全都是固体的,不存在熔融的岩浆,而只是在固态的上地幔内存在较多的超临界流体而已。因而地震的纵、横波速略有降低,岩石的塑性较强,有利于上部板块的运移(万天丰, 2011)。

板块构造学说由于起源于海洋地质研究,所以后来就存在所谓“登陆”的问题。确实,相对于大陆构造而言,洋底构造是相对简单一些,而且现在洋底上主要保存了最近2亿年来的地质记录。大陆地质学家们早就认识到:大陆内部的构造变形远比大洋复杂得多,例如在一些大陆地块内存在相当广泛的板内变形和一些古碰撞带,尤其是在亚洲大陆内,纵横数千千米均可发现多期次、强弱不等的、方向各异的板内变形,这表明板块并不是刚性的。当时还没有在大陆内部进行深地震反射剖面的探测,不知道岩石圈内还可以存在很多局部的构造滑脱面:如在大陆的某些部分可以在地壳上部发生构造滑脱,形成一些低角度的逆掩断层(常在沉积岩系与变质结晶基底之间);在中地壳附近有时可存在地震波低速和高导电率层(简称低速高导层,我国大陆内很多破坏性地震都是起源于此层位);在莫霍面附近,有时也会发现一些构造滑脱面,它们的滑移量和滑移速度有时甚至与现代大陆板块运移的主滑脱面差不多。早在20世纪80年代初,张文佑先生就认识到岩石圈内可以存在多个滑脱面的。

尽管板块构造学说对于现代全球岩石圈板块构造的划分与运移,已经有了很详尽的和较为可靠的研究成果,但是对于漫长地质历史时期太古宙—元古宙板块的划分、运移和重新组合等问题则是近40多年以来大陆地质学者们所一直关注的问题,应该说这方面的研究虽已取得一些成绩,但是现在仍在继续探讨之中。

在20世纪60年代,板块构造学说刚创立时,为了解释板块为什么会运移,板块构造学说的创立者们(Le Pichon, 1960)就不约而同地想起他们的前

辈 Holmes(1931)和 Griggs(1939)的“地幔对流假说”。于是他们就想当然地引用固体地幔的韧性流变有可能造成地幔对流,以为地幔对流好像是一个传送带,只有地幔对流才能带动地球表层的岩石圈板块发生水平运移。因而“传送带模式”就应运而生,流传很广,使许多人信以为真。其后,一些地球物理学家曾提出板块俯冲时,可产生“负浮力”从而导致板块运移,认为下插的大洋板块在深部变成高密度的榴辉岩,牵引着大洋板块向下运移和俯冲,以此来解释板块为什么会运移。但是,后来不少地球物理学家都否定了他们的计算,认为他们夸大了“负浮力”的作用,而忽略了地幔深部周围岩石密度可以远远大于榴辉岩密度的事实(万天丰,2011)。

英国皇家地球物理学会理事长 Bott and Kusznir(1984)对此问题曾发表了著名的文章,说到:“与其说地幔对流带动岩石圈板块运动,不如说岩石圈板块带动上地幔运移”。因为岩石圈板块的运移速度一般为 $0.1\sim 10\text{ cm/yr}$ (全球板块的平均运移速度相当于人的指甲的生长速度,每周 1 mm ,每年平均约 5 cm 左右),运移速度最快的印度板块在白垩纪一度可达 $18\sim 20\text{ cm/yr}$ 左右,而根据大量发育在洋底的、形成于中、上地幔的热点(hot spot,在地表则表现为玄武岩喷发的火山)的位移速度来判断,固体地幔的水平位移量一般仅为 $n\text{ mm/yr}$,绝对都小于 2 cm/yr ,小一个数量级的地幔水平运移速度是不可能带动速度较快的岩石圈板块运移的。因而,所谓的“地幔对流”是不可能带动岩石圈板块运移的。应该说,用地幔对流来带动岩石圈板块运动的假说早已破产。不过,美国一些地球物理学者一直不肯承认上面这些事实,总想制造出一些地幔运移速度大于岩石圈板块的成果来。他们也知道几十年过去了,板块构造的动力学机制问题至今仍未解决,到底什么是真正的岩石圈板块运移的动力学机制呢?尚有待深入研究。

中—新生代大陆和洋底构造的资料较多,已经有了一些比较有根据的假说:当太阳系(含地球)每隔 33 Ma 左右就要穿越一次星际物质密集的银道面时(Rampino and Stothers,1984,1988),就极易发生大型陨石(其直径可大于 1 km)撞击地球,它们在不同时期、不同部位以不同角度撞击地球表面,诱发地幔底辟、岩浆活动和火山喷发,从而使岩石圈板块发生不同样式、不同速度和不同方向的运移。现在看来,巨大陨石的撞击作用可能是中生代板块运移的主要诱发因素和动力作用来源(万天丰,2011,

