引用格式：童亨茂，2025. 李四光对地质力学（Geomechanics）的开创性贡献：纪念李四光诞辰 135 周年[J]. 地质力学学报，31（1）：1−7. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024085

Citation: TONG H M，2025. J. S. Lee's pioneering contribution to Geomechanics：the 135th anniversary of J. S. Lee's birth[J]. Journal of Geomechanics，31（1）：1−7. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024085

李四光对地质力学（Geomechanics）的开创性贡献——纪念李四光诞辰 135 周年

童亨茂[1,2]

TONG Hengmao[1,2]

1. 中国石油大学（北京）油气资源与探测国家重点实验室，北京 102249；
2. 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249

1. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Exploration*, *China University of Petroleum* (Beijing), *Beijing* 102249, *China*;
2. *Geoscience institute*, *China University of Petroleum* (Beijing), *Beijing* 102249, *China*

J. S. Lee's pioneering contribution to Geomechanics：the 135th anniversary of J. S. Lee's birth

Abstract: ［**Objective**］The Chinese academic community is well known for J. S. Lee's creation of geomechanics, but the academic community's understanding of "geomechanics" is still different, and some scholars have doubts about J. S. Lee's creation of geomechanics. As a result, the understanding of J. S. Lee's academic contributions is biased, and there is also an obvious dispute whether J. S. Lee's Geomechanics and geomechanics as used by the international community belong to the same term, which will more or less affect the use of geomechanics terms and the development of the discipline. ［**Methods**］On the basis of long-term practice in geomechanics research, the author, through systematic study and analysis of J. S. Lee's geomechanics works (especially J. S. Lee's book entitled "Fundamentals and Methods of Geomechanics", 1945 edition), combined with in-depth research and analysis. ［**Results & Conclusion**］The author confirms that J. S. Lee not only founded geomechanics, but also made a number of groundbreaking contributions to geomechanics such as proposing the concept of principal stress plane and principal stress; introducing the Mohr's circle into the analysis of structural deformation mechanics; establishing the analytical expression of the generalized Hooke's law, etc. On this basis, the geomechanics established by J. S. Lee is briefly reviewed, and the development history and prospects of geomechanics are concisely summarized and envisioned. ［**Significance**］This article was completed on the 135th anniversary of J. S. Lee's birth to commemorate his pioneering contributions to geomechanics.

Keywords: J. S. Lee **;** Geomechanics**;** mechanical analysis of structural deformation**;** tectonic system

摘　要：中国学术界熟知李四光创立了地质力学，但学术界对该"地质力学"的理解还存差异，部分学者对李四光创立 Geomechanics（地质力学）还存在疑问，导致对李四光学术贡献的理解存在偏颇，对李四光创立的"地质力学"和国际上使用的"geomechanics"属于同一术语还明显存在争议，这或多或少地影响地质力学（Geomechanics）术语的使用和该学科的发展。笔者在长期从事地质力学研究实践的基础上，通过对李四光地质力学著作（尤其是李四光 1945 年版的《地质力学之基础与方法》一书）的系统研读和分析，结合深入的调研分析，确认李四光不仅创立了地质力学（Geomechanics），而且对地质力学及构造变形力学分析有一系列开创性贡献，如提出主应力平面和主应力的概念；把摩尔圆引入构造变形力学分析；建立了广义胡克定律的解析表达式等。在此基础上，简要评述了李四光创立的地质力学，并简要回

基金项目：国家自然科学基金项目（41272160，20772086）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants No. 41272160 and 20772086).

