

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2019.03.011

滇东会泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系 微量元素地球化学特征及其古环境演化

程涌^{1,2}, 胡煜昭¹, 李丕优¹, 卢萍²

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 昆明冶金高等专科学校矿业学院, 昆明 650033)

摘要: 黑色岩系在全球分布广泛, 层位稳定, 对于探讨地球浅部的化学元素的分布规律与机制, 重塑地球演化的历史和过程、开发利用矿产资源及保护环境等方面具有重要意义。通过对滇东会泽县大海乡老林村下寒武统筇竹寺组黑色岩系剖面的系统采样和微量元素地球化学分析结果表明: ①微量元素 Pb、Zn 强烈富集, B、Cu、V、U 相对富集, Sr 强烈亏损; $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值明显低于大陆地壳平均值, 说明该样品总体受到的风化程度低, 可以用来反映古环境及其演化信息。② $w(\text{B})/w(\text{Ga})$ 值反映古水体盐度变化为咸水→半咸水→淡水→半咸水, 经历了一个先降低再升高的过程。③亲氧元素 Sr 强烈亏损, 指示筇竹寺组沉积时期还原环境占主导地位; $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni})$ 值表明该沉积时期古水介质总体为水体分层不强的厌氧环境, 下部沉积泥质灰岩和粉砂质白云岩时经历了短暂的氧化环境, 中上部沉积碳质页岩时经历了短暂的硫化环境。④ $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ 值指示该沉积时期古气候总体为温暖潮湿, 下部沉积时期经历了短暂的炎热干旱气候, 这与下部具高盐度咸水和氧化的古水介质相对应。此研究对于该区黑色岩系矿床形成背景的探讨、矿产资源勘查及页岩气选区评价具有一定的指导意义。

关键词: 筇竹寺组; 黑色岩系; 微量元素; 地球化学; 沉积环境; 会泽地区; 云南省

中图分类号: P531; P534.41 **文献标识码:** A

0 引言

黑色岩系(black rock series), 即含有机碳(含量接近或大于1%)及硫化物(铁硫化物为主)较多的深灰色—黑色的硅质、碳酸盐岩、泥质岩(含层凝灰岩)及其变质岩石的组合体系^[1]。黑色岩系是地球演化中特定地质环境的产物, 是岩石圈、水圈、气圈和生物圈变化和相互作用的结果, 其对于探讨地球表层或浅部的化学元素的分布规律与机制, 重塑地球演化的历史和过程具有重要意义^[2]。黑色岩系

不但是世界上许多油气田的生油、生气母岩^[3-4], 而且众多金属(PGE、REE、Au、Ag、Ni、Mo、Cu、Pb、Zn、Se、V、U、Tl、Cd)、非金属矿床(石煤、重晶石、磷矿等)及超大型矿床的形成亦与黑色岩系有关^[1,5-6]。此外, 黑色岩系中还分布着一些低浓度的对人体有害的元素(U、As、Hg等), 易造成环境污染^[7]。近年来, 美国页岩气的大规模商业开采掀起了全球能源领域的一场革命^[8-10], 黑色岩系作为页岩气的生气层和储层被深入研究^[11-13]。因此, 研究黑色岩系亦具有矿产资源勘查开发和环境治理保护实际意义。

下寒武统黑色岩系在全球分布广泛, 层位稳定;

收稿日期: 2018-11-16 责任编辑: 王传泰

基金项目: 云南省应用基础研究计划项目(编号:2015FD052, 编号:2017FD129)资助。

作者简介: 程涌(1988—), 男, 讲师, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业。通信地址: 云南省昆明市一二一大街文昌路68号, 昆明理工大学国土资源工程学院; 邮政编码: 650093; E-mail: cheng_yong1988@163.com

通信作者: 胡煜昭(1964—), 男, 教授级高级工程师, 博导, 主要从事沉积盆地金属、油气资源勘查研究。通信地址: 云南省昆明市一二一大街文昌路68号, 昆明理工大学国土资源工程学院; 邮政编码: 650093; E-mail: 709254786@qq.com

