

# 造山过程重力塌陷与褶皱作用——面理弯切轴与褶皱轴面数据对比研究

曹 汇<sup>1,2</sup>

(1.大陆构造与动力学国家重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京 100037;2.澳大利亚詹姆斯库克大学地球科学学院,澳大利亚 汤斯维尔 4811)

**摘要:** 美国东部阿巴拉契亚造山带北端缅因州 Rangeley 地区志留—泥盆纪中温低压片岩测得的面理弯切轴与褶皱轴面数据有很好的对应关系。西部科迪勒拉造山带落基山脉南端科罗拉多州阿肯色河地区 Texas Creek 以东高温低压前寒武纪堇青石片岩中测得的褶皱轴面方向和片理走向数据与该地区堇青石、斜长石变斑晶内测得的 5 期面理弯切轴也表现出很好的一致性。而在 Rangeley 北东 200 km 的佛蒙特州 Chester Dome 地区奥陶—泥盆纪中温中压片麻岩中测得的类似褶皱轴面数据却只反映了该地区 5 期面理弯切轴中较晚的北北西—南南东走向和北北东—南南西走向的两期面理弯切轴,未测得与其余 3 期面理弯切轴对应的褶皱轴面数据。通过对变质峰期温度相近、压力不同的两个造山带内 3 个典型变质岩区面理弯切轴、褶皱轴面方向和片理走向数据的对比分析认为,造山作用发生的地壳深度差异是早期褶皱经历多期造山运动后能否保存下来的主要影响因素。重力形成的去褶皱作用使得早期形成的规模较小褶皱经历复杂造山过程后难以保存。区域内早期形成的规模较大褶皱和造山过程晚期形成的褶皱由于受到重力塌陷作用影响较小,所以能够较好保存下来。

**关键词:** 造山运动;重力塌陷;面理弯切轴;褶皱轴面

**中图分类号:** P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)06-1818-11

## 1 前 言

近年来通过对石榴子石、十字石、斜长石和堇青石等变斑晶内包裹物迹线的研究表明,部分片理平行于层理( $S_0$  平行  $S_1$ )的变质岩地区,在野外露头可以明显识别的第一期变形作用之前就已经经历了复杂的变质变形过程<sup>[1-3]</sup>。区域内规模较大的褶皱可能是形成于这些早期变质变形过程,在经历了后期造山运动过程后保存下来<sup>[4-5]</sup>。变斑晶内包裹物迹线可以记录变斑晶生长所经历的复杂造山运动过程,这些复杂的变质变形历史过程信息受到后期造山作用的叠加改造,而无法保留在变斑晶周围的基质中<sup>[6-9]</sup>。变斑晶内面理弯切轴测量技术 (Foliation Intersection/

Inflection Axes, FIAs)能有效划分区域内经历的各项变形事件并确定其对应水平挤压主应力的方向。各期变形事件的先后顺序可根据多期生长变斑晶内包裹物迹线由核部到翼部的变化来推断,为重建造山运动历史过程提供重要依据<sup>[10]</sup>。

将区域图幅内褶皱轴面方向数据进行统计分析,在玫瑰花图上显示结果与显微构造分析测得的变斑晶面理弯切轴方向表现出较好的一致性<sup>[11-12]</sup>。区域内现今能观测到的规模最大的褶皱通常形成于整个区域变质变形历史过程的早期,其余小规模褶皱则可能是由于变形分解作用或岩浆侵入产生的压力影而免遭后期造山作用的改造而保留下来<sup>[1]</sup>。

美洲大陆西部的科迪勒拉造山带是世界上最长

收稿日期:2013-08-16;改回日期:2013-11-10

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金(2013693)、国家自然科学基金项目(41202153)、国土资源公益性行业科研专项(201211093)及中国地质科学院地质研究所中央级公益性基本业务费专项基金(J1101)共同资助。

作者简介:曹汇,男,1982年生,博士,从事造山带及大地构造研究;E-mail: caohui@cags.ac.cn。

的褶皱山系,其北部的落基山脉经历了复杂的造山运动过程。位于落基山脉南端的科罗拉多州中部 Texas Creek 地区,处于北部 Yavapai 地体和南部 Mazatzal 地体之间,该地区大量出露的前寒武纪变质沉积岩是研究 Yavapai 地体和 Mazatzal 地体拼贴时限及北美大陆西南部造山过程研究的理想实验室。

美国东部阿巴拉契亚造山带形成于前寒武—二叠纪的多次造山运动,奥陶纪塔康运动和泥盆纪阿卡迪亚运动是阿巴拉契亚造山带的两次主要造山事件。佛蒙特州东南部 Chester Dome 地区和缅因州西部 Rangeley 地区大量分布经历了这两期造山运动的奥陶纪—泥盆纪片岩和片麻岩,其穹隆和褶皱发育,是研究阿巴拉契亚造山带造山运动过程的典型地区<sup>[8,13]</sup>。

本文选取区域内褶皱分布较广,此前未开展过褶皱详细研究的经历了高温低压变质作用的科迪勒拉造山带 Texas Creek 地区和阿巴拉契亚造山带 Rangeley 地区,以及经历了相似变质温度,但是压力稍高的阿巴拉契亚造山带 Chester Dome 地区面理弯切轴及褶皱轴面数据进行对比研究。讨论褶皱形成的地壳深度及造山过程中重力作用对早期褶皱及变质变形信息保存的影响。

## 2 区域地质背景

### 2.1 科迪勒拉造山带落基山脉南端科罗拉多州 Texas Creek 地区

美国科罗拉多州中南部落基山脉南端前寒武纪变质沉积岩主要经历了 1750~1650 Ma (Yavapai/Mazatzal) 及 1450~1350 Ma 两期主要造山事件<sup>[14]</sup>。Karlstrom 和 Williamms<sup>[15]</sup>研究认为,该地区变质岩经历 Yavapai/Mazatzal 第一期造山事件时位于中地壳,在经历第二期造山事件过程中开始折返。科罗拉多州中部 Texas Creek 以东地区前寒武纪变质岩广泛出露(图 1~2),主要为堇青黑云片麻岩、黑云斜长片麻岩、长英质片麻岩、堇青石片岩、石英砂线片麻岩、硅质片岩和角闪岩。堇青石片岩包含有大量红柱石、堇青石、斜长石和石榴子石变斑晶。变斑晶内 S 形及反 S 形包裹物迹线发育明显(图 3),为区域构造变形变质历史过程研究提供了有效途径。Siddoway 等<sup>[16]</sup>研究认为该地区在前寒武纪时期经历了三期变形和两期变质事件。堇青石片岩的变质峰期温度为 575~725°C,压力为 2.3~7 kbar<sup>[20]</sup>。

### 2.2 阿巴拉契亚造山带北端缅因州西部 Rangeley 地区和佛蒙特州 Chester Dome 地区

阿巴拉契亚造山带北端缅因州西部 Rangeley 地区位于 Central Maine 变质带和 Bronson Hill 变质带边界位置(图 4)。Central Maine 变质带主要为经历了阿卡迪亚造山运动的志留—泥盆纪绿片岩到角闪岩相变质岩<sup>[21~22]</sup>。石榴十字石片岩和石榴砂线片麻岩的变质独居石 U-Pb 年代学研究表明变质作用年代为 411~352 Ma,峰期温度为 520~680°C,压力为 3~4 kbar<sup>[12,23]</sup>。区域内 Mooslookmeguntic 岩体侵入时代为 389~370 Ma(图 5)。