第一作者：童亨茂（1967—），男，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

收稿日期：2024−11−06；**修回日期：**2024−12−29；**录用日期：**2025−01−12；**网络出版日期：**2025−02−02；**责任编辑：**吴芳

顾了地质力学的发展历史并展望其发展前景。该文在李四光诞辰135周年之际完成，以此纪念其对地质力学的开创性贡献。

关键词：李四光；地质力学；构造变形力学分析；构造体系
中图分类号：P55 **文献标识码**：A **文章编号**：1006−6616(2025)01−0001−07
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024085

0 引言

李四光是中国最为著名的科学家之一。笔者虽然早知道李四光这个名字，但开始了解他是在北京大学地质系学习期间。笔者基于构造地质与地质力学这一专业，主修了多门与地质力学有关的课程(地质力学概论、固体力学、弹性力学、构造应力场等)，这些课程为笔者后续从事和发扬地质力学打下了坚实基础。授课教师包括邵济安、王仁、丁中一、殷有泉等教授(其中王仁和丁中一是地质力学界很有影响的学者)，当时老师们在课堂上均会或多或少地提到李四光，并不断表达对他的崇敬之情。但这一阶段笔者对李四光的了解总体是比较浅表的。

随后在笔者研究生求学期间，导师钱祥麟教授也多次提到过李四光，还展示了与李四光的合影，对李四光的崇敬之情溢于言表。另外中国显微构造地质学的奠基人刘瑞珣教授也多次提到过李四光。刘瑞珣教授介绍了李四光的很多生动事迹，特别强调李四光深厚的学术功底、科学报国情怀以及他的多才多艺。在此期间，笔者对李四光的印象不断加深。

到中国石油大学(北京)工作后，笔者的研究方向主要为构造物理模拟、储层裂缝预测和盆地构造(主要是断裂)分析等方面，核心是破裂(断层和节理)的力学机理，本质上从事的就是地质力学(Geomechanics)。工作期间，由于笔者长期对科学的执着追求和在北大求学期间打下的扎实地质力学学科基础，以及油气工业界的需求和支持(如石油部支持建立构造物理模拟实验室、海量的高精度三维地震资料和钻测井资料、以及开发压裂资料)，经过二十多年的不断探索，在断层基础理论方面取得了突破性的进展，创立了广义断层理论(广义剪切活动准则和广义断层模式的合称)和摩尔空间的理论和方法。广义断层理论把经典的剪切破裂准则(Coulomb-Mohr 准则及 Byerlee 律；Byerlee, 1978)和 Anderson 断层模式统一起来，并把 Anderson 断层模式扩展到有先存构造的非均匀介质(适用于实际地质体)及断层的活动演化分析(童亨茂等，2015, 2024)，发展了地质力学的基础理论。

在研究和文献调研过程中，已故的刘瑞珣教授曾给予笔者很大的帮助和支持，并提供了李四光1945年版的《地质力学之基础与方法》一书。但该书是繁体字版的，阅读比较困难，没有深入研读。后来在地质力学所的帮助下，得到了该书的简体文字版(后来重编的，但内容保持原貌)。笔者怀着极其崇敬的心情专心一致地研读了全书，并作了标记和评述。在研读此书的过程中，笔者受到了很大的震撼：①深刻体会到李四光数理和地质功底的深厚；②《固体力学基础》和《构造地质学》的很多基础知识的源头在这里；③笔者在《地质力学概论》课堂中学到的和后来听到的(主要是大地构造上的认识)与书中阐述的“地质力学”存在很大的差距；④大众对李四光创立的地质力学缺乏足够的了解，理解存在偏差。研读完本书后，结合李四光纪念馆的参观和相关的思考，对李四光和地质力学的认识得到了很大的深化，也激发了撰写文章的冲动。同时笔者对能为地质力学的发展有所贡献感到无比欣慰和自豪。

通过笔者的调研和梳理，发现了李四光在地质力学中有多方面开创性的贡献。考虑到调研的难度(时代的久远)和水平的限制，文章中仅阐述李四光几个能落实的开创性成果；并在此基础上，简要评述李四光创立的地质力学，回顾和展望地质力学的发展历史和前景。

1 创立了地质力学(Geomechanics)

中国学术界熟知李四光创立了地质力学，但对该“地质力学”的理解不同学者还存差异，导致对李四光学术贡献的理解存在偏颇。Zoback(2007)出版了《储层地质力学》(Reservoir Geomechanics)，在石油工业界有巨大影响。在中译版《储层地质力学》