我国下寒武统黑色岩系主要集中在南方扬子地块和西北塔里木地块,它的形成对应 Tommotian 期的全球缺氧事件^[2]。滇东曲靖地区黑色岩系以下寒武统筇竹寺组最为发育,是优质的页岩气储层。前人对滇东曲靖—马龙地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系已有探索性研究:王毅^[14]、张聪等^[15]研究了其成藏地质条件,指出该区具有较好的页岩气勘探潜力,保存条件是页岩气富集的关键;白名岗等^[16]、蒋源^[17]、李昂等^[18]、薛晓辉等^[19]研究了其储层特征,认为页岩有机质丰度中等、脆性较好、含气量低、吸附能力较强;陈艳霞^[20]、姜永果等^[21]研究了其地球化学特征,认为形成于滨岸—浅海缺氧、低能热水环境,物源主要为陆源碎屑,有少量的深部物质,沉积成岩过程有生物作用参与,伴有热水喷流作用。在曲靖北边的会泽地区,黑色岩系层序完整,剖面出露良好,但研究工作较少;穆丹^[22]、张东阳^[23]报道了其地球化学特征及物源分析,但尚未涉及到黑色岩系在纵向上的地球化学及古环境演化研究。此外,下寒武统筇竹寺组黑色岩系的找矿工作在相邻的贵州地区已取得重大进展^[24-27],在滇东地区也应具有较大勘探前景。

因此,本文选取会泽县大海乡老林村公路沿线的下寒武统筇竹寺组为研究剖面,通过系统采样和微量元素地球化学分析工作,力图研究该黑色岩系微量元素地球化学特征,探讨古环境演化,以期为该地区黑色岩系矿床勘查和页岩气选区评价提供一定的地质依据。

1 地质背景概述

研究区地处特提斯—喜马拉雅构造域与环太平洋构造域的交接复合部位,印度板块与欧亚板块的碰撞接触地带东侧^[28]。在地史发展过程中,分属于欧亚板块与冈瓦纳板块两大超级构造单元的腾冲、保山、兰坪—思茅、扬子、印度等板(陆)块分期相继拼接,形成了中间地块和缝合线相间的复杂大地构造格局(图 1a)现状。

滇东会泽地区属于扬子地台西南缘,处于弥勒断裂北西、小江断裂东部。该区震旦纪—侏罗纪整体属于地台或准地台,燕山期—喜山期隆起遭受剥蚀,发育元古界—新生界,具有褶皱基底和沉积盖层二元结构。其中早寒武世筇竹寺组沉积时期,滇东地区大致以会泽—曲靖—马龙为沉积中心(图 1b),沉积了一套灰黑色—灰绿色页岩及粉砂质页岩、碳质页岩、泥质粉砂岩的黑色岩系^[29]。

2 样品采集及测试

(1) 样品采集

样品采集地点为会泽县大海乡老林村下寒武统筇竹寺组剖面(图 1b),剖面发育完整,沿公路出露,覆盖较少,岩性较新鲜(图 2)。根据颜色、结构和构造变化,从底部到顶部采取样品 21 件;选择其中具有代表性的 14 件样品,进行了全岩微量元素测试。