佛蒙特州东南部 Chester Dome 地区寒武—泥盆纪片麻岩变质程度相对较高,主要为包含有石榴子石、十字石和蓝晶石斑晶的石英云母片岩和千枚岩等泥质变质沉积物(图 6)。该地区变形与变质事件主要为泥盆纪阿卡迪亚造山运动,Chester-Athens Dome 地区变质作用年代为 395~385 Ma,峰期温度为 700°C,压力为 10.5 kbar<sup>[24,25]</sup>。

### 2.3 研究区域对比

Texas Creek、Rangeley 和 Chester Dome 地区片岩和片麻岩变质峰值温度均为 700 °C 左右。然而,Chester Dome 地区变质作用的压力相对较高,为 7~10.5 kbar<sup>[25]</sup>,Texas Creek 和 Rangeley 地区则分别为 2.3~7 kbar<sup>[17]</sup>和 3~4 kbar<sup>[12]</sup>。岩石矿物组成及变质相差异说明 Texas Creek 和 Rangeley 地区的变质作用的地壳深度比 Chester Dome 地区要浅。

## 3 面理弯切轴数据

面理弯切轴是通过观察定向采集样品根据垂直薄片内的变斑晶内包裹物迹线几何形状(顺时针旋转或逆时针旋转)变化来判定的。首先,根据野外标记在室内将定向标本回归定向,由正北方向(标为 0°)依次往南,每间隔 10°切制垂直薄片。然后在偏光显微镜下观察变斑晶内包裹物迹线,当观察到的包裹物迹线几何形状发生改变(顺时针与逆时针或 S 与反 S 之间的相互转变),即可判定为面理交切轴(FIA)的方向(图 7)。根据多期生长变斑晶内包裹物迹线形状由核部到翼部的变化可以进一步推断各期面理弯切轴及对应变形事件的先后顺序,从而为造山运动过程的重建提供科学依据<sup>[6]</sup>。

### 3.1 科迪勒拉造山带落基山脉 Texas Creek 地区

在 Texas Creek 地区采集到的 46 个样品中共测

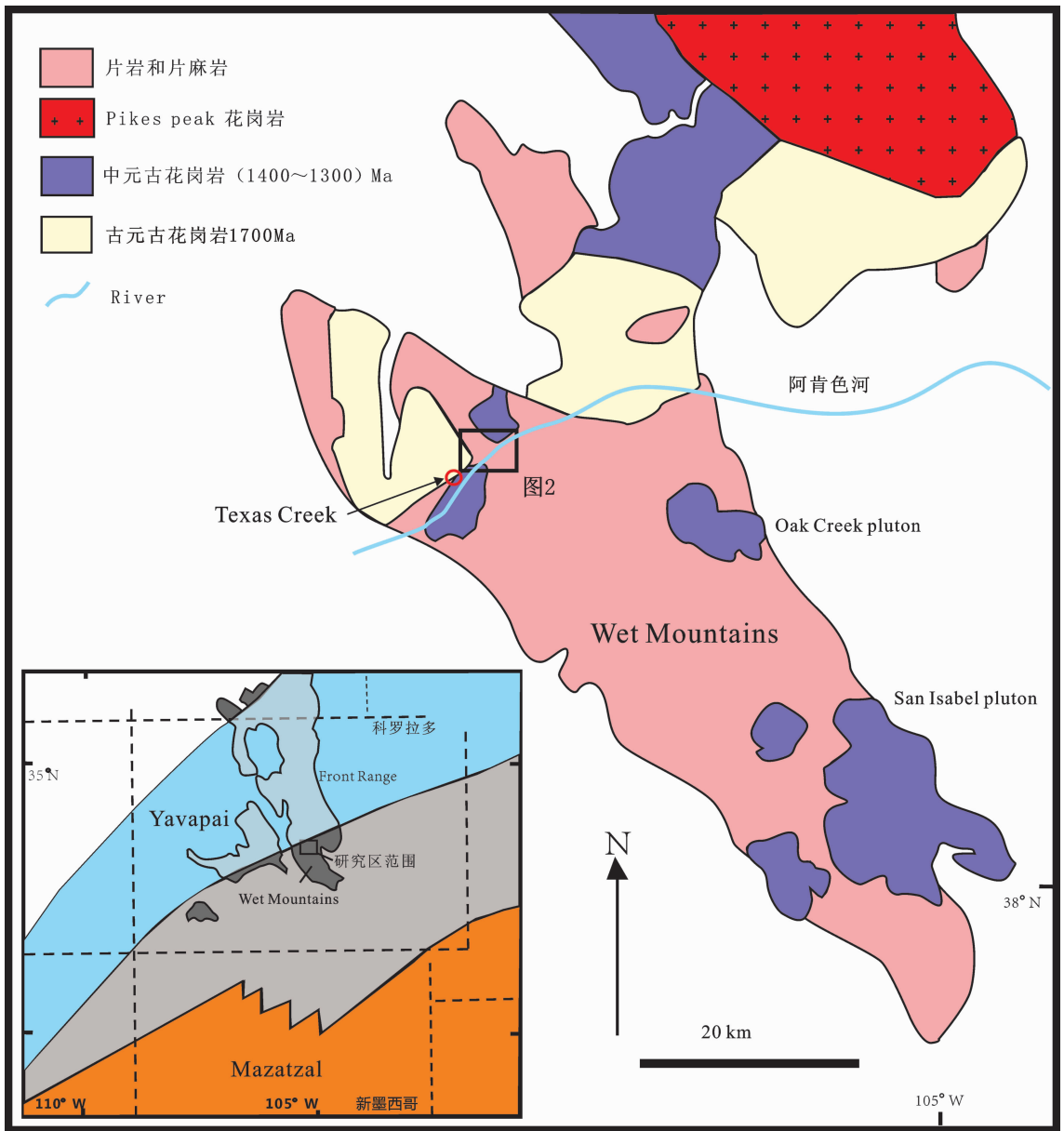


图1 迪勒拉造山带落基山脉南端科罗拉多州中部 Texas Creek 地区地质简图  
(据 Siddoway et al.(2000)<sup>[16]</sup>; Wobus et al.(2001)<sup>[17]</sup>; Jones & Connelly (2006)<sup>[18]</sup>修改)

Fig.1 The location of the study area described herein within a regional geological map of the Texas Creek, Arkansas River Canyon, Colorado (modified after Siddoway et al.(2000)<sup>[16]</sup>; Wobus et al.(2001)<sup>[17]</sup>; Jones & Connelly (2006)<sup>[18]</sup>)

得 63 个面理弯切轴数据。其中变斑晶内只有一期面理弯切轴的样品有 36 个，其余 27 个面理弯切轴数据是由 13 个有多期生长变斑晶样品中测得的。玫瑰花图(图 8-a1)统计显示出 5 组明显方向，由北往南依次为：北北东-南南西，北东-南西，东-西，南东-北西，南南东-北北西。原位独居石 U-Th-Pb 年代学测定显示他们的年龄为由老到新依次为：(1506±