的序言中译者特别强调指出，这里的“Geomechanics”（地质力学）不是李四光的“地质力学”，相信持该观点的大有其人。

由于多种可能的原因（如地质力学基础部分本身很难教也很难学，结果教的少，学生掌握的更少，学习和了解的大多是李四光用地质力学推演的认识，尤其是大地构造方面的认识；由于各种原因，李四光用地质力学对中国大地构造的认识，即地质力学假说影响太大了，反而让人误以为李四光创立的地质力学就只是解释中国和东亚大地构造的地质力学假说或地质力学学派），很多人认为（包括笔者早期的认识），李四光的地质力学只是中国大地构造的一个学派，缺乏对李四光创立的地质力学的整体认识。

系统研读李四光的地质力学著作（尤其是《地质力学之基础与方法》一书）后不难发现，李四光系统阐述了地质力学的基本概念、基本原理和构造变形分析的基本方法，以及构造变形的基本特征和规律（尤其是构造体系思想的提出），涵盖了地质力学的基本内容，且这些认识多是开创性的，这才是地质力学的核心和精华，而李四光对中国及东亚大地构造的地质力学假说（还包括其他的中国大地构造学派）恰恰是具有时代局限性的（可以说已被板块构造理论完全取代了）。对地质力学的认识是该回归到本源（地质学和力学的交叉学科，即 Geomechanics）的时候了。

另外还有一个需要澄清的问题。有人曾告诉笔者，地质力学（Geomechanics）是 Taylor 首先提出的（言外之意是对李四光创立地质力学有疑问），笔者当时没有掌握足够的资料，也没有深入的思考，也就没有进行辩驳，但意识到有这种疑问的很可能不是一个人，有必要调研和澄清一下。

泰勒（Taylor）在 1928 确实提出了 Geomechanics 这一名词（之后还有其他一些学者）也作了一些研究（李四光，1945）。但李四光是最早系统论述地质力学（见李四光 1945 年编写的《地质力学之基础与方法》）的学者，是地质力学的创始人。就像“大陆漂移说”一样，法国学者斯纳德（Snider）于 1858 和美国地质学家泰勒（Taylor）在 1910 等也曾论证过大陆漂移（金性春，1984），但不成体系，一般公认德国气象学家和极地探险家魏格纳才是大陆漂移学说的创始人。

实际上，李四光（1945）在《地质力学之基础与方法》一书的序言中也明确指出以前曾经有人用过“地质力学”这一名词，但指出均没有进行系统的研究：“拟议中的地质力学这一名词，实际上并不需要这样的辩护，但是应该指明的是：曾经用过这个名词的人们，大都各人所指的只是地质力学的某一方面，甲所指的一方面往往与乙所指的一方面不同。”

2　提出主应力平面和主应力的概念

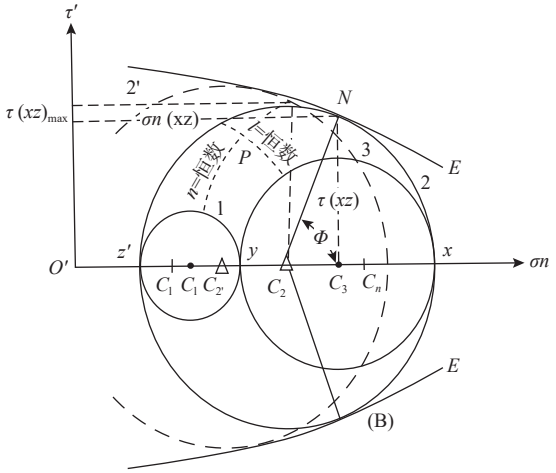
李四光通过直角四面体（其中 1 个角顶对应的 3 个角均为直角）的受力平衡分析及其平衡方程的建立，发现存在 3 个相互垂直的面，其剪应力均为零（详细推导见《地质力学之基础与方法》一书中的 p13-16）。李四光命名这 3 个面为主平面（现在称主应力平面），并命名对应面上的正应力为主应力，进一步提出应力椭球的概念。虽然应力椭球在实际应用难度很大，目前实际应用的人很少，但主应力平面和主应力已成为地质力学（包括固体力学、弹性力学、构造地质学）中最基本的概念。

