

# 利用古温标恢复 四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量

朱传庆<sup>1,2</sup> 徐 明<sup>1,2</sup> 单竞男<sup>1,2</sup> 袁玉松<sup>3</sup> 赵永庆<sup>4</sup> 胡圣标<sup>1</sup>

(1.中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029;2.中国科学院研究生院,北京 100049;  
3.中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院,北京 100083;4.中国石化勘探南方分公司,四川 成都 610041)

**摘要:**地层剥蚀量是沉积盆地埋藏史和热史重建中一个关键的参数。本文利用石油钻井的系统古温标( $R_0$ )资料,并结合多种恢复方法,得出四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量。研究表明:加里东期,川东南剥蚀量较大,达 2000 m。东吴运动时期,川西南、川东南等距二叠纪玄武岩喷发区较近地区的剥蚀量较大,分别在 260~450 m 和 800~900 m;印支早期盆地整体遭受了抬升剥蚀作用,剥蚀厚度为 100~500 m。印支中、晚期龙门山地区褶皱剥蚀,H1、Y1 等钻井该时期的地层剥蚀量超过 2000 m。燕山期周缘山系的继续隆升造成山前大范围地区的剥蚀;喜山期盆地周缘钻井的剥蚀量较大,在 2000 m 左右,而早期古隆起上的钻井如 GJ<sub>13</sub>、Z<sub>12</sub> 等钻井的地层剥蚀量则较小,在 1000 m 左右。可见,四川盆地不同地质时期及不同构造区位的剥蚀厚度都不尽相同,这一时空差异反映了构造运动对该区的差异影响。这一研究也表明,以系统的古温标资料( $R_0$ )为基础,针对不同地质情况选用适当的反演方法并结合多种反演方法,能有效地恢复钻井在不同时期的剥蚀量。上述四川盆地各时期剥蚀地层厚度的恢复,对研究该区的构造、沉积和油气演化提供了基础数据。

**关键词:**镜质体反射率;古热流法;剥蚀量;四川盆地

**中图分类号:**P539.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)06-1268-10

四川盆地位于扬子板块西缘,处于扬子地块、塔里木地块、青藏高原、印度地块等多地体交汇处,受板块运动作用的影响较为强烈。该盆地是一个在上扬子克拉通基础上发展起来的叠合盆地,经历了古生代—早中生代的早期克拉通拗陷阶段(位于上扬子克拉通西部)和晚三叠世—新生代晚期的前陆盆地阶段<sup>[1]</sup>。印支期是扬子板块重大变革阶段,此时形成了盆地的雏形,后经喜马拉雅运动全面褶皱形成现今构造面貌<sup>[1-3]</sup>。

四川盆地是中国重要的含油气盆地之一,前人针对盆地的构造演化及石油天然气地质学做了大量的研究<sup>[2-5]</sup>,近年来,普光大型气田的发现,为盆地海相油气勘探前景打开了新局面。盆地经历了多次构造运动,使沉积岩系遭受了多次的抬升和剥蚀,因而

各地质时期的沉积厚度与现今的残存厚度有较大差别<sup>[6]</sup>。恢复不同地质时期的地层剥蚀量,对于研究四川盆地构造发展演化、厘定主要构造运动对盆地的影响程度以及盆地内油气地质研究具有重要意义。

曾道富<sup>[6]</sup>曾对盆地各构造时期的剥蚀量做过初步的研究,较为系统地讨论了四川盆地各主要构造运动时期的剥蚀量,但限于当时的技术条件和资料的缺乏,恢复的剥蚀量结果不能对全盆地进行较好的控制。近年来,不少学者对重点油气区块和与青藏高原相接的盆地西缘等热点研究区的地层剥蚀量的恢复也做了大量的工作<sup>[7-12]</sup>。N. J. Richardson 等<sup>[8]</sup>研究了盆地西缘新生界以来的剥蚀量;怀怀辉等<sup>[12]</sup>以川合 100 井为例,讨论了古热流法对剥蚀量的敏感性;卢庆治等<sup>[7]</sup>利用古温标数据恢复了川东北的热

收稿日期:2009-03-27;改回日期:2009-07-14

基金项目:国家自然科学基金项目(40672197,40974048)资助。

作者简介:朱传庆,男,1981年生,博士生,从事含油气盆地地热史恢复方面的研究;E-mail:zqc\_igcas@163.com。



且是可以定量描述的。盆地内地层的热史(地温史)主要受地层埋藏和盆地热流影响,其次还受到火山岩浆和地下流体活动等非稳态热效应的影响。地层中的  $R_0$  值就记录了地层的埋藏史和盆地的热流史。对于埋藏史的恢复来说,确定剥蚀厚度是关键。如果能够确定各剥蚀层的剥蚀厚度,就可通过现今残留地层厚度的回剥来恢复地层埋藏史<sup>[14]</sup>,从而可以模拟与之伴随的沉积或剥蚀等非稳态热过程,再结合盆地热流史(如果盆地热流史已知),就能重建地层温度史。因此,古热流法反演中的变量是盆地热流史和不整合面地层剥蚀厚度。

反演过程中采用的模型为平行化学反应模型<sup>[14]</sup>(EASY % $R_0$ )。反演前先将反演井剖面按实际地层和不整合分为若干构造层,每一构造层内至多有两个未知量:剥蚀厚度( $He$ )和剥蚀开始时的热流值( $Q_i$ )。然后,从最上一个构造层开始,自上而下逐层反演。由于古热流模型采用分段线性模型,现今热流和岩石热导率、比热及密度都是已知的,因此反演时间段( $t_i$ )之前  $t_{i-1}$  段内任意时刻( $t$ )的热流( $Q(t)$ )为

$$Q(t) = Q_{i-1} (1 + \lambda \Delta t_i)$$

$$\lambda_{i-1} = (Q_i - Q_{i-1}) / \Delta t_i$$

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$$

其中,  $Q_{i-1}$  为  $t_{i-1}$  时刻的热流值,  $\lambda_{i-1}$  为  $\Delta t_i$  时间段内的热流变化率。通过二分法或非线性牛顿迭代法对  $He$  和  $Q_i$  进行迭代,以使构造层内实测  $R_0$  值与相应的 EASY% $R_0$  理论模型计算值达到最佳拟合,  $He$  和  $Q_i$  即可同时确定。