2018b)。但是,由于中生代以前很多洋底和大陆的地质记录和板块运移还缺乏可靠资料,至今对于中生代以前全球板块构造的动力学机制问题,暂时还很难下结论,所以只好期待将来慢慢地解决。

4 个人的体会

在马杏垣先生诞辰 100 周年之际,回顾往事,我深感马先生在构造地质与大地构造学的造诣很深,他的学术功底很扎实,对于学科发展有着很长远的战略眼光。我有幸能在马杏垣和庄培仁教授的直接指导下,在 20 世纪 60 年代,从扎实地做好野外地质构造研究开始,他们要求我从最小的看得见、摸得着的构造变形—节理开始研究各个时期的构造变形,弄清其时空演化的特征;从实际资料比较丰富的中生代构造变形开始、比较扎实地研究小区域的构造应力场,以后才可逐步扩大自己的视野,研究更古老的区域大地构造。应该说,我的学术成长道路,正是在马杏垣和庄培仁教授的指引下前进的。我校在 20 世纪 80 年代曾流传着“胡(家杰)断层,贾(精一)褶皱和万(天丰)节理”之说,这就是当时中青年教师研究方向各有所长的一种表现。而不是急于让教员们一下子去研究大地构造学。所以,我们学校自建校以来,从本科生到博士生的专业设置上,从来都不设“大地构造学专业”,以免误导学生。

马先生对于我校的另一个重要贡献是在 1978 年,他曾带头组织了我校几十位教师联名上书邓小平同志,要求在全国基础科学的研究中心(北京),保留我校的研究生部,从而得到邓小平同志的亲自批准,使我校的北京部分能得以保存,并逐渐得到发展。遗憾的是,为此,他却受到个别上级领导人的惩罚,被迫离开了我们学校,而无法再回学校工作。

在我出国进修回来之后的 20 世纪 80 年代初期,我与郭铁鹰、吕新媛、王维襄、刘和甫等老师经常在一起讨论如何进一步研究与发展大地构造学的问题。我们都深感我国的老前辈们,有的十分关注地质建造和时代演化的研究,有的则十分重视构造变形的空间组合规律的研究,然而两者结合得比较差,而且还有一定程度的互相排斥现象。如何将两者结合起来就是一大难题。显然,必须从系统掌握大量原始资料入手,才有可能解决。而我过去只在小区域内进行系统的构造变形与演化的研究,要在一个小地区通过对各时代的地层内测定数千条节理来进行综合分析。如果真想要推广到全国,可能大概要测几千万

条节理才行,这么大量的工作量怎么能够完成呢?正当我一筹莫展之际,老同学郭铁鹰就提醒我说:“你为什么不用区域地质图中的纵弯褶皱来恢复区域构造应力场呢?”,他这么一句话就使我茅塞顿开。

从 1984 年开始,我就花了 10 年时间,在完成各项教学和科研任务的同时,抽空到我校资料室、航遥中心的资料室、地质图书馆和地质资料局去系统阅读和收集全国绝大部分地区比例尺为 1:20 万(新疆与西藏地区的比例尺则为 1:100 万)的地质图内的地层、岩浆活动和地质构造的原始资料,对于白垩纪以来的构造则认真研究“中国石油地质图集”(内部发行)内的构造资料,以及近年来大量实测的同位素测年成果。据我所知,至今全国还只有我一人做了这个工作量巨大而又十分繁琐的研究工作。

好在当时我阅读和收集这些资料时,只要开一封介绍信就可以进行,并且只需花很少的费用去复制一些重要的图件。如果在现在,我很可能就没有那么多的经费来支持这项研究了。当时,朱鸿老师帮我系统整理和计算了全球和我国各地块的古生代以来的古地磁资料。老同学吕新媛就帮我进行了繁琐的计算(当时使用的计算机是仿造美国二次世界大战时期所用的电子管计算机)数据的输入和计算。老同学任之鹤则帮我整理与计算了许多地壳变形的数据。路凤香和赵崇贺老师就给我介绍了岩石学研究的许多最新成果与新概念。我们教研室的同事曹秀华则帮我透射电子显微镜下观测石英的晶格位错密度,以计算出近千个不同时代的古构造应力值的大小。20 世纪 80—90 年代,我每到一个省的某一矿区进行矿田构造研究时,总要同时把该省全部的区域地质构造资料进行收集与总结,以便扩大自己的视野,了解区域构造的背景,以免当“井底之蛙”。

