

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

# 四川峨眉麦地坪震旦系-寒武系界线剖面的中子活化分析研究

徐道一

毛雪瑛

张勤文

赵东旭

(国家地震局  
地质研究所,北京)

(中国科学院  
高能物理研究所,北京)

(中国地质科学院  
地质研究所,北京)

(中国科学院  
地质研究所,北京)



张勤文等曾对四川峨眉麦地坪震旦系-寒武系界线剖面进行了研究。1991年对此剖面又进行了加密间距采样。中子活化分析结果表明,在震旦系-寒武系界线附近的标本具有较高的Ni,Co,Cs含量,Ir的含量也较上覆、下伏地层的标本为高。因而认为,在麦地坪剖面,把中国C点作为震旦系与寒武系的分界比采用中国A点、B点及D点界线,依据更充足些。

**关键词** 事件地层学 中子活化分析 铀异常 震旦纪-寒武纪界线

近十几年来,很多学者对我国的震旦系-寒武系的界线划分问题作了比较详细的研究<sup>[1-6]</sup>。至今,对震旦系-寒武系界线的位置的确定存在着不同的意见,大体可归纳为中国A点、B点、C点和D点四个不同位置<sup>[7]</sup>。在麦地坪剖面,中国A点大约位于洪椿坪组猫儿岗段与麦地坪段分界附近或稍低一些地方;中国B点位于麦地坪段顶界以下十余米处,以上两点是依据小壳化石的出现或带化石来确定;中国C点位于洪椿坪组麦地坪段与九老洞组的分界处;中国D点是依据三叶虫化石的出现来划分。在麦地坪剖面中,九老洞上段出现大量三叶虫,但中国D点具体划在那儿尚报导不多。

何廷贵等<sup>[1]</sup>对麦地坪剖面作了比较详细的地层研究工作。张勤文、徐道一等<sup>[3,4,5]</sup>从灾变事件角度对麦地坪剖面进行了研究,采样范围包括了中国的A点、B点和C点,涉及厚度达40余米,把震旦系-寒武系界线确定为中国的C点位置,并在此处找到了界线粘土。毛雪瑛等曾对这些标本进行了中子活化分析,部分分析结果发表在《中国天文地质事件》<sup>[8]</sup>一书的第二章中和其它论文摘要中<sup>①</sup>。

## 1 野外工作

麦地坪剖面位于四川峨眉县城南约14 km的高桥乡麦地坪一带(图1)。1990年徐道一对麦地坪剖面再次进行野外考察,对剖面露头进行了人工剥离,以便取得较为新鲜的标本。采样剖

注:本文中是在中国科学院核分析技术开放研究实验室和现代古生物学和地层学开放实验室资助下完成的,课题目分别是91B0031和9307。

① 毛雪瑛等. 中子活化研究四川峨眉麦地坪前寒武系/寒武系界线剖面元素地球化学特征. 第一次全国放射分析化学学术讨论会会议论文摘要集(北京),1991. 35页.

本文1994年3月收到,8月改回,王毅编辑。

面具体地点位于一条通往一小水泥厂的大路东侧一个高约 3 m 的陡坡的东边。标本采样间距加在中国 C 点附近,标本间距为 3—4 cm。采样范围集中在中国 C 点上下约 2 m 的厚度。在室内对采集标本进行了仪器中子活化分析,部分标本进行岩矿薄片鉴定和放射化学中子活化分析。

标本的地层顺序和岩性自新到老简介如下:

下寒武统九志洞组

- |                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| 5. 灰色中、薄层泥质粉砂岩、砂质泥岩(标本号 CG901—911) | >113cm |
| 4. 黑色炭质泥岩(CG912—916)               | 15cm   |
| 3. 灰黑色粘土质页岩(CG917—920)             | 12cm   |
| 2. 褐黑色磷块岩,块状,风化后呈褐黄色(CG921)        | 4cm    |

上震旦统洪椿坪组麦地坪段

- |                            |       |
|----------------------------|-------|
| 1. 浅灰色含硅磷质细晶白云岩(CG922—927) | >62cm |
|----------------------------|-------|

