

辽河盆地西部凹陷源岩特征及低熟油分布规律研究

朱芳冰

(中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074)

摘要: 未一低成熟油的发现及其成因研究是近年来油气地球化学的重要进展之一,从源岩的基本特征入手,分析辽河盆地低熟油的生成能力,将原油划分为六类:未熟—低熟降解稠油、未熟未降解稠油、低熟降解稠油、低熟未降解稀油、正常稀油和成熟降解稠油。研究表明,未一低熟油的分布受深度、生油洼陷的构造带及断层输导能力的控制。

关键词: 辽河盆地;低熟油;生烃潜能;成因类型;分布特征。

中图分类号: P618.13 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)01-0025-05

作者简介: 朱芳冰(1966—),女,讲师,1994年毕业于中国地质大学研究生院,获硕士学位,主要从事石油地质与油藏工程的教学与科研工作。E-mail: haofang@cug.edu.cn

1 地质背景

辽河盆地位于辽宁省中南部,属渤海湾北部的一个中、新生代凹陷,前第三纪基底结构较为复杂,其主要控制性断裂呈东北向展布,形成了隆凹相间的构造格局。根据第三系底面起伏、主要断裂构造特征及盆地沉降—沉积特点,将辽河盆地划分为7个次级构造单元:沈北凹陷、大民屯凹陷、西部凸起、西部凹陷、中央凸起、东部凹陷和东部凸起,新生代沉积的地层为房身泡组、沙河街组、东营组和上第三系的馆陶组及明化镇组。本文从源岩的基本特征研究入手,分析各地层单元的发育规律及低熟油的生成潜能,从而对低熟油的分布规律进行研究。

2 源岩特征及低熟油生成能力分析

2.1 源岩特征

源岩有机质丰度和类型是决定沉积盆地油气潜能的最重要因素之一,亦是“未熟或低熟”稠油发育的重要控制条件。源岩的有机质丰度常利用有机碳、沥青及总烃含量加以评价^[1]。总有机碳 $w(\text{TOC})$ 是评价其生烃能力的重要参数之一。辽河盆地各层位源岩的平均 $w(\text{TOC})$ 变化较大,其中沙四段的平均

$w(\text{TOC})$ 达2.83%,沙三段的平均 $w(\text{TOC})$ 值亦接近2%。与沙四段和沙三段相比,沙一、沙二段和东营组的 $w(\text{TOC})$ 明显降低,但均值大于1%(图1)。

可溶有机质的含量及其构成是反映源岩生烃潜能的重要方面,常用的评价参数为氯仿沥青“A”和总烃的含量及组成。辽河盆地西部凹陷不同地层单元的氯仿沥青“A”含量差别明显,沙四段氯仿沥青最高,平均达 2160×10^{-6} ,其次为沙三段,平均为 1380×10^{-6} ,沙二段和沙一段的氯仿沥青略低于沙三段,但均值大于 1000×10^{-6} (图1)。东营组的氯仿沥青含量明显降低,均值仅为 220×10^{-6} 。总烃含量具有与氯仿沥青相同的变化趋势。不同地层单元可溶有机质的构成明显不同。从沙四段到东营组,

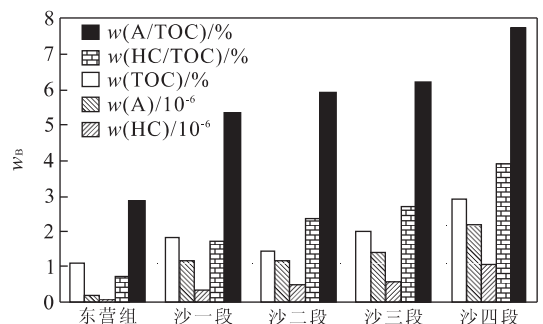


图1 辽河盆地各层位源岩有机质丰度对比

Fig. 1 Correlation of organic matter abundance in source rocks of different ages in Liaohe basin
 $w(\text{A})$ 和 $w(\text{HC})$ 的数值在图上均缩小1 000倍

$w(A)/w(TOC)$ 的比值逐渐下降,饱和烃在总烃中所占的比例逐渐减小.由此可见,本区各地层单元有机质丰度存在明显差异.除成熟度及运移效应等次生因素外,有机质沉积和保存条件的变化是导致各地层单元有机质丰度明显变化的主要因素,其中具有决定意义的是沉积和早期成岩阶段介质的氧化—还原条件.本区经历了裂陷和裂后两个主要演化阶段,不同演化阶段盆地的沉降速率、湖水深度和沉积体系分布明显不同,导致不同演化阶段介质氧化—还原条件的明显差异.

