

构造活动和火山作用对干酪根成烃转化的影响*

程日辉,王璞瑛,刘万洙,单玄龙

(吉林大学地球科学学院,吉林 长春 130061)

摘要:盆地构造活动和火山作用可以促进干酪根成烃转化。构造活动的影响表现在力化学作用上;火山活动的影响除了表现为加热作用外,还表现为与火山岩有关的矿物与有机质或干酪根的相互作用,包括催化和加氢作用。黄铁矿被证明是一种更有效的催化剂。这些影响是附加在正常的干酪根热解作用上,而且构造活动和火山作用的影响也是复合在一起的。一些模拟实验证实了上述作用的存在以及对于不同的干酪根类型所施加影响的程度是不同的。

关键词:干酪根;力化学;成烃;催化作用;火山作用

中图分类号: TE122.111

文献标识码: A

文章编号: 1000-7849(2003)01-0083-05

构造活动和火山作用是裂谷盆地的主要特征,由此构成了特殊的构造样式和盆地地层结构,在这种构架下,有机相的分布也同样具有特殊型式。因此,响应于构造—火山活动背景下的干酪根成烃转化应具有特殊的方式。干酪根是指“沉积岩中不溶于碱、非氧化型酸和有机溶剂的分散有机质”^[1],其余可溶于有机溶剂的部分叫沥青,指氯仿抽提物,包括烃类、胶质和沥青质^[2]。根据元素分析 [范氏图: $n(H)/n(C) - n(O)/n(C)$] 将干酪根分为三类: I 型(藻质型),指高产石油的干酪根; II 型(腐泥型),指生烃能力较高的干酪根; III 型(腐殖型),指以成气为主的干酪根。对于干酪根有机类型的详细分类国内外已有数十种分类方案,或偏重成因^[3,4],或注重应用^[5],或二者结合^[6]。岩石中的干酪根是重要的成烃母质,随埋深的加大和地温的升高,有机质中的干酪根含量不断下降,而烃类、胶质和沥青质含量则相应增加。干酪根类型的划分与鉴定是研究其成烃转化的基础。随着我国东部油气勘探逐步转向深层和非常规油气藏(如火山岩油气藏),对于干酪根成烃方式的了解是十分必要的。

1 构造活动与干酪根成烃转化

盆地中构造活动不仅控制着盆地的沉积和油气运聚,而且越来越多的地质和地球化学证据显示,构造活动在干酪根或有机质成烃转化中起着重要作用,表现为力化学作用。力化学是介于力学与化学之

间的研究物质在机械作用下的化学转化。从能量角度看,力学与化学的相互关系是机械能与化学能的相互转化^[7]。机械能在成烃过程中的作用问题是讨论的关键。在化学工业中力化学作用常应用于高分子聚合物机械破碎中的化学转化。机械能作用于有机聚合物所发生的反应主要有:①直接作用于聚合物,由于内应力分布不均或集中在个别链段,超过临界应力后使化学键断裂或随机械能消耗活化能而降低活化;②机械作用所产生的电磁、超声波、发光和不同射线而诱发聚合物的降解;③力活化可以生成活性离子,力降解可以使聚合物分子量下降,形成大量的自由基,并伴随着低分子物的析出^[7]。

关于盆地中机械作用对成烃的影响,ДМУРСКИЙ 于 1985 年认为在构造活动区构造作用的能量可与热能相比,并足以对有机质的演化起积极作用。СОЛОВЬЕВ 于 1989 年对各种构造力属性的物理—机械因素与油气生成过程最可能的联系作了系统总结,认为构造作用对有机质演化所起的力化学作用主要有:①当沉积源岩受非线性构造作用(剪切)时,含有机质及其转化产物的岩石物理性质呈周期性振动,使产物及时排出,从而加速了化学反应的进行;②在构造应力场中,固相矿物晶格发生损伤,使反应体系中化学活性急剧提高(如催化作用),并使有机质的转化作用增强;③应力场引起的微观剪切作用直接使大分子发生裂解而产生小分子烃类。

Petoukha 等在 1991 年采用三维试验釜对西伯利亚的煤进行了实验,结果表明当煤的基团结构受

收稿日期: 2002-01-07 编辑: 禹华珍

基金项目: 国家自然科学基金“九五”重大资助项目(49894190-12)