热流史反演的过程中,各构造层间(上构造层对下伏构造层)以及同一构造层内的所有样品间是相互联系和制约的。同时,地史与热史反演又是完全耦

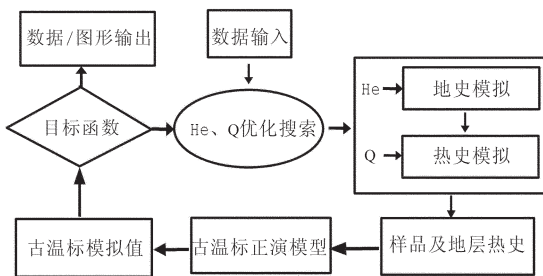


图2 古热流法热史恢复原理流程(据文献[14]修改)  
Fig.2 Flow chart of the paleo-heat flow method (modified from Ref. [14])

合的,这就减少了反演的多解性。该方法是目前利用古温标进行热史和剥蚀量恢复的较为成熟的方法。

## 2 四川盆地各构造运动时期的剥蚀量

利用古温标重建剥蚀量和热史恢复的必要条件是地层早期所经历的温度大于后期温度。沉积地层的温度,主要由其埋藏深度决定。因此,早时期埋藏较深,其后形成隆起的地区,是利用古温标研究热史和剥蚀量的有利区域。

四川盆地发育多期的古隆起<sup>[24-27]</sup>(图3),如果古隆起上的钻井打到了其形成之前的沉积地层,则可以利用地层中的  $R_0$  测试数据恢复该隆起造成的地层剥蚀厚度。根据古隆起发育的时间,与钻井深度、钻井  $R_0$  资料分布等情况相结合,笔者在盆地范围内选择了18口井作为重点研究井。

### 2.1 代表性钻井地层剥蚀量恢复

古温标反演方法,以地层不整合界面(剥蚀界面)作为不同构造层的分界,反演出各构造层的古地温特征以及它们之间的剥蚀量。因此,对于两次时间相邻的剥蚀,如果后期剥蚀较大,不仅剥蚀掉了前一次剥蚀之后新沉积的地层,而且剥蚀到了前一次剥蚀之前的残留地层,那么,反演的定量结果只能代表

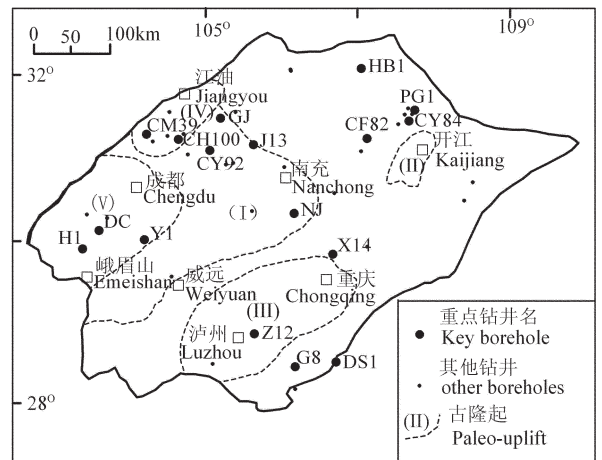


图3 四川盆地古隆起及研究井分布  
(I)—乐山龙女寺古隆起(加里东期);(II)—开江古隆起(海西期、印支期);(III)—泸州古隆起(印支期);(IV)—江油—绵竹古隆起(燕山期);(V)—大兴古隆起(燕山期)  
Fig.3 Distribution of paleo-uplifts and locations of key boreholes in Sichuan basin  
(I)—Leshan-Longnusi uplift; (II)—Kaijiang uplift; (III)—Luzhou uplift; (IV)—Jiangyou-Mianzhu uplift; (V)—Daxing uplift



两次剥蚀的总厚度,即不整合面上下构造层之间总的剥蚀厚度。

四川盆地的主要不整合有:中新生界之间的不整合、侏罗系与三叠系之间的不整合、上-下二叠统之间的不整合、早古生界顶部不整合。

距现在的时间愈短,剥蚀过程愈简单,则其剥蚀量更容易精确地恢复。古热流法的反演过程,也是从最上的一个构造层开始,自上而下的逐层反演。因此,如果上面构造层的剥蚀量愈精确,则下伏构造层的剥蚀量也可以更加容易和精确地得到恢复。古热流法在进行迭代拟合的过程中,受第一个构造层的剥蚀量和现今热流的影响较大,因为最后的一次剥蚀和现今的热流值,是整个地质过程演化的最终状态和热演化的定格,也是该方法反演的基础参数。

因此,本文所采取的恢复流程,是从最晚期的剥蚀开始,时间上由晚到早,空间上从上到下,进行剥蚀量的恢复。对于最晚的一期剥蚀,由于其过程简单,可以采用  $R_o$  差值法和古地温梯度法进行恢复。而对于早期的剥蚀,则采用古热流法进行搜索反演,最后通过对现今古温标数据的最佳拟合来确定其剥蚀量。

四川盆地大部分钻井都存在中新生界的不整合,代表了盆地经受的距现今最近的大范围剥蚀。图 4 所示为采用  $R_o$  差值法确定的 PG1 井顶部的中新生界间不整合的剥蚀量,为 1720 m ( $R_o=0.20\%$  处代表古地表位置)。