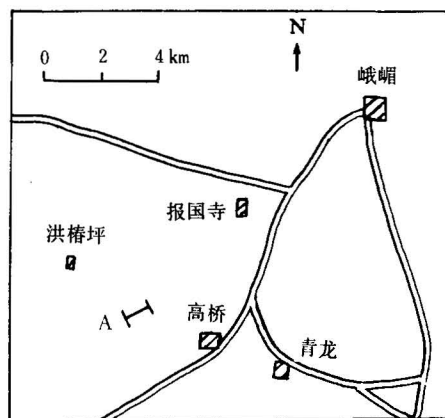


图 1 四川峨眉麦地坪剖面位置(A)示意图

Fig. 1 Sketch map showing the location of the Maidipin section (A), Emei County, Sichuan Province

上述第二层的磷块岩经薄片观察为砂屑泥晶磷块岩。砂屑由含粘土硅质磷块岩破碎而成,并混有伊利石和石英颗粒。此层似可与湘西大庸天门山地区的牛蹄塘组底部的磷块岩相对比,据范德廉等<sup>[9]</sup>研究,在贵州新土沟剖面的牛蹄塘组底部亦有一层厚度不大的磷块岩。

在麦地坪剖面中,我们把震旦系与寒武系界线确定在 CG921,从 CG921 开始为寒武系。

## 2 实验方法

将采集的标本,选取未经风化部分进行粉碎,用高纯铝箔将样品包好,送反应堆中照射 24 小时。中子注量率为  $8 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,衰变为 7 天和 21 天,分别两次用同轴大体积的 Ge(Li) 探测器,微机程控  $\gamma$  谱仪测定样品的  $\gamma$  能谱,并计算样品中微量元素的含量。

Ir 的测定是采用放射化学中子活化分析方法。具体流程是:先称取一定量样品,送入反应堆中照射 48 小时,适当冷却后,经碱熔  $\rightarrow$  6mol/l HCl 回流 2 小时  $\rightarrow$  蒸至尽干  $\rightarrow$  调节到 0.05mol/l HCl  $\rightarrow$  用长链伯胺 N1923 萃取 Ir  $\rightarrow$  测定  $\gamma$  能谱  $\rightarrow$  通过计算得 Ir 含量。

## 3 结果分析

图 2 显示了麦地坪剖面 14 个元素的变化情况。由图可见,除个别元素外,它们在震旦系-寒武系界线附近都显示了突然的变化。

### 3.1 亲铁元素

从 CG921 或 CG920 标本开始向上,Cr,Co,Fe,As,Ir 的含量显著增加。Co 的含量最高达  $139 \times 10^{-6}$  比其下伏麦地坪段岩石的含量高 200 余倍;Cr 的含量最高达  $178 \times 10^{-6}$ ,比下伏岩石的高十余倍。

在图 2 中没有表示 Ni 的含量,这是由于在大部分样品中未测到 Ni 的确定值,但是有两块样品(即 CG921 和 CG918C)测得 Ni 含量相当高,分别为  $737 \pm 277 \times 10^{-6}$  和  $246 \pm 55.1 \times 10^{-6}$ 。CG921 中测得 Ni 的高含量,这一数据的可靠性如何? 在中子活化分析过程中,对震旦系-寒武系

