

doi:10.3799/dqkx.2011.005

四川旺苍志留系鲕粒灰岩特征及地质意义

秦松¹, 张涛², 苏文博^{1*}, 王巍¹, 马超¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 四川省地勘局区调队, 四川双流 610213

摘要: 近期在川西北旺苍地区早志留世南江组中首次发现了鲕粒灰岩。它们多以 10 cm 左右的薄层夹持在页岩或粉砂质泥岩中, 沉积相分析显示该段地层总体应属于均斜缓坡沉积体系。说明这些鲕粒是由异地搬运而来, 在旺苍附近可能会存在相当规模的鲕粒滩。在显微镜下可观察到, 其中的鲕粒类别单一, 鲕粒紧密排列, 并呈现一定程度的压缩变形, 局部壳层呈锯齿状, 也指示这些鲕粒曾经历过高能分选和搬运, 以及压实成岩作用等。氧碳同位素测试显示, 这些鲕粒灰岩沉积时的古温度大体为 25~31 °C, 表明早志留世的上扬子地台应处于中低纬度干热或温暖的古气候带。除去古气候及古地理学方面的意义, 当前鲕粒灰岩的发现还为该区油气勘探提供了重要的储层信息。

关键词: 鲕粒灰岩; 古气候; 志留纪; 沉积作用; 上扬子地台。

中图分类号: P531; P534

文章编号: 1000-2383(2011)01-0043-10

收稿日期: 2010-05-31

Characteristics and Implications of the Oolitic Limestones from the Silurian Succession in Wangcang, Sichuan, South China

QIN Song¹, ZHANG Tao², SU Wen-bo^{1*}, WANG Wei¹, MA Chao¹

1. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Regional Investigation Team in Geological Prospecting Bureau of Sichuan, Shuangliu 610213, China

Abstract: Oolitic limestone has been recognized for the first time in the Early Silurian (Telychian) Nanjiang Formation from Wangcang, NW Sichuan. Facies analyses show that this oolitic-bearing succession developed in a ramp environment. With the thickness less than 10 cm in general and interbedded in the ramp succession, it can be determined that the oolitic layers were moved by episodic currents probably from a large oolitic beach near Wangcang, NW Sichuan, Upper Yangtze platform. Under the microscope, the categories of the oolites are monotonous, and somewhat compressed and deformed, with close contacts and serrated appearances. It also indicates that the oolites should be well-sorted and transported under the high-energy environment, and then be compacted during the following diagenetic stage. The oxygen and carbon isotope analyses of the oolites indicate that the paleotemperature is 25–31 °C, suggesting tropical to subtropical climates of the mediate to low latitude during the Early Silurian (Telychian) in the Upper Yangtze region. Besides the study of the paleoclimate and paleogeography, as the high-quality reservoir rock, the discovery of the Early Silurian oolitic beds and the possible related oolitic beach nearby is helpful for the oil-gas exploration in NW Sichuan.

Key words: oolitic limestone; paleoclimate; Silurian; sedimentation; Upper Yangtze platform.

四川广元—陕西宁强一带志留系出露良好, 地层分布连续, 化石丰富, 在我国志留纪研究中有着十分重要的地位。半个多世纪来, 许多学者先后在该地

区进行了各种研究(刘第壩等, 1964; 周希云和余开富, 1984; 丁梅华和李耀泉, 1985; 金淳泰等, 1992, 1997; 张廷山等, 1995, 1998; 陈旭和戎嘉余, 1996; 李

基金项目: 中石化海相烃源岩前瞻性项目(No. G0800-06-ZS-319); 国家自然科学基金项目(No. 40772076); 斯伦贝谢——中国地质大学(北京)教育基金(No. SLBX0901)。

作者简介: 秦松(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事综合地层及沉积古地理学研究。E-mail: qinsong222168@163.com。

* 通讯作者: 苏文博, E-mail: suwenbo@cugb.edu.cn

越等,1998;陈旭等,2001;Li *et al.*, 2004),逐步建立起该区志留系地层系统,探讨了包括生物礁及碳酸盐微相、沉积古地理、成岩作用、储层及油气资源评价等方面的工作。但是在这些研究工作中均没有鲕粒灰岩的有关研究和报道。

鲕粒是一种包覆颗粒(Tucker *et al.*, 1990),具有很明显的层圈结构以及复杂的沉积组构。其成分可以是碳酸盐质的、铁质的、硅质的、磷质的,还有少量是由硅酸盐矿物、硫酸盐矿物或硫化物矿物组成的(梅冥相,2008)。作为经典的碳酸盐岩,鲕粒灰岩本身含有丰富的古环境—古地理—古气候信息(颜佳新等,1999)。鲕粒形成之后在漫长的地质历史作用中一定会经受不同形式的成岩变化作用,不同的鲕粒类型表示不同的成岩变化作用,不同类型的成岩次生变化标志着不同的地质意义(王英华等,1983;张秀莲,1984)。而在油气勘探与开发中,鲕粒灰岩还是良好的储积层(马永生等,2005;李吉君等,2008)。最近笔者在广元旺苍地区志留系首次发现了鲕粒灰岩沉积,本文将在简述其地质特征的基础上探讨其沉积环境和古地理背景,并揭示它们在川西北油气勘探工作中的意义。