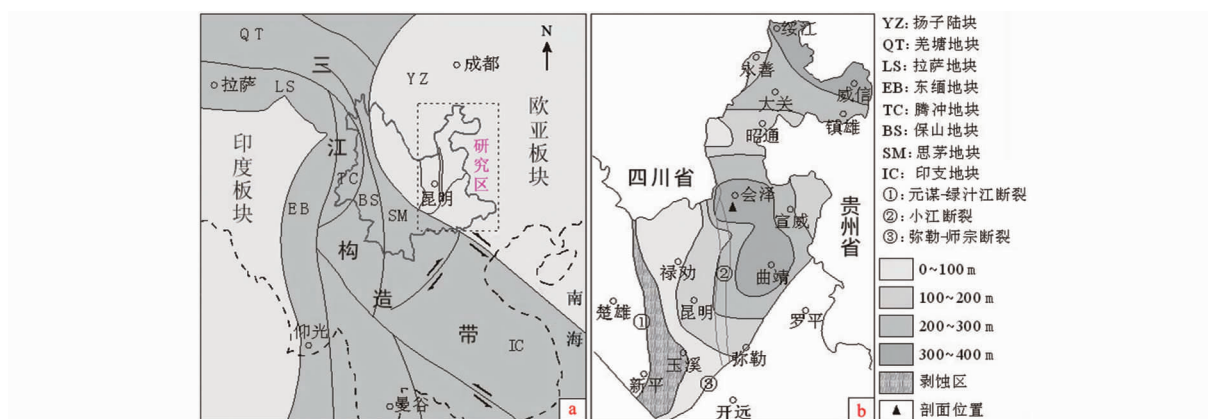


图 1 滇东大地构造位置(a)及筇竹寺组厚度等值线(b)

Fig. 1 The geotectonic location of eastern Yunnan province (a) and isopach map of Qiongzhusi Formation (b)



图 2 筇竹寺组剖面(a)和黑色泥质灰岩(b)

Fig. 2 Geological section of Qiongzhusi Formation and black argillaceous limestone

取样过程中尽量选择风化蚀变弱的细粒沉积岩,在最大程度上减少或消除机械分异对沉积物成分的影响以及取样差异带来的影响。

(2)测试方法

全岩微量元素测试分析工作由武汉上谱分析科技有限责任公司分析测试中心完成,所用的测试仪器为 Agilent 7700e ICP-MS。

将具有代表性的岩石样品进行粉碎加工成 200 目粉样(缩分后不少于 200 g)备用。

测样制作:①将 200 目样品置于 105℃ 烘箱中烘干 12 小时;②准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中;③先后依次缓慢加入 1 ml 高纯硝酸和 1 ml 高纯氢氟酸;④将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190℃ 烘箱中加热 24 小时以上;⑤待溶样弹冷却,开盖后置于 140℃ 电热板上蒸干,然后加入 1 ml HNO₃ 并再次蒸干(确保溶样弹壁无液体);⑥加入 1ml 高纯硝酸、1 ml MQ 水和 1 ml 内标 In(浓度为 1×10⁻⁶),再次将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190℃ 烘箱中加热 12 小时以上;⑦将溶液转入聚乙烯料瓶中,并用 2% HNO₃ 稀释至

100 g 以备 ICP-MS 测试。

测试方法,见 GB/T14506.30—2010(硅酸盐岩石化学分析方法)。

3 实验结果

微量元素分析结果表明,V 元素含量波动最大,其含量 $w(V) = 3.94 \times 10^{-6} \sim 788.88 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 152.18×10^{-6} ;其次为 Rb、Cs、Hf、Zr、Th、Li、Ga、Ta、Nb、Cr、Sr、Tl、Sc、Sn、B、U、Cu、Ni,最大值与最小值相差 10~50 倍;Be、Co、Zn、Pb 含量较稳定,最大值与最小值相差 7~10 倍;Ba 含量最稳定, $w(Ba) = 577.84 \times 10^{-6} \sim 902.34 \times 10^{-6}$,平均值 728.36×10^{-6} 。

将各微量元素测试结果除以上地壳平均值(UCC)^[30]进行标准化,得到微量元素的富集系数;各测试样品的微量元素富集系数变化曲线如图 3 所示。其中,Pb、Zn 强烈富集,富集系数分别为 27.37 和 26.29;B、Cu、V、U 相对富集,富集系数在 2~5