不同类型的有机质具有不同的化学结构、热稳定性及裂解产物,因此有机质类型的研究是盆地油气潜能评价和低熟油分析的基础.

氢指数 $w(HI)$ 是研究有机质类型的常用指标^[2],通常认为 $w(HI) > (450 \sim 600) \times 10^{-3}$ 为 I 型干酪根, $w(HI) = (200 \sim 600) \times 10^{-3}$ 为 II 型干酪根,而 III 型干酪根的 $w(HI)$ 一般均小于 200×10^{-3} . 研究区不同地层单元的氢指数变化较大,最大值超过 $1\ 000 \times 10^{-3}$,最小值小于 50×10^{-3} (图 2),各地层单元氢指数的变化表明辽河盆地发育多种类型的干酪根.

红外光谱分析是研究有机质基团组成和结构的有效方法.图 3 是辽河盆地部分干酪根的 $(I_{2850} + I_{2920})/I_{1600}$ 与 $N(H)/N(C)$ 原子比的关系图.随 $(I_{2850} + I_{2920})/I_{1600}$ 增大,干酪根的 $N(H)/N(C)$ 原子比逐渐增大,证明了红外光谱反映有机质富氢程度的有效性.

通过多种有机地球化学方法的综合分析,在辽

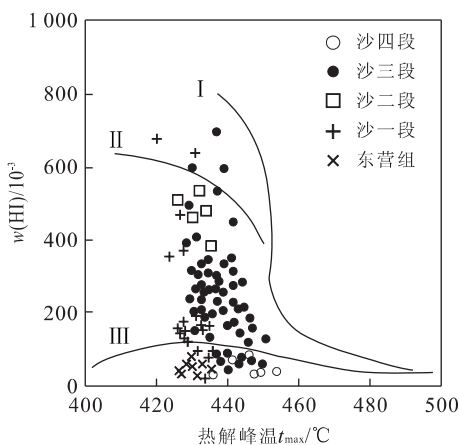


图 2 辽河盆地不同地层单元样品的氢指数与热解峰温关系

Fig. 2 Hydrogen index (HI) and t_{max} diagram of rock-eval results in different stratigraphic units from Liaohe basin

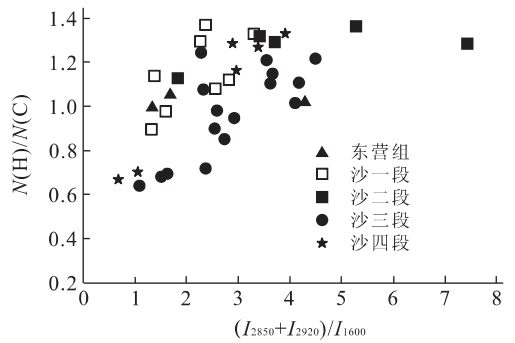


图 3 辽河盆地红外光谱参数与 $N(H)/N(C)$ 原子比的关系

Fig. 3 Relationship between factors of infrared spectroscopic and $N(H)/N(C)$ (atomic ratio) in Liaohe basin

河盆地西部凹陷划分出如下干酪根成因类型(表 1).