3　把摩尔圆引入构造变形力学分析

应力摩尔圆由 Otto Mohr 于 1882 提出，被认为是构造地质学中应用最广、最有价值的基本力学分析工具（Coelho and Passchier, 2008），并被广泛应用到诸如应力分析、破裂包络线、裂缝开启、先存构造重新活动等方面的研究分析中（Brace, 1961; Ramsay, 1967; Means, 1983; Delaney et al., 1986; Morris, et al., 1996; Jolly and Sanderson, 1997; Morley, et al., 2007; CÉlÉrier, 2008），也做为《构造地质学》中英文教材（Twiss and Moores, 1992; 徐开礼和朱志澄，1998）中重要的基础知识。因 Ramsay（1967）的专著（《Folding and Fracturing of Rocks》）在构造地质界有较大的影响力，可能导致有些人认为是 Ramsay 首先将摩尔圆引入到构造地质学领域的。

笔者创立摩尔空间的理论和方法后（Tong and Yin, 2011; 童亨茂等，2014），因发表论文的需要，对摩尔圆的发展历史进行了深入的调研，当时发现瑞典的地质学家 Brace（1961）应用摩尔圆比 Ramsay 要早。后来经刘瑞珣教授的提示，翻阅了李四光（1945）的《地质力学之基础与方法》一书，结果十分吃惊地发现摩尔圆赫然在此书中（图 1）。李四光在该书中不仅表述了三轴摩尔圆（图 1），而且还推导

出了任意方位界面正应力和剪应力理论上的解析表达式(界面用方位向量表示)。李四光把摩尔圆引入构造变形力学分析实际上比 Brace 还整整早了16年,这虽然不为世人所知,但可以确定李四光是最早把摩尔圆引入构造变形力学分析的科学家。



图中的参数描述参见文献李四光, 1945

图 1 三轴应力三轴摩尔圆图解(李四光, 1945)

Fig. 1 Diagram of triaxial Mohr's circles (J. S. Lee, 1945)

The parameters in the figure are described in the literature (J. S. Lee, 1945).

4 建立了广义胡克定律的解析表达式

广义胡克定律是地质力学、弹性力学、固体力学等学科有关弹性介质最基本的本构方程(应力–应变的关系方程)。笔者第一次见到广义胡克定律是在王仁等(1979)主编的《固体力学基础》一书(这是笔者最常翻阅的几本参考书之一)中,是本科上学时接触的。后来在 Jaeger and Cook (1979)编写的《Fundamental of Rock Mechanics》(这是国内外岩石力学的经典参考书,也是笔者最常翻阅的几本参考书之一,该书的第一版是 1969 出版的)也见到了广义胡克定律,但一直不知道出处。后来研读了《地质力学之基础与方法》后发现,广义胡克定律原来是李四光首先建立的。

李四光应用介质泊松效应(属于当时的新发现),建立了线应变与正应力之间的解析表达式,并利用剪应变与角度变化的关系,建立了剪应变与剪应力的解析表达式,详细的推导过程见该书 p9-13(李四光, 1945),从而构成完整的广义胡克定律。后来笔者通过反复求证(包括与已故的刘瑞珣教授一起开展讨论求证),确定这是广义胡克定律(各向同性介质)的原始出处。

5 其他一些开创性的工作

(1)在岩石的变形习性方面,李四光率先指出岩石具有流变特征(书中称“柔性静流”和“软流”;李四光, 1945),并进一步指出流变体变形不存在屈服强度点(书中称“软化点”);理论上任何大小的外力均可以导致流变。这些认识在当时是十分超前的。

(2)在岩石样品的应力–应变关系方面,李四光建立了岩石的应力–应变曲线模式,把岩石样品变形划分为 3 个阶段:弹性变形、塑性变形及最后的破坏,并提出了屈服强度的概念(书中称“软化点”;李四光, 1945),并沿用至今,后人只作了一些微小的修正。

