

# 准噶尔盆地南缘东部中二叠流芦草沟组黑色页岩中白云岩夹层的成因探讨

张晓宝

(中国科学院兰州地质研究所)

**摘要** 准噶尔盆地南缘东部中二叠流芦草沟组是一套温暖潮湿气候条件下形成的半深湖至深湖相黑色页岩夹白云岩沉积。本文通过芦草沟组黑色页岩及其白云岩夹层在岩石学和地球化学等方面的对比研究认为:①黑色页岩形成环境及其有机质演化为白云岩的形成提供了十分有利的热力学、动力学条件;②白云岩是在黑色页岩形成环境及其有机质演化过程中、底层水盐度提高、 $\text{CO}_3^{2-}$ 浓度增大的条件下原生沉淀的。

**关键词** 黑色页岩 有机质 白云岩 原生沉淀

**作者简介** 张晓宝 男 35岁 助理研究员 沉积学

迄今为止,大多数沉积环境中的白云岩已有过详尽的讨论(Machel, H. G. 和 Mountjoy, E. W., 1986),但对于夹于黑色页岩中或与其互层的白云岩研究得较少。此类白云岩在许多陆相含油气盆地中均有产出,如美国怀俄明州绿河盆地始新统绿河组、我国泌阳凹陷下第三系核桃园组、准噶尔盆地中二叠流芦草沟组等。因此,对它的研究既可以丰富白云岩的成因理论,又可以进一步深入了解黑色页岩、油页岩的沉积环境为生油岩的评价和黑色页岩金属含矿性的研究提供信息。本文以准噶尔盆地南缘东部中二叠流芦草沟组为解剖对象,试图在黑色页岩形成环境已基本确定的基础上,通过黑色页岩与白云岩在岩石学和地球化学等方面的对比研究,从黑色页岩形成环境和有机质演化的角度探讨白云岩的成因。

## 1 研究区概况

研究区中二叠流主要分布于准噶尔盆地南缘东部乌鲁木齐至吉木萨尔县一带,自下而上可分为乌拉沟组、井井子沟组、芦草沟组和红雁池组等四个组。

研究剖面选在乌鲁木齐市东南红雁池附近。该剖面芦草沟组可以分为上下两个岩性段,下段为灰黑色粉砂质页岩、页岩夹油页岩、粉砂岩;上段为黑色页岩夹薄层白云岩。芦草沟组岩相稳定,但厚度变化较大。

中二叠世初期由于博格达山的隆起,海水退出本区,在博格达山北缘形成一山前凹陷。该凹陷在中二叠世形成了一个湖平面上升的层序。中二叠世早期,本区地形起伏明显,气候相对干燥、形成了一套以砂岩、粉砂岩、凝灰岩为主的近源流急的支流河、河流三角洲以及滨浅湖相

沉积,中二叠世晚期,本区地形趋于夷平,气候相对潮湿,湖侵面积扩大,生物繁盛,形成了一套以黑色页岩、油页岩夹白云岩为主的半深湖至深湖相沉积。芦草沟组即形成于后一阶段。

## 2 白云岩和黑色页岩岩石学特征对比研究

### 2.1 产状

研究剖面中白云岩主要分布于芦草沟组的上段,该段由黑色页岩和白云岩构成多个沉积旋回,自下而上粉砂质成分减少,白云岩夹层增多,白云岩出现在黑色页岩变细的序列中,反映了白云岩是在湖水加深的过程中形成的。白云岩和黑色页岩厚度相差悬殊,前者一般小于0.5m,后者一般厚10m,二者在纵向上为突变关系。黑色页岩形成以后到白云岩沉淀以前可能有一个沉积停滞期,在该停滞期内水体的成分发生了很大的变化。

横向上白云岩主要分布于芦草沟组黑色页岩分布区西部的一个局限范围内,黑色页岩较厚处,白云岩夹层的数目也较多,以研究剖面为中心向两侧白云岩的层数逐渐减少,厚度也略为减薄。以上现象说明在形成环境方面白云岩与黑色页岩密切相关。