辽河盆地西部凹陷干酪根成因类型丰富,这可能是造成该凹陷油气类型多样性的原因之一.由于盆地不同演化阶段沉降幅度、物源供应状态的变化及由此决定的沉积体系空间配置的差异,本区不同地层单元干酪根成因类型组合明显不同.沙四段沉积期,本区沉降强烈,湖水较深,可能发育了碱性还原环境,有机质保存条件好,因此,沙四段的干酪根类型较好,从凹陷中央到边缘,发育了藻质 I 型、II 型→混合 II 型→木质 III 型的干酪根类型组合,发育了具有高有机质丰度的源岩,并在特定的沉积条件下发育了藻质 III 型和木质 III 型等特殊干酪根类型.沙三段沉积期,湖水深度较沙四段沉积期有所变浅,有机质保存条件总体上较沙四段沉积期变差,发育藻质 II 型→混合 II 型→木质 III 型的干酪根类型组合,有机质丰度有所降低.沙一、二段和东营组沉积期,湖泊进一步变浅,介质的氧化性增强,在此情况下,抗氧化—降解能力较差的低等水生浮游植物来源的有机质被优先降解,因此发育了混合 II 型→木质 III 型的干酪根类型组合,在凹陷边缘甚至出现了反映强氧化环境的木质 IV 型干酪根,并在特定条件下发育了木质 II 型等特殊类型的干酪根.

根据以上论述,本区沙四段是最好的烃源岩,其次为沙三段,而沙一、二段和东营组的生烃能力明显变低.

2.2 源岩热演化及低熟油生成能力分析

通过对各种测试参数的综合分析,本区的生烃门限约在 2 650 m,其热演化阶段可分为未成熟、低成熟、成熟、高成熟—过成熟阶段^[3,4].本区低成熟油形成于未成熟及低成熟阶段.低熟油系指非干酪

表 1 辽河盆地西部凹陷主要干酪根成因类型

Table 1 Genetic types of kerogen in western depression, Liaohe basin

成因类型	生物来源	沉积—成岩环境	分布层位	地球化学特征
藻质 I 型 (I _A)	藻类	强还原环境	沙四段	1. $N(H)/N(C) > 1.4$, $w(HI) > 600 \times 10^{-3}$; 2. $w(PAOM) > 80\%$, $w(GA) < 10\%$, PAOM 具强荧光; 3. $w(TOC) > 5\% \sim 10\%$, $w(S^{2-})$ 高, $w(Fe^{2+})/w(Fe^{3+})$ 高
藻质 II 型 (II _A)	藻类	还原—强还原	沙四段 沙三段	1. $N(H)/N(C) > 1.0 \sim 1.2$, $w(HI) > 300 \times 10^{-3}$; 2. $w(PAOM) > 80\%$, $w(GA) < 10\%$, PAOM 具强—较强荧光; 3. $w(TOC) > 5\% \sim 10\%$, $w(S^{2-})$ 高, $w(Fe^{2+})/w(Fe^{3+})$ 高
混合 II 型 (II _M)	藻类高等植物	还原—强还原	沙四段 沙三段	1. $N(H)/N(C) > 1.0$, $w(HI) > 200 \times 10^{-3}$; 2. $w(PAOM) > 50\%$, $w(GA) < 40\%$, PAOM 具强—较强荧光; 3. $w(TOC) > 5\% \sim 10\%$, $w(S^{2-})$ 高, $w(Fe^{2+})/w(Fe^{3+})$ 高
壳质 II 型 (II _E)	高等植物	强氧化	东营组	1. $N(H)/N(C) > 1.2$, $w(HI) > 260 \times 10^{-3}$; 2. $w(E) > 68\%$, $w(GA) = 28\%$, $w(PAOM) = 4\%$; 3. $w(TOC) > 5.9\%$, $w(S^{2-})$ 低, $w(Fe^{2+})/w(Fe^{3+})$ 低
木质 II 型 (II _W)	高等植物	碱性还原	沙四段	1. $N(H)/N(C) = 1.16$, $w(HI) = 268 \times 10^{-3}$; 2. $w(D) = 78\%$, $w(GA) = 12\%$; 3. $w(TOC) = 1.6\%$, $w(S^{2-})$ 中等, $w(Fe^{2+})/w(Fe^{3+})$ 中等
藻质 III 型 (III _A)	藻类	弱还原—弱氧化	沙四段	1. $N(H)/N(C) = 0.96$, $w(HI) = 156 \times 10^{-3}$; 2. $w(PAOM) = 81\%$, PAOM 具弱荧光; 3. $w(TOC) = 0.69\%$, $w(S^{2-})$ 低, $w(Fe^{2+})/w(Fe^{3+})$ 低
木质 III 型 (III _W)	高等植物	弱还原—弱氧化	沙四段 东营组	1. $N(H)/N(C) > 1.0$, $w(HI) = 38 \times 10^{-3} \sim 286 \times 10^{-3}$; 2. $w(GA) + w(V) > 80\%$, $w(PAOM) < 10\%$; 3. $w(TOC) > 0.56\% \sim 2.36\%$, $w(S^{2-})$ 低, $w(Fe^{2+})/w(Fe^{3+})$ 低
木质 IV 型 (IV _W)	高等植物	强氧化环境	沙一、二段 东营组	1. $w(BGA + I) > 80\%$; 3. $w(TOC) < 0.5\%$, $w(S^{2-})$ 极低, $w(Fe^{2+})/w(Fe^{3+})$ 极低