(3)在脆性变形方面,李四光已明确指出存在2种破裂方式:扩张破裂和剪切破裂(书中称“分裂”和“滑动”;李四光, 1945)。但李四光时期,对剪切破裂机制的认识还存在局限(指出应可以用最大剪应力来确定,实际上均匀介质的情况下,剪切破裂面是方位优选的,并非是剪应力最大的面 Anderson, 1951);正交节理的成因也缺乏正确的理解,认为与 X 剪破裂的成因类似,正交节理的成因虽然目前还存在一些争议,但能确定不是 X 剪破裂(Pollard and Aydin, 1988)。

(4)在岩石样品和地质体强度的差异方面,李四光指出,岩石在自然环境下的强度很可能与实验室大不相同,并指出先存破裂是重要的影响因素。

(5)在构造变形解析方面,李四光有很多开创性的认识。李四光(1945)指出,探索地壳活动的原因,不能从岩石的强度着眼,而应该对不同区域地质体的变形结果加以分析;提出递进变形过程中构造序次的思想;指出擦痕的方向要进行构造变形复原后,才能反映当时的滑动方向;李四光(1945)已注意到逆冲带的变换断层,但成因机理分析存在问题(认为与 X 剪破裂的成因一致,实际上是调节位移的变换断层)。李四光已提出构造解析的思想,但书中没有细化到具体的操作方法(“因可寻之途径甚多,而且难立一定之方式,兹故略之”)。

(6)在构造变形模式方面,李四光(1945)提出了构造体系(tectonic system)、构造样式(构造型式,tectonic type)的概念和思想;提出褶皱递进变形过程

中，各种裂缝的发育模式，这一模式目前还在普遍使用；李四光描述了几乎所有类型的构造现象，并对成因加以分析（当然存在不当之处）。其中构造体系（“构造体系是许多不同形态、不同性质、不同等级和不同序次，但具有成生联系的各项结构要素所组成的构造带以及它们之间所夹的岩块或地块组合而成的总体”；李四光，1973；李四光，1976）思想的提出，指出了各种构造间具有成生联系，分布和组合是有规律的，这对构造组合和演化规律的认识具有开创意义。

李四光已指出递进变形过程中，应力场会发生变化。这在当时是一很超前的认识，至今很多人还未充分理解这一点，如目前还经常能看到“燕山期的应力场”和“喜山期的应力场”等不规范表述，恰当的表述应是“燕山期的构造应力体制”和“喜山期的构造应力体制”。

李四光在地质和力学结合的方面，还有很多工作是开创性的，上面罗列的仅为其中的一部分。

6　地质力学的简要评述和发展展望

6.1　地质力学的简要评述

李四光创立了地质力学，是对地质学分支学科的系统贡献。纵观中国科学史，在学科领域中有这样系统贡献的科学家也是为数不多的。李四光在地质学科中的贡献应得到充分的理解和肯定。

然而，学科是发展的，真理是相对的，对李四光盲目崇拜和对其所创立的地质力学全盘接受是不可取的（当然也不能走另外一个极端）。每一个学科在发展过程中都会面临在一定时期有其局限性问题，地质力学也是如此。

地质力学对揭示地质体变形（构造）的力学机理、确定构造变形的发展过程及分布和演化规律等确实能发挥其他学科不可替代的作用，对矿产资源的勘探和开发确实有现实的指导作用。地质力学的很多基本概念、基本原理和基本方法在固体力学、弹性力学、构造地质学等学科中得到继承和发展。地质力学展示出了很强的生命力。然而，尝试用地质力学来系统地解决大地构造问题（如盆地和造山带的形成演化及成因机制、岩石圈大规模水平运动的成因机制、岩石圈活动的驱动机制等问题）确实存在一定的困难，尤其是李四光创立和发展地质力学的时代（20 世纪 40～70 年代）更为如此。

细致分析李四光对中国和东亚的大地构造的认识就可以发现，有些认识是牵强的（如用“山字形”构造解释青藏高原东侧的走滑构造带）、有些认识是存在时代局限的（如李四光用“新华夏系”来解释亚洲东部构造的形成演化，其科学性就明显不如目前应用板块构造理论取得的认识，其中第二沉降带（李四光，1973）的松辽平原、华北平原（相当于渤海湾盆地和松辽盆地）实际上不是一个时代形成的沉降带（渤海湾盆地是新生代形成的裂陷盆地，而松辽盆地则是中生代的裂陷盆地））、有些认识已被证明是不正确的（如李四光对地壳活动的驱动机制是采信了魏格纳的观点，主要是地球自转的离极力和惯性偏向力。他虽然也用物理模拟实验进行了验证，但模拟实验完全缺乏相似性。他在实验中自转的转速超过地球实际转速的一百万倍以上）。因此，李四光地质力学著作中部分关于大地构造的观点和认识是需要扬弃的。