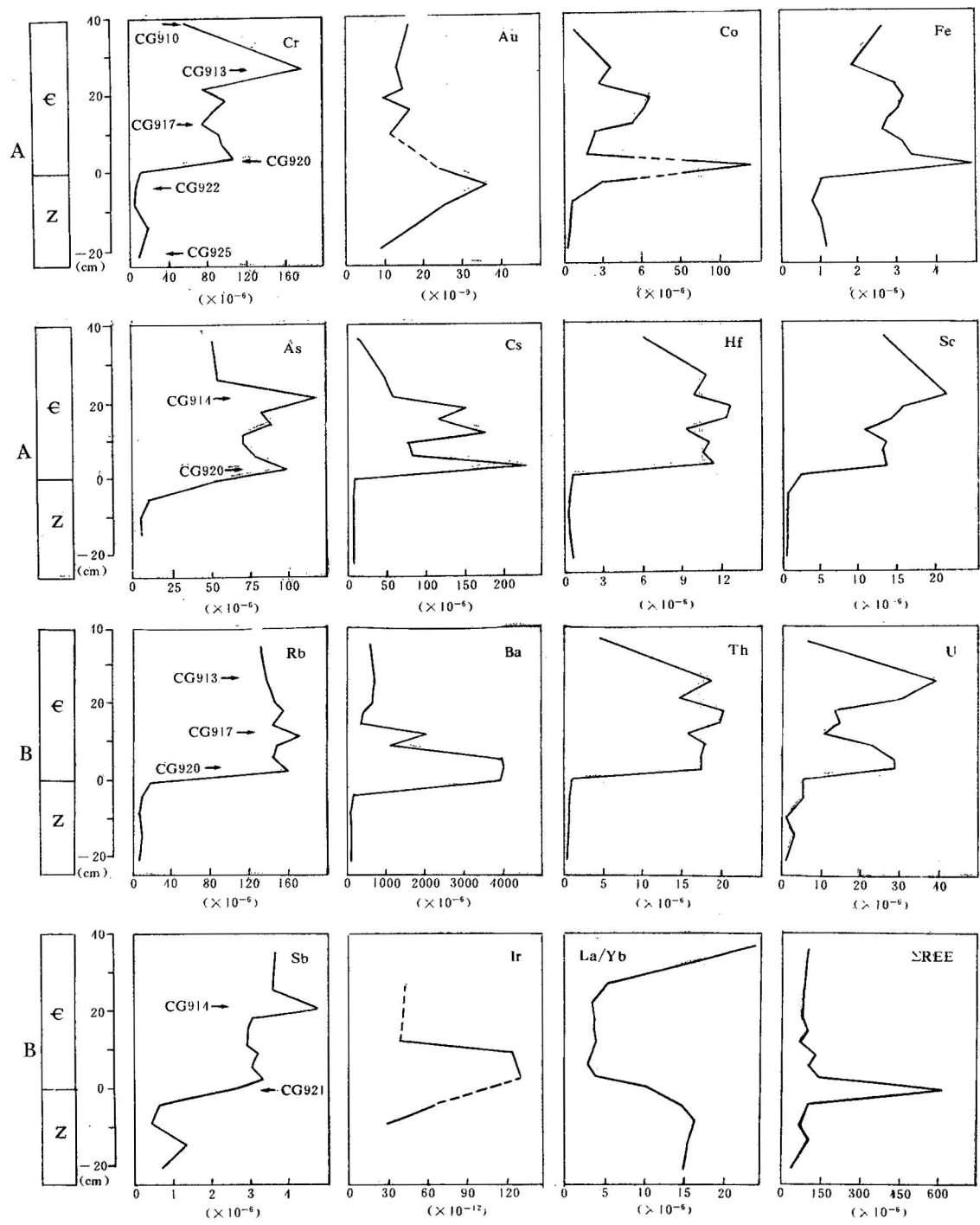


图 2 麦地坪剖面震旦纪—寒武纪界线附近多种微量元素变化曲线(A,B)

Fig. 2 Variations of several trace elements around the Sinian—Cambrian boundary in the Maidiping section (A,B)

表 1 CG921、CG920 标本的一些微量元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )Table 1 The analytic results of some trace elements in the samples CG921 and CG920 of the Maidiping section (concentration in  $\times 10^{-6}$ )

标本号	Ni	Co	Au	As
CG920	737 $\pm$ 277	139 $\pm$ 1.4	24.4 $\pm$ 5.0	51.1 $\pm$ 2.45
CG920B	651 $\pm$ 92	115 $\pm$ 1.7	12.2 $\pm$ 8.1	134 $\pm$ 5.2
CG920C	599 $\pm$ 239	1.93 $\pm$ 0.18	3.0 $\pm$ 0.7	29.5 $\pm$ 1.8