1 地层学及沉积学特征

研究区位于四川省旺苍县(图 1),剖面在旺苍县城通往国华镇公路旁。此剖面志留系地层出露较

完整、连续,整个剖面厚度大约 890 m,相关研究层段见图 2。

剖面上的南江组其底部是黑色笔石页岩,水平层理发育,出现的笔石种属繁多、丰富(刘第墉等,1964)。这些种属的大量出现说明当时的海水是非常平静、滞留的,代表盆地相的沉积环境。这里所谓盆地不是一般所指的深海盆地,而是浅海陆棚上的相对凹陷区(张廷山等,1995),代表川西北早志留世碳酸盐—陆源碎屑均斜缓坡沉积体系(张廷山等,1995)最深环境。往上逐渐出现粉砂质页岩夹粉砂岩,颜色逐渐变成灰色—灰绿色,笔石种属成分和数量也大大减少,代表深缓坡型的沉积环境。其上覆地层曾被称作“罗惹坪组”(刘第墉等,1964),总体为粉砂岩夹生物灰岩,并发育波痕与交错层理,化石变为介壳相,含有复体珊瑚、腕足、三叶虫等,代表浅缓坡或潮间带沉积环境。南江组之上的这段地层,其岩石特征及生物特征与周希云和余开富(1984)在南江等地所划分的“韩家店组”完全一致。而根据牙形石等资料(周希云和余开富,1984),南江一带的“韩家店组”完全可与黔北湘西一带的“秀山组”对比,都应属于早志留世 Telychian 期沉积(陈旭和戎嘉余,1996;林宝玉等,1998)。由于其岩性及所含化石组合与邻近的广元—宁强一带的宁强组中下部基本一致(金淳泰等,1992,1997;陈旭和戎嘉余,1996)、而有别于标准地点的罗惹坪组(林宝玉等,1998),因此笔者将当前旺苍及南江一带的这套地层统一改称为宁

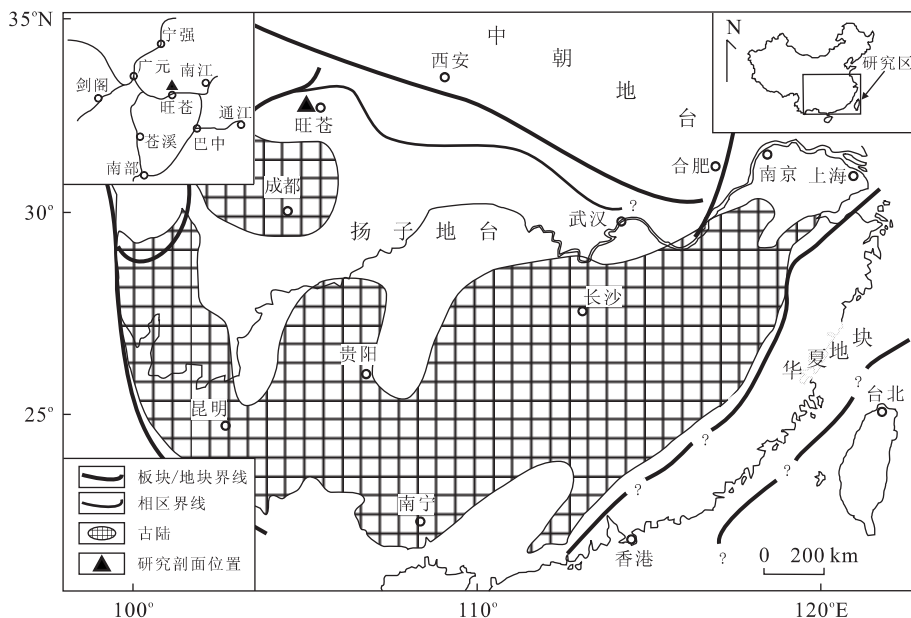


图 1 研究区早志留世晚期古地理背景及剖面位置(据陈旭和戎嘉余,1996;王鸿祯等,2006;Su *et al.*, 2009)

Fig. 1 Sketch map of paleogeographical setting of the Late Early Silurian interval and the location of studied section

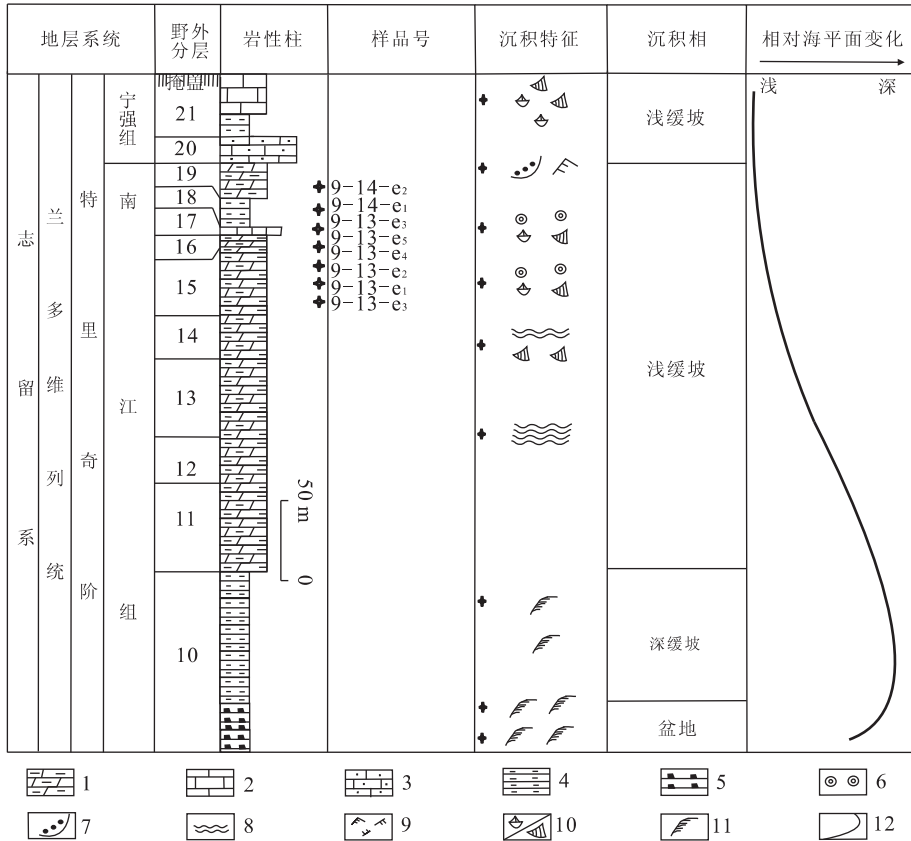


图 2 旺苍王家沟剖面南江—宁强组地层柱状图及样品层位

Fig. 2 Horizons of the samples and the stratigraphic subdivision of the Nanjiang Fm. and the Ningqiang Fm. at the Wangjiagou section of Wangcang, NW Sichuan

