# 1 引言

## 1.1 研究意义与选题依据

褶皱冲断带是板块汇聚背景下，发育在造山带和盆地之间的过渡带，通常是受区域挤压应力作用，形成的以褶皱和逆冲推覆变形为主的构造变形带(Bally et al., 1966; Price,1981)。褶皱冲断带在全球分布广泛，是构造变形研究的一个重要领域。它不仅是了解盆山耦合的窗口，还是地震、滑坡、泥石流等地质灾害频发的区域。而且，全球已探明的油气储量14%都与褶皱冲断带有关(Cooper,2007)。褶皱冲断带的构造演化过程的清晰与否对于盆地性质认识，断层活动规律找寻，盆地油气运移都有着重要意义。

长期以来，人们对于褶皱冲断带构造演化研究多限于定性分析。二十世纪后期，断层相关褶皱理论(Suppe,1983; Suppe and Medwedeff,1990)的提出开启了构造变形特征的定量化研究的大门。以断层相关褶皱理论为代表的单纯的经典运动学方法，在应用于复杂褶皱冲断带油气构造分析时具有一定的局限性，符合几何约束的构造解释存在多解性和不确定性，而且传统的运动学方法在应用于复杂挤压构造的中深层构造分析与评价时遇到很大的困难，而这恰

恰是我国中西部前陆盆地褶皱冲断带油气勘探与研究有待突破的重点与难点。因此，将变形机制与变形几何学分析相结合，通过构造模拟的方法定量研究褶皱冲断构造变形特征、变形规律及变形机制， 有利于进一步发展前陆盆地褶皱冲断构造地质理论认识，完善复杂构造解析与建模集成技术，有利于前陆盆地中深层油气勘探目标的选择与评价，为油气勘探的进一步突破提供理论指导和技术支撑。

南海盆地

构造物理模拟及数值模拟可以通过准确的边界条件和参数设置，定量的分析褶皱冲断带构造变形特征，是定量研究褶皱冲断带构造变形过程与变形机制的重要方法。与构造物理模拟相比，数值模拟可以得到更多的系统内部的信息（如应力、应变等），并且可重复性高，边界条件设置更容易。二十世纪七十年代，Cundall and Strack (Cundall and Strack,1979)提出了基于非连续介质力学的离散元法（Discrete Element Method，简称DEM），用于研究岩土体的各种力学行为。该方法将颗粒集合体模型视为若干离散单元的集合，允许颗粒间产生大位移，特别适合用于构造变形研究，是未来的构造变形研究的主要方向之一(Morgan,2015)。国内构造数值模拟发展缓慢，与国外研究差距较大，很重要的一个原因是因为缺少高效、易用的离散元构造数值模拟软件。因此，开发一款适用于构造变形研究的离散元数值模拟软件显得尤为重要。

本文将在详述离散元原理的基础上，完成离散元软件的算法优化、并行计算与软件测试，

开发出一款用于构造变形研究的高性能离散元数值模拟软件。基于该软件，将通过单因素变

量控制，分析岩层内摩擦角、粘聚力、厚度及滑脱层强度、厚度对褶皱冲断带构造形态及演

化的影响，得出底部滑脱层及其上覆地层的岩石力学性质与楔体坡度间的关系。同时，将结

合构造物理模拟和塔里木盆地库车坳陷的构造研究进展，通过构造模拟的方法定量分析褶皱

冲断带盐构造变形特征与变形机制，为前陆盆地复杂褶皱冲断构造地质理论的完善提供定量

依据。

## 1.2 构造变形定量化研究现状

上世纪后期，John Suppe等人提出了以断层传播褶皱、断层转折褶皱为主要内容的断层相关褶皱理论及其运动学模型（Suppe,1983; Suppe and Medwedeff,1990），在构造地质学领域取得了突破性进展。自此，构造地质学者开始了构造变形特征的定量化研究。但是，传统的以断层相关褶皱理论为代表的经典运动学方法，在应用于复杂的地质构造时有一定的局限性，符合几何约束的构造解析往往有多解性和不确定性。将变形机制与变形几何学分析结合，建立定量化的构造模型是一种发展思路。美国地质学会构造地质学2007年最佳论文奖得主Peter Geiser也在其著作中表示，构造地质的发展方向中应有更加定量化的研究。定量化的构造模型的基本原理是根据几何学、运动学和动力学的相似性，在一定的比例尺度上还原构造变形过程和主要变形特征。通过不断构造模型的边界条件和参数设置来更好地探究构造变形的机制和控制因素。

常用的构造模型有物理模型和数值模型，本文采用的是离散元数值模拟方法。相比物理模拟，数值模拟在控制单一变量上更加简单、准确，当软件硬件设备条件满足时，数值模拟可重复性高，边界条件更容易设置，且可以更好的得到应变情况等系统内部信息。基于非连续介质力学的离散元法（Discrete Element Method，简称DEM）早在1979年就被运用于研究岩土体的力学（Cundall and Strack,1979），随后被广泛运用在构造地质学领域。Hardy等人利用离散元方法研究了强弱干层的相对厚度，分布层数和岩层强度对滑脱构造形态的影响（Hardy,2005）；Hughes等人考虑了滑脱面摩擦系数和边界条件对断层相关褶皱的影响（Hughes,2014）；国内也有学者用离散元的方法模拟相关盐构造的研究（张洁等，2008；尹宏伟等，2011；蔡申阳等，2016；李长圣，2019）。虽然，近年来国内数值模拟方面硬件技术不断发展，各种超级计算机开始出现，但是国内研究仍然发展缓慢，与国外研究差距较大，很大程度是因为缺少高效易用的离散元构造数值模拟软件，需要新的研究力量的投入。

## 1.3 创新点