15) Ma, (1467±23) Ma, (1425±18) Ma, 未测得和 (1366±20) Ma<sup>[10]</sup>。

### 3.2 阿巴拉契亚造山带 Chester Dome 地区

Bell 等<sup>[9]</sup>测定了 Chester Dome 地区奥陶—泥盆纪石榴子石变斑晶内包含的 130 个面理弯切轴数据，第一期面理弯切轴为北西-南东向，其后依次为北东-南西、东-西、南南东-北北西、南南西-北北

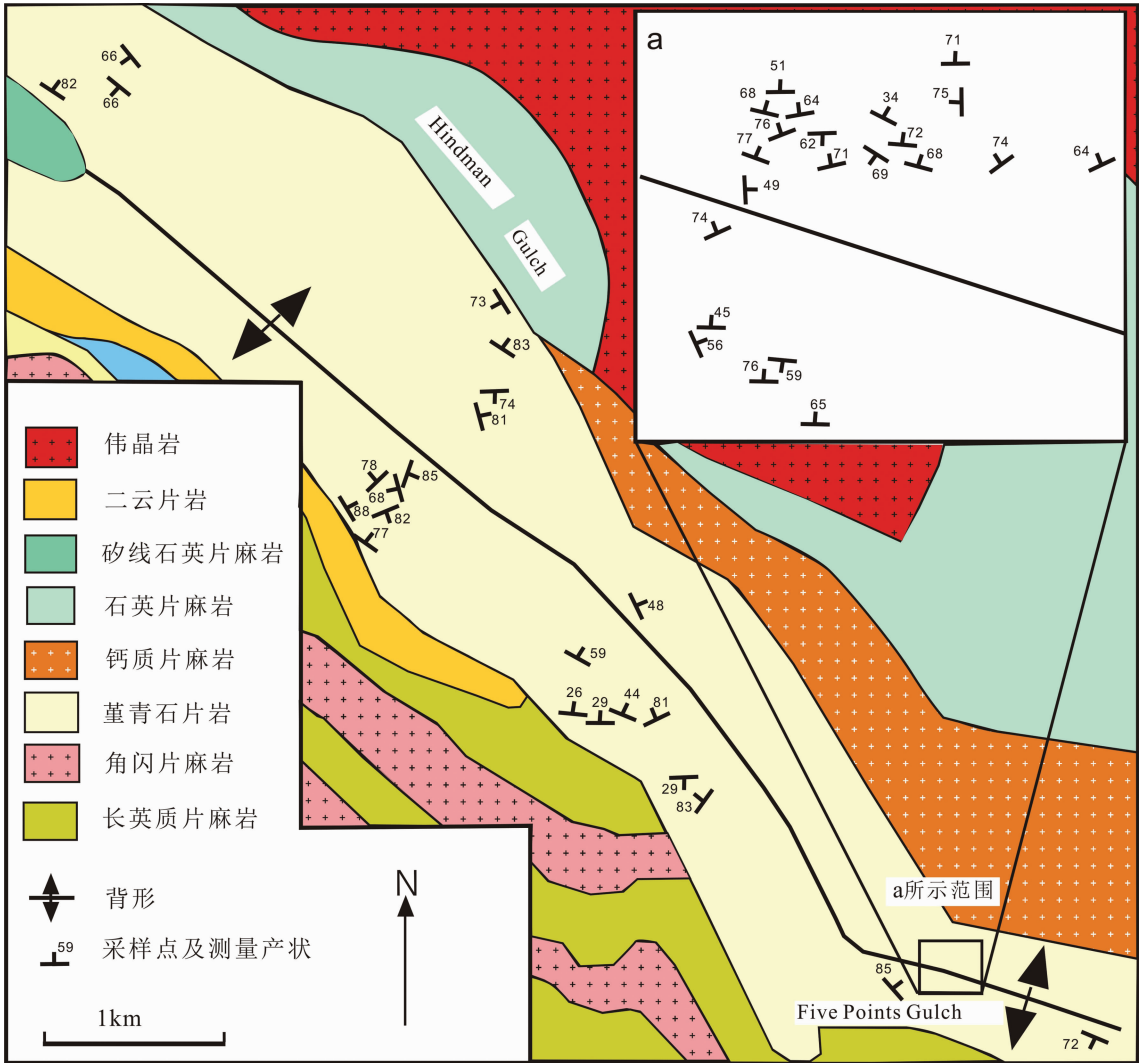


图 2 Texas Creek 地区 Five Points Gulch-Hindman Gulch 研究区地质图及面理弯切轴数据采样点位置图(据 Siddoway et al.(2000)<sup>[10]</sup>和 Gartner et al.(2001)<sup>[19]</sup>修改)

Fig.2 Geological map of the Texas Creek, Five Points Gulch-Hindman Gulch study area (after Siddoway et al.(2000)<sup>[10]</sup> and Gartner et al.(2001)<sup>[19]</sup>) showing sampling locations

东向(图 8-c1)。该面理弯切轴数据中的前两期的年龄早于 425 Ma,其余三期依次为 425~404 Ma,404~385 Ma,385~360 Ma<sup>[20]</sup>。

## 4 褶皱轴面方向和片理走向数据

### 4.1 科迪勒拉造山带落基山脉 Texas Creek 地区

图 8-a2 所示的玫瑰花图为落基山脉南端科罗拉多州 Texas Creek 地区 Fremont 和 Custer counties 区域地质图<sup>[27]</sup>图幅范围内各褶皱轴面方向数据统计图<sup>[10]</sup>。褶皱轴面数据所示方向可分为 6 组由正北方依次被标记为 A、B、C、D、E 和 F。图 8-b2 玫瑰花

图为 Texas Creek 地区 Fremont 和 Custer counties 区域地质图<sup>[27]</sup>范围内测得的 50 个片理走向数据统计图。玫瑰花图所示方向可分为 5 组,由正北方向依次被标记为 A、B、C、D 和 E。这 5 组方向中 A 组为南南西-北北东,其余 B 组到 E 组由南西到北东依次分布。

### 4.2 阿巴拉契亚造山带 Chester Dome 地区

佛蒙特州 Chester Dome 研究区范围内测得的褶皱轴面数据<sup>[28]</sup>(图 8-d2),图中所示方向主要为北北西-南南东(A 组)和北北东-南南西(B 组)两组,并且以北北东-南南西向一组为主。由图 8-d1 可