1. 粉砂质灰岩; 2. 灰岩; 3. 砂岩; 4. 粉砂质页岩; 5. 炭质页岩; 6. 鲕粒; 7. 球枕状构造; 8. 波痕; 9. 交错层理; 10. 亮相化石; 11. 笔石; 12. 相对海平面变化曲线

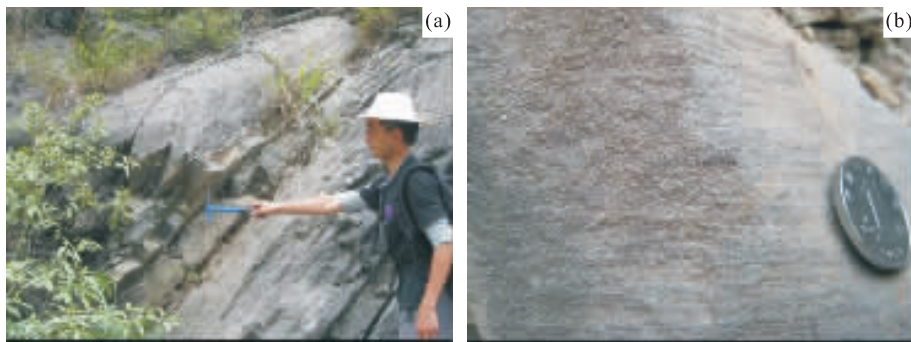


图 3 四川旺苍王家沟剖面鲕粒灰岩野外露头照片

Fig. 3 Oolitic limestone at the Wangjiagou section of Wangcang, NW Sichuan

a. 鲕粒灰岩野外产出状态(铁锤指处); b. 鲕粒灰岩近观

强组(图 2).

通过剖面实测观察到,整个王家沟剖面出露的志留纪地层中只有南江组顶部的地层中出现了鲕粒灰岩(图 2),且其厚度很薄,一般以 10 cm 左右的夹层分布在粉砂质页岩或粉砂质灰岩中(图 3a),鲕粒结构明显,大多呈球粒状、椭球粒状(图 3b).

2 观察及测试结果

2.1 采样及研究方法

样品采自于实测剖面(图 2)的 15、16、17、18 层中,共采集样品 26 件,在室内挑选出其中 8 件制成

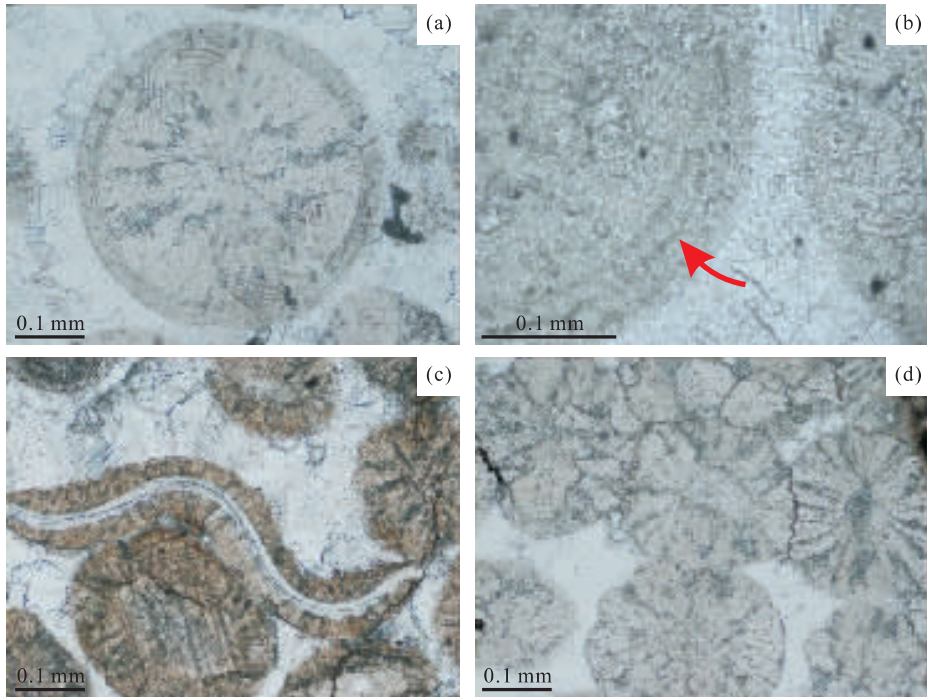


图 4 四川旺苍王家沟剖面鲕粒微观特征

Fig. 4 The microcosmic characteristics of oolites at Wangjiagou section of Wangcang, NW Sichuan

a. 球状鲕粒,具放射及同心纹层,单偏光(×10);b. 鲕粒外部同心纹层局部放大(箭头),单偏光(×20);c. 与鲕粒共存的较完整三叶虫碎片,单偏光(×10);d. 鲕粒紧密排列,压缩变形,单偏光(×10)

光薄片,各个产出层位均有代表样品。

在前期的野外沉积相研究基础上,笔者通过常规显微镜观察,划分鲕粒类型,分析鲕粒微区特征、鲕粒内部层圈及胶结物物质等鲕粒组成物质特征以及可能存在的成岩作用。在此基础上,结合碳氧同位素分析等,探讨该区域当时的古气候等特征。

2.2 鲕粒的微观特征

鲕粒始于核心,成熟于圈层,继而是后期成岩作用下的生长变化,鲕粒的类型及名称能够反映出它在生长阶段的各种特征。通过镜下观察发现,四川旺苍志留系的鲕粒大部分都是纯放射鲕,也可见少许的同心鲕。鲕粒大部分呈球状(图 4a),少数呈椭球状,球状者占约 80%。其核心为泥晶团粒或生屑组成;放射鲕包壳由放射状排列的方解石晶体组成,鲕粒直径约 0.2~0.6 mm。在当前的同心鲕中,在其外部可见数层同心纹层,平滑的圈层显示出亮层和暗层交互的现象(图 4b)。胶结物大部分为亮晶方解石,鲕粒边界清晰,有些鲕粒残缺、破碎,镜下有时可见较完整的三叶虫碎片(图 4c)。这些迹象表明此处的鲕粒应来自于高能鲕粒滩,经过成岩作用鲕粒出现了紧密排列和压缩变形的现象(图 4d)。