把确定的顶部剥蚀量,现今地温梯度、热流值(表 1 为根据各类文献<sup>[7,12,28]</sup>以及本次工作确定的各钻井的地温梯度和热流值)以及岩石热物性参数(热导率等)输入到古热流法反演程序中,通过多次迭代拟合,便可以得到各不整合面的剥蚀厚度的最佳计

算值。

图 5 显示了 PG1 井的古热流法反演结果。实线代表理论(EASY% $R_o$  模型)计算的  $R_o$  值,圆点代表实测值,理论值与实测值拟合较好。

表 2 展示了利用古温标数据,采用古热流法恢复的四川盆地几口重点研究井的主要不整合面的剥蚀量。

### 2.2 主要构造运动时期的地层剥蚀

四川盆地内主要的不整合面代表了盆地从加里东期以来的主要构造运动的影响:加里东期的广西运动,海西期的云南运动、东吴运动,印支运动,燕山运动以及新生代以来的喜山运动。多期的构造运动使四川盆地的沉积地层经历了复杂的变形和剥蚀过程,而剥蚀量也在一定程度上反映了各期构造运动的影响程度。图 6 为四川盆地各区域几口代表性钻井的沉降史,可以反映出各构造运动时期的沉降与抬升剥蚀情况。

#### 2.2.1 加里东期

中志留世末期,加里东运动使四川盆地整体抬升,直至中石炭世海侵之前,长期遭受剥蚀<sup>[9]</sup>。本次

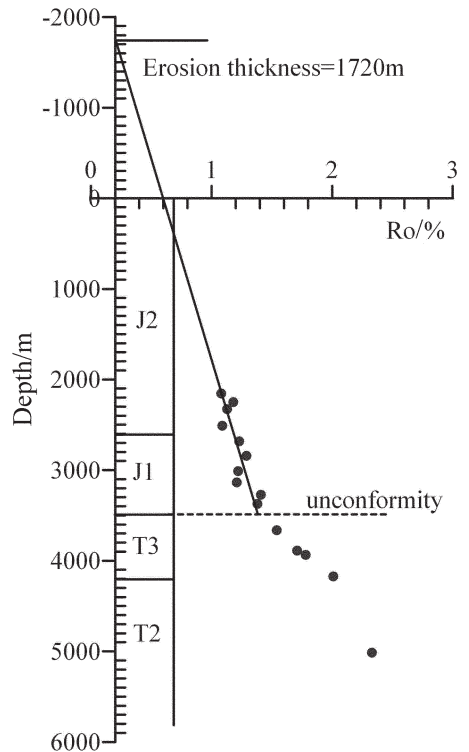


图 4  $R_o$  差值法恢复 PG1 井顶部剥蚀量  
Fig.4 Reconstruction of the denudation thickness at the top of PG1 borehole using the method of different  $R_o$  values

表 1 主要研究井的现今地温梯度和热流值

Table 1 The present temperature gradients and heat flow values of key boreholes

井号	G(°C/km)	Q(mW/m <sup>2</sup> )	井号	G(°C/km)	Q(mW/m <sup>2</sup> )
CM39	22.3	55	HB1	20.1	42
CH100	22.1	54	CF82	20.5	50
CY92	22.3	56	SS1	22	54
DC	21.3	53	PG1	18.2	41
HI	22.1	57	CY84	19.2	47
Y1	22.3	58	X14	21	54
GJ	22.2	56	Z12	25	61
J13	23.2	57	G8	23.6	43
NJ	23.7	62	DS1	16.7	39

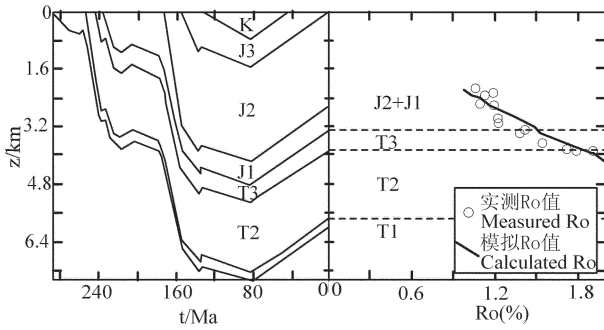


图5 四川盆地 PG1 井古热流法反演结果

剥蚀时间 ( $t_i$ ) 和相应的剥蚀量 ( $He_i$ ):  $t_1=43.24$  Ma,  $He_1=800$  m;  $t_2=84.00$  Ma,  $He_2=700$  m;  $t_3=137$  Ma,  $He_3=140$  m;  $t_4=220.00$  Ma,  $He_4=230$  m;  $t_5=237.00$  Ma,  $He_5=120$  m;  $t_6=260$  Ma,  $He_6=100$  m

Fig.5 The inversion result of borehole PG1 using the paleo-heat flow method

Denudation time ( $t_i$ ) and corresponding denudation amount ( $He_i$ ):

$t_1=43.24$ Ma,  $He_1=800$ m;  $t_2=84.00$ Ma,  $He_2=700$ m;  $t_3=137$ Ma,  $He_3=140$ m;  $t_4=220.00$ Ma,  $He_4=230$ m;  $t_5=237.00$ Ma,  $He_5=120$ m;  $t_6=260$ Ma,  $He_6=100$ m

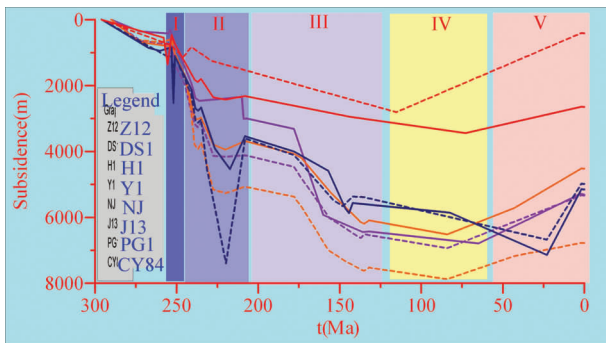


图6 四川盆地部分钻井沉降史

I—海西(东吴运动)期; II—印支期; III—燕山早-中期; IV—燕山晚期; V—喜山期

Fig.6 History of subsidence of boreholes in Sichuan basin I—Hercynian Dongwu period; II—Indo-Sinian period; III—Early-Middle Yanshanian period; IV—Late Yanshanian period; V—Himalayan period