作者简介: 程日辉(1963—),男,副教授,主要从事沉积学和有机地球化学的教学和科研工作。

到力化学作用时伴有脂肪基和芳香基的形成。刘文汇等^[7]对不同类型的低演化烃源岩有机质分别进行了低温力化学成烃的模拟,以便提供力化学成烃的证据。模拟实验分别选择 30°C、100 MPa、120 h 和 80°C、100 MPa、120 h 的实验条件,样品为 500 g,以便比较在低温和生油窗内温度条件下不同类型干酪根的转化特点。模拟结果(表 1 和表 2)显示机械能对成烃化学转化有明显的作用,但不同的母质在机械能作用下的转化强度有所差别。具体分析如下。

(1) 可溶有机质的变化 刘文汇等^[7]用 S_1 和 S_2 分别代表模拟形成的烃(残留烃)和剩余生烃潜力(热解烃),用氯仿沥青“ A ”质量分数和有机碳(C_{org})质量分数比值的变化来反映氯仿沥青“ A ”中组分的变化。对于腐殖型母质,在 30°C 条件下, S_1 和 S_2 的质量分数比原样明显降低,反映其发生了成气转化,但没能收集到气体,其原因可能与样品的吸附有关。与原样相比氯仿沥青“ A ”质量分数和有机碳质量分数比值减少了 3.17%,也说明了部分可溶有机质已转化为气体。在 80°C 条件下, S_1 和 S_2 的质量分数与原样相比变化不大,只是 S_2 的质量分数略有升高,说明在机械能的作用下部分有机碳已转化为潜力烃。氯仿沥青“ A ”质量分数和有机碳质量分数的比值略有升高反映了不溶有机质向可溶有机质的转化。这两种条件实验的对比说明,在相同机械力的作用下,低温更有利于腐殖型母质向气态烃的转化。对于腐泥型母质,从原样到 30°C 和 80°C 的实验

中,氯仿沥青“ A ”和 S_2 的质量分数、氯仿沥青“ A ”质量分数和有机碳质量分数的比值均明显下降,而 S_1 的质量分数则明显增大,说明腐泥型母质在该条件下消耗可溶有机质而形成残留烃(S_1),特别是气态烃。模拟实验前后样品的 T_{max} 在误差范围内基本上无变化,说明在样品成烃转化过程中温度为非制约因素,而显示机械能起着重要作用。

(2) 族组成的变化 刘文汇等^[7]的模拟实验表明,对于腐殖型母质,在 30°C 条件下,总烃质量分数略有降低,非烃和沥青质量分数增高,说明不溶有机质大规模转化为沥青组分。在总烃中烷烃质量分数降低而芳烃质量分数增加,显示原岩中部分烷烃已转化为气态烃。相比在 80°C 条件下,总烃质量分数比原岩略有增加,其原因与芳烃的增加有关,沥青质量分数的增加幅度低于 30°C 条件下的情况,而非烃质量分数的增加幅度较大。结合模拟产物中氯仿沥青“ A ”的变化,显示腐殖型有机质在低温机械能的作用下主要以成气为主。对于腐泥型母质,其在低温机械能作用下表现为总烃质量分数大规模增加,非烃质量分数降低,烷烃和芳烃质量分数明显增加,只是在低温时变化幅度略小。结合氯仿沥青“ A ”质量分数和有机碳质量分数的比值逐步降低而总烃升高的特征,可以认为在机械能作用下腐泥型有机质明显发生了从非烃向烃类的转化。总之,对比模拟实验结果表明:① 腐泥型母质明显发生了非烃向烃类的转化,这种烃类分子较大,仍然保留在样品中而使总烃

表 1 力化学模拟条件及样品分析^[7]

Table 1 Simulated condition for mechanochemistry and analysis

样号	样品井号	实验条件	C		氯仿沥青“ A ”		残留烃 S_1	热解烃 S_2	成熟最大温度 $T_{max}/^{\circ}C$	[$w(\text{氯仿沥青“ A ”})/w(\text{有机碳})$]	
			$w_B/\%$	$w_B/\%$	$w_B/\%$	$w_B/(mg \cdot g^{-1})$				比值 $\%$	变化率 $\%$
模	Lz1-1	原样(III型)	3.00	0.156	0.78	6.50		427	5.20	0	
模	Lz1-2	牛 7 井	30°C, 100 MPa	2.84	0.143	0.61	5.16	424	5.04	- 3.17	
模	Lz1-3	80°C, 100 MPa	3.12	0.168	0.69	6.54	427	5.37	+ 3.27		
模	Lz2-1	原样(I型)	3.93	0.290	0.82	29.16	415	7.83	0		
模	Lz2-2	面 4-5-16	30°C, 100 MPa	4.05	0.252	0.88	28.49	415	6.22	- 15.72	
模	Lz2-3	80°C, 100 MPa	3.97	0.187	0.87	28.41	413	4.72	- 36.04		