2.3 氧碳同位素测试结果及分析

前人对早古生代及其更古老碳酸盐岩的碳氧同位素研究表明,氧碳稳定同位素组成可以揭示成因信息和地层信息(Veizer *et al.*, 1992),对古环境演化具有明显的响应(Qing and Veizer, 1994; Veizer, 1995)。研究样品的选择首先以显微镜下岩石学观察为基础,挑选出无后生脉,未发生强烈的重结晶作用、岩石结构主要为亮晶鲕粒结构、白云石化作用较弱的较纯鲕粒灰岩。去除风化表面层后,再用分析纯乙醇清洗颗粒表面,然后在玛瑙碾钵中碾磨至 200 目。在实验室采用磷酸法制备样品的 CO_2 ,将所获得的 CO_2 气体在 MAT-252 质谱仪上进行测试并得到 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的数值,测试结果以 PDB 和 SMOW 标准给出,质谱仪测试精度优于 2‰。其样品测试分析结果汇总于表 1。

2.3.1 “年代效应”及校正 一般来说,年代越老,受成岩作用改造越强烈, $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏离也越大,这种效应被称为“年代效应”(Keith and Weber, 1964; 邵义龙, 1994)。在氧碳同位素的测试当中,利用 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值对沉积介质进行古盐度和古温度定量分析,对中生代以来的样品是比较有效的,而对中生代以前的样品,由于经常受到较强的成岩作

表 1 研究地区鲕粒灰岩 C、O 同位素组成及 Z 值和古温度

Table 1 $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, and Z values and paleotemperature of oolitic limestones in studied area

样号	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB, ‰)	修正后 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB, ‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB, ‰)	修正后 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB, ‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW, ‰)	古温度 (t , °C)	Z 值
9-13-e ₁	-1.68	-0.80	-10.31	-4.77	20.23	25.92	123.29
9-13-e ₂	-1.68	-0.80	-11.50	-5.96	19.01	31.74	122.69
9-13-e ₃	-0.14	0.74	-10.19	-4.65	20.35	25.35	126.50
9-13-e ₄	-0.52	0.36	-10.57	-5.03	19.97	27.16	125.53
9-13-e ₅	-2.20	-1.32	-11.27	-5.73	19.24	30.59	121.74
9-14-e ₁	-0.55	0.33	-11.26	-5.72	19.25	30.54	125.13
9-14-e ₂	-1.72	-0.84	-12.62	-7.08	17.85	37.48	122.05

注:样品处理及同位素测试由中国地质大学(北京)地质实验中心稳定同位素实验室完成。

用的影响,致使原始沉积物中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值因同位素交换而发生变化,从而降低了这些岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值指示古温度和古盐度的可靠性。年代效应将会影响古盐度、古温度测定的可靠性,在这种情况下,就要考虑怎样消除这些成岩作用的影响,即在计算过程中进行了“年代效应”校正。因此,类似志留系这样古老地层的相关样品,其测试数据都需要进行一定的校正后才能进行相关分析。本文研究的样品,用 Keith and Weber(1964)给出的 $\delta^{18}\text{O}$ 值及 $\delta^{13}\text{C}$ 值与地质年代的关系进行“年代效应”校正,然后再进行古盐度和古温度的计算。

在旺苍地区,用其中志留纪样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与第四纪 $\delta^{18}\text{O}$ 值之差,将所研究的志留纪样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值校正为相当于第四纪岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,然后用校正过的数值计算古温度;这种方法的前提是将成岩作用对同一时代的岩石 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响看作是一常数,然后加以校正。由于各种岩石所经历的成岩作用不尽一致,所以用一个常数去校正 $\delta^{18}\text{O}$ 测定值显然也不能完全反映岩石最初沉积时的情况,但至少可以说,在使用前人用于中生代以来的样品公式时,会更接近实际情况(邵义龙,1994)。

志留纪海相石灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值约为 -6.72‰ (Keith and Weber, 1964; Jaffrès *et al.*, 2007), 第四纪海相石灰岩 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值约为 -1.18‰ , 根据“年代效应”校正的方法,用 $\Delta\delta^{18}\text{O} = 5.54\text{‰}$ 将志留纪石灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值校正成相当于第四纪样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值;志留纪的海相石灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $+1.08\text{‰}$ (Keith and Weber, 1964; Veizer *et al.*, 1999), 第四纪海相石灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值约为 $+1.96\text{‰}$, 两者差值为 $+0.88\text{‰}$, 用 $\Delta\delta^{13}\text{C} = 0.88\text{‰}$ 将志留纪的 $\delta^{13}\text{C}$ 值校正为相当于现代海相石灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值;并根据这一校正过的数值计算古盐度 Z 值、古温度(表 1)。

2.3.2 古盐度特征 海相灰岩中 $\delta^{13}\text{C}$ 值(PDB)接

近于零,多在 $-5\text{‰} \sim +5\text{‰}$ (Veizer *et al.*, 1999; Prokoph *et al.*, 2008)。 $\delta^{13}\text{C}$ 值随温度变化很小,不同类型的石灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值有明显的差异,其值越大的沉积介质盐度越高, ^{13}C 的富集强度随碳原子的氧化程度增加而增强,即 $\delta^{13}\text{C}$ 值的偏负程度是环境闭塞程度和还原强度的标志(Wotte *et al.*, 2007; Prokoph *et al.*, 2008)。由表 1 可知 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-2.2\text{‰} \sim -0.14\text{‰}$, 都在海相石灰岩标准之内,指示样品形成环境基本属于正常海相。

与此同时,也可从另一个定量化的角度分析其古盐度。Keith and Weber(1964)提出用 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值综合区分侏罗纪及时代更新的海相石灰岩和淡水石灰岩的经验公式:

$$Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50), \quad (1)$$

式(1)中 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值均为 PDB 标准。 $Z > 120$ 为海相石灰岩; $Z < 120$ 为淡水石灰岩。