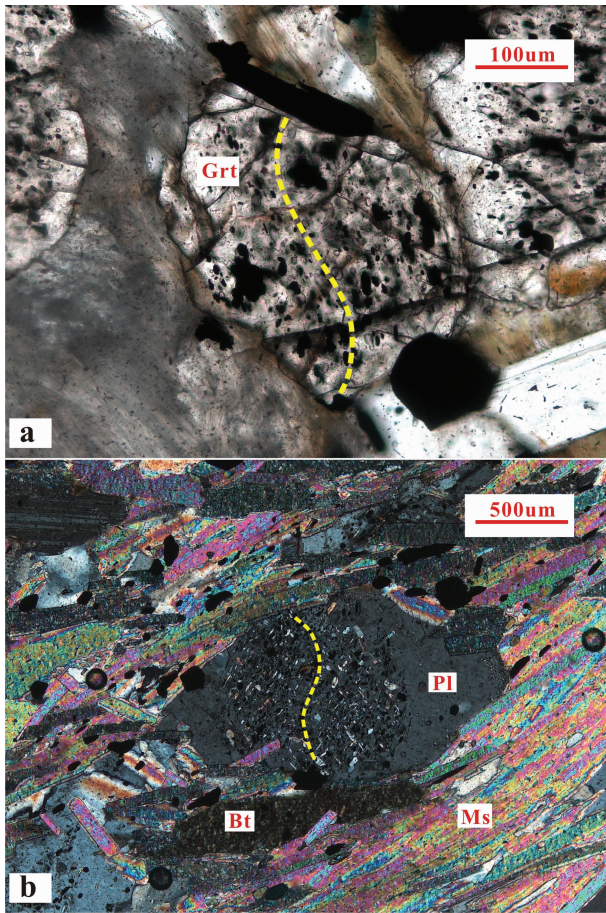


图3 科罗拉多州 Texas Creek 地区石榴子石变斑晶内顺时针旋转包裹物迹线(a—YL36-90, 正交偏光)及斜长石变斑晶内逆时针旋转包裹物迹线(b—YL36-90, 正交偏光)

Grt—石榴子石; Bt—黑云母; Pl—斜长石; Ms—白云母

Fig.3 Clockwise inclusion trails in a garnet porphyroblast (a, YL2-60-crossed nicols) and anticlockwise inclusion trails in a plagioclase porphyroblast (b, YL36-90-crossed nicols), Texas Creek, Colorado, USA

Grt—Garnet; Bt—Biotite; Pl—Plagioclase; Ms—Muscovite

见, 区域内 5 期面理弯切轴数据结构以 FIA 3 和 FIA 4 为主。而褶皱轴面数据中北北西-南南东向的一组(A 组)与 FIA 3 方向基本吻合, 北北东-南南西向的一组(B 组)与 FIA 4 有较多重叠, 但有 10°~15° 的偏差。

### 5 数据解释

#### 5.1 Texas Creek 地区面理弯切轴与褶皱轴面及片理数据相关性分析

近来研究表明, 区域内测得的褶皱轴面走向与面理弯切轴方向具有明显的一致性<sup>[11-12]</sup>。图 9 对科

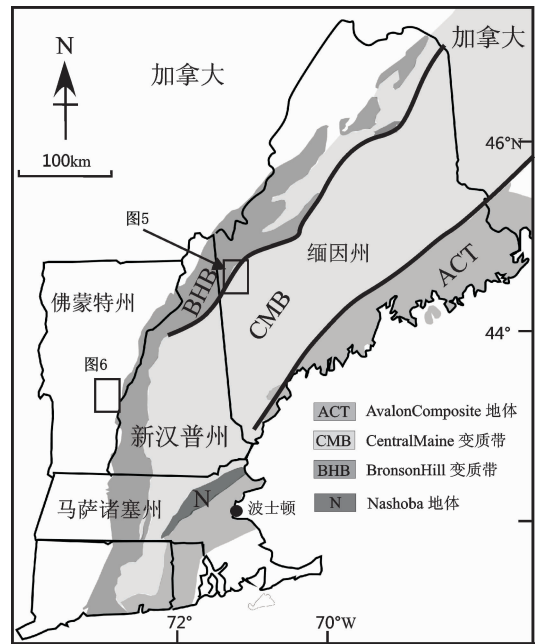


图4 阿巴拉契亚造山带北端缅因州地质简图  
Fig.4 Simplified geological map of Maine, north of Appalachians

迪勒拉造山带 Texas Creek 地区面理弯切轴方向及褶皱轴面走向数据进行了对比, 每期面理弯切轴均有方向相近的褶皱轴面走向与之对应。南南西-北北东向的褶皱轴面数据(A 组)平行于第二期面理弯切轴(FIA 2), 南西-北东向的褶皱轴面数据(B 组)平行于第五期面理弯切轴(FIA 5)。C 组和 D 组与第一期面理弯切轴(FIA1)对应, E 组和 F 组则分别与第四和第三期面理弯切轴数据(FIA4 和 FIA3)相对应。在图 9-a 中片理走向数据不像褶皱轴面数据那样与面理弯切轴数据精确对应。片理走向数据在玫瑰花图投影 5 个明显方向数量分布较为平均, 依次对应 5 期面理弯切轴方向, 但是 A、B、C 和 D 组片理走向数据与对应面理弯切轴方向相比向南偏大约 10°, 而 E 组片理走向则相对于第三期面理弯切轴(FIA3)向北偏 10°。由褶皱轴面数据与面理弯切轴数据的关联性可以推断, 图 8-a2 所示区域褶皱的相对时间顺序依次为: 东-西, 北北东-南南西, 南南东-北北西, 南东-北西, 北东-南西。

片理走向数据与面理弯切轴数据的偏差比褶皱轴面方向数据与面理弯切轴数据的偏差要大, 进一步说明相比体积较大的褶皱, 片理受后期造山作用的影响要大。由于褶皱成分层的再活化, 真正的轴面

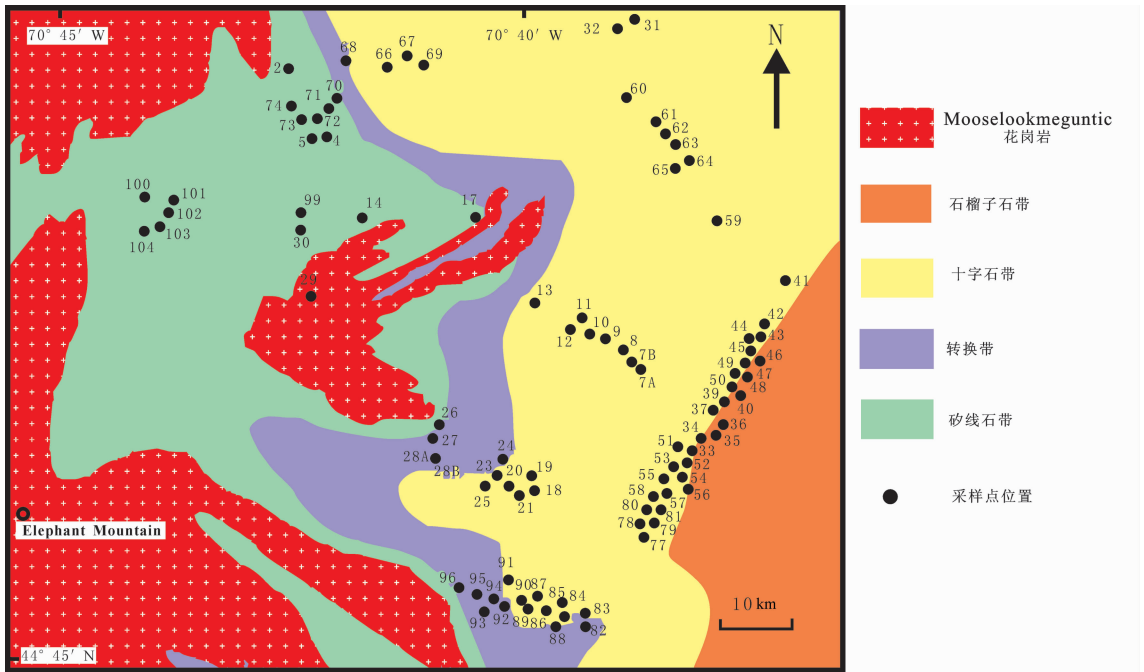


图 5 阿巴拉契亚造山带北端缅因州 Rangeley 采样点位置图(据 Sanislav(2009)<sup>[12]</sup>修改)