研究由于下古生界的古温标资料较少,所以大部分钻井的剥蚀量未能通过古温标资料直接恢复出。由表2看出,川东南的DS1井,剥蚀量较大,达2000 m,川西南的H1井和Y1井,剥蚀量在500 m左右,川东北的HB1井,剥蚀量较小,230 m左右。这一规律,与曾道富<sup>[6]</sup>利用沉积速率法、沉积速率趋势法,恢复的剥蚀量的规律是一致的。川东南地区在加里东期的剥蚀量较大,也是前人认为的位于四川叠合盆地东南的江南造山带形成时间相对较早的一个证据<sup>[27]</sup>。

表2 钻井各不整合面的地层剥蚀厚度(单位:m)

Table 2 Stratigraphic denudation thickness of various unconformity surfaces in boreholes (in meter)

井名	-P	P <sub>1</sub> -P <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>3</sub>	T <sub>3</sub> -J	Mz-Cz
CM39					150 1000
CH100					300 1700
CY92				400	1500
DC				(50)	200 2500
H1	500	450	325	1000	2600
Y1	500	260	100	2460	2300
GJ		100		250	1500
J13		100	200	200	1300
NJ		150	(50)	260	2100
HB1	(230)	200	200	300	2310
CF82			150	250	2200
SS1		100	(50)	230	2150
PG1		100	120	230	1640
CY84		150	150	(50)	1710
X14		800	410	800	3000
Z12		900	100	100	800
G8				1750	3180
DS1	2000			(1500)	2400

注:括号内数据表示资料缺乏或通过其他方法的换算得出。

### 2.2.2 海西期

中石炭世末期的昆明运动,使盆地大部分地区特别是川东北地区抬升,直至早二叠世海侵之前,几乎经历了整个晚石炭世的大面积剥蚀,将先前沉积的中石炭统上部或整个中石炭统剥蚀殆尽,甚至还可能剥蚀了一部分加里东期的残留地层<sup>[2,6]</sup>。因此,石炭系以及泥盆系在盆地内大部分地区残留厚度较薄或者已经被完全剥蚀掉。

发生在早、晚二叠世期间的东吴运动,在四川盆地主要表现为玄武岩的喷发。何斌等认为峨嵋山玄武岩喷发前岩浆上涌形成的穹状穹隆造成了地层的抬升剥蚀,川西南、川东南等盆地边缘距玄武岩喷发区较近的地区的剥蚀量相对较大<sup>[29-31]</sup>。川西南的剥蚀量在260~450 m,川东南剥蚀量较大,800~900 m,其他地区剥蚀量较小,为100~200 m(图7)。

### 2.2.3 印支期

印支运动分为早、中、晚三幕。印支早幕使整个盆地抬升、剥蚀,基本上结束了整个盆地的海相沉积历史,它是继加里东运动后,四川盆地再次遭受剥蚀的重要时期<sup>[2,5-6]</sup>。从表2及图6中可以看出,多口钻井在印支早期遭受了抬升剥蚀作用,剥蚀厚度为100~500 m。该期运动还在川东北部的开江地区形

成明显的 NE 向展布的褶皱隆<sup>[27]</sup>。

印支中、晚幕表现为盆地西部边缘的龙门山地区强烈的褶皱剥蚀,致使大部分上三叠统剥蚀无存,而在盆地内部的广大地区则表现微弱<sup>[5,6]</sup>。这点在图 6 中显示得较为明显:川西的 H1、Y1 的剥蚀量较大,超过了 1000 m,而盆地其他地区的钻井剥蚀则多数在 200 m 左右。印支中晚期运动,使龙门山前陆盆地开始发育<sup>[32-41]</sup>。

2.2.4 燕山早—中期

燕山早—中期 (J-K1) 是华南褶皱带的造山时期,发育强烈的构造岩浆作用,并形成逆冲推覆和强烈的褶皱。同时期,冈瓦纳大陆全面裂解漂移,夹于其上扬子区向北运动,南秦岭向南逆冲、推覆,形成了川北拗陷<sup>[3,42-45]</sup>。

汪泽成等<sup>[42]</sup>认为,大巴山前陆盆地在晚三叠世为随大巴山隆升而成为北大巴山隆起带与四川盆地过渡的斜坡地带,而在侏罗纪发育成为前陆盆地。图 6 可以看出,在 150 Ma 之后,川西、川东北、川中等大部分地区都发生了小规模剥蚀,这代表了龙门山、米仓山、大巴山等周缘山系的继续隆升而造成山前大范围地区的抬升剥蚀。

2.2.5 燕山晚期—喜山期

燕山晚期川北、川东结束了陆相沉积,开始进入风化剥蚀时期,并形成了北东走向的构造和四川盆地东南部的边缘锥形<sup>[3]</sup>。

喜山期是从晚白垩世至今最后的一个构造时期,其主要的构造活动发生在盆地周缘,使四川盆地又一次褶皱抬升,古新统及下伏地层的剥蚀时间已经持续了 50 Ma<sup>[6,8]</sup>。刘树根等<sup>[46]</sup>和邓宾等<sup>[47]</sup>通过磷灰石裂变径迹研究认为喜山期是盆地大规模隆升时期,川东南丁山 1 井自晚白垩世以来的隆升幅度超过了 3000 m,威远地区超过了 4000 m,而龙门山等周缘山系,隆升幅度超过了 5000 m。