### 2.2 矿物成分

通过X衍射分析、化学分析和镜下观察得知白云岩的矿物成分以白云岩为主,含量大于60%,其次含少量方解石、黄铁矿及微量的长石、石英和粘土矿物。黑色页岩的矿物成分以伊利石、蒙脱石等粘土矿物为主,其次含少量石英长石、黄铁矿和微量白云岩。白云岩和黑色页岩中各类矿物的含量差异很大,但种类却十分相似,尤其是它们所含的主要碳酸盐矿物均为白云石。

白云岩中白云石的有序度极低,平均为0.38,说明它们形成于成核速度较快的咸水环境。这一认识同白云岩中Sr的含量所指示的盐度是较为一致的。Land(1985)认为古代白云岩中Sr的含量一般很少超过200ppm,而芦草沟组白云岩中Sr的含量平均可达700ppm。

白云岩中自生的白云石、石英、方解石及黄铁矿含量大于98%,说明白云岩形成于距湖岸较远的环境中。

### 2.3 结构

白云岩以泥晶结构为主,由0.03~0.005mm的它形粒状白云石组成(图版I,1,2),在粒度上完全可以与黑页岩的泥质结构类比,说明两者都形成于低能环境中。

白云岩中白云石晶体的形状、大小与形成条件的关系十分密切。粒径在10 $\mu$ m以下的它形粒状白云石主要形成于成核速度较快的条件下(Land,1975)。

### 2.4 构造

白云岩与黑色页岩均具微细水平层理(图版I,3)。白云岩中水平层理的细层厚0.5~1mm,镜下观察它们由白云石和少量陆源碎屑及球状黄铁矿集合体组成的定向结构。黑色页岩中的微细水平层理厚1~2mm,是由粘土矿物、陆源碎屑、有机碎片及球状或粒状黄铁矿集合体组成的定向结构,微细水平层理代表一种低能的环境。

白云岩中含球状黄铁矿集合体(图版I,4)集合体由0.004mm左右的球状黄铁矿组成,一般呈长轴平行于微细水平层理的微透镜状,微透镜体长0.16mm,厚0.06mm。黑色页岩中含球状(图版I,5)和粒状(图版I,6)两种黄铁矿集合体,前者为微透镜状,后者为不规则状。

球状黄铁矿集合体是由硫酸盐还原细菌将沉积物中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 还原成 $\text{S}^{2-}$ 并与 $\text{Fe}^{2+}$ 结合形

成的,它标志着一种富含有机质的滞水碱性还原环境,白云岩和黑色页岩可能均形成于这种环境,泥晶白云石在阴极射线下不发光,Fe、Mn 的含量分别可达 271ppm 和 1100ppm 也同上述认识是一致的。在球状黄铁矿出现的环境中,由于硫酸盐还原细菌的作用,使  $\text{SO}_4^{2-}$  的含量大大减低,甚至完全消失,这有利于白云石的成核和快速生长(Machel and Mountjoy, 1986)。

### 2.5 化石

黑色页岩中含大量的叶肢介和介形虫化石,而白云岩中化石的种类和数量要少得多,且为异化的小壳化石(图版 I, 7, 8)。这些化石个体小(一般 0.12~0.6mm),壳质薄,保存完好。上述现象可能同白云岩形成的感水环境密切相关。

## 3 白云岩和黑色页岩元素地球化学对比研究

### 3.1 元素比值

白云岩的 Sr/Ba 值(2.51)大于黑色页岩的 Sr/Ba 值(0.91),说明它们形成时水体性质差异较大,但黑色页岩的 Mg/Ca 值(0.82)大于白云岩的 Mg/Ca 值(0.65),这意味着黑色岩形成时水体的 Mg/Ca 值已达到了形成白云石的数值,之所以没有形成大量的白云石,是因为其它条件尚不具备。