标本号	Cr	Cs	Th	U
CG920	109 $\pm$ 3.4	227 $\pm$ 1.8	17.4 $\pm$ 0.3	29.0 $\pm$ 1.0
CG920B	105 $\pm$ 3.3	208 $\pm$ 1.7	18.8 $\pm$ 0.3	26.1 $\pm$ 1.0
CG920C	123 $\pm$ 3.18	118 $\pm$ 0.9	16.7 $\pm$ 0.3	17.6 $\pm$ 0.6

界线处关键位置的标本(CG921、CG920)进行了多样测量。表1中列出了相当于CG921标本同一位置的3次测量结果。3个样品之间的不同处在于CG921和CG921B取自同一剖面,前者是粉碎至小于200目的样品,而后者则是粉碎至小于60目的样品。CG921C则来自距上述剖面约0.5m的另一剖面,层位与CG921相同。CG921三块标本的Ni含量分析结果应是可信的。张爱云等<sup>[10]</sup>列

举了中国南方下寒武统底部磷块岩的Ni含量的平均值为 $320 \times 10^{-6}$ ,而CG921的Ni值较其高出一倍。由表可见,Co,Au,As的含量在多数情况下重复性亦好。CG920标本4个元素(Cr,Cs,Th,U)的重复性亦好。

### 3.2 铱(Ir)

图2中的Ir值是放化化学中子活化分析结果。标本CG920的Ir值为 $0.129 \times 10^{-9}$ ,其百分误差为19.9%,CG918— $0.123 \times 10^{-9}$ ,百分误差为82.1%,高出CG924的Ir值( $0.027 \times 10^{-9}$ ±

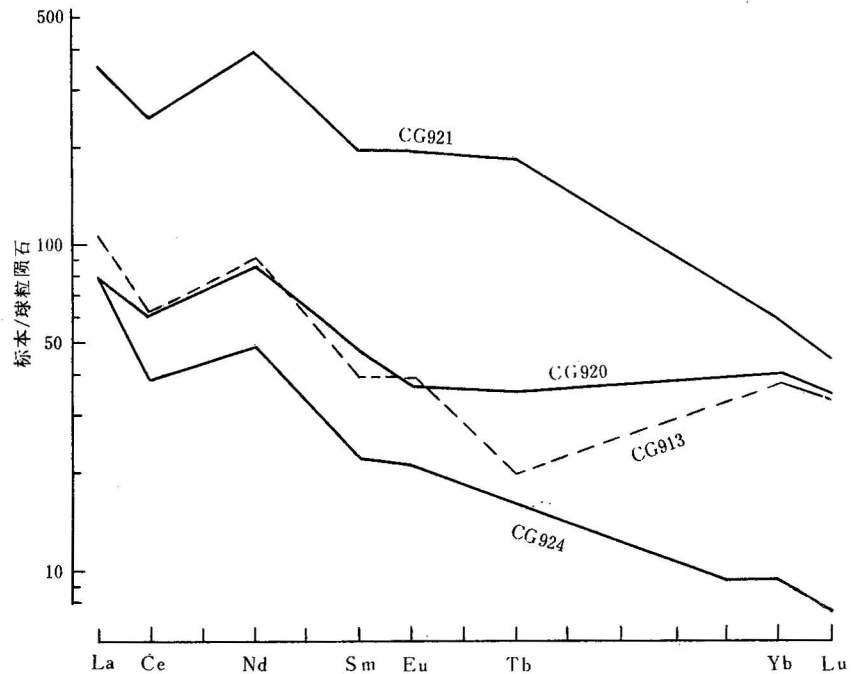


图3 麦地坪剖面4个样品的稀土元素分配曲线

Fig. 3 REE pattern of 4 samples in the Maidiping section

12.4%,可作为背景值的代表)约4—5倍。

### 3.3 亲石元素

一些亲石元素,如Cs,Hf,Rb,Ba,Th,U等自CG921标本的层位往上,其含量亦有十分明显的变化。在黑色页岩或磷块岩中,Cs值比麦地坪段白云岩中高出200倍;Hs高出约20余倍;Rb高出约15倍;Ba高出约70余倍;Th高出约40余倍;U高出约10余倍;Sc高出约20余倍。