曾道富<sup>[6]</sup>所恢复的喜山期剥蚀数据认为盆地内部的剥蚀地层较薄,一般为 1200~2000 m,在盆地边缘地区,因褶皱强烈,剥蚀地层则较厚,一般约为 3000 m。

Richardson 等<sup>[9]</sup>通过磷灰石裂变径迹等低温热年代学的最新研究成果认为,盆地内新生界的剥蚀量在 1~4 km,在盆地内广泛存在。笔者恢复的剥蚀量表明,盆地周缘钻井的剥蚀量较大,在 2000 m 左右,而早期形成的古隆起上的钻井如 GJ、J13、Z12 等钻井的剥蚀量则较小,在 1000 m 左右(图 8)。

经历了多期运动后,喜山期在最近的一次强烈构造运动,使周缘山系隆升、山前前陆盆地定型,形成了四川盆地现今的构造面貌。

3 结 论

通过对四川盆地各构造时期的剥蚀量的恢复结果的分析,可以得出以下几点认识:

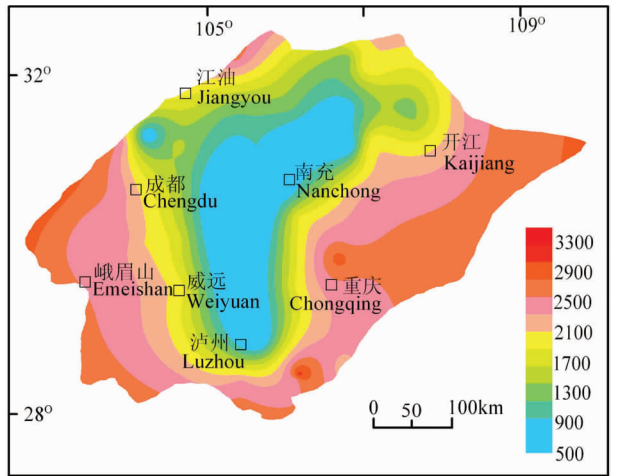
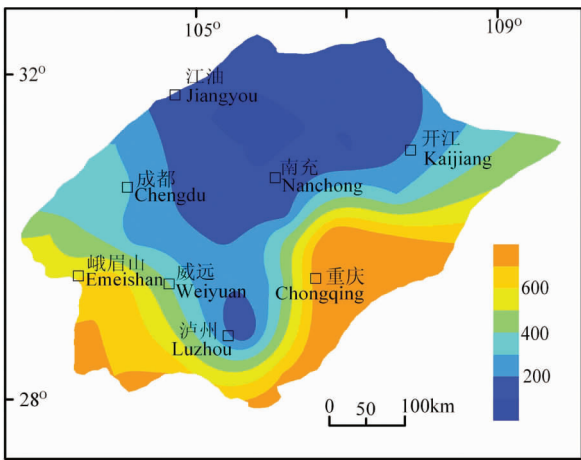


图 7 四川盆地东吴运动时期剥蚀量等值线图

Fig.7 Contour map of the denudation thickness during Dongwu movement in Sichuan basin

图 8 四川盆地喜山期剥蚀量等值线图

Fig.8 Contour map of the denudation thickness in Himalayan period, Sichuan basin

(1)以系统的古温标资料( $R_o$ )为基础,针对不同地质情况选用适当的反演方法,多种反演方法相结合,可以有效地恢复钻井在不同时期的剥蚀量;起始条件对古热流法反演的结果影响较大,因此,钻井顶部剥蚀量可利用其他手段获取后再通过古热流法迭代确定。

(2)四川盆地古生代以来经历了几次主要的构造活动,广西运动、云南运动、东吴运动、印支运动、燕山运动以及喜山运动,使四川盆地的沉积层系多次抬升和褶皱和剥蚀。恢复各时期的剥蚀地层厚度,对于再现四川盆地沉积和剥蚀的动态发展历史,以便运用动态平衡的观点和方法来研究盆地、构造、沉积岩相的发生、发展和油气演化奠定了一定的基础。

(3)加里东期、海西期和喜山期,是盆地大部分地区遭受剥蚀程度最严重的时期,早古生代地层和新生代地层缺失厚度巨大,在 2000 m 以上。川西南和川东南地区的上下二叠系之间的剥蚀量较盆地内部大,可能反映东吴运动与峨眉山玄武岩的喷发有关。

(4)印支期,使整个盆地抬升、剥蚀,基本上结束了整个盆地的海相沉积历史,进入陆相沉积阶段,奠定了现今盆地格局的雏形,开始前陆盆地的形成阶段;通过喜山期强烈的构造、造山作用,形成了盆地现今的构造和地貌格局。

**致谢:**感谢中石化勘探南方分公司及研究院、中石化西南油气分公司研究院在资料收集、样品采集方面提供的帮助。古温标反演方法上得益于与杨树春、卢庆治等同志的探讨,一并致谢。对本文审稿专家的工作和良好建议表示诚挚的谢意!

**参考文献 (References):**

[1] 刘和甫, 李景明, 李晓清, 等. 中国克拉通盆地演化与碳酸盐岩—蒸发岩层序油气系统[J]. 现代地质, 2006, 20(1):1-18.  
Liu Hefu, Li Jiming, Li X iaqing, et al. Evolution of Cratonic basins and carbonate-evaporite sedimentary sequence hydrocarbon system s in China [J]. Geosciences, 2006, 20 (1):1-18 (in Chinese with English abstract).

[2] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化 [M]. 北京:地质出版社, 1996:113-138.  
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. The Formation and Development of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:113 -138 (in Chinese with English abstract).

[3] 毛琼, 邹光富, 张洪茂, 等. 四川盆地动力学演化与油气前景探讨 [J]. 天然气工业, 2006, 26(11):7-10.