经过十几年的地质构造资料的收集、整理与消化,同时结合我在全国大部分省区的野外地质实践,对各个省区的地质构造资料进行系统地分析研究,到 2000 年我终于得到王鸿祯先生的支持,开始编写中国大地构造学的初稿,2004 年出版了《中国大地构造学纲要》(万天丰,2004)。以后经过多方面地听取意见和在教学过程中与博士生们的共同探讨,终于在 2011 年出版了《中国大地构造学》(万天丰,2011; Wan, 2011)。应该说,随着科学研究的进展和新资料的不断涌现,现在已经发现在我的著作中,有 20 多个错误或表述得不够准确的地方,有待今后再版时改正。总之,大地构造学是一门随着科学技术的发展,需要不断改进和不断纠正自身错误的学科。我

们现在能得到的一些认识都只是暂时的相对真理,不可能得到最终的“绝对真理”。

2012 年起,我得到我国地质调查局和地质科学院矿产资源研究所的支持,负责编制“亚洲大地构造图”。由于在 20 世纪 90 年代,我是国际地质对比计划(IGCP)“冈瓦纳裂解与亚洲增生”项目的秘书长及中国工作组组长。每年我都能出国去参加学术研讨会,并且到许多亚洲国家去进行野外地质考察,增加了不少感性认识,结识了不少同行和朋友,他们给了我许多宝贵的地质资料,这就为我编制亚洲大地构造图和撰写《亚洲大地构造与大型矿床》(中文版,2018 年 4 月高教出版社出版;英文版,将于 2019 年地质出版社与 Springer 联合出版)打下了良好的基础。此书是为在“一带一路”服务的地质工作者提供地质构造和矿产资源背景资料而撰写的。

有的好心的朋友曾劝我说:“年纪这么大了,都退休了那么长时间,何必还要搞什么科学研究?”,其实,在我研究资料和撰写文章的过程中,经常是在轻音乐伴奏下进行的。这就好像在音乐伴奏下奶牛可以多出奶是一个道理,是一件很愉快的事情。不过,面对现在国内流行着一种“不读书、不看报”状况来说,我也许真的有点像孔夫子所说的,是一个“痴书不疑者,愚夫也”。

总之,大地构造学是一门不断艰难前进的学问,需要我们坚持不懈地进行探索,努力地获得新知识,从一切学科中吸取营养,切不可墨守陈规,不能急功近利,也不能过分自信,需要不断地修正自身的错误认识,使我们对于大地构造的认识逐渐地向真理靠拢。当然,在艰难的探索过程中,这也是一件十分有趣和很有价值的事情。相信在促进人类社会发展的过程中,对于大地构造学的认识必将逐步取得更大的成就。

References

- Bott, M. H. P., Kuszniir, N.J., 1984. The Origin of Tectonic Stress in the Lithosphere. *Tectonophysics*, 105:1-13.
- Brenchley, P.J., Rowson, P.E., 2006. The Geology of England and Wales(2nd Edition). The Geological Society of London, London.
- Cox, A., 1969. Geomagnetic Reversals. *Science*, 263: 237-245.
- Dietz, R. S., 1961. Continent and Ocean Basin Evolution by Spreading of the Sea Floor. *Nature*, 190:854-857.
- Ferrara, G., Ricci, C.A., Rita, F., et al., 1978. Isotopic Age and Tectono-Metamorphic History of Metamorphic Base-