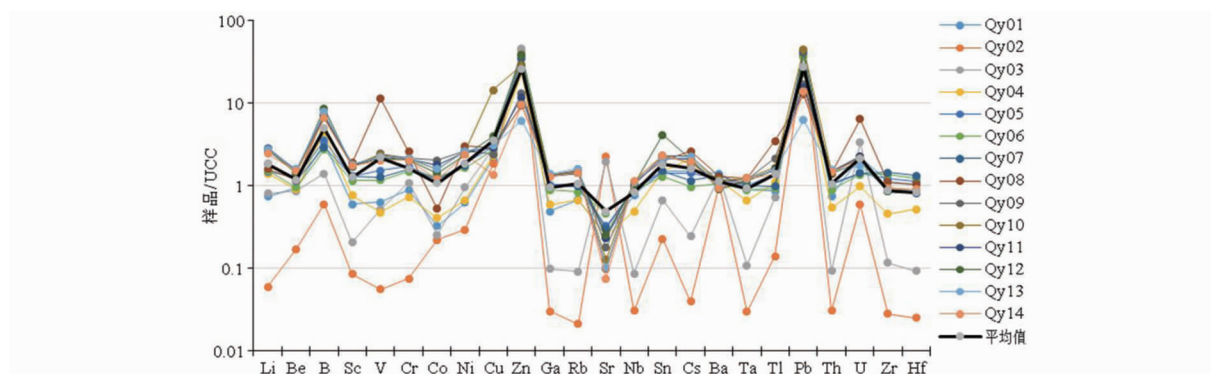


图 3 样品微量元素 UCC 标准化蛛网图

Fig. 3 Spider diagram of UCC-normalized trace elements of rock sample

之间;Ni、Li、Sn、Cr、Cs、Tl、Sc、Be、Ba、Co、Rb、Th、Ga、Ta、Zr、Nb、Hf 接近上地壳元素丰度;Sr 富集系数为 0.50,强烈亏损。

4 讨论

4.1 源区风化程度

风化作用是影响剖面中微量元素含量、分布的关键因素,在根据沉积物元素分布研究源区特征时,应充分考虑源岩风化程度。U 元素在具有氧化环境的水体中主要以可溶的 U^{6+} 的形式存在,在还原环境中,往往会转化为不可溶的 U^{4+} 沉淀在沉积物中,因此在还原性的水体中 U 元素含量较高;Th 元素的化学性质相对稳定且不易发生迁移,多富集在抗风化矿物中,在氧化环境中含量较高^[31]。风化过程中,U、Th 在表生条件下发生分离,使得 $w(Th)/w(U)$ 值增大,因此常用 $w(Th)/w(U)$ 值表征源区风化程度^[32-33]。

大陆地壳 $w(Th)/w(U)$ 值平均为 3.80^[34],而

研究区筇竹寺组样品 $w(Th)/w(U)$ 值介于 0.15~4.69,平均 2.58。仅有样品 Qy13($w(Th)/w(U)=4.69$)明显大于大陆地壳 $w(Th)/w(U)$ 平均值,Qy05、Qy07、Qy12 与大陆地壳接近,其余明显低于大陆地壳 $w(Th)/w(U)$ 平均值。以上表明研究区岩石样品总体受到的风化程度低,大气淡水淋滤等风化作用对筇竹寺组黑色岩系的破坏程度较小,原生沉积环境保存相对稳定,各元素组成均能较好地保留了其形成时期沉积环境的信息,因此可以用微量元素来反映古环境及其演化信息。

4.2 古水体盐度

微量元素 B 在水中主要以硼酸(H_3BO_3)及其解离产物(H_3O^+ 和 $H(OH)_4^-$)的形式存在。在沉积水体中,B 元素会被黏土矿物吸附在其薄片边缘,然后由于静电作用在薄片边缘被固定下来,最终因新物质的增长和 B 元素的扩散作用进入黏土矿物晶格中^[35]。黏土矿物中 B 元素含量与沉积水体中的 B 元素含量呈正比,而水体中的 B 元素含量又与水体盐度呈正比,因此黏土矿物中 B 元素含量与水体盐度亦呈正比关系。B 元素与 Ga 元素的化学性质