根据式(1),笔者用校正过的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值计算出各鲕粒灰岩样品的 Z 值(表 1),其 Z 值变化范围为 $121.74 \sim 126.50$, Z 值均大于 120。 $\delta^{13}\text{C}$ 值没有较大的波动,大多分布在 $-1.68\text{‰} \sim -0.14\text{‰}$ 。与张秀莲(1985)在分析碳酸盐岩中氧、碳同位素与古盐度关系时的 Z 值及 $\delta^{13}\text{C}$ 值经验数据 $-1.00\text{‰} \sim +0.16\text{‰}$ 代表潮间和潮下带环境相比较,说明该处的古盐度也是潮间、潮下带环境,与地层序列和相分析显示的浅缓坡和深缓坡环境相符,表明循环良好,盐度正常。

2.3.3 古温度特征 $\delta^{18}\text{O}$ 值与水体的温度关系比较密切。在盐度不变的情况下, $\delta^{18}\text{O}$ 值随温度的升高而降低。Shackleton and Kennett(1974)在前人的基础上提出了古温度计算公式:

$$t(^{\circ}\text{C}) = 16.9 - 4.38(\delta_c - \delta_w) + 0.1(\delta_c - \delta_w)^2, \quad (2)$$

式(2)中, t 为碳酸盐岩形成时的海水古温度; δ_c 为

测得碳酸盐岩中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(PDB 标准); δ_w 为当时海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(SMOW 标准)。

使用此公式计算古温度时,需用校正值进行计算, δ_c 用校正的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(PDB 标准); δ_w 用当时海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(SMOW 标准)。志留纪时期海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(SMOW 标准)为 -2.8‰ (Given and Lohmann, 1986; Stricanne *et al.*, 2006)。故公式可以修正为:

$$t(^{\circ}\text{C}) = 16.9 - 4.38(\delta^{18}\text{O}_{\text{校正}} + 2.8) + 0.1(\delta^{18}\text{O}_{\text{校正}} + 2.8)^2 \quad (3)$$

基于上述的公式,笔者对研究区各样品进行了古水温计算,计算出来的古温度值为 $25.35 \sim 37.48^{\circ}\text{C}$,绝大多数在 $25 \sim 31^{\circ}\text{C}$ (表 1)。这一温度范围体现了上扬子地区早志留世干热或温暖的气候条件,属于中低纬度的气候。

3 讨论与结论

3.1 从研究区志留纪古气候特征的推演看“年代效应”校正的合理性

古盐度分析中,用 $\delta^{13}\text{C}$ 的原始数据直接计算当时的古盐度是可行的,因为自寒武纪以来 $\delta^{13}\text{C}$ 值不会发生太大的变化 (Veizer *et al.*, 1999; Prokoph *et al.*, 2008)。但是在古温度的计算过程中,根据 $\delta^{18}\text{O}$ 值计算的结果常会出现较大偏差,分析其原因主要有以下 3 点: (1) 受年代效应的影响,所测出的 $\delta^{18}\text{O}$ 值并不能反应当时的原始值,故本文中采用校正值计算古温度,而未采用测试值; (2) 此公式只适用于正常盐度下,且盐度保持不变, $\delta^{18}\text{O}$ 值才与古水温有明显的关系; (3) 式中的 δ_w 指当时的海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值。鉴于以上原因,若用上面的古温度公式计算样品形成时的古水温,那么就要选用正常盐度下的样品,并用其 $\delta^{18}\text{O}$ 校正值。当前测试结果都较稳定,没有较大的波动,与此前古地磁资料显示的早古生代志留纪时期扬子地块位于赤道附近偏南位置 (吴汉宁等, 1998) 的结论相一致,这样的中低纬度温暖干燥气候带,也为本文推测的旺苍附近地区发育一定规模的鲕粒滩提供了古气候方面的背景保障 (颜佳新等, 1999)。这也从另一个侧面说明了地球化学测试中“年代效应”校正及测试样品选择的重要性以及当前测试结果的可靠性。

3.2 鲕粒灰岩的发现与川西北地区油气勘探关系

在扬子地台志留纪及其后的构造演化史中,普遍认为扬子和华北地台逐渐接近、拼接,其中东北部较早拼合,西北部最后封闭 (殷鸿福和彭元桥, 1995;

杜远生等, 1997; 李越等, 1998; 殷鸿福和张克信, 1998; 殷鸿福等, 1999; Li *et al.*, 2004; 王鸿祯等, 2006)。而在奥陶纪末期—志留纪早中期,扬子地台主要受到来自东南方向的华夏地块与之拼接所产生的持续不断的北西向推挤 (许效松等, 1996; 苏文博等, 2007; 李青等, 2009; Su *et al.*, 2009), 导致扬子地台的陆表海各部分在志留纪兰多维列世晚期先后上升为陆, 至特列奇期末仅在局部地区残留海湾 (陈旭和戎嘉余, 1996; 李越等, 1998; Li *et al.*, 2004)。在陆源碎屑干扰较弱的时期和地点, 形成了局限碳酸盐岩台地等沉积建造 (张廷山等, 1995, 1998; 李越等, 1998)。在这样的构造背景下, 旺苍地区应该属于上述海湾的组成部分 (图 1)。

当前在旺苍地区南江组所发现的鲕粒灰岩多以 10 cm 左右的厚度出现, 夹持在厚 2~10 m 的陆源—泥页岩或粉砂质灰岩当中 (图 3)。结合上述的构造背景和室内分析可以进一步推测: 在旺苍附近地区志留纪相当层位应发育有相当规模的鲕粒滩, 当前剖面中薄层的鲕粒灰岩是在周期性的强水流作用下被搬运到此地沉积下来。在基底快速下降和来自周缘不同时期隆起区陆源碎屑的强烈均衡补偿充填作用下, 它们又被较厚的碎屑岩所披盖, 从而形成当前这样的沉积序列 (图 2)。