表 2 力化学模拟产物的族组分及分析^[7]

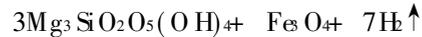
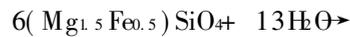
Table 2 Contents and analysis in simulated products for mechanochemistry

样号	烷烃		芳烃		非烃		沥青		总烃		
	$w_B/\%$	变化率 $\%$									
模	Lz1-1	31.19	0	22.42	0	35.54	0	4.90	0	53.61	0
模	Lz1-2	30.04	- 3.69	22.59	+ 0.76	35.75	+ 0.59	6.36	29.80	52.63	- 1.83
模	Lz1-3	30.23	- 3.08	24.88	+ 10.97	38.14	+ 7.32	5.81	18.57	55.11	+ 2.80
模	Lz2-1	18.95	0	7.53	0	68.68	0	-	-	26.48	0
模	Lz2-2	19.64	+ 3.64	9.52	26.43	62.50	26.43	-	-	29.16	10.12
模	Lz2-3	22.69	+ 19.74	9.64	28.02	58.43	28.02	-	-	32.33	22.09

比例增加,但还未达到机械能使不溶有机质(干酪根)降解成可溶有机质的程度;而腐殖型母质则不仅发生了可溶有机质中的非烃、沥青质向总烃的转化,而且还发生了大分子烃类向小分子烃类的转化;②腐殖型母质在机械能作用下,不溶有机质(干酪根)可以向可溶有机质发生一定的转化,且以形成气态烃为主;而腐泥型母质在机械能作用下在低演化阶段可以消耗可溶有机质而生成游离烃(这可能是未熟—低熟油形成的最主要机制之一)。在松辽盆地许多油气田分布在深大断裂的两侧,如富拉尔基油田分布在嫩江断裂带、太平庄气田分布于哈尔滨—扶余断裂带上。这不仅因为断裂控制了盆地沉积相带和火山岩相带的展布^[8]、构造圈闭与非构造圈闭的展布、高地温场和储层内流体势场的展布^[9],而且还因为构造活动与机械能对有机质或干酪根的成烃转化作用有关。以松辽盆地徐家围子断陷气藏为研究对象,有关构造作用对有机质成烃转化的地质模拟研究正在进行中。对其有机质的分析显示,徐家围子断陷侏罗系烃源岩中有机碳的平均质量分数为 0.62%,氯仿沥青“A”平均质量分数为 0.023%,总烃平均质量分数为 262×10^{-6} ,说明侏罗系烃源岩是较好的气源岩。徐家围子断陷的埋藏较深,演化程度高,镜质体反射率 $R_o > 1.3\%$,油气源岩的有机质母质类型以 III 型为主,II 型次之。初步分析结果表明,由于在晚侏罗世—早白垩世徐家围子断陷的构造活动十分强烈,III 型母质在成烃转化过程中有机质作用的贡献,从而使不溶有机质向可溶有机质转化,并形成气态烃。尚待解决的问题是如何估计这种机械作用对总烃的贡献。

2 火山矿物与有机质的相互作用

盆地中的构造运动经常伴随着火山作用,尤其是在裂谷盆地中。构造—火山作用建造了特殊的盆地构造格架和地层结构,这使得火山岩与生油岩共生。火山作用不仅为干酪根成烃转化提供热量而且还提供气液体和矿物质^[10]。研究显示一些火山岩矿物对有机质生烃转化具有催化和加氢作用,可以使生油岩在较低的温度和压力条件下生成较多的油气。金强等^[11]利用从火山岩中采集的沸石作为催化剂,橄榄石作为氢的来源,以 II 型和 III 型有机质为生油岩,进行了火山岩矿物对生油岩催化、加氢的对比模拟实验。实验结果表明加入橄榄石后氢气的产率明显提高,同时加入沸石和橄榄石后氢气的产率仍在提高。这是橄榄石在有机质成烃转化过程中发生蚀变而释放出氢气所致,其反应式如下:



实验结果还表明生油岩与沸石、橄榄石相互作用后,甲烷的产率提高了 2~3 倍,产率提高的原因与氢气的增加有关,同时表明有机质或干酪根的类型越好,氢气和甲烷的产率越高。然而,对有机质或干酪根成烃转化具有催化作用的矿物不仅仅只有沸石等粘土矿物,黄铁矿亦有催化作用。干酪根中普遍含有黄铁矿,而且黄铁矿的质量分数与干酪根的类型有密切的关系。张景廉等^[12]对松辽盆地的资料分析表明,I 型干酪根中黄铁矿的质量分数高达 38%~76%,II 型干酪根中黄铁矿的质量分数为 10%~30%,III 型干酪根中黄铁矿的质量分数为 2.5%~3.5%,即干酪根的类型越好,黄铁矿的质量分数越高。电子显微镜揭示出 I 型和 II 型干酪根常与黄铁矿密切共生,且干酪根具有明显的分带,中心常发育一个黄铁矿核^[13]。干酪根的形态与黄铁矿的形态有关,干酪根的形态不同,黄铁矿的形态也不同:III 型干酪根以轮廓形为主,没有微晶黄铁矿包裹体;I 型干酪根以无定形为主,富含微晶黄铁矿;II 型干酪根形态为混合型,各组分的相对比例变化较大^[14]。Hunt 等^[15]发现干酪根的反应活化能、反应速率与硫的质量分数有关,若把 II 型干酪根分成 A、B、C、D 四类,其硫的质量分数越高,反应速率越快,则活化能就会越低(表 3)。各类干酪根的活化能大小排序为 $E_1 > E_2 > E_3$,即在相同的温度条件下,III 型干酪根成熟最早,II 型次之,I 型最晚。但随温度的升高,I 型干酪根的降解速率增加最快,II 型次之,III 型最小。大约从 280°C 开始,I 型干酪根的降解速率大大超过 III 型干酪根,这说明黄铁矿在起作用^[12]。

表 3 不同类型干酪根中硫质量分数与活化能的相互关系^[15]

Table 3 Relationship between S content of different types of kerogens and activation energies

干酪根类型	活化能 $E / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	幂指数 A / Ma^{-1}	硫含量 $w(\text{S}) / \%$	反应速率 k
II A	143.4	7.017×10^0	11.0	快
II B	178.7	4.233×10^3	9.0	中—快
II C	201.3	1.546×10^5	7.4	中
II D	218.3	5.656×10^5	5.4	慢

注: $k = A \exp(-E/RT)$,其中 R 为理想气体常量; T 为温度(K)

黄铁矿是地壳中分布最广泛的硫化物,可形成于多种不同的地质条件下。黄铁矿质量分数最大的矿床是产于火山岩系中的含铜黄铁矿层,由火山沉积和火山热液作用形成^[16]。虽然干酪根中的多数黄铁矿通常是有机成因的,但干酪根中黄铁矿的质量分数无疑会受到火山作用的影响。因为火山作用提

供的富硫物质,一方面可以增加水介质中硫的质量分数,参与与干酪根相关的黄铁矿的形成,另一方面可以由火山岩或火山碎屑岩直接形成黄铁矿。因此,在研究与火山岩有关的矿物与有机质间的相互作用时,黄铁矿应该是重点考虑的

3 讨论

自干酪根热解成烃理论^[17]提出并占主导地位以来,其它的能源形式包括机械能和生物能对有机质或干酪根成烃转化的作用没有得到应有的重视。事实上,在有机质或干酪根成烃转化过程中各种类型的能量是综合在一起发挥作用的,只是在不同的演化阶段主导性发生了变化。早期阶段可能是以生物能为主导,晚期阶段则可能是以热能为主导,而机械能是始终存在的,且往往在构造活动期上升为主导因素。就机械能而言,相关的模拟实验对于深入研究干酪根成烃转化起到了强有力的推动作用,不但证实了这种机制的存在,而且对于不同类型的有机质或干酪根,其作用程度有明显的差异^[7]。深入的模拟实验研究还应提供不同类型的有机质或干酪根(包括不同的显微组分)在成烃转化过程中机械能的大小、力的作用方式等与成烃量、油气类型的定性和定量的关系,因而具有预测性。这在建立具体地质背景下的油气成因与勘探模型时都具有意义。