Mao Qiong, Zou Guangfu, Zhang Hongmao, et al. Discussion on geodynamic evolution and oil/gas prospect of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (11):7-10 (in Chinese with English abstract).

[5] 周小进, 杨帆. 中国南方新元古代——早古生代构造演化与盆地原型分析[J]. 石油实验地质, 2007, 29(5):446-451.  
Zhou Xiaojin, Yang Fan. Tectonic evolution and prototypes analysis form Neoproterozoic to early Paleozoic in South China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29 (5):446 -451 (in Chinese with English abstract).

[6] 曾道富. 关于恢复四川盆地各地质时期地层剥蚀量的初探 [J]. 石油实验地质, 1988, 10(2):134-141.  
Zeng Daofu. A preliminary study on the restoration for the various denuded sequences of Sichuan basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 1988, 10(2):134-141(in Chinese with English abstract).

[7] 卢庆治, 胡圣标, 郭彤楼, 等. 川东北地区异常高压形成的地温场背景[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5):1110-1116.  
Lu Qingzhi, Hu Shengbiao, Guo Tonglou, et al. The background of the geothermal field for formation of abnormal high pressure in the northeastern Sichuan basin[J]. Chinese J. Geophys, 2005, 48(5): 1110-1116(in Chinese with English abstract).

[8] 沈传波, 梅廉夫, 郭彤楼. 川东北地区中、新生代热历史的裂变径迹分析[J]. 天然气工业, 2007, 27(7):24-26  
Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Guo Tonglou, et al. Fission track analysis of Mesozoic-Cenozoic thermal history in northeast Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(7):24-26(in Chinese with English abstract).

[9] Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al. Extraordinary denudation in the Sichuan basin; Insights from low temperature thermochronology adjacent to the eastern margin of the Tibetan plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(B04409):1-23.

[10] An Yanfen, Han Zhujun, Wang Jinglin. Fission track dating of the Cenozoic uplift in Mabian area, southern Sichuan Province, China [J]. Science in China (Ser.D), 2008, 51(9):1238-1247.

[11] Eric Kirby, Peter W. Reiners, Michael A. Krol, et al. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: inferences from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and (U-Th)/He thermochronology [J]. Tectonics, 2002, 21(1):1-20.

[12] 杨怀辉, 李忠惠. 从古热流值和剥蚀量的研究来判断地热的发育——以四川盆地川合 100 井为例 [J]. 四川地质学报, 2004, 24 (3):180-185.  
Yang Huahui, Li Zhonghui. Development of geothermal pool deduced from old thermal current values and denudation quantity-by the example of Well 100 at Chuanhe in Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sichuan, 2004, 24(3):180-185(in Chinese with English abstract).

[13] 胡圣标, 汪集隼, 张容燕. 利用镜质体反射率数据估算地层剥蚀厚度[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26 (4):42-45.  
Hu Shengbiao, Wang Jiyang, Zhang Rongyan. Estimation of the