表 1 方差极大旋转因子解

Table 1 Factor solution of maximum rotation of variance analysis

岩性	黑色页岩				白云岩		
变量 \ 因子	I	II	III	IV	I	II	III
Ca	0.9547	0.1047	-0.1658	-0.0458	0.0340	0.0282	0.02332
Mg	0.8890	-0.0975	-0.2060	0.0010	0.7453	-0.3194	-0.4987
K	-0.0359	-0.0381	-0.0868	0.7596	-0.9607	0.0107	-0.0537
Na	0.3319	0.2727	-0.7515	0.2678	-0.9666	-0.0610	-0.2140
Al	-0.2132	0.0986	0.4647	0.6734	-0.9825	0.0719	-0.0399
Fe	0.1117	0.9336	-0.0258	0.1154	-0.0781	0.8671	0.1890
Co	-0.0673	0.9247	-0.1950	-0.2003	-0.0825	-0.0543	0.7709
Ni	-0.1373	0.9104	-0.1359	-0.2047	-0.5610	0.5239	-0.5166
Zr	0.2856	-0.0506	0.8960	-0.1717	-0.3836	0.4987	0.4901
Ti	-0.4633	0.2386	0.7187	0.3374	-0.9713	0.0594	0.0684
Cr	0.6750	0.0829	-0.1346	-0.4326	-0.9132	0.0808	-0.1593
V	-0.0509	0.7811	0.3737	0.1060	-0.6249	0.3066	-0.2764
Sr	0.8470	-0.0356	0.3971	-0.1371	-0.0663	-0.6462	0.1474
Ba	-0.1067	0.1813	0.1883	-0.6837	0.3450	-0.1931	0.6539
Mn	0.4146	0.6122	-0.5564	-0.2659	0.1364	0.9119	-0.2940
特征值累积百分比	29.4368	52.8755	69.0300	82.2559	51.7097	70.0664	85.5302

表2 元素组合分类表

Table 2 Division of element associations

岩石类型	组合名称	因子解	主要元素	次要元素	元素的赋存状态		
					矿物相	主要元素	类质同相等
黑色页岩	Ca-Mg 组合	I	Ca, Mg, Sr, Cr	Mn	白云石等	Ca, Mg	Sr, Cr, Mn
	Fe-Co 组合	II	Fe, Co, Ni, V, Mn	Ti	黄铁矿等	Fe	Co, Ni, V, Mn, Ti
	K-Al 组合	IV	K, Al	Ba	粘土矿物等	K, Al	Ba
	Zr-Ti 组合	III	Zr, Ti	Al, Sr, V, Ba	锆石金红石等	Zr, Ti	Al, Sr, V, Ba
白云岩	Ca-Mg 组合	I	Ca, Mg	Ba, Mn, Sr	白云石等	Ca, Mg	Ba, Mn, Sr
	Fe-Mn 组合	II	Fe, Mn	Ni, V	黄铁矿等	Fe, Mn	Ni, V
	Zr 组合	III	Zr, Ni		锆石等	Zr	Ni
	K-Al-Na 组合	I	K, Al, Ti, Na, Cr, V		粘土矿物等	K, Al, Na	Ti, Cr, V

### 3.2 元素组合

笔者选择了9个白云岩样品和15个页岩样品,并以Ca, Mg等15个元素含量为变量做因子分析(表1)。根据主因子解对白云岩、黑色页岩元素进行分组,并参考镜下和X衍射分析结果确定了每种岩石第一元素组合的主要元素、次要元素及元素的赋存状态(表2)。

从表2得知:黑色页岩和白云岩具有比较类似的四个元素组合,暗示了它们形成时水体的物理化学条件和性质上的继承性。

黑色页岩以K-Al元素组合为主,白云岩以Ca-Mg元素组合为主,两个组合呈明显的负相关、反映了沉积水动力条件和水体性质的变化。

黑色页岩和白云岩中都出现Fe-Mn组合,说明它们均形成于还原条件下。

白云岩中K-Al-Na元素组合的主要元素包括了吸附态的Ti, Cr, V,而这几个元素更常出现于黑色页岩中,这可能也意味着水体的继承性。

## 4 白云岩的稳定同位素

稳定同位素主要用于研究白云岩形成时水介质的盐度、温度、白云石的形成方式,成岩作用和生物作用等特征。笔者测量了同一样品中的白云石和方解石的稳定同位素值。从测量结果表明白云石的碳同位素值平均可达+11.6%,最高可达+16.1%;方解石的碳同位素值平均可达+5.0%,最高可达5.8%。 $C^{13}$ 的强烈富集一方面说明水体的盐度较高,另一方面可能主要与微生物发酵作用产生的 $CO_2$ 参与了水体与碳酸盐矿物的碳同位素平衡有关(Lohmann, 1973)。