注: PAOM. 片、絮状无定形; GA. 细粒状无定形; V. 镜质组分; D. 基质镜质体; E. 壳质组分; BGA. 黑色细粒状无定形; I. 惰质体。

根晚期热降解成因的各类低温早熟烃类。已发现的不同成因机制的未熟或低熟原油的物理、化学性质存在巨大差异。从原油密度和粘度的角度,未熟或低熟原油既可以是低密度低粘度的凝析油,亦可以是高密度、高粘度的重质油,即稠油。

在辽河盆地西部凹陷,未成熟源岩排出的具有较高胶质和沥青质含量及较高密度和粘度的原油在经过短距离运移聚集成藏,形成原生稠油,同时,具有较高密度和粘度的未熟和低熟原油经过不同程度的生物降解后进一步稠化,形成未熟和低熟—降解稠油。因此,大量未熟或低熟原油的出现是研究区稠油大量发育的原因之一,研究未—低熟稠油的分布特征是认识稠油成藏条件和分布规律的基础。

本区沙四段具有较特殊的岩性组合,常见暗色泥岩、油页岩和白云质(泥)灰岩互层。很多地区的暗色泥岩和油页岩的总有机碳 $w(TOC)$ 超过 10%,并具有特殊的无机矿物组合:高方沸石和高黄铁矿质量分数。部分样品的方沸石质量分数高达 40%,黄铁矿质量分数亦达 20%。较高的方沸石质量分数通常是咸化碱性湖泊的标志^[5],在一定程度上反映了强还原碱性湖泊沉积环境。沙四段异常高的黄铁矿含量和较高的还原硫含量证明了这一点。

较强的还原环境和较高的 $w(TOC)$ 决定了本

区沙四段具有较高的原生沥青质量分数。特别是,泌阳凹陷、江汉盆地和柴达木盆地未—低成熟油的发育规律表明,强还原环境沉积的碳酸盐岩有利于有机质的早期转化,为未—低熟油的形成奠定了物质基础^[6]。

3 未—低成熟油的分布特征

辽河盆地西部凹陷典型的低熟未降解稠油较少,本文主要讨论低熟未降解稠油和遭受不同程度生物降解的低熟稠油。

在辽河盆地西部凹陷,现已发现的未熟—低熟油(包括原生稠油和未—低熟—降解稠油)大多发育在埋藏深度 $h < 2500$ m 的地层单元中。图 4 为研究区原油的 $w(Ts)/w(Tm)$ 与深度关系图,根据原油的 $w(Ts)/w(Tm)$ 值和油层深度,将原油分为六类,对应于图中的 6 个分区:(1)未熟—低熟降解稠油(I₁区)。 $w(Ts)/w(Tm) < 0.4$, C_{29} 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$ 、 C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 一般小于 0.25 左右;油层埋深 $h < 2000$ m,主要包括高升地区和冷东地区部分原油;(2)未熟未降解稠油(原生稠油)(I₂区)。 $w(Ts)/w(Tm) < 0.4$,油层埋藏深度一般为 2000~2500 m,最大埋深 $h < 2750$ m,以