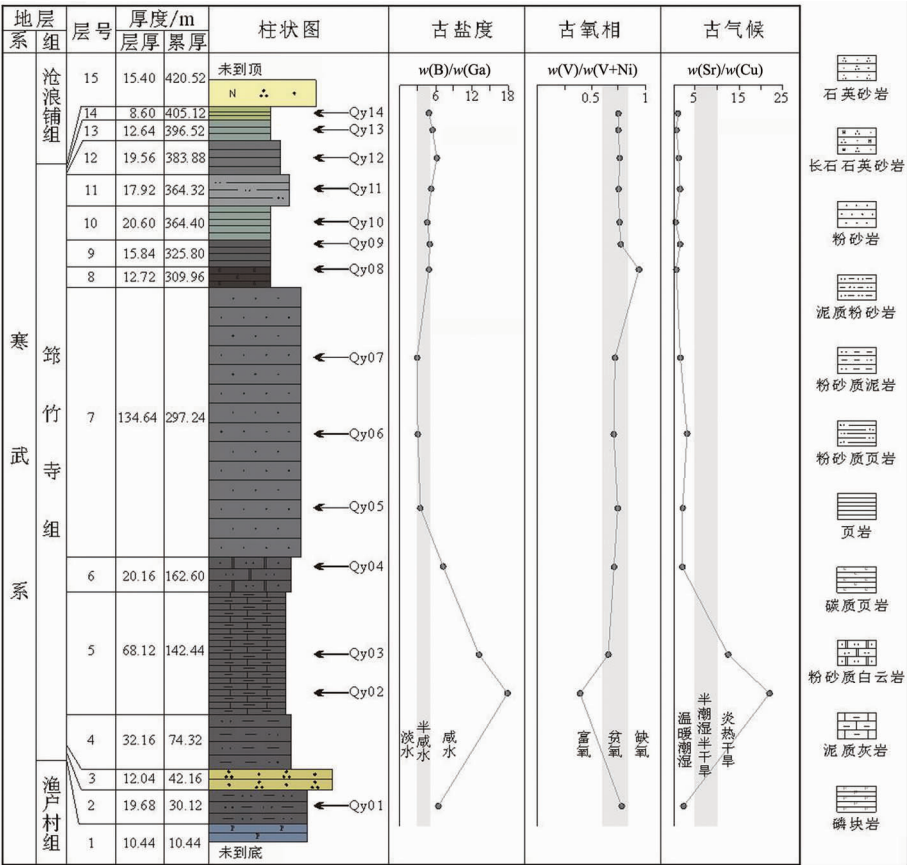


图 4 样品微量元素特征及古环境演化

Fig. 4 Trace element characteristics and paleoenvironmental evolution of rock samples

不同,相对来说,硼酸盐有较大的溶解度和较强的迁移性,只有当水蒸发后才析出;相反,Ga 元素活动性相对较差,容易沉淀^[36]。因此, $w(B)/w(Ga)$ 值可指示古盐度。

研究表明, $w(B)/w(Ga)$ 值 >5 指示咸水环境,3~5 表示半咸水环境, <3 为淡水环境^[37]。研究区筇竹寺组样品 $w(B)/w(Ga)$ 值分布在 2.59~17.43 范围内,平均 4.59,大多处于半咸水环境(图 4)。下部样品 Qy01、Qy02、Qy03 和 Qy4 的 $w(B)/w(Ga)$ 值分别为 6.06、17.43、12.77 和 6.71,均明显 >5 ,表示该时期水体盐度大,处于咸水环境,并沉积了一套泥质灰岩与粉砂质白云岩;样品 Qy05 的 $w(B)/w(Ga)$ 值降低为 3.06,指示水体盐度降低,变成半咸水环境;样品 Qy06、Qy07 的 $w(B)/w(Ga)$ 值继续降低为 2.71 和 2.59,指示水体盐度进一步降低,变成淡水环境;之后,样品 Qy8—样品 Qy14 的 $w(B)/w(Ga)$ 值升高并接近 5(样品 Qy12 为 5.79),说明水体盐度又增大了,为半咸水环境。因此,研究区筇竹寺组沉积时期古水体盐度变化为:咸水→半咸水→淡水→半咸水,经历了一个先降低再升高的旋回。

4.3 古氧相

有一些微量元素的溶解度明显受沉积环境氧化还原状态控制,从而导致其向还原性的水体和沉积物中迁移而自生富集。在还原条件下,U、V、Mo、Cr、Co 表现为不溶,Ni、Cu、Zn、Cd 常以硫化物形式沉淀,在氧化条件下均表现为易溶,因此其含量及其比值可以作为恢复古氧相判别指标^[38]。