众所周知, 上扬子地台早古生界发育有良好的烃源岩, 旺苍王家沟剖面下志留统底部发育厚达 200 m 的暗色岩系就属于其中之一。就在这套岩系之上的南江组中笔者发现了鲕粒灰岩。根据当前研究, 在旺苍附近可能会存在相当规模的鲕粒滩。根据其所含化石 (刘第壩等, 1964; 周希云和余开富, 1984), 区域上它与川南地区志留系储层—“小河坝砂岩” (郭英海等, 2004; 张林等, 2005) 层位相当。由此可见, 当前发现的鲕粒灰岩物源、即旺苍附近地区的鲕粒滩建造, 可与下部的暗色岩系及其上的泥岩披盖等, 构成天然的“生—储—盖”体系。显然, 当前鲕粒灰岩的发现为该地区下古生界油气勘探与开发提供了新的储层信息。

近来的工作已明确揭示, 以“普光”气田为代表的川东地区丰富的天然气资源就赋产于晚二叠世—早三叠世飞仙关期鲕粒滩及相关沉积中 (马永生等, 2005; 李吉君等, 2008)。而广元—旺苍及川北下古生界具有一系列优质烃源岩, 它们的层位都在南江组底部以下。因此, 有理由认为, 与旺苍王家沟剖面志留系鲕粒灰岩相关的可能存在的鲕粒滩, 将是川西北地区早古生代极为有利的储集相带和层位。未来

的勘探与开发,应当围绕这一层位在广元—旺苍附近地区开展更为深入系统的工作。

4 结论

(1)在川西北旺苍地区志留纪兰多维列世中期地层中首次发现了鲕粒灰岩,它们多以 10 cm 左右的薄层产于泥页岩或粉砂质泥岩序列中;(2)当前的鲕粒大小均一,并多为放射鲕。鲕粒灰岩结构紧密,局部有压缩变形,并伴生有比较破碎的生物碎屑。显示了鲕粒曾经历过较强水流的筛选和微弱的成岩压实作用。而沉积相分析表明,鲕粒灰岩所在沉积序列为均斜缓坡沉积体系。由此推测,当前南江组这些鲕粒灰岩,应是由较强水流从异地搬运而来,在旺苍—广元附近应存在相当规模的鲕粒滩。这为该区油气勘探提供了新的储层信息;(3)对南江组所发现鲕粒地球化学分析得到的古温度为 25~31 °C,这一古温度范围体现了上扬子地区早志留世干热或温暖的气候条件,应属于中低纬度的亚热带气候带。

致谢:评审专家及编辑部对文章初稿所提出的一系列十分中肯、具体、详细的意见和建议,在此表示衷心感谢!同时感谢王欢、陈吉、杨永琼、赵慧静等参加了部分野外工作。

References

- Chen, X., Rong, J. Y., 1996. Telychian (Llandovery) of the Yangtze region and its correlation with British Isles. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Chen, X., Rong, J. Y., Zhou, Z. Y., et al., 2001. Central Guizhou and Yichang increased uplift at the turn of Ordovician—Silurian period in the Upper Yangtze region. *Chinese Science Bulletin*, 46(12): 1052—1056 (in Chinese).
- Ding, M. H., Li, Y. Q., 1985. Silurian conodonts of Ningqiang area, Shanxi Province and their biostratigraphic significance. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 10(2): 9—20 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y. S., Yin, H. F., Wang, Z. P., 1997. The Late Caledonian—Early Hercynian basin's framework and tectonic evolution of Qinling orogenic belt. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(4): 401—405 (in Chinese with English abstract).
- Given, R. K., Lohmann, K. C., 1986. Isotopic evidence for the early meteoric diagenesis of the reef facies, Permian reef complex of West Texas and New Mexico. *Journal*

- of Sedimentary Petrology*, 56(2): 183—193. doi: 10.1306/212F88B4—2B24—11D7—8648000102C1865D
- Guo, Y. H., Li, Z. F., Li, D. H., et al., 2004. Lithofacies palaeogeography of the Early Silurian in Sichuan area. *Journal of Palaeogeography*, 6(1): 20—29 (in Chinese with English abstract).
- Jaffrés, J. B. D., Shields, G. A., Wallmann, K., 2007. The oxygen isotope evolution of seawater: a critical review of a long-standing controversy and an improved geological water cycle model for the past 3.4 billion years. *Earth Science Reviews*, 83(1—2): 83—122. doi: 10.1016/j.earscirev.2007.04.002
- Jin, C. T., Fang, Z. Q., Chen, J. R., 1997. Recent progress in the research of the Silurian system on the northwestern margin of the upper Yangtze platform. *Tethyan Geology*, 21: 142—156 (in Chinese).
- Jin, C. T., Fang, Z. Q., Ye, S. H., et al., 1992. The Silurian in Guangyuan Sichuan and Ningqiang, Shaanxi. Chengdu Science and Technology University Press, Chengdu (in Chinese).
- Keith, M. L., Weber, J. N., 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected lime-stones and fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10—11): 1787—1816. doi: 10.1016/0016—7037(64)90022—5
- Li, J. J., Lu, S. F., Xue, H. T., et al., 2008. Migration and accumulation efficiency of natural gas in Feixianguan Formation oolitic gas reservoirs, northeastern Sichuan basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(4): 565—571 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Duan, R. C., Ling, W. L., et al., 2009. Detrital zircon U-Pb geochronology of the Early Paleozoic strata in eastern Guangxi and its constraint on the Caledonian tectonic nature of the Cathaysian continental block. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 189—202 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Chen, X., Pan, J. X., 1998. Temporal and spatial distribution of the carbonate platform of the Llandovery Ningqiang Formation (Silurian) with special reference to the closure of the Ningqiang bay. *Journal of Stratigraphy*, 22(1): 16—24 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Steve, K., Chen, X., 2004. Control of carbonate sedimentation and reef growth in Llandovery sequences on the northwestern margin of the Yangtze platform, South China. *Gondwana Research*, 7(4): 937—949. doi: 10.1016/S1342—937X(05)71076—5