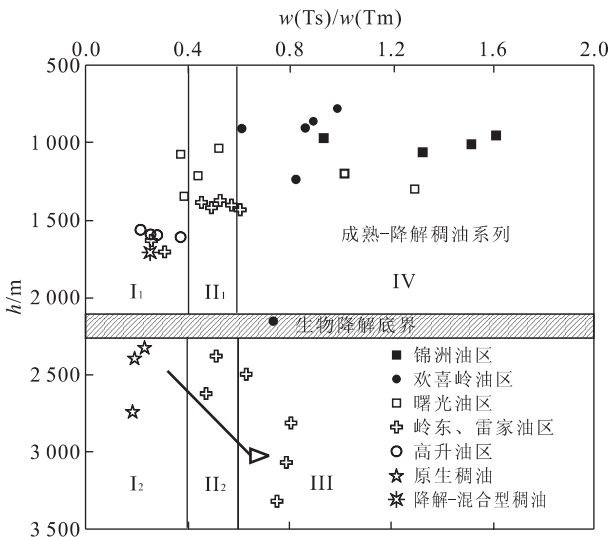


图 4 辽河盆地西部凹陷原油 $w(Ts)/w(Tm)$ 随深度的变化, 箭头示未降解原油的成熟系列

Fig. 4 Variations of crude oil $w(Ts)/w(Tm)$ with depth in Liaohai basin, western depression; Arrow represents maturity of undegradation crude oil

冷东地区冷 39 井、雷 41 井、坨 1—26—32 井高升地区部分沙四段稠油为代表。原油的正构烷烃具有明显的奇偶优势, 且 C_{29} 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$ 、 C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 均较低; (3) 低熟降解稠油 (II₁ 区)。 $w(Ts)/w(Tm)$ 介于 0.4~0.6 之间, C_{29} 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$ 、 C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 一般小于 0.35~0.4 左右; (4) 低熟未降解稀油 (II₂ 区)。 $w(Ts)/w(Tm)$ 介于 0.4~0.6 之间, C_{29} 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$ 、 C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 较低 (一般小于 0.35~0.4); 原油未遭受生物降解, 密度一般低于 0.9 g/cm³; (5) 正常稀油 (III 区)。 原油的 $w(Ts)/w(Tm) > 0.6$, C_{29} 甾烷 $w(20S)/w(20S+20R)$ 、 C_{29} 甾烷 $w(\beta\beta)/w(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 一般小于 0.35~0.4, 为典型的未降解稀油, 在辽河盆地西部凹陷的各主要油区均有分布, 油层埋深变化较大, 一般超过 2500 m; (6) 成熟—降解稠油 (IV 区)。 原油的 $w(Ts)/w(Tm)$ 值变化较大, 油层深度一般小于 2000 m, 包括锦州、欢喜岭、曙光及冷东地区的稠油。 这些稠油的成熟度变化较大, 且大多遭受了不同程度的混合, 因此 $w(Ts)/w(Tm)$ 除受成熟度的控制外, 还受生物降解和混合效应的影响。

从图 4 可看出, 本区未—低成熟油主要分布于 2750 m 以上, 其中深度 $h < 2000$ m 的未—低成熟油大多遭受了不同程度的生物降解, 深度 $h > 2000$

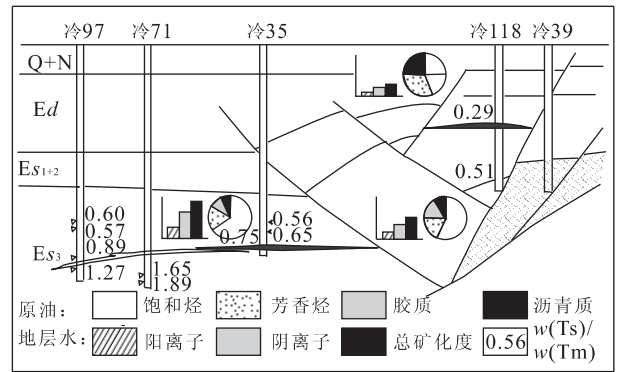


图 5 冷东地区冷 97 井—39 井油藏剖面及原油物理化学性质和地层水化学组成的变化

Fig. 5 Oil deposit profile from well Leng97-39 in Lengdong and variation of physical-chemical character of crude oil and chemical composition in strata water
原油和地层水中组分值均为质量分数