研究区岩石样品中亲氧元素 Sr 强烈亏损,说明筇竹寺组沉积时期还原环境占主导地位。

在还原环境中,V 元素比 Ni 元素以更有效的有机络合物形式沉淀下来, $w(V)/w(V+Ni)$ 值可以指示古水体氧化还原条件; $w(V)/w(V+Ni)$ 值 >0.84 反映水体分层及底层水体中出现 H_2S 的厌氧环境,0.60~0.84 为水体分层不强的厌氧环境,0.46~0.60 说明水体为分层弱的氧化环境, <0.46 为更氧化环境^[39]。研究区筇竹寺组岩石样品 $w(V)/w(V+Ni)$ 值除样品 Qy02 为 0.39、Qy08 为 0.93 外,其余均介于 0.60~0.84 之间,平均为 0.80(见图 4)。说明该沉积时期古水介质总体为水体分层不强的厌氧环境,筇竹寺组下部沉积泥质灰岩和粉砂质白云岩时经历了短暂的氧化环境,中上部沉积碳质页岩时经历了短暂的硫化环境。

4.4 古气候

沉积物中一些微量元素因受到古沉积气候影响

而可以在特定的环境下被保存下来,如 Cr、Ni、Mn、Cu、Fe、Ba、Br、Co、Cs、Hf、Rb、Sc、Th 为喜湿型元素,而 Sr、Pb、Au、As、Ca、Na、Ta、U、Zn、Mg、Mo、B 为喜干型元素。喜干型元素 Sr 与喜湿型元素 Cu 的比值对古气候具有灵敏的指示^[40]。 $w(Sr)/w(Cu)$ 值 >10.0 表明具有炎热干旱的古气候,该值分布于 5~10 表明具有半潮湿—半干燥的古气候,分布于 1.3~5.0 表明具有温暖潮湿的古气候^[41]。

研究区筇竹寺组岩石样品 $w(Sr)/w(Cu)$ 值除样品 Qy02 和 Qy03 为 21.80 和 12.53 >10.0 外,其余样品的 $w(Sr)/w(Cu)$ 值 ≤ 3 (见图 4),指示该沉积时期古气候总体为温暖潮湿,筇竹寺组下部沉积时期经历了短暂的炎热干旱气候,这与下部具高盐度咸水和氧化的古水介质相对应。

5 结语

(1)滇东会泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系较好地保留了其形成时期沉积环境的信息,可以用来反映古环境及其演化信息。

(2)会泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系沉积时期,大多处于半咸水环境,古水体盐度变化为咸水→半咸水→淡水→半咸水,经历了一个先降低再升高的旋回。

(3)会泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系沉积时期,还原环境占主导地位。古水介质总体为水体分层不强的厌氧环境;筇竹寺组下部沉积泥质灰岩和粉砂质白云岩时经历了短暂的氧化环境,中上部沉积碳质页岩时经历了短暂的硫化环境。

(4)会泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系沉积时期,古气候总体为温暖潮湿;筇竹寺组下部沉积时期经历了短暂的炎热干旱气候,这与下部具高盐度咸水和氧化的古水介质相对应。

参考文献:

- [1] 范德廉,张焘,叶杰. 中国的黑色岩系及其有关矿床[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 杨剑. 黔北地区下寒武统黑色岩系形成环境与地球化学研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [3] 黄俨然, 张枝焕, 李友川, 等. 全球深水含油气盆地有效烃源岩的发育规律和控制因素[J]. 海相油气地质, 2011, 16(3): 15-21.
- [4] 宋芊, 金之钧. 大油田统计特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 11-14.