麦地坪剖面的Th/U的比值变化范围在0.3—1.5,而在震旦系-寒武系界线处出现其最低值。如CG921的Th/U=0.158,向上则逐渐近于1。

### 3.4 稀土元素

表2列出了15块标本8个稀土元素分析结果。稀土总量( $\Sigma\text{REE}$ )在CG921为最大,约 $600 \times 10^{-6}$ (图2);La/Yb比值在九老洞组底部为最小,自CG920往上仅为3左右,而它在麦地坪段岩石中为15左右,这表明前者的重稀土元素含量相对地富集。

图3表示了麦地坪剖面的四块标本的各稀土元素与球粒陨石相应稀土元素含量之比。由图可见,未显示Eu负异常,却有Ce负异常,表示他们形成于较氧化环境。CG920的分配曲线右半段变平,亦表明重稀土元素相对地富集。

表2 麦地坪剖面15块标本的稀土元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )

Table 2 REE composition of 15 samples in the Maidiping section (concentration in  $\times 10^{-6}$ )

标本号	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	$\Sigma\text{REE}$
CG904	57.4	92.8	50.6	3.97	0.759	0.553	2.57	0.441	209.1
CG910	49.0	72.0	34.1	1.85	0.437	0.326	2.05	0.372	160.1
CG913	31.3	51.8	51.1	8.08	1.72	0.966	6.26	1.03	151.0
CG914	17.6	26.9	<14	4.89	1.02	0.632	5.20	0.846	—
CG915	23.2	32.0	33.5	4.30	1.12	0.882	6.70	1.06	72.7
CG916	22.1	28.5	22.9	3.82	0.840	0.847	6.55	0.995	86.6
CG917	17.2	20.8	20.4	2.56	0.688	0.818	4.57	0.723	67.67
CG918	22.3	43.6	42.2	8.68	2.40	1.41	6.68	1.04	128.4
CG919	17.7	31.0	28.7	4.66	1.16	0.965	6.25	0.994	91.4
CG920	23.9	51.3	50.5	9.94	2.73	1.69	6.88	1.09	140.0
CG921	98.0	207.0	224	41.1	14.3	9.10	9.80	1.37	596.3
CG922	20.6	30.1	29.9	5.76	2.10	1.04	1.41	0.203	91.1
CG923	12.8	15.5	19.6	2.92	0.904	0.449	0.802	0.118	53.1
CG924	23.7	32.6	28.5	4.70	1.60	0.786	1.56	0.229	93.7
CG925	8.61	10.1	9.75	1.95	0.615	0.385	0.586	0.100	32.1

## 4 讨论

(1) 80年代毛雪瑛曾对张勤文、徐道一等采集标本进行过中子活化分析,分别在美国Los Alamos国家实验室和中国科学院高能物理研究所进行,其结果相近。

现在,我们对麦地坪剖面的震旦系-系武纪界线附近的岩层进行了加密间距的采样,并改善

了采样条件,对关键性部位的样品进行了双样(不同的粉碎程度)同时分析。因此,从中子活化分析结果看来,麦地坪剖面分析结果的可信度应是较高的。

表 3 列出了本次分析结果(以下称第二次)与 80 年代分析结果<sup>[8]</sup>(以下称第一次)进行比较。由表可见,Cr,Fe,Ir,As,Hf,Rb,Th,U, $\Sigma$ REE 的两次分析结果差别不大;Ni 在第一次分析中没有测到结果;Co,Cs 值在第二次分析中要高许多,这些可能与加密采样和采样条件改善有关。

表 3 麦地坪剖面震旦系-寒武系界线附近标本两次分析结果的对比( $\times 10^{-6}$ ,Au,Ir 除外)