m 的未降解稠油 (原生稠油) 较少。在层位上, 未—低成熟油 (包括未降解和降解) 主要分布于沙三段和沙四段, 其中沙四段中的未—低成熟油多为自生自储型。未—低成熟油的层位分布可能与未—低成熟油的运移特征有关。辽河盆地西部凹陷的低—未成熟油主要来源于沙四段, 这类原油具有较高的胶质和沥青质含量及较高的粘度, 因此运移距离相对较小, 主要聚集在沙四段或经过短距离运移聚集于生油凹陷附近的沙三段储层中。在平面上, 西部凹陷的未—低成熟油主要分布于高升、冷东和雷家地区, 欢喜岭地区的一些原油的降解程度亦较低。在同一油区, 未—低成熟油的分布亦有一定的规律性。未—低成熟油主要分布于靠近断层的浅部储层中 (图 5)。未—低成熟油这一分布特征反映了不同成熟度油气的聚集史及断裂活动性对油气分布的控制作用。在未—低成熟油运移聚集期, 断层的活动性较强, 低熟原油运移至浅部储层; 而在成熟油气的主要运聚期, 断裂的活动性明显减弱, 输导能力降低, 控制了油气的分布。

参考文献:

- [1] 王启军, 陈建渝. 油气地球化学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988.
Wang Q J, Chen J Y. Oil and gas geochemistry [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1998.
- [2] Peters K E. Guidelines for evaluating petroleum source rocks using programmed pyrolysis [J]. AAPG Bulletin, 1986, 70: 318-329.

- [3] 朱芳冰. 辽河盆地西部凹陷源岩热演化及生烃史研究 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(3): 53—56.
Zhu F B. Research of organic maturation and petroleum generation in the western depression, Liaohe basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(3): 53—56.
- [4] Chen J Y, Hao F, Ding Z Y, et al. Petroleum potential and thermal history of the Yitong basin, China [J]. Organic Geochemistry, 1994, 22: 331—341.
- [5] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 低熟油气形成机理与分布 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
Wang T G, Zhong N N, Hou D J, et al. Immature oils forming mechanism and distribution [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [6] 侯读杰, 王铁冠. 中国陆相沉积中的低熟油气资源 [J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(6): 38—45.
Hou D J, Wang T G. Immature-low mature oil in continental deposit in China: a review [J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(6): 38—45.

Research on Characteristic of Source Rock and Immature Oils Distribution in Western Depression, Liaohe Basin

Zhu Fangbing

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The discovery and study of immature oils is one of the most important progresses in oil and gas geochemistry in recent years. The generation hydrocarbons have been studied based on source rock characters. The oil is divided into six types, namely immature to lower mature, bio-degraded heavy oil, immature undegraded heavy oil, lower mature bio-degraded heavy oil, lower mature oil, normal oil and mature bio-degraded heavy oil. On the basis of above, it was researched about immature oils distribution character. It shows that the immature oils distribution is controlled by depth, structural belt of oil generating depression and fault conducting ability.

Key words: Liaohe basin; immature oil; generation hydrocarbon potential; genetic type; distribution character.

更 正

本刊 2001 年第 26 卷第 5 期《激光剥蚀电感耦合等离子体质谱测定岩石样品中稀土元素》一文, 由于执笔人仓促, 表 2 中 WTB8(麻粒岩)中的数据有错, 现更正如下:

WTB-8 (麻粒岩)	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
测定值 LA (n=3)	2.92	5.55	7.12	0.90	6.26		0.44								
RSD/%	7.69	1.76	12.74	3.27	2.98		16.84								
测定值 SN		4.76	9.39	1.35	6.15	1.41	0.38	1.10	0.10	0.60	0.10	0.29	0.040	0.29	0.040

另外, 此文参考文献[1]中第一作者 Güther D 应为 Günther D. 作者罗彦感谢高山教授对本文疏漏之处的洞察与指正, 并向广大读者表示诚挚歉意.