由于地质构造的复杂性、影响的多因素性、演化的长期性等原因，应用地质力学解决构造（包括区域构造和局部构造，俗称“小构造”，Structural Geology）的形成演化和成因机制问题是比较现实的（当然需要资料的充分配合），但要用地质力学很好地解决大地构造的很多问题（如整个岩石圈的形成演化和驱动机制问题等）在目前看来是有困难的，恐怕在可以预见的将来也难以实现。当然，也有一些地质力学在大地构造研究方面的案例，如应用物理模拟和数值模拟来研究板块俯冲过程和机理。

通过上述分析，笔者尝试着对地质力学重新进行界定：地质力学（Geomechanics）是李四光创立的地质学和力学的交叉学科，主要研究地质构造的力学机理、确定构造变形的发展过程及分布和演化规律的一门学科。其中“地质构造”的规模可以随着地质力学的发展而不断扩大，但目前还主要局限在构造（包括区域构造和局部构造，Structural Geology）的范畴。

6.2　地质力学的发展历史简述

李四光创立地质力学以后，按照笔者的理解，地质力学经历了几个快速发展时期。

中华人民共和国成立后，国家百废待兴，国家对矿产资源的需求十分迫切，加上李四光担任地质部部长，地质力学进入了第一个发展期，并持续到 20 世纪 70 年代。在此期间，北京地质学院率先于 1964 年在区域地质教研室中成立地质力学教学小

组，1970年根据周总理提议、两次请示李四光部长后，1971年开始筹建地质力学系，1973年开始招收工农兵学员。此后，北大地质系和其他多个地质学院新设立了地质力学专业。地质力学研究所的建立是这一阶段的重要标志。这一时期，主要是地质力学在国内的传播和应用为特征，在中国矿产资源的勘探开发发挥了极其重要的指导作用。

第二个快速发展阶段为改革开放初期到上世纪80年代末。这一阶段，北京大学力学系的王仁、丁中一、殷有泉等多位教师加盟到地质系，并开设了《固体力学》《弹性力学》《构造应力场》等多门地质力学的基础课程，王仁，丁中一，殷有泉于1979年出版的《固体力学基础》是这一阶段的标志性成果。这一阶段地质力学的发展主要表现为基础理论的深化和人才培养，多位（如美国地质学会的最高奖——彭罗斯奖获奖者尹安教授是其中的杰出代表）在地质与力学结合方面作出杰出贡献的地质学家是这一阶段打下的基础。

第三个快速发展时期为2010年至今，以中国页岩气工业开发的突破作为起点。随着油气勘探开发的快速发展，尤其是页岩气的大规模水平井压裂开发，以及Zoback（2007）《储层地质力学》专著及中译本的出版，国内外油气地质领域地质力学的研究又迎来了一个新的热潮。中国石油集团公司、中国石化集团公司和中国海洋石油集团公司设立了多个地质力学的专项课题，并对地质力学的高级人才求贤若渴，对地质力学的发展带来了新的机遇，并取得了一系列进展，其中破裂（尤其是断层）的基础理论取得了重大突破，包括了广义断层理论（Tong et al., 2010, 2014; Tong and Yin, 2011; 童亨茂等, 2015）、摩尔空间理论和方法（Tong and Yin, 2011; 童亨茂等, 2014）的创立，以及广义破裂准则（童亨茂等, 2024）的提出，并在油气勘探开发中（如渤海漏油机理的科学诊断和防治、页岩气水平井套管变形预测和防控（童亨茂等, 2021a, 2021b）、注气开发盖层突破风险预测与评价等）产生了重大的应用成效。