- ment of North-Eastern Sardinia. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 68:99—106.
- Griggs, D. T., 1939. Creep of Rocks. *Journal of Geology*, 47 (3):225—251.
- Hess, H. H., 1962. History of Ocean Basins. In: Engel, A. E., James, H. L., Leonard, B. F., eds., *Petrologic Studies: A Volume in Honor of A. F. Buddington*. Geological Society of America, Boulder, 599—620.
- Holmes, A., 1931. Radioactivity and Earth Movements. *Trans. Geol. Glasgow*, 18:559—606.
- Huang, J. Q., 1960. The Main Characteristics of the Geological Structure of China: Preliminary Conclusions. *Acta Geologica Sinica*, 40(1):1—31, 135 (in Chinese).
- Huang, J. Q., Chen, B. W., 1987. The Evolution of the Tethys in China and Adjacent Regions. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Huang, J. Q., Ren, J. S., Jiang, C. F., et al., 1977. An Outline of the Tectonic Characteristics of China. *Acta Geologica Sinica*, 51 (2):117—135 (in Chinese with English Abstract).
- Huang, J. Q., Zhang, Z. K., Zhang, Z. M., et al., 1965. Eugeosynclines and Miogeosynclines of China and Their Development of Multi-Gyration. In: Professional Papers of Academy of Geological Sciences, Section C: Regional Geology and Structure Geology, No. 1. Industry Publishing House of China, Beijing (in Chinese).
- Jiang, C. F., 1994. From the Polycyclic Theory to Open-and-Close Tectonics. *Acta Geoscientia Sinica*, (3—4): 103—112 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, C. F., Yang, J. S., Feng, B. G., et al., 1992. The Open and Close Structure of Kunlun. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Kröner, A., Willner, A. P., 1998. Time of Formation and Peak of Variscan HP-HT Metamorphism of Quartz-Feldspar Rocks in the Erzgebirge, Saxony, Germany. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 132:1—20.
- Le Pichon, X., 1960. The Deep Water Circulation in the Southwest Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, 65 (12): 4061—4074.
- Le Pichon, X., 1968. Sea-Floor Spreading and Continental Drift. *Journal of Geophysical Research*, 73: 3661—3697.
- Ma, X. Y., 1987. Fundamental of Lithospheric Dynamics of China. Cartographic Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ma, X. Y., 1989. Lithospheric Dynamics Atlas of China. China Cartographic Publishing House, Beijing (in Chinese).
- McKenzie, D. P., Parker, R. L., 1967. The North Pacific: An Example of Tectonics on a Sphere. *Nature*, 216: 1276—1280.
- Morgan, W. J., 1972. Plate Motions and Deep Mantle Convection. *Geological Society of America Memoir*, 132:7—22.
- Rampino, M. R., Stothers, R. B., 1984. Terrestrial Mass Extinctions: Cometary Impacts and the Sun's Motion Perpendicular to the Galactic Plane. *Nature*, 308 (5961): 709—712.
- Rampino, M. R., Stothers, R. B., 1988. Flood Basalt Volcanism during the Past 250 Million Years. *Science*, 241 (4866): 663—668.
- Stille, H., 1924. Grundfragen der Vergleichenden Tektonik. Borntraeger, Berlin, 1—443.
- Tan, Y. J., 1992. The Tectonic Deformation and Its Evolution of the Southern Margin of Ordos Basin, China (Dissertation). China University of Mining & Technology, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wan, T. F., 2004. Outline of Chinese Geotectonics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wan, T. F., 2011. Chinese Geotectonics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wan, T. F., 2011. The Tectonics of China—Data, Maps and Evolution. Higher Education Press, Beijing; Springer, New York.
- Wan, T. F., 2018a. Asian Tectonics and Giant Ore Deposits. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Wan, T. F., 2018b. On the Dynamic Mechanics of Global Lithosphere Plate Tectonics. *Earth Science Frontiers*, 25 (2):320—335 (in Chinese with English abstract).
- Wan, T. F., Zhu, H., Zhao, L., et al., 1996. Formation and Evolution of the Tancheng-Lujiang Fault Zone. China University of Geosciences Press, Wuhan.
- Wegener, A., 1915. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Vieweg, Braunschweig.
- Wilson, J. T., 1965. A New Class of Faults and Their Bearing on Continental Drift. *Nature*, 207:343—347.
- Yang, W. R., 1992. Law of “Opening and Closing” in Geosciences and Its Application to the Study of Orogenic Belts. *Geological Science and Technology Information*, 11(3):5—9 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K., 1998. A Theory of Fault-Block and Opening-Closing Tectonics—A New Thought in China's Tectonic Study. *Geological Review*, 44(5):449—455 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 黄汲清, 1960. 中国地质构造基本特征的初步总结. *地质学报*, 40(1):1—31, 135.
- 黄汲清, 陈炳蔚, 1987. 中国及邻区特提斯海的演化. 北京: 地质出版社.

- 黄汲清,任纪舜,姜春发,等,1977.中国大地构造基本轮廓.地质学报,51(2):117—135.
- 黄汲清,张正坤,张之孟,等,1965.中国的优地槽和冒地槽以及它们的多旋回发展.见:地质科学研究所论文集,丙种:区域构造地质,第1号.北京:中国工业出版社.
- 姜春发,1994.从多旋回说到开合构造.地球学报,15(3—4):103—112.
- 姜春发,杨经绥,冯秉贵,等,1992.昆仑开合构造.北京:地质出版社.
- 马杏垣,1987.中国岩石圈动力学纲要.北京:地图出版社.
- 马杏垣,1989.中国岩石圈动力学地图集.北京:地图出版社.
- 谭永杰,1992.鄂尔多斯盆地南缘构造变形及其演化(博士学位论文).北京:中国矿业大学.
- 万天丰,2004.中国大地构造学纲要.北京:地质出版社.
- 万天丰,2011.中国大地构造学.北京:地质出版社.
- 万天丰,2018a.亚洲大地构造与大型矿床.北京:高等教育出版社.
- 万天丰,2018b.论全球岩石圈板块构造的动力学机制.地学前缘,25(2):320—335.
- 杨巍然,1992.地学“开合律”及其在造山带研究中的意义.地质科技情报,11(3):5—9.
- 张抗,1998.断块开合说——中国大地构造研究的新思维.地质论评,44(5):449—455.