从理论和实验角度看,在沉积条件下处于平衡状态的白云石和方解石的氧同位素差值为 $3 \pm \%$ (Land, 1980),而碳同位素差异较大。芦苇沟组白云石和方解石的 $\Delta\delta^{13}C$ 为6.6%,而 $\Delta\delta^{18}O$ 为3.6%,与原生白云石比较接近。

## 5 有关问题讨论

### 5.1 咸水环境的形成机理

从白云石的晶形、大小、有序度、Sr的含量、碳同位素特征以及生物特征看,芦苇沟组白云

岩应形成于咸水环境。笔者认为这种咸水环境是由于温暖潮湿气候条件下,停滞湖水的盐度分层作用造成的。首先,从区域上看芦草沟组以及与其相当的平底泉组都以温暖潮湿气候条件下形成的生油岩或含煤地层为主;其次,据中科院贵阳地球化学所(1987)的研究结果芦草沟组黑色页岩形成时底层水的盐度可达 30%,且为还原条件,这样的环境已不适应水生生物的生存;但与白云岩同时异相的还原黑色页岩的形成,这都说明了盐度分层作用的存在。

### 5.2 水体的 pH 值

据研究(W. S. 布罗狄克,1971)地表水的 pH 值主要与水体中  $\text{CO}_2$  气体分压成反比,与碱度成正比。黑色页岩形成时, $\text{CO}_2$  气体含量比较高而碱较低,所以,pH 值也比较低;白云岩形成时,碱度较高, $\text{CO}_2$  气体的含量较低,所以 pH 值较高。

### 5.3 水体中 $\text{CO}_2$ 气体的来源及其作用

黑色页岩形成的半深湖、深湖环境中含有丰富的有机质。微生物对有机质的作用(包括有氧呼吸、无氧呼吸和发酵作用)必然要产生  $\text{CO}_2$  气体。研究表明(殷纯赓,1980) $\text{CO}_2$  气体的存在性态主要受 pH 的控制。黑色页岩形成环境中,pH 值相对较低, $\text{CO}_2$  气体主要以  $\text{HCO}_3^-$  的性态存在,白云石不能大量沉淀,从而提高了水体中的 Mg,Ca 含量;白云岩形成环境中 pH 值相对较高, $\text{CO}_2$  气体主要以  $\text{CO}_3^{2-}$  的形成存在,对白云石的形成极为有利。

## 6 黑色页岩中白云岩夹层的成因探讨

### 6.1 黑色页岩中白云岩夹层形成的有利条件

通过芦草沟组黑色页岩与白云岩的对比研究,作者认为黑色页岩形成环境及其中有机质的演化为白云岩的形成提供了十分有利的化学热力学、动力学条件。

黑色页岩形成环境及其有机质演化可以提供远远大于其它环境的  $\text{CO}_3^{2-}$  离子。Davies 等(1977)认为增加  $\text{CO}_3^{2-}$  含量可以促进白云石的形成。

黑色页岩形成环境中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量极低。Baker and Kastner(1981)通过实验研究认为白云石形成的主要条件不是高的 Mg/Ca 比,而是低的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度。

黑色页岩形成环境中含有丰富的有机质和有机化合物。据研究有些有机化合物可以加快白云石的形成(Mansfield,1980)。

黑色页岩形成环境一般呈碱性还原条件,这对白云石的形成十分有利(Machel and Mountjoy,1986)。

从实验分析数据看,黑色页岩形成时湖水中已含有一定量的 Mg,Ca 离子,并具有较高的 Mg/Ca 比。

黑色页岩形成的半深源、深湖滞水环境有利于通过盐度分层作用提高底层水的盐度。

### 6.2 黑色页岩中白云岩夹层的成因

根据白云岩和黑色页岩的对比研究结合有关分析,作者把白云岩的形成划分为以下两个阶段:

#### 6.2.1 黑色页岩形成阶段(或称白云岩形成条件的准备阶段)

黑色页岩形成的湖水中已含有一定量的 Mg,Ca 离子,并具有较高的 Mg/Ca 比。局限的半深湖、深湖环境水体相对宁静,在溶质重力,温度和日照作用下,由于弱的盐度分层作用将水体分为表层水和底层水。表层水水体活跃,含氧充分、透气良好,营养丰富,是水生生物生长的良