有机质或干酪根成烃转化的另一个问题是反应速率和产烃率,即催化作用问题。由于矿物基质的影响,用热解技术确定干酪根类型不完全可靠。矿物基质的影响,其实是无机矿物(粘土矿物、碳酸盐、硅酸盐等)对干酪根的催化作用。张景廉等^[12]认为粘土矿物等催化剂可降低反应活化能(即降低反应的温度),使反应速度加快并影响反应机理,他们同时认为黄铁矿是更有效的催化剂。火山物质中可以提供数量丰富的催化剂矿物,如蒙脱石,它主要产于中酸性火山岩和火山凝灰岩的风化壳中,并大量富集于膨润土中;此外,还有黄铁矿,它大量存在于火山岩系中,由火山沉积和火山热液作用形成。化学工业中的裂解和有机质成烃转化模拟实验中得到的有关催化剂作用的认识将有助于了解自然状态下的成烃机制。无论是机械能还是催化剂对于有机质或干酪根成烃转化的作用均必须放在具体的地质背景中考虑,如盆地中的构造或地层单元,由此可揭示一些小型富油盆地或单元的形成机理,并建立预测模型。

裂谷盆地,特别是在裂谷形成的早期,构造和火山活动特别强烈,盆地充填处于构造—火山活动背景之下,在不同的构造单元和地层单元中由于构造

和火山活动所控制的动力条件不同,不同的单元对有机质或干酪根成烃转化必定存在其特有的温度、压力、浓度和催化剂条件。在盆地的充填物质中除火山岩外,泥炭沼泽和湖泊环境中的煤和油页岩都很发育,这些均可以提供不同干酪根的有机显微类型,它们的分布也同样受构造单元、地层单元及地层结构的控制。因此,通过研究不同构造样式和不同地层结构中有机质或干酪根成烃转化对于构造—火山活动背景的响应方式,可以建立预测模型。但仍有许多方面需进行深入研究,包括地层格架中的构造样式与火山岩和火山碎屑岩的时空分布;火山活动对湖盆介质、沉积物、有机质富集的控制;生油层中火山岩的成岩演化和蚀变;在埋藏条件下有机质与火山矿物的相互作用^[11];与构造作用有关的机械能的估计及其在同沉积和沉积期后对有机质成烃转化影响的差异等。

参考文献:

- [1] Hunt J M. *Petroleum Geochemistry and Geology* [M]. San Francisco, W. H. Freeman and Co., 1979.
- [2] 陈荣书. 石油及天然气地质学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.
- [3] Teichmuller M, Wolf M. Application of fluorescence microscopy in coal petrology and oil exploration [J]. *J. Microscopy*, 1977, 109(1): 49-73.
- [4] Robert P. Classification of organic matter by means of fluorescence— Application to hydrocarbon source rocks [J]. *Intern. J. Coal Geology*, 1981, 1(2): 103-138.
- [5] Senftle J T, Brown J H, Larter S R. *Organic Matter Fluorescence Application to Petroleum Source Rock Evaluation* [M]. Virginia Society of Organic, 1984.
- [6] 涂建琪,王淑芝,费轩冬. 干酪根有机质类型划分的若干问题探讨 [J]. 石油实验地质, 1998, 20(2): 187-191.
- [7] 刘文汇,徐永昌,张守春,等. 一种新的成烃机制——力化学作用及其实验证据 [J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 314-318.
- [8] Cheng Rihui, Liu Wanzhu, Shan Xuanlong, et al. The sequence architecture of volcanic basin fillings— An example from Xujiaweizi faulted depression in Songliao basin [J]. *Journal of Geoscientific Research in Northeast Asia*, 2001, 4(2): 11.
- [9] 郭占谦. 关于松辽盆地北部油气勘探如何突破的思考 [J]. 大庆石油勘探与开发, 1998, 17(5): 1-7.
- [10] Simoneit B R T. Petroleum generation, an easy and widespread process in hydrothermal system: An overview [J]. *Applied Geochemistry*, 1990, 5(1/2): 17-18.
- [11] 金强. 裂谷盆地生油层中火山岩及其矿物与有机质的相互作用——油气生成的催化和加氢作用研究进展及展望 [J]. 地球科学进展, 1998, 13(6): 542-546.
- [12] 张景廉,张平中. 黄铁矿对有机质成烃的催化作用讨论 [J]. 地球科学进展, 1996, 11(3): 283-287.
- [13] 陆琦,刘惠芳,罗莉娟,等. 广西百色盆地干酪根的研究——兼谈干酪根演化与粘土矿物的关系 [J]. 沉积学报, 1993, 11(2): 124-131.
- [14] 郭迪孝,王荣福,胡惕麟,等. 干酪根类型参数的相互关系及其

意义 [A]. 见: 中国石油学会地质委员会. 有机地球化学和陆生石油 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1986.