Table 3 The comparison of twice analytical results of samples obtained around the Sinian-Cambrian boundary in the Maidipin Section (concentration in  $\times 10^{-6}$ ,except Au,Ir)

元素	上震旦统麦地坪段顶部		下寒武统底部界线层	
	第一次	第二次	第一次	第二次
Cr	3-9	2-15	40-180	20-150
Co	0.4-1	0.3-3.5	0.7-23.5	1-140
Fe	0.1-1	0.8-1.3	5-9	2.5-5
Ni	—	—	—	250-750
Au( $\times 10^{-9}$ )	—	9-37	—	3-25
Ir( $\times 10^{-9}$ )	0.003-0.013	0.02-0.06	0.01-0.1	0.03-0.13
As	1-9.5	5-10	13-258	20-140
Cs	0.5-0.8	0.5-3	6-35	4-230
Hf	0.1-0.3	0.1-0.6	1-17	0.6-12
Rb	1.5-6	4-9	25-165	14-155
Ba	—	39-140	280-460	300-3900
Th	0.1-0.65	0.3-0.8	2-30	1-21
U	0.1-0.65	1.4-6.5	2-35	6.5-40
$\Sigma$ REE	8-31	30-95	120-950	90-600

注:第一次、第二次的涵义见文字部分。

(2) 麦地坪剖面大多数微量元素的急剧变化发生在 CG921 标本处或稍上一些层位。麦地坪九老洞组的岩性主要为薄层至厚层的粘土质粉砂岩、泥岩,仅在底部有约 30cm 的黑色页岩(CG921-920)中,大多数微量元素变化幅度甚大。类似情况见于贵州、陕西和湖南等地。

在贵州、湖南等地,早寒武世早期发育着一套厚度较大的,以灰、深灰色含炭质粉砂质页岩、粉砂岩为主的牛蹄塘组,其下部炭质高,具有距震旦系-寒武系界线甚近的镍钼多金属层<sup>[9,10]</sup>。陕西汉中邓家垭的震旦系-寒武系剖面中,在下寒武统底部的岩石中的 Co,Ni 含量甚高(Ni 含量高达  $4\ 000 \times 10^{-6}$ ,Co 含量约  $519 \times 10^{-6}$ ),可与麦地坪剖面相应层位比较。

因此,麦地坪剖面约 30 cm 厚度的黑色页岩中微量元素组合大体可与牛蹄塘组底部相对比,仅是厚度较后者为小,并缺少 Mo 等一些元素异常。

(3) S. C. Morris<sup>[11]</sup>指出:在艾迪卡拉动物群大量绝灭之后和早寒武世三叶虫等动物群大量繁盛之前,有一个全球性的生物矿化时期。在中国,这个时期的早期和中期是以富含磷质,以磷质壳为特征的小壳动物大量繁盛和演化,并成为我国西南地区磷矿的重要成矿时期。它的后期则有一个多金属矿化时期。它的特点是几十种元素在一个相对短的地质时期异常地富集,其成因尚

研究得不清楚,但已发现与有机质的富集有一定相关性。这一多金属矿化时期(或多元素富集期)开始于震旦系-寒武系的界线(中国C点),其分布在中国南方很广泛。M. D. Braiser<sup>[12]</sup>把中国C点层位标为前一大旋迴(震旦系中)的结束和新的旋迴的开始。自此开始,磷质壳生物逐渐衰落,而钙质壳生物得到持续和长期的发展<sup>[13]</sup>,这可能与多元素富集促使生物的发育达到一个新的高度阶段有关。