好场所。底层水水体宁静。含氧稀少,透光度低,盐度可达微咸水,是死亡生物堆积的场所。底层水含氧极少,微生物作用又消耗了一部分氧,所以水体呈还原环境。硫酸盐还原细菌作用使  $\text{SO}_4^{2-}$  转变为  $\text{S}^{2-}$ 。细菌作用使有机质中放出大量的  $\text{CO}_2$  气体。由于水体的 pH 值低,  $\text{CO}_2$  气体主要以  $\text{H}_2\text{CO}_3$  或  $\text{HCO}_3^-$  的形成存在;同时也由于大量粘土矿物的存在,使白云石不能大量沉淀,从而在水体中储备了大量的 Mg, Ca 离子。

### 6.2.2 白云石沉淀阶段

随着水体加深,湖水动力减弱,陆源补给不足,局限的半深湖、深湖环境中盐度分层作用加强,底层水转变为咸水, Mg, Ca 离子浓度得到相应提高;同时,由于水体 pH 值增大,来源于微生物发酵作用的  $\text{CO}_2$  气体主要以  $\text{CO}_3^{2-}$  形成存在,使白云石从水中沉淀下来。

本文是在马宝林研究员的指导下完成的,同时还得到了普惠娟、朱莲芳、温常庆研究员、黄杏珍、刘文彬副研究员的热情帮助,谨此表示衷心的感谢。

收稿日期:1992年1月4日

### 参 考 文 献

- [1] 布罗埃克. W. S., 奥弗斯比 V. M., 1979, 地球的化学平衡(中译本), 地质出版社.
- [2] 殷纯嘏编著, 1980, 地质中的基础化学问题, 地质出版社.
- [3] Baker, P. A. and Kastner, M., 1981, Constraints on the formation of sedimentary dolomite, *Science*, **213**, p. 4504
- [4] Davies, P. J., Bubela, B. and Ferguson, J., 1977, Simulation of Carbonate diagenetic progresses: Formation of dolomite, huntite and Monahydro-calcite by the reactions between nesquehonite and brine. *Chem. Geol.*, **V. 19N. 3**, p. 187~214
- [5] Lohmann, K. C., Breining-Afifi, K. A., Budai, J. M. and Cercone, K. R., 1985. Enriched Carbon-13 compositions in meteoric and shallow burial calcites and dolomites, evidence of organic fermentation during early diagenesis. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Ann. Mid-year Mtg.*, **1**, 55
- [6] Machel, H. G., and Mountjoy, E. W., 1986, Chemistry and environments of dolomitization-A reapprail, *Earth-Sci. Rev.*, **N. 23**, p175~222.

## Study on the Origin of the Dolostone Intercalated in the Black Shales in Middle Permian Lucaogou Formation Eastern Part of Southern Margin of Junggar Basin