Fig.5 Simplified geological map of the study area in Rangeley, west Maine, Appalachians, showing sampling location (after Sanislav(2009)<sup>[12]</sup>)

片理并不是在褶皱的形成过程中发育<sup>[7]</sup>。

### 5.2 Chester Dome 地区面理弯切轴与褶皱轴面数据相关性分析

阿巴拉契亚造山带 Chester Dome 地区面理弯切轴数据与褶皱轴面数据并没有显示出像 Texas Creek 地区那样的一致。褶皱轴面数据仅与最晚两期面理弯切轴数据的方向对应,并且北北东-南南西向的褶皱轴面数据(B组)与最晚的第四期面理弯切轴数据(FIA4)之间有大约 10°的夹角。未测得与其余 3 期面理弯切轴数据相对应的褶皱轴面数据。Bell 等<sup>[8]</sup>研究认为, Chester-Athens dome 区域内最大褶皱是在变斑晶开始生长之前就已形成,并且接近平行于最晚一期面理弯切轴。

## 6 讨论

### 6.1 科迪勒拉造山带落基山脉 Texas Creek 地区

Texas Creek 地区褶皱轴面方向统计数据与面理弯切轴数据在玫瑰花图上显示出很好的一致性。图 2 中所示的研究区范围内最大等斜褶皱形成于该地区第一期面理弯切轴(FIA1)形成时期<sup>[20]</sup>。虽然经历了后造山作用的多次挤压期主应力方向的变化,

但是主应力方向依然接近平行于第一期面理弯切轴的方向。然而,该褶皱还是受到了其后多期变形作用的影响,特别是占面理弯切轴大多数的第三期(FIA3)和第四期面理弯切轴(FIA4)的影响,而发生顺时针旋转。该褶皱能够保存下来的主要原因可能是与最初形成时的规模大小有关<sup>[1,4,8]</sup>。

### 6.2 阿巴拉契亚造山带 Chester Dome 地区

Chester Dome 地区褶皱轴面数据与面理弯切轴数据并不完全对应。而在 Chester Dome 北东,相距 200 km 的缅因州西部 Rangeley 地区,与之年代相近的石榴砂线片麻岩中褶皱轴面数据与面理弯切轴数据则显示出非常好的一致性。这主要是因为 Rangeley 地区片麻岩变质作用压力与科迪勒拉造山带 Texas Creek 地区相近,而 Chester Dome 地区片麻岩的变质峰期压力则比这两个地区高 3.5~8 kbar。

### 6.3 褶皱的再活化作用

由大量不同地质构造背景中测得的面理弯切轴数据分析表明,成分层的再活化作用在造山运动过程中普遍存在<sup>[30]</sup>。褶皱形成后,在其后造山作用过程中褶皱其中一翼或两翼就会发生成分层的再活化作用。而且并不会受到水平方向的挤压缩短和垂直方



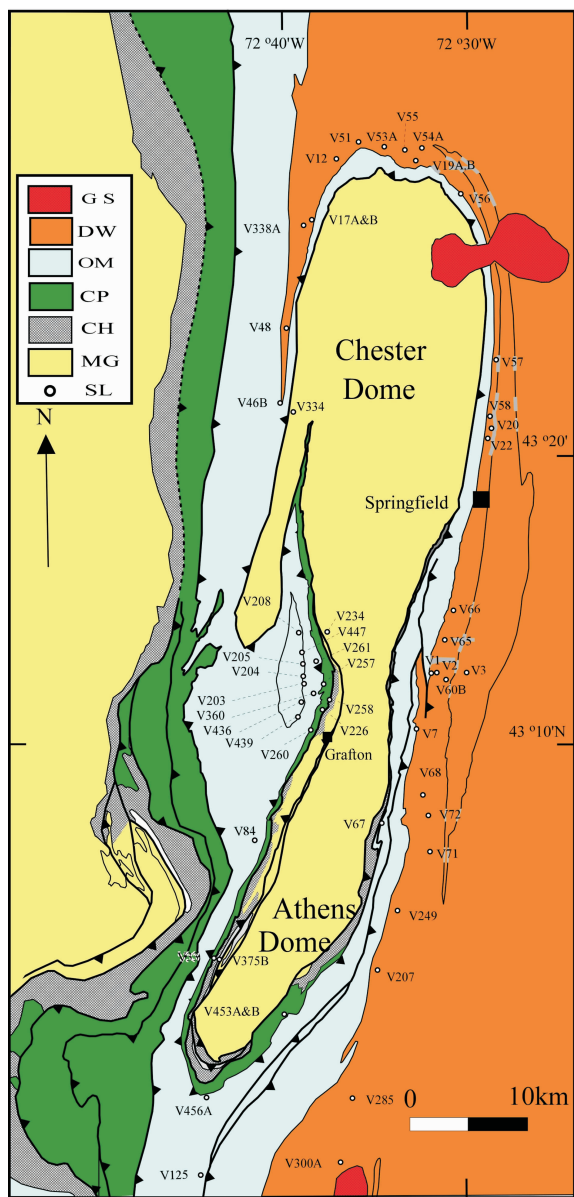


图6 佛蒙特州 Chester-Athens Domes 地区地质简图及采样点位置 (据 Bell et al.(2005)<sup>[12]</sup>修改)

GS—花岗岩;DW—泥盆纪 Waits River 组地层;OM—奥陶纪 Moretown 组地层;CP—寒武纪 Pinney Hollow 组地层;CH—寒武纪 Hoosac 组地层;MG—中元古基底片麻岩;SL—采样点位置

Fig.6 Geological map of the Chester and Athens Domes showing localities of samples used in the text (modified after Bell et al.(2005)<sup>[12]</sup>)

GS—Granite;DW—Devonian Waits River Formation; OM—Ordovician Moretown Formation;CP—Cambrian Pinney Hollow Formation;CH—Cambrian Hoosac Formation; MG—Mesoproterozoic basement gneisses;SL—Sample location

向的重力塌陷作用的影响<sup>⑧</sup>。变斑晶中所记录的复杂变形和变质作用的历史信息说明,基质中最后留存的那些不与成分层平行的面理只经历了 P-T 轨

迹的进变质过程<sup>[31]</sup>。

### 6.4 褶皱形成的挤压应力方向

不同期次褶皱轴面数据可以反映造山过程挤压应力方向的变化过程。经历了复杂多期变形的片麻岩不同期次褶皱形成时间的厘定是变质岩区构造变形过程研究的难点之一。这主要是因为片麻岩褶皱轴面及片理并不像片岩褶皱中那样发育,有时很难观测到<sup>[32-33]</sup>,褶皱形成过程中更容易发生分层的活化而不是形成新的轴面面理<sup>[4]</sup>。这些片麻岩中包含有变斑晶,则为揭示这一复杂构造过程提供了新的研究途径。