因此,我们认为,把中国C点作为麦地坪剖面震旦系-寒武系的界线,从沉积、地球化学和古生物等诸多角度来看,都是较为合理的。

### 参 考 文 献

- 1 邢裕盛,丁启秀,罗惠麟,何廷贵,王砚耕等. 中国震旦系-寒武系界线. 中国地质科学院地质研究所刊10号. 北京:地质出版社,1983. 262页.
- 2 罗惠麟,蒋克文,武希彻,宋学良,欧阳麟等. 中国云南晋宁梅树村震旦系-寒武系界线层型剖面. 昆明:云南人民出版社,1984. 265页.
- 3 张勤文,毛雪英,柴之芳,马淑兰,徐道一等. 在前寒武纪和寒武纪界线上的地质事件 国际地质交流学术讨论文集(1). 北京:地质出版社,1984. 143—150页.
- 4 张勤文,徐道一,严正,孙亦因. 梅树村地质事件的主要标志. 天地生综合研究. 北京 中国科学技术出版社,1989. 26—28页.
- 5 Zhang Qinwen, Xu Daoyi, Sun Yiyin et al. The rare event at the Precambrian and Cambrian boundary and the stratigraphic position of this boundary. *Modern Geology*, 11: 69—77.
- 6 陈孟莪,陈忆元,钱逸. 峡东区震旦系-寒武系底部的管状动物化石. 中国地质科学院天津地质矿产研究所刊,第3号. 北京:地质出版社,1981.
- 7 殷继成,李大庆,何廷贵. 滇东震旦系-寒武系界线遗迹化石新发现及其对比意义. *地质学报*, 1993, 67(2): 146—156.
- 8 Xu Daoyi, Zhang Qinwen, Sun Yiyin, Yan Zheng et al., *Astrogeological events in China*. Geological Publishing House, Beijing, China, Van Nostrand Reinhold, New York, Scottish Academic Press, Edinburgh, 1989: 264.
- 9 范德廉,叶杰,杨瑞英,黄忠祥. 扬子地台前寒武纪-寒武纪界线附近的地质事件与成矿作用. *沉积学报*, 1987, 5(2): 81—95.
- 10 张爱云,伍大茂,郭丽娜,王云龙. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义. 北京:科学出版社,1987. 240页.
- 11 Morris S C. The fossil record and the early evolution of Metazoa. *Nature*, 1993. 361: 219—225.
- 12 Brasier M D. Nutrient-enriched water and early skeleted fossil record. *Journal of the Geological society*, London, 1992, 149: 621—629.
- 13 Xu Daoyi, Mao Xueying, Yanzheng. Geochemical anomalies at the Precambrian—Cambrian boundary in South China and their possible biological significance. *Global Boundary Events — An Interdisciplinary Conference, Kielce—Poland, September 27—29. 1993, Abstract*, 55.

**STUDIES OF THE MAIDIPING SINIAN-CAMBRIAN BOUNDARY SECTION,  
E'MEI COUNTY, SICHUAN PROVINCE, BASED  
ON THE NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS**

Xu Daoyi

*(Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing)*

Mao Xueying

*(Institute of High Energy physics, Academia Sinica, Beijing)*

Zhang Qinwen

*(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing)*

Zhao Dongxu

*(Institute of Geology, Academia Sinica, Beijing)*

**Abstract**

Late Sinian and Early Cambrian strata are well developed at the Maidiping Section, Emei County, Sichuan province. Here, the Sinian-Cambrian boundary (China C point) is defined by a marked lithological change from carbonate rocks to shale.

High-resolution geochemical studies of the Maidiping section show that a ca-30-cm-thick layer at the base of the Jiulaodong Formation from the Sinian-Cambrian boundary upward can be divided into phosphorite, greyish black shale and mudstone. phosphorite and the lower part of black shale are enriched in Ir, Ni, Co, Cr and Fe as well as Cs, Hf, Rb, Ba, Th and U.

Therefore, it is more reasonable to take the China C point as the Sinian-Cambrian boundary at the Maidiping section rather than the China A, China B or China D points.

**Key words:** event stratigraphy, neutron activation analysis, iridium anomaly, Sinian-Cambrian boundary

**作者简介**

徐道一,生于1934年8月。1956年毕业于北京地质学院地质矿产普查专业,1963年毕业于苏联莫斯科大学地质系,获得博士学位。现为国家地震局地质研究所研究员,从事数学地质、天文地质、地震预测、天地生人综合研究。通讯处:北京德外国家地震局地质研究所,邮编:100029。