- Lin, B. Y., Su, Y. Z., Zhu, X. F., et al., 1998. China stratigraphic code—Silurian, Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, D. Y., Chen, X., Zhang, T. R., 1964. Early Paleozoic strata in Nanjiang, North Sichuan. *Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Science's Publications*, 1: 161—170 (in Chinese).
- Ma, Y. S., Mou, C. L., Guo, T. L., et al., 2005. Sequence stratigraphy and reservoir distribution of the Changxing Formation in northeastern Sichuan basin, *Earth Science Frontiers*, 12(3): 179—185 (in Chinese with English abstract).
- Mei, M. X., 2008. Implication for the unusual giant oolites of the Phanerozoic and their morphological diversity; a case study from the Triassic Daye Formation at the Lichuan Section in Hubei Province, South China. *Geoscience*, 22(5): 683—698 (in Chinese with English abstract).
- Prokoph, A., Shields, G. A., Veizer, J., 2008. Compilation and time-series analysis of a marine carbonate $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $\delta^{34}\text{S}$ database through earth history. *Earth Science Reviews*, 87(3—4): 113—133. doi: 10.1016/j.earscirev.2007.12.003
- Qing, H. R., Veizer, J., 1994. Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: implications for coeval seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(20): 4429—4442. doi: 10.1016/0016-7037(94)90345-X
- Shackleton, N. J., Kennett, J. P., 1974. Initial reports of the deep sea drilling project 29. U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 743—755.
- Shao, Y. L., 1994. The relation of the oxygen and carbon isotope in the carbonate rocks to the paleotemperature etc. *Journal of China University of Mining and Technology*, 23(1): 39—45 (in Chinese with English abstract).
- Stricanne, L., Munnecke, A., Pross, J., 2006. Assessing mechanisms of environmental change; palynological signals across the Late Ludlow (Silurian) positive isotope excursion ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) on Gotland, Sweden. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 230(1—2): 1—31. doi: 10.1016/j.palaeo.2005.07.003
- Su, W. B., Huff, W. D., Etensohn, F. R., et al., 2009. K-bentonite, black-shale and flysch successions at the Ordovician—Silurian transition, South China: possible sedimentary responses to the accretion of Cathaysia to the Yangtze block and its implications for the evolution of Gondwana. *Gondwana Research*, 15(1): 111—130. doi: 10.1016/j.gr.2008.06.004
- Su, W. B., Li, Z. M., Etensohn, F. R., et al., 2007. Distribution of black shale in the Wufeng-Longmaxi Formations (Ordovician-Silurian), South China: major controlling factors and implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(6): 819—827 (in Chinese with English abstract).
- Tucker, M. E., Wright, V. P., Dickson, J. A. D., 1990. Carbonate sedimentology. Blackwell Sciences, Oxford.
- Veizer, J., 1995. Reply to the Comment by L S Land an “Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods; implications for coeval seawater”. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2845—2846.
- Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., et al., 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161(1—3): 59—88. doi: 10.1016/S0009-2541(99)00081-9
- Veizer, J., Plumb, K. A., Clayton, R. N., et al., 1992. Geochemistry of Precambrian carbonates, V-Late Paleoproterozoic seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(6): 2487—2501. doi: 10.1016/0016-7037(92)90204-V
- Wang, H. Z., He, G. Q., Zhang, S. H., 2006. The geology of China and Mongolia. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. H., Yang, C. Y., Zhang, X. L., 1983. Relationship between the changes of ooidal texture and the property and strength of diagenesis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1(2): 73—83 (in Chinese with English abstract).
- Wotte, T., Álvaro, J. J., Shields, G. A., et al., 2007. C-, O- and Sr-isotope stratigraphy across the Lower-Middle Cambrian transition of the Cantabrian zone (Spain) and the Montagne Noire (France), West Gondwana. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 256(1—2): 47—70. doi: 10.1016/j.palaeo.2007.09.002
- Wu, H. N., Zhu, R. X., Bai, L. X., et al., 1998. Paleomagnetic apparent polar wander paths and the characteristics of block movement in Phanerozoic, Yangtze platform. *Science in China (Ser. D)*, 28(Suppl.): 69—78 (in Chinese).
- Xu, X. S., Xu, Q., Pan, G. T., et al., 1996. Paleogeography of the South China Continent (SCC) and its contrast with Pangea. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yan, J. X., Liu, B. P., Zhang, H. Q., 1999. Palaeogeographic implications of carboniferous to Permian oolitic limestones in the Changning-Menglian belt of West Yunnan. *Journal of Palaeogeography*, 1(3): 13—18 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Peng, Y. Q., 1995. Evolution of the Phanerozoic paleo-ocean of Qinling. *Earth Science—Journal of*

China University of Geosciences, 20(6): 605—611 (in Chinese with English abstract).

Yin, H. F., Wu, S. B., Du, Y. S., et al., 1999. South China defined as part of Tethyan Archipelagic ocean system. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).

Yin, H. F., Zhang, K. X., 1998. Evolution and characteristics of the central orogenic belt. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(5): 437—442 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L., Wei, G. Q., Guo, Y. H., et al., 2005. Silurian sequence stratigraphy and favorable reservoir distribution in Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 25(5): 6—8 (in Chinese with English abstract).

Zhang, T. S., Lan, G. Z., Chen, X. H., et al., 1995. Early Silurian siliciclastic-Carbonate ramp deposits in NW Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(4): 27—36 (in Chinese with English abstract).

Zhang, T. S., Yu, J. H., Bian, L. Z., et al., 1998. Strontium, carbon and oxygen isotopic compositions and their geological significance: the Silurian strata on the northern and southern margins of the Sichuan basin. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 18(3): 41—49 (in Chinese with English abstract).

Zhang, X. L., 1984. Secondary variation of oolitic grains and its significance in the study of diagenesis. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 3(4): 377—470 (in Chinese with English abstract).

Zhang, X. L., 1985. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater. *Acta Sedimentologica Sinica*, 3(4): 17—30 (in Chinese with English abstract).