面理弯切轴测量技术已经广泛应用于变斑晶成核生长及褶皱形成机制研究<sup>[32,34]</sup>。每期面理弯切轴对应于一定时期内相对稳定的水平挤压主应力方向。由变斑晶面理弯切轴,可推断褶皱形成时的水平挤压主应力方向。通过多期生长变斑晶内包裹物迹线由核部到翼部的变化可以推断各期面理弯切轴的相对形成时间,进而确定各期褶皱形成的先后顺序<sup>[9,35]</sup>。

### 6.5 褶皱作用的地壳深度及重力作用的影响

科罗拉多州中部 Texas Creek 以东地区和缅因州西部 Rangeley 地区测得的褶皱轴面数据和片理走向数据在玫瑰花图上显示与面理弯切轴方向具有明显的一致性。然而在佛蒙特州 Chester Dome 地区褶皱轴面方向与面理弯切轴数据的相关性仅仅表现在最晚两期面理弯切轴统计数据上。说明早于变斑晶生长形成的背斜受到了最晚的两期面理弯切轴褶皱作用的影响。为什么会存在这种差异? Chester Dome 地区与 Texas Creek 及 Rangeley 地区的最明显区别是发生褶皱变形作用的地壳深度不同。尽管 Chester Dome 与 Texas Creek 及 Rangeley 地区变形变质作用的温度相近,但是变质作用压力相差 3.5~8 kbar。造山作用过程中,相同的温度条件下,上部岩层厚度越大,重力塌陷的去褶皱作用越明显,易于形成接近垂直的褶皱轴面。那些越早形成的褶皱,受到后期造山事件中重力塌陷作用在垂向上的挤压应力越大<sup>⑧</sup>。

## 7 结论

通过对科迪勒拉造山带及阿巴拉契亚造山带 3 个经历了复杂造山运动过程的典型变质岩区面理弯切轴与褶皱轴面数据的对比分析,讨论了不同变质峰期温压条件下对应不同地壳深度重力塌陷对褶皱作用的影响,结论如下:

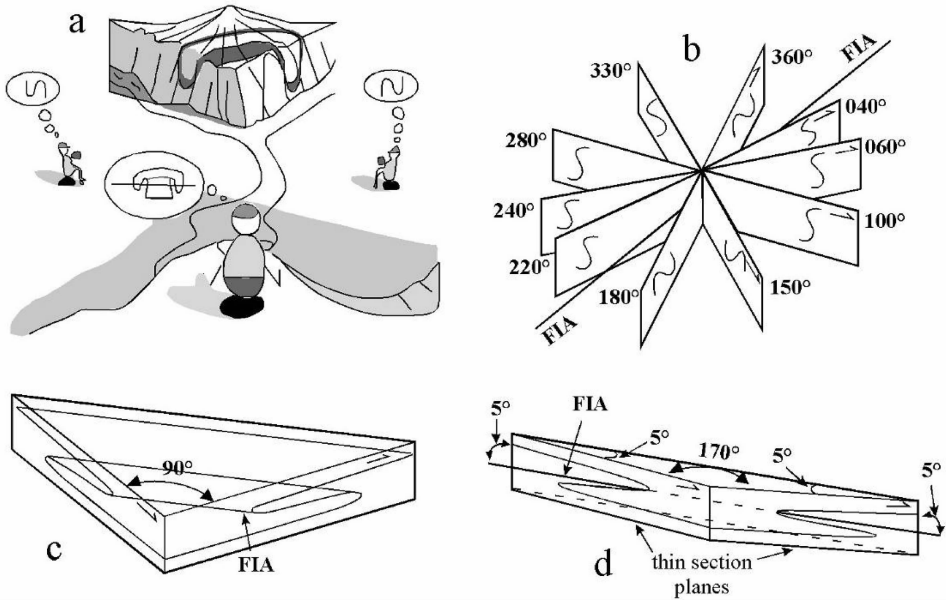


图 7 面理弯切轴 (FIA) 原理示意图 (根据 Bell et al., 2004<sup>[7]</sup> 修改)

a—在褶皱左右两侧断面,地质学家观察到形状相反的“S”和反“S”褶皱剖面,无法判断褶皱枢纽的形态,位于中间的地质学家同时观察到了褶皱的两个断面,可以推断出褶皱在三维空间的几何形态;b—由同一方向观察到的沿不同走向切制的竖直薄片内包裹物迹线几何形状,FIA 位于包裹物迹线几何形状发生转变(40°为顺时针旋转“S”,360°为逆时针旋转“反S”)的临近两薄片中间;c—两竖直薄片切面夹角为 90°时,观察 FIA 两剖面几何形状的变化;d—两薄片切面夹角为 170°且与 FIA(同 c)的夹角均为 5°时,可将 FIA 的方向限定在 10°范围内

Fig. 7 Sketch illustrating the principle behind FIA measurement (after Bell et al., 2004<sup>[7]</sup>)

a—The geologists to either side see the opposite asymmetry for same fold in a cliff face. They have no idea of its hinge line. The geologist in the centre sees the fold on both cliff faces and knows its shape in 3-D; b—Shows the asymmetry on a series of differently-striking vertical sections. The asymmetry flips across the compass (40°—clockwise, 360°—anticlockwise) when viewed in the same direction; c—Shows asymmetry of a sigmoid axis in two sections cut 90° apart; d— Shows the sigmoid axis of (c) in two sections cut 10° apart lying on either side of the axis. The switch in asymmetry between them defines the location of the axis within a 10° range