- amount of uplift and erosion across an unconformity using vitrinite reflectance data[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26 (4) :42-45(in Chinese with English abstract).
- [14] 邱楠生,胡圣标,何丽娟,著. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2004:38-56  
Qiu Nansheng, Hu Shengbiao, He Lijuan. Principles and Applications on Thermal Regime of Sedimentary Basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004:38-56 (in Chinese with English abstract).
- [15] 邱春光,王璞珺,刘延莉. 滨北地区 T5 和 T4 不整合面剥蚀量恢复[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(6):16-20.  
Qiu Chunguang, Wang Pujun, Liu Yanli. Erosion restoration of T5 and T4 unconformities in Binbei area of Songliao Basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2006, 28(6):16-20(in Chinese with English abstract).
- [16] 纪友亮,杜金虎,邹伟宏,等. 渤海湾盆地剥蚀量恢复中的综合分析法[J]. 同济大学学报, 2004, 32(5):617-621.  
Ji Youliang, Du Jinhui, Zou Hongwei, et al. Application of synthetical analysis method for seeking eroded strata thickness of Mesozoic in Bohai Bay Basin [J]. *Journal of Tongji University*, 2004, 32(5): 617-621(in Chinese with English abstract).
- [17] 王毅,金之钧. 沉积盆地中恢复地层剥蚀量的新方法[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5):482-486.  
Wang Yi, Jin Zhijun. Progress of the methods on the recovery of the thickness of eroded strata in Basin [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(5):482-486(in Chinese with English abstract).
- [18] 王敏芳,焦养泉,黄传炎. 地层剥蚀量恢复方法浅叙 [J]. 承德石油高等专科学校学报, 2005, 7(4):6-11.  
Wang Minfang, Jiao Yangquan, Huang Chuanyan. Basic study on denuded strata recovery methods[J]. *Journal of Chengde Petroleum College*. 2005, 7(4):6-11(in Chinese with English abstract).
- [19] 佟彦明,吴冲龙. Ro 查值法恢复地层剥蚀量的不合理性 [J]. 天然气工业. 2006, 26(5):21-25.  
Tong Yanming, Wu Chonglong. Irrationality of calculating denudation thickness of strata with Ro -difference method [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(5):21-25(in Chinese with English abstract).
- [20] 佟彦明,朱光辉. 利用镜质体反射率恢复地层剥蚀量的几个重要问题[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(3):197-199.  
Tong Yanming, Zhu Guanghui. Several important problems in reconstructing the erosion thickness using Ro data[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2006, 28 (3):197-199 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王敏芳,黄传炎,徐志诚,等. 浅述底层剥蚀量恢复的基本原理与方法[J]. 海洋石油, 2006, 26(1):28-33.  
Wang Minfan, Huang Chuanyan, Xu Zhicheng, et al. Basic principles and methods of denuded strata comeback [J]. *Offshore Oil*, 2006, 26(1):28-33(in Chinese with English abstract).
- [22] 陈增智,柳广弟,郝石生. 修正的镜质体反射率剥蚀厚度恢复方法[J]. 沉积学报, 1999, 17(1):141-144.  
Chen Zengzhi, Liu Guangdi, Hao Shisheng. A corrected method of using vitrinite reflectance data to estimate the thickness of sediment removed at an unconformity [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(1):141-144(in Chinese with English abstract).
- [23] 张一伟,李京昌,金之钧,等. 原型盆地剥蚀量计算的新方法——波动分析法[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1):88-91.  
Zhang Yiwei, Li Jingchang, Jin Zhijun, et al. A new calculating method of denuded amount for prototype basin——wave analysis [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21 (1):88-91 (in Chinese with English abstract).
- [24] 韩用兵,王良书,刘绍文. 渤海湾盆地济阳拗陷沙四段和孔店组地层剥蚀厚度恢复[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3):440-450.  
Han Yongbing, Wang Liangshu, Liu Shaowen. The estimation of the erosion thickness of ES4 and Ek formation in Jiyang depression, Bohai bay basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(3):440-450(in Chinese with English abstract).
- [25] 李晓清,汪泽成,张兴为,等. 四川盆地古隆起特征及对天然气的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4):347-351.  
Li Xiaoqing, Wang Zecheng, Zhang Xingwei, et al. Characteristics of paleo-uplifts in Sichuan basin and Their control action on natural gases [J]. *Oil & Gas Geology*, 2001, 22 (4):347-351(in Chinese with English abstract).
- [26] 刘顺,罗志立,熊荣国,等. 从实验岩石变形过程探讨四川盆地加里东古隆起的形成机制 [J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(4):343-347.  
Liu Shun, Luo Zhili, Xiong Rongguo, et al. On formation mechanism of Caledonian paleoswell in Sichuan Basin form experimental rocks deformational process [J]. *Journal of Chengde University of Technology*, 2000, 27(4):343-347(in Chinese with English abstract).
- [27] 范小林,潘文蕾,刘光祥. 扬子地区中生代盆地成盆深部过程及对古生代盆地叠加效果浅析 [J]. 海相油气地质, 2005, 10(4):13-21.  
Fan Xiaolin, Pan Wenlei, Liu Guangxiang. On the deep shaping process of Mesozoic -Cenozoic basins and their relative superposition effect to Palaeozoic, marine basins in Yangzi region [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2005, 10 (4):13-21 (in Chinese with English abstract).
- [28] 姚根顺,李大成,卢文忠,等. 四川叠合盆地盆山耦合特征分析[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(4):435-444.  
Yao Genshun, Li Dacheng, Lu Wenzhong, et al. Characters of coupling between Mesozoic sedimentary basin and orogenic belt in Sichuan overlain basin and its adjacent area [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2006, 30 (4):435-444 (in Chinese with English abstract).
- [29] 袁玉松,马永生,胡圣标,等. 中国南方现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4):1118-1126  
Yuan Yusong, Ma Yongsheng, Hu Shengbiao, et al. Present-day geothermal characteristics in South China [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2006, 49(4):1118-1126(in Chinese with English abstract).