Zhou, X. Y., Yu, K. F., 1984. The discovery of conodonts in the Early Silurian, Nanjiang, Chenkou, Yuechi, Sichuan Province. *Journal of Stratigraphy*, 8(1): 67—70 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈旭, 戎嘉余, 1996. 中国扬子区兰多维利统特列奇阶及其与英国的对比. 北京: 科学出版社.

陈旭, 戎嘉余, 周志毅, 等, 2001. 上扬子区奥陶—志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升. *科学通报*, 46(12): 1052—1056.

丁梅华, 李耀泉, 1985. 陕西宁强地区志留纪牙形石及其地层意义. *地球科学—武汉地质学院学报*, 10(2): 9—20.

杜远生, 殷鸿福, 王治平, 1997. 秦岭造山带晚加里东—早海

西期的盆地格局与构造演化. *地球科学—中国地质大学学报*, 22(4): 401—405.

郭英海, 李壮福, 李大华, 等, 2004. 四川地区早志留世岩相古地理. *古地理学报*, 6(1): 20—29.

金淳泰, 万正权, 陈继荣, 1997. 上扬子地台北西部志留系研究新进展. *特提斯地质*, 21: 142—156.

金淳泰, 万正权, 叶少华, 等, 1992. 四川广元、陕西宁强地区志留系. 成都: 成都科技大学出版社.

李吉君, 卢双舫, 薛海涛, 等, 2008. 川东北飞仙关组鲕粒气藏天然气运聚效率. *地球科学—中国地质大学学报*, 33(4): 565—571.

李青, 段瑞春, 凌文黎, 等, 2009. 桂东早古生代地层碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学及其对华夏陆块加里东期构造事件性质的约束. *地球科学—中国地质大学学报*, 34(1): 189—202.

李越, 陈旭, 樊隽轩, 1998. 志留纪宁强组碳酸盐岩台地的时空演变及宁强湾的封闭. *地层学杂志*, 22(1): 16—24.

林宝玉, 苏养正, 朱秀芳, 等, 1998. 中国地层典——志留系. 北京: 地质出版社.

刘第壖, 陈旭, 张太荣, 1964. 四川北部南江早古生代地层. *中国科学院地质古生物研究所集刊*, 1: 161—170.

马永生, 牟传龙, 郭彤楼, 等, 2005. 四川盆地东北部长兴组层序地层与储层分布. *地学前缘*, 12(3): 179—185.

梅冥相, 2008. 显生宙罕见的巨鲕及其鲕粒形态多样性的意义, 以湖北利川下三叠统大冶组为例. *现代地质*, 22(5): 683—698.

邵义龙, 1994. 碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系. *中国矿业大学学报*, 23(1): 39—45.

苏文博, 李志明, Ettensohn, F. R., 等, 2007. 华南五峰组—龙马溪组黑色岩系时空展布的主控因素及其启示. *地球科学—中国地质大学学报*, 32(6): 819—827.

王鸿祯, 何国琦, 张世红, 2006. 中国与蒙古之地质. *地学前缘*, 13(6): 1—13.

王英华, 杨承运, 张秀莲, 1983. 鲕粒的结构变化与成岩作用性质和强度的关系. *沉积学报*, 1(2): 73—83.

吴汉宁, 朱日祥, 白立新, 等, 1998. 扬子地块显生宙古地磁视极移曲线及地块运动特征. *中国科学(D辑)*, 28(增刊): 69—78.

许效松, 徐强, 潘桂棠, 等, 1996. 中国南大陆演化与全球古地理对比. 北京: 地质出版社.

颜佳新, 刘本培, 张海清, 1999. 滇西昌宁—孟连带内石炭纪—二叠纪鲕粒灰岩的古地理意义. *古地理学报*, 1(3): 13—18.

殷鸿福, 彭元桥, 1995. 秦岭显生宙古海洋演化. *地球科学—中国地质大学学报*, 20(6): 605—611.

殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等, 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分. *地球科学—中国地质大学学报*, 24(1): 1—12.

殷鸿福,张克信,1998. 中央造山带的演化及其特点. 地球科学——中国地质大学学报,23(5):437—442.

张林,魏国齐,郭英海,等,2005. 四川盆地志留系层序地层及有利储集层分布. 天然气工业,25(5):6—8.

张廷山,兰光志,陈晓慧,等,1995. 川西北早志留世陆源碎屑—碳酸盐混积缓坡. 沉积学报,13(4):27—36.

张廷山,俞剑华,边立曾,等,1998. 四川盆地南北缘志留系的锶和碳、氧同位素演化及其地质意义. 岩相古地理,18

(3):41—49.

张秀莲,1984. 鲕粒在成岩作用中的次生变化及其意义. 大庆石油地质与开发,3(4):377—470.

张秀莲,1985. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系. 沉积学报,3(4):17—30.

周希云,余开富,1984. 四川南江、城口、岳池等地早志留世牙形刺的发现. 地层学杂志,8(1):67—70.

(上接 42 页)

附中文参考文献

陈德潜,陈刚,1990. 实用稀土元素地球化学. 北京:冶金工业出版社,18—21.

陈福坤,李秋立,李潮峰,等,2005. 高精度质谱计在同位素地球化学的应用前景. 地球科学——中国地质大学学报,30(6):639—645.

李潮峰,陈福坤,王芳,2008. 采用氧化物方式高精度测量微量样品钷同位素比值. 地球科学——中国地质大学学报,33(2):243—250.

李志昌,方向,1998. Ce 同位素——一个新的地球化学示踪

器. 华南地质与矿产,(2):1—8.

李志昌,方向,刘文贵,2002. La-Ce 法与 Ce 同位素地球化学. 武汉:中国地质大学出版社.

李志昌,黄圭成,刘文贵,2000. 粤西新榕锰矿成矿物质来源的 Ce,Nd 同位素证据. 矿产与地质,14(6):408—411.

刘丛强,解广轰,增田彰正,1995. 中国东部新生代玄武岩的地球化学(II) Sr、Nd、Ce 同位素组成. 地球化学,24(3):203—214.

杨红梅,段桂玲,凌文黎,2009. La-Ce 法岩石标准物质和 Ce 同位素标准溶液研制. 地球化学,38(2):179—186.