[15] Hunt J.M. Modeling oil generation with time-temperature indexes based on the Arrhenius equation [J]. *AAPG Bull.*, 1991, 75: 795-807.

[16] 罗谷风. 基础结晶学与矿物学 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1993.

[17] Tissot B.P., Welt D.H. *Petroleum Formation and Occurrence—A New Approach to Oil and Gas Exploration* [M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1978.

INFLUENCE OF TECTONIC ACTIVITY AND VOLCANISM ON HYDROCARBON GENERATION OF KEROGEN

CHENG Ri-hui, WANG Pu-jun, LIU Wan-zhu, SHAN Xuan-long

(Faculty of Earth Sciences, Jilin University, Changchun Jinlin 130061, China)

Abstract Tectonic activities and volcanism in the basin have an influence on hydrocarbon generation of kerogen and its change. The influence of tectonic activities focuses on a process of mechanochemistry, while the influence of volcanism is presented by interaction between volcanic minerals and organic matter including catalysis and adding of hydrogen into hydrocarbon. It is known that pyritet is a more effective catalyst. All those influences are exerted on the normal process of thermal degradation of organic matter or kerogen, with the influences of both tectonics and volcanism mixed with each other. Some simulations have proved the influences mentioned above and also the different influence degrees for different types of kerogens.

Key words kerogen; mechanochemistry; hydrocarbon generation; catalysis; volcanism

造山带混杂岩区非史密斯地层学研究主要成果简介

张克信

(中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉, 430074)

在我国“九五”“国家第二代地质填图计划”中的造山带非史密斯地层区 1: 25万区域地质调查和专题科研任务中, 由中国地质大学主持完成的中国地质调查局重大项目“1: 25万冬给措纳湖幅区域地质调查与东昆仑造山带非史密斯地层区 1: 25万区域地质填图方法研究”(1996~ 2000年), 进一步深化了造山带地层的空间结构规律和成因特征研究, 解决了一批关键性的疑难地层问题, 使造山带地层学在研究理论、方法和指导思想上得到丰富和发展。其主要成果“造山带混杂岩区构造岩片四维裂拼复原方法”被中国地质调查局主编的《1: 25万区域地质调查技术要求》《青藏高原艰险区 1: 25万区域地质调查技术要求》和《青藏高原区域地质调查野外工作手册》引用, 被我国西部正在开展的造山带区 40多个地质填图项目广泛采用。该成果于 2001年 3月在北京由中国地质调查局组织评审通过鉴定, 被评为优秀级。评审委员会认为: “为造山带 1: 25万区域地质调查开辟了新的方法和途径, 对于造山带非史密斯地层区的 1: 25万区域地质填图具有示范意义”。该项研究的主要成果如下。

1. 通过充分地运用新理论、新技术和新方法, 对东昆仑造山带东段的造山带物质组成、形成、演化及现今三维地质结构进行深入调查和分析的基础上,

并综合中国中央和西部造山带形成演化特点, 提出了中国造山带研究的新理论——非威尔逊旋回, 总结出非威尔逊旋回在 3 个方面与威尔逊旋回不同, 即造洋阶段的多岛洋、俯冲对接阶段的软碰撞和由此产生的多旋回。

2. 在大量室内和野外工作的基础上, 对东昆仑造山带混杂岩非史密斯地层单位的建立、划分、术语、命名原则和填图技术路线等提出了一套系统的、全新的体系; 总结出“构造岩片四维裂拼复原方法”; 提出将构造岩片、超岩片作为混杂岩区填图单位之一, 并对其进行了可操作的科学定义; 对非史密斯地层填图及研究技术路线, 提出“物态、时态、相态、位态和变形、变质历程”分析法。并对研究区进行了较深入的调查分析, 取得了大量的实际资料和研究成果, 明显提高了研究区的地质调查水平。

3. 对东昆仑造山带不同造山旋回的蛇绿岩进行了厘定, 将其划分为四条蛇绿岩带, 进行了系统的岩相学、地球化学、矿物学、矿物地球化学的研究, 分析了不同蛇绿岩形成的构造背景, 并论证了不同蛇绿岩带的形成在板块动力学上的差异。对东昆仑中部和东昆仑南部蛇绿岩带的深入研究, 深化了对东昆仑造山带洋陆转换过程的认识。

(下转第 91 页)