Zhang Xiaobao

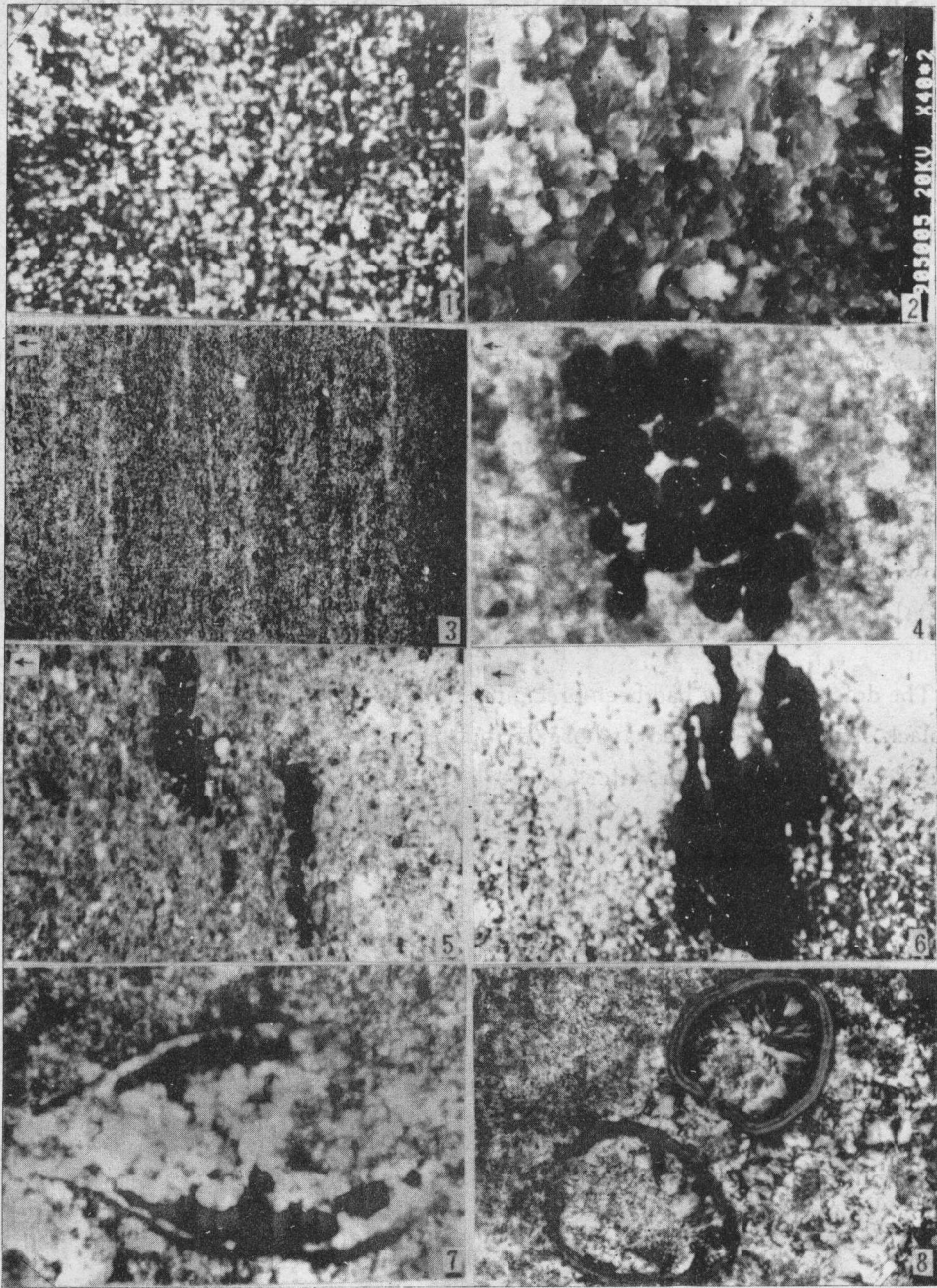
(Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences)

### Abstract

The black shales and dolostones intercalated with them had been researched petrologically and geochemically of middle Permian Lucaogou Formation, eastern part of southern. Margin of Junggar Basin. The great similarity between them has been found. Based on the above study and the discussion of carbon and oxygen stable isotopic composition of the dolostone, it is concluded that:

1). Special thermodynamical and kinetic condition favorable for the formation of the environment where black shales were formed and organic evolution in then including: A):  $\text{CO}_3^{2-}$ , B): Low  $\text{SO}_4^{2-}$ , C): High  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  ratio and D): organic-rich alkline and reducing environment.

2) The dolostones may had been precipitated in the evolution process of the environment where black shales were formed, and organic matter, accompanying with the increase of salinity and  $\text{CO}_3^{2-}$  content of bottom water.



1. 泥晶白云岩, 由它形粒状白云石组成,  $\times 300$ , 正交偏光; 2. 泥晶白云岩的电镜形态特征,  $\times 4000$ ; 3. 泥晶白云岩中的微细水平层理,  $\times 60$ , 单偏光; 4. 泥晶白云岩中的球状黄铁矿集合体,  $\times 375$ , 单偏光; 5. 黑色页岩中的球状黄铁矿集合体,  $\times 300$ , 单偏光; 6. 黑色页岩中的粒状黄铁矿集合体,  $\times 60$ , 单偏光; 7. 白云岩中的小壳化石,  $\times 150$ , 单偏光; 8. 白云岩中的小壳化石,  $\times 375$ , 单偏光。