- [30] 何斌, 徐义刚, 王雅玫, 等. 用沉积记录来估计峨眉山玄武岩喷发前的地壳抬升幅度 [J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(106): 316-320.  
He Bin, Xu Yigang, Wang Yamei, et al. The magnitude of crystal uplift prior to the eruption of the Emeishan basalt: inferred from sedimentary records [J]. Geotectonica & Metallogenia. 2005, 29 (106):316-320(in Chinese with English abstract).
- [31] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布: 来自沉积地层学的新证据[J]. 地质学报, 2003, 77(2):194-202.  
He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, et al. Generation and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: new evidence from stratigraphic records [J]. Acta Geologica Sinica. 2003, 77(2): 194-202(in Chinese with English abstract).
- [32] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义[J]. 地质论评, 2006, 52(1):30-37.  
He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, et al. Sedimentary responses to uplift of Emeishan mantle plume and its implications [J]. Geological Review. 2006, 52(1):30-37(in Chinese with English abstract).
- [33] 刘树根, 罗志立, 戴苏兰. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降[J]. 地质学报, 1995, 69(3):205-214.  
Liu Shungen, Luo Zhili, Dai Sulan. The uplift of the Longmenshan thrust belt and subsidence of the western Sichuan foreland basin[J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 69 (3):205-214 (in Chinese with English abstract).
- [34] 邓康龄. 龙门山构造带印支期构造递进变形与变形时序. 石油与天然气地质[J]. 2007, 28(4):485-490  
Deng Kangling. Indosinian progressive deformation and its chronogenesis in Longmenshan structural belt [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4):485-490(in Chinese with English abstract).
- [35] 王金琪. 龙门山印支运动主幕辨析——再论安县构造运动[J]. 四川地质学报, 2003, 23(2):65-69  
Wang Jinqi. Recognition on the Main Episode of Indo-China Movement in the longmen Mountains—A re-review on the Anxian tectonic movement[J]. Acta Geologica Sichuan. 2003, 23(2):65-69.
- [36] 林茂炳. 初论陆内造山带的造山模式——以四川龙门山为例[J]. 四川地质学报, 1996, 16(3):193-198.  
Lin Maobing. A primary discussion on the orogenic model for inner continental orogenic belts——on the example of Longmenshan orogenic belt [J]. Acta Geologica Sichuan, 1996, 16 (3):193-198(in Chinese with English abstract).
- [37] 刘树根, 徐国盛, 李巨初, 等. 龙门山造山带——川西前陆盆地系统的成山成盆成藏动力学 [J]. 成都理工大学学报, 2003, 30 (6):559-566.  
Liu Shugen, Xu Guosheng, Li Juchu, et al. Basin-formation and natural gas pool formation in the system of Longmen mountains and west Sichuan foreland basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2003, 30 (6):9-566 (in Chinese with English abstract).
- [38] 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等. 龙门山造山带——川西前陆盆地系统形成的动力学模式及模拟研究[J]. 石油实验地质, 2003, 25 (5):432-438.  
Liu Shugen, Luo Zhili, Zao Xikui, et al. Study on the dynamic mode and its simulation in the formation of Longmen mountain-west Sichuan foreland basin system, China [J]. Petroleum Geology & Experiment. 2003, 25(5):432-438(in Chinese with English abstract).
- [39] 王道永. 龙门山中段中生代前陆盆地的构造演化史[J]. 成都理工大学学报, 1994:21(3):20-28.  
Wang Daoyong. Structural evolution of Mesozoic foreland basin in the middle Longmen mountains[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1994, 21(3):20-28(in Chinese with English abstract).
- [40] 刘顺. 论龙门山中北段东缘印支运动晚幕的性质[J]. 成都理工大学学报, 1998, 25(4):524-528.  
Liu Shun. On properties of tectonic movement in east margin of middle and northern Longmen mountains at the end of Triassic period [J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1998, 25 (4):524-528(in Chinese with English abstract).
- [41] 蔡学林, 魏文贵, 刘援朝, 等. 论楔入造山作用——以龙门山造山带为例[J]. 四川地质学报, 1996, 16(2):97-102.  
Cai Xuelin, Wei Xiangui, Liu Yuanchao, et al. On Wedge-In Orogeny—On the example of the Longmenshan orogenic belt[J]. Acta Geologica Sichuan, 1996, 16 (2):97-102 (in Chinese with English abstract).
- [42] 汪泽成, 赵文智, 徐安娜, 等. 四川盆地北部大巴山山前带构造样式与变形机制[J]. 现代地质, 2006, 20(3):429-435.  
Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Xu Anna, et al. Structure styles and their deformation mechanisms of Dabashan foreland thrust belt in the north of Sichuan Basin[J]. Geoscience, 2006, 20(3):429-435(in Chinese with English abstract).
- [43] 李占奎, 丁燕云. 大巴山推覆构造特征的探讨 [J]. 物探与化探, 2007, 31(6):495-498.  
Li Zhankui, Ding Yanyun. A Tentative discussion on characteristics of the Daba mountain nappe structure [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31 (6):495-498 (in Chinese with English abstract).
- [44] 董树文, 胡健民, 施炜, 等. 大巴山侏罗纪叠加褶皱与侏罗纪前陆[J]. 地球学报, 2006, 27(5):403-410.  
Dong Shunwen, Hu Jianmin, Shi Wei, et al. Jurassic superposed folding and Jurassic foreland in the Daba mountain, central China [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2006, 27 (5):403-410 (in Chinese with English abstract).
- [45] 高长林, 刘光祥, 张玉箴, 等. 东秦岭—大巴山逆冲推覆构造与油气远景[J]. 石油实验地质, 2003, 25(增刊):523-531.  
Gao Changlin, Liu Guangxiang, Zhang Yuqian, et al. Thrusting nappe structure and oil-gas potential in eastern Qinling and Daba mountain [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(Sup.0): 523-531(in Chinese).
- [46] 刘树根, 孙玮, 李智武, 等. 四川盆地晚白垩世以来的构造隆升作用与天然气成藏[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3):294-301.  
Liu Shugen, Sun Wei, Li Zhiwu, et al. Tectonic uplifting and gas pool formation since late Cretaceous Epoch, Sichuan basin [J].

Natural Gas Geoscience, 2008, 19 (3):294–301 (in Chinese with English abstract).

[47] 邓宾, 刘树根, 李智武, 等. 青藏高原东缘及四川盆地晚中生代以来隆升作用对比研究 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2008, 35(4):477–486.

Deng Bin, Liu Shugen, Li Zhiwu, et al. A comparative study of the late Mesozoic uplifting in the eastern margin of Qinghai–Tibet Plateau and Sichuan basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2008, 35(4):477–486(in Chinese with English abstract).

## Quantifying the denudations of major tectonic events in Sichuan basin: Constrained by the paleothermal records

ZHU Chuan-qing<sup>1</sup>, XU Ming<sup>1</sup>, SHAN Jing-nan<sup>1</sup>,  
YUAN Yu-song<sup>3</sup>, ZHAO Yong-qing<sup>4</sup>, HU Sheng-biao<sup>1</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Exploration and Production Research Institute, SINPIEC, Beijing 100083 China; 4. Exploration Department of South Company of Prospecting, Sinopec, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Based on the paleo-thermal indicator of vitrinite reflectance ( $R_o$ ), the authors reconstructed the denudation thickness of the sedimentary formation in the boreholes of Sichuan basin. The largest denudation occurred in southeastern Sichuan basin and reached 2000m in Caledonian period. During Dongwu movement, the denudation reached the values of 260~450m in southwestern Sichuan basin and reached 800~900m in southeastern Sichuan basin. Both areas were close to the central zone of Emeishan basalts. The basin was uplifted in early Indosinian period, and the denudation thickness reached 100~500m. In middle and late Indosinian period, the areas around the Longmen Mountain began to be denudated, and the denudation thickness in boreholes of these areas reached the values of over 2000m. In Yanshanian period, the areas around the mountains beside Sichuan basin experienced variable degrees of denudation due to the uplifting of these mountains. According to the inversion results of many boreholes, the maximum denudation occurred in areas close to the basin boundary and reached 2000m in Himalayan period. However, the areas which were uplifted in the early time were subjected to less denudation, and the values only reached 1000m or so.

**Key words:** vitrinite reflectance; paleo-heat flow method; denudation thickness; Sichuan Basin

---

**About the first author:** ZHU Chuan-qing, male, born in 1981, doctoral candidate, majors in structure geology; E-mail: zcq\_igcas@163.com.