6.3 地质力学的发展展望

由于地质构造变形的复杂性、时空分布的广泛性、影响的多因素性，地质力学虽然已取得了很多成果，但还有很多构造变形的力学机理、过程和规律还没有得到很好地解决，地质力学还有很大的发展空间。

目前，有很多既现实又与人类生产和生活紧密相关的地质力学问题需要解决：①注水压裂过程中，应力场的演化特征和规律研究；②在注水压裂过程中，有不同分布和组合天然裂缝存在的条件下压裂缝的扩展方式及影响因素如何？③如何实现矿产资源分布的有效预测？④地震孕育的过程及其各阶段的响应特征；⑤大地震先兆信息的形成机理及其有效监测技术；⑥滑坡体的定量预测与防治；⑦如何实现矿产开发过程中安全风险的准确预测和监测？⑧大型工程地质安全风险的准确评价等。这些既现实又与人类生产和生活紧密相关的问题都还没有得到很好地解决，表明地质力学具有广阔的发展前景。就像李四光本人指出的那样，地质力学发展前途无量（“固敢断言，此学科（地质力学）前途之发展，实属无限”；李四光, 1945）。

地质力学发展到今天，如果只采用单纯的数理推演、简单的物理和数值模拟实验很难取得有价值的成果，而必须与工业生产紧密结合、充分利用深部探测资料（如反射地震、钻井与测井、深部层析成像等）和监测资料、采用资料解剖+理论分析+物理和数值模拟+室内实验和现场试验+综合分析等有机融合的方法进行研究。期待地质力学在21世纪得到更好地发展，能很好地解决上述问题。

致谢：感谢地质力学研究所和《地质力学学报》编辑部对李四光文献资料收集的大力支持。感谢陈正乐研究员、陈柏林研究员等对本文的详细审阅，并提出宝贵的修改意见和建议。感谢审稿专家的辛勤劳动和宝贵的修改意见和建议。受笔者专业和研究方向的局限，本文对地质力学的发展历史的简述可能很不全面，对李四光先生贡献的总结主要集中在小构造方面，未包含李四光先生在全球构造、资源能源、古生物、第四纪冰川、地震地质等方面的内容。期待此总结能够起到抛砖引玉的作用，也期待中国学术界对“地质力学”的理解回归本源（地质学和力学结合的一门学科，Geomechanics）。谨以此文纪念李四光先生诞辰135周年。

References

ANDERSON E M, 1951. The dynamics of faulting and dike formation with application to Britain[M]. 2nd ed. Edinburgh: Oliver and Boyd.

BRACE W F, 1961. Mohr construction in the analysis of large geologic strain[J]. GSA Bulletin, 72(7): 1059-1079.

BYERLEE J, 1978. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics,

116(4): 615-626.

CÉLÉRIER B, 2008. Seeking Anderson's faulting in seismicity: a centennial celebration[J]. Reviews of Geophysics, 46(4): RG4001.

COELHO S, PASSCHIER C, 2008. Mohr-cyclides, a 3D representation of geological tensors: the examples of stress and flow[J]. Journal of Structural Geology, 30(5): 580-601.

DELANEY P T, POLLARD D D, ZIONY J I, et al., 1986. Field relations between dikes and joints: emplacement processes and paleo-stress analysis[J]. Journal of Geophysical Research, 91(B5): 4920-4938.

JAEGER J C, COOK N G W, 1979. Fundamentals of rock mechanics[M]. 3rd ed. London: Chapman and Hall.

JOLLY R J H, SANDERSON D J, 1997. A Mohr circle construction for the opening of a pre-existing fracture[J]. Journal of Structural Geology, 19(6): 887-892.

J S LEE, 1945. Fundamentals and methods of geomechanics[M]. Chongqing: Chongqing University Press: 20-23. (in Chinese)

J S LEE, 1973. Introduction to geomechanics[M]. Beijing: Science Press: 131. (in Chinese)

J S LEE, 1976. Methods of geomechanics[M]. Beijing: Science Press: 150-156. (in Chinese)

MEANS W D, 1983. Application of the Mohr-circle construction to problems of inhomogeneous deformation[J]. Journal of Structural Geology, 5(3-4): 279-286.