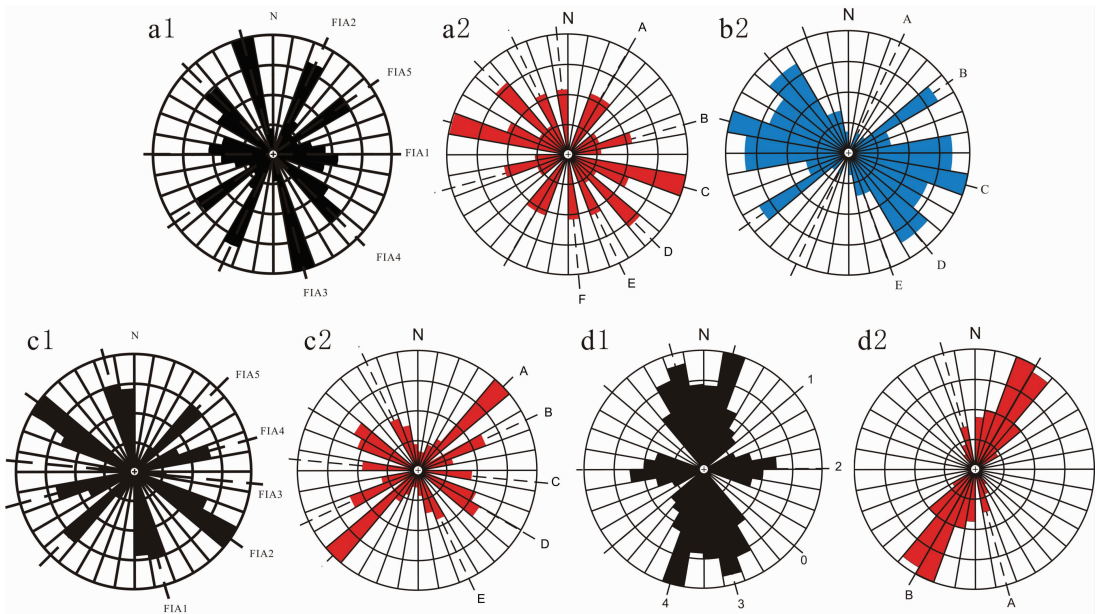


图 8 Texas Creek、Rangeley 和 Chester Dome 地区褶皱轴面方向数据、面理弯切轴数据及片理走向数据玫瑰花图  
 a1—Texas Creek 面理弯切轴数据; a2—Texas Creek 褶皱轴面方向; b2—Texas Creek 片理走向; c1—Rangeley 面理弯切轴数据;  
 c2—Rangeley 褶皱轴面方向; d1— Chester Dome 面理弯切轴数据; d2—Chester Dome 褶皱轴面方向  
 Fig.8 Equal area rose diagrams showing the trends of the fold axial planes, FIAs in porphyroblasts, and schistosity in Texas Creek, Rangeley and Chester Dome region  
 a1— Texas Creek FIA trend; a2— Texas Creek fold axial planes; b2— Texas Creek schistosity;  
 c1—Rangeley FIA trend; c2— Rangeley fold axial planes; d1— Chester Dome FIA trend; d2— Chester Dome fold axial planes



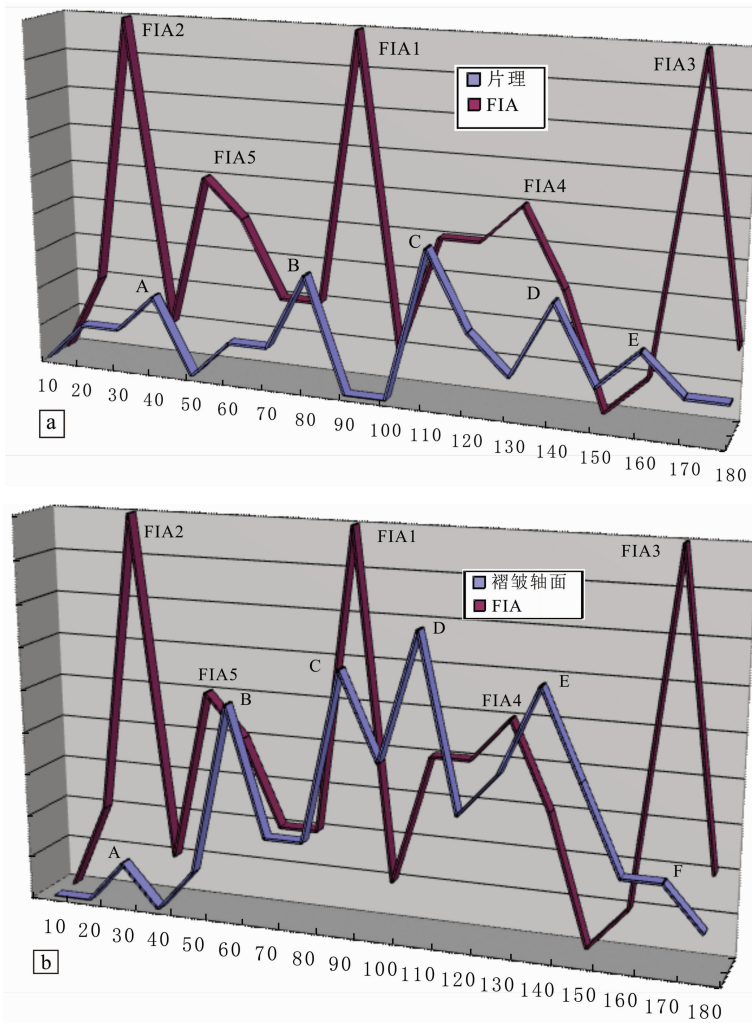


图 9 科罗拉多州中部 Texas Creek 地区片理走向数据与面理弯切轴数据对比图 (a)及褶皱轴面方向与面理弯切轴数据对比图(b)(X 轴为方向)

Fig.9 The schistosity data in comparison with FIA data (a) and the trends of the fold axial planes in comparison with FIA data (b) in the Texas Creek, Colorado (the X axis showing the degree of the trend)

(1)Texas Creek 地区面理弯切轴数据与褶皱轴面数据和片理走向数据表现出很好的一致性,说明中低压变质岩区面理弯切轴与褶皱轴面有很好的对应关系,并由此推断 Texas Creek 地区褶皱作用的先后顺序依次为:东-西,北北东-南南西,南南东-北北西,南东-北西,北东-南西。

(2)Texas Creek 地区及 Rangeley 地区变质岩形成于地壳中低压条件下,研究区内测得的面理弯切轴数据与褶皱轴面数据和片理走向数据有很好的对应关系,而变质峰期温度相近,压力稍高的 Chester Dome 地区褶皱轴面数据却仅对应了最晚两期面理弯切轴数据。这说明重力塌陷作用是影响早期褶皱能否经历多期造山作用保存下来的主要因

素。地壳深度越大,重力塌陷产生的去褶皱作用越强,早期褶皱越不容易保存。

**致谢:**感谢 Tim Bell 教授在论文数据分析过程中给予的指导,以及 Ioan Sanislav 博士和审稿人对论文修改提出的宝贵意见。

**参考文献(References):**

[1] Bell T H, Ham A P, Hickey K A. Early formed regional antiforms and synforms that fold younger matrix schistositities: Their effect on sites of mineral growth [J]. Tectonophysics, 2003, 367 (3/4): 253-278.  
 [2] Sayab M. Decompression through clockwise P-T path: Implications for early N-S shortening orogenesis in the Mesoproterozoic Mt Isa Inlier (NE Australia) [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2006, 24