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]. Journal of Structural Geology, 29(4): 646-663.

MORRIS A, FERRILL D A, HENDERSON D B, 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation[J]. Geology, 24(3): 275-278.

POLLARD D D, AYDIN A, 1988. Progress in understanding jointing over the past century[J]. GSA Bulletin, 100(8): 1181-1204.

RAMSAY J G, 1967. Folding and fracturing of rocks[M]. New York: McGraw-Hill: 568.

TONG H M, MENG L J, CAI D S, et al., 2009. Fault formation and evolution in rift basins: sandbox modeling and cognition[J]. Acta Geologica Sinica, 83(6): 759-774. (in Chinese with English abstract)

TONG H M, CAI D S, WU Y P, et al., 2010. Activity criterion of pre-existing fabrics in non-homogeneous deformation domain[J]. Science China Earth Sciences, 53(8): 1115-1125.

TONG H M, YIN A, 2011. Reactivation tendency analysis: a theory for predicting the temporal evolution of preexisting weakness under uniform stress state[J]. Tectonophysics, 503(3-4): 195-200.

TONG H M, KOYI H, HUANG S, et al., 2014. The effect of multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models[J]. Tectonophysics, 626: 197-212.

TONG H M, WANG J J, ZHAO H T, et al., 2014. Mohr space and its application to the activation prediction of pre-existing weakness[J]. Science China Earth Sciences, 57(7): 1595-1604.

TONG H M, CHEN Z L, LIU R X, 2015. Generalized shear activation criterion[J]. Chinese Journal of Nature, 37(6): 441-447. (in Chinese with English abstract)

TONG H M, LIU Z P, ZHANG H X, et al., 2021a. Theory and method of temporary macrofracture plugging to prevent casing deformation in shale gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 41(5): 92-100. (in Chinese with English abstract)

TONG H M, ZHANG P, ZHANG H X, et al., 2021b. Geomechanical mechanisms and prevention countermeasures of casing deformation in shale gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 41(1): 189-197. (in Chinese with English abstract)

TONG H M, ZHANG H X, HOU Q L, et al., 2024. Generalized fracturing activation criteria[J]. Journal of Geomechanics, 30(1): 3-14. (in Chinese with English abstract)

TWISS R J, MOORES E M, 1992. Structural geology. Freeman company[M]. New York: W. H. Freeman: 532.

WANG R, DING Z Y, YIN Y Q, 1979. Fundamentals of solid mechanics[M]. Beijing: Geological Publishing House: 363. (in Chinese)

XU K L, ZHU Z C, 1998. Structural geology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 270. (in Chinese)

ZOBACK M D, 2007. Reservoir geomechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press.

附中文参考文献

金性春，1984. 板块构造学基础[M]. 上海：上海科学技术出版社.

李四光，1945. 地质力学之基础与方法[M]. 重庆：重庆大学出版社：20-23.

李四光，1973. 地质力学概论[M]. 北京：科学出版社：131.

李四光，1976. 地质力学方法[M]. 北京：科学出版社：150-156.

童亨茂，王建君，赵海涛，等，2014.“摩尔空间”及其在先存构造活动性预测中的应用[J]. 中国科学：地球科学，44(9)：1948-1957.

童亨茂，陈正乐，刘瑞珣，2015. 广义剪切活动准则[J]. 自然杂志，37(6)：441-447.

童亨茂，刘子平，张宏祥，等，2021a. 暂堵大裂缝防治页岩气水平井套管变形的理论与方法[J]. 天然气工业，41(5)：92-100.

童亨茂，张平，张宏祥，等，2021b. 页岩气水平井开发套管变形的地质力学机理及其防治对策[J]. 天然气工业，41(1)：189-197.

童亨茂，张宏祥，侯泉林，等，2024. 广义破裂活动准则[J]. 地质力学学报，30(1)：3-14.

王仁，丁中一，殷有权，1979. 固体力学基础[M]. 北京：地质出版社：363.

徐开礼，朱志澄，1998. 构造地质学[M]. 北京：地质出版社：270.