- (2): 89–105.
- [3] Yeh, M W. Deformation sequence of Baltimore gneiss domes, USA, assessed from porphyroblast foliation intersection axes [J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29(5): 881–897.
- [4] Ham A P, Bell T H. Recycling of foliations during folding [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(11): 1989–2009.
- [5] Bell T H, Newman, R. Appalachian orogenesis: The role of repeated gravitational collapse [J]. *Special Paper – Geological Society of America*, 2006, 414: 95–118.
- [6] Bell T H, Hickey K A, Upton G J G. Distinguishing and correlating multiple phases of metamorphism across a multiply deformed region using the axes of spiral, staircase and sigmoidal inclusion trails in garnet [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1998, 16(6): 767–794.
- [7] Bell T H, Ham A P, Kim H S. Partitioning of deformation along an orogen and its effects on porphyroblast growth during orogenesis [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(5): 825–845.
- [8] Bell T H, Ham A P, Hayward N, et al. On the development of gneiss domes [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2005, 52(2): 183–204.
- [9] Bell T H. Deformation partitioning, foliation successions and their significance for orogenesis: Hiding lengthy deformation histories in mylonites [C]//*Continental Tectonics and Mountain Building: The Legacy of Peach and Home*. Geological Society, London, Special Publications, 2010, 335: 275–292.
- [10] Cao H. Chemical U–Th–Pb monazite dating of deformations versus pluton emplacement and the proterozoic history of the Arkansas River region, Colorado, USA [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(5): 917–926.
- [11] Shah A. Tectono–Metamorphic Evolution of Big Thompson Canyon Region, Colorado Rocky Mountains, USA [D]. PhD Thesis, James Cook University, 2010: 198.
- [12] Sanislav I V. Tectono–Metamorphic Evolution of the Western Maine, Northern Appalachians, USA [D]. James Cook University, Australia, Townsville, 2009: 273.
- [13] Shah A A. Decoding the regional ~1700 Ma deformational history from the rocks of Big Thompson Canyon region Colorado using monazite dating of foliations preserved within garnet and staurolite porphyroblastic phases [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83: 971–984.
- [14] Anderson J L. Proterozoic anorogenic granites of the southwestern United States [C]//Jenny J P, Reynolds S J (eds.). *Geologic Evolution of Arizona*. Arizona Geological Society Digest, 1989, 17: 211–238.
- [15] Karlstrom K E, Williams M L. Heterogeneity of the middle crust: Implications for strength of continental lithosphere [J]. *Geology*, 1998, 26, 815–818.
- [16] Siddoway C S, Givot R M, Bodle C D, et al. Dynamic versus anorogenic setting for Mesoproterozoic plutonism in the Wet Mountains, Colorado: Does the interpretation depend on level of exposure? [J] *Rocky Mountain Geology*, 2000, 35(1): 91–111.
- [17] Wobus, R A, Folley, M J, Wearn, K M and Noblett, J B. Geochemistry and tectonic setting of Paleoproterozoic metavolcanic rocks of the southern Front Range, lower Arkansas River Canyon and northern Wet Mountains, central Colorado. *Rocky Mountain Geology*, 2001, 36(2): 99–118.
- [18] Jones, J V III and Connelly, J N. Proterozoic tectonic evolution of the Sangre de Cristo Mountains, southern Colorado, USA. *Rocky Mountain Geology*, 2006, 41(2): 79–116.
- [19] Gartner J E, Siddoway, C S and Anonymous. Field investigation of small Mesoproterozoic intrusions in the southern Colorado; lack of deformation fabrics gives evidence for comparatively shallow emplacement. *Abstracts with Programs – Geological Society of America*, 2001, 33(5): 12.
- [20] Clark E. Analysis of deformational and metamorphic history of cordierite schist, east Gulch, Colorado [R]. Carleton College Geology Department Comprehensive Exercise Projects Report, 1998: 1–4.
- [21] Guidotti C V. Metamorphism in Maine: an overview [J]. *Studies in Maine Geology*, 1989, 3: 1–19.
- [22] Bradley D C, Tucker R D, Lux D R, et al. Migration of the Acadian Orogen and Foreland Basin Across the Northern Appalachians [R]. U.S. Geological Survey, 1998, Open–File Report, 98–770, 79.
- [23] Smith H A, Barreiro B. Monazite U–Pb dating of staurolite grade metamorphism in pelitic schists [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1990, 105: 602–615.
- [24] Stanley R S, Ratcliffe N M. Tectonic synthesis of the Taconian orogeny in western New England [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1985, 96(10): 1227–1250.
- [25] Armstrong T R, Tracy R J, Hames W E. Contrasting styles of Taconian, eastern Acadian and western Acadian metamorphism, central and western New–England [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1992, 10: 415–426.
- [26] Bell T, Welch P W. Prolonged Acadian orogenesis: Revelations from foliation intersection axis (FIA) controlled monazite dating of foliations in porphyroblasts and matrix [J]. *American Journal of Science*, 2002, 302(7): 549–581.
- [27] Taylor R B, Scott G R, Wobus R A, et al. Reconnaissance geologic map of the Cotopaxi 15–minute quadrangle, Fremont and Custer counties, Colorado [M]. *Miscellaneous Investigations Series – U. S. Geological Survey*, 1975, I–0900: scale 1: 62500.
- [28] Cao H. Tectonics of the Arkansas River Region, Colorado [D]. USA: PhD Thesis, James Cook University, 2010: 183.
- [29] 曹汇, 许志琴, 李化启, 等. 复杂变质带褶皱形态判定新方法——变斑晶包裹物迹线应用研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32(5): 751–760.
- Cao Hui, Xu Zhiqin, Li Huaqi, et al. New method to ascertain the shape of isoclinal folds in multiply–deformed metamorphic zone——The application of porphyroblast inclusion trails [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2013, 32 (5): 751–760 (in Chinese)

- with English abstract).
- [30] Bell T H, Mares V M. Correlating deformation and metamorphism around arcs in orogens[J]. *American Mineralogist*, 1999, 84: 1727–1740.
- [31] Bell T H, Bruce M D. The internal inclusion trail geometries preserved within a first phase of porphyroblast growth[J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(2): 236–252.
- [32] Bell T H, Hickey K A. Distribution of pre-folding linear indicators of movement direction around the Spring Hill synform, Vermont: Significance for mechanism of folding in this portion of the Appalachians[J]. *Tectonophysics*, 1997, 274(4): 275–294.
- [33] Hickey K A, Bell T H. Resolving complexities associated with the timing of macroscopic folds in multiply deformed terrains: The Spring Hill synform, Vermont [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(10): 1282–1298.
- [34] 曹汇, Chris FLETCHER. 面理弯切轴测量技术在造山带研究中的应用——以美国阿肯色河地区为例[J]. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1937–1948.
- Cao H, Fletcher C. Using foliation inflection/intersection axes investigates orogenesis –take Arkansas River region, USA for example [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28 (6): 1937–1948 (in Chinese with English abstract).
- [35] Aerden D G A M, Bell T H, Puga E, et al. Multi-stage mountain building vs. relative plate motions in the Betic Cordillera deduced from integrated microstructural and petrological analysis of porphyroblast inclusion trails[J]. *Tectonophysics*, 2013, 587: 188–206.

## Gravitational collapse and folding during orogenesis: A comparative study of FIA trends and fold axial plane traces

CAO Hui<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Environmental Sciences, James Cook University, Townsville, Qld 4811, Australia)

**Abstract:** The FIA trends (foliation intersection or inflection axes in porphyroblasts) measured from Siluro–Devonian garnet sillimanite gneiss in Rangeley, Appalachians, when plotted on a rose diagram, reflect the trends of axial planes of all map scale folds. Similar FIA trends data measured in high temperature–low pressure regime Precambrian rocks in the Texas Creek, Cordillera, are reflected by the fold axial plane traces and schistosity data in this region. But the fold axial plane trace data, which were measured in high temperature to medium pressure regime Palaeozoic rocks in Chester Dome, 200 km southwest of Rangeley, only preserve the effects of the youngest FIA of the all 5 FIA sets that were obtained in this region. This difference of the orogenic regimes from the shallow part to the depth reflects decreasing competency contrasts under greater pressures with collapse and unfolding of earlier formed folds. This investigation shows that the greater overlying loads of rocks flatten folds more obviously under higher pressures.

**Key words:** orogenesis; gravitational collapse; foliation intersection or inflection axes; fold axial plane

**About the first author:** CAO Hui, male, born in 1982, majors in tectonics and structural geology; E-mail: caohui@cags.ac.cn.