- [5] 王登红. 与黑色岩系有关矿床研究进展[J]. 地质地球化学, 1997(2): 85-88.
- [6] 叶杰, 范德廉. 黑色岩系型矿床的形成作用及其在我国的产出特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(2): 95-102.
- [7] 皮道会. 贵州遵义早寒武世黑色岩系地球化学研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2007.
- [8] 李世臻, 乔德武, 冯志刚, 等. 世界页岩气勘探开发现状及对中国的启示[J]. 地质通报, 2010, 29(6): 918-924.
- [9] 程涌, 陈国栋, 尹琼, 等. 中国页岩气勘探开发现状及北美页岩气的启示[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2017, 33(1): 16-24.
- [10] 程涌, 郭宇丰, 陈国栋, 等. 中国页岩气资源潜力、分布及特点[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2017, 33(5): 17-24.
- [11] 程涌, 刘聪, 吴伟, 等. 氩离子抛光-环境扫描电镜在页岩纳米孔隙研究中的应用——以辽中凹陷 JX 地区沙一段为例[J]. 电子显微学报, 2018, 37(1): 52-59.
- [12] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7-12.
- [13] 吴伟, 刘惟庆, 唐玄, 等. 川西坳陷富有机质页岩孔隙特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 1-8.
- [14] 王毅. 滇东曲靖地区筇竹寺组页岩气成藏地质特征分析[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- [15] 张聪, 包书景, 石砥石, 等. 云南曲靖地区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏地质条件及有利区预测[J]. 海相油气地质, 2017, 22(1): 69-74.
- [16] 白名岗, 张聪, 杨玉茹, 等. 滇东曲靖地区下寒武统筇竹寺组泥页岩储层特征研究[J]. 地质力学学报, 2017, 23(6): 838-845.
- [17] 蒋源. 云南昭通—曲靖地区筇竹寺组页岩气储层研究及重点地段资源预测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [18] 李昂, 丁文龙, 张国良, 等. 滇东地区马龙区块筇竹寺组海相页岩储层特征及对对比研究[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 176-189.
- [19] 薛晓辉, 胡琳, 张郁云. 滇东下寒武统筇竹寺组页岩气储层特征[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(3): 35-39.
- [20] 陈艳霞. 云南省曲靖地区下寒武统黑色岩系地球化学特征及成因研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [21] 姜永果, 郭欣, 周洪瑞, 等. 云南曲靖地区下寒武统黑色岩系岩石地球化学特征与成因[J]. 矿物学报, 2015, 35(4): 489-496.
- [22] 穆丹. 会理—会泽—东川地区下寒武统黑色岩系地球化学特征与沉积物源分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [23] 张东阳. 滇东北会泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系地球化学特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [24] 韩善楚, 胡凯, 曹剑. 贵州天柱早寒武世黑色岩系重晶石矿床有机地球化学研究[J]. 地球化学, 2014, 43(4): 386-398.
- [25] 魏怀瑞, 杨瑞东, 高军波, 等. 贵州寒武系底部黑色岩系型矿床沉积构造特征研究[J]. 现代地质, 2012, 26(4): 673-681.
- [26] 徐争启, 倪师军, 张成江, 等. 贵州东部上震旦统到下寒武统黑色岩系中 U-V 型矿床地质地球化学特征[J]. 矿物学报, 2009, 29(s1): 644-645.
- [27] 周洁, 胡凯, 边立曾, 等. 贵州遵义下寒武统黑色岩系 Ni-Mo 多金属矿地球化学特征及成矿作用[J]. 矿床地质, 2008, 27(6): 742-750.
- [28] 陈跃昆, 廖宗廷, 陈军. 滇西兰坪-思茅盆地 TSM 分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
- [29] 董云超, 严涛, 刘红林, 等. 滇东寒武系下统筇竹寺组页岩含气性分析[J]. 天然气勘探与开发, 2016(1): 17-22.
- [30] 鄢明才, 迟清华, 顾铁新, 等. 中国东部地壳元素丰度与岩石平均化学组成研究[J]. 物探与化探, 1997, 21(6): 451-459.
- [31] 尹锦涛, 俞雨溪, 姜呈馥, 等. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩元素地球化学特征及与有机质富集的关系[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1544-1556.
- [32] MCLENNAN S M, HEMMING S, MCDANIEL D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [J]. Special Paper of the Geological Society of America, 1993, 284: 21-40.
- [33] 宋朔, 刘招君, 孙平昌, 等. 红色泥岩层系地球化学特征及物源分析——以松辽盆地东南隆起区上白垩统姚家组为例[J]. 世界地质, 2015, 34(3): 774-785.
- [34] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution, An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks [M]. Blackwell Scientific Pub, 1985.
- [35] 田景春, 张翔. 沉积地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [36] 李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(5): 1-3.
- [37] 张茜, 王剑, 余谦, 等. 川西南构造复杂区龙马溪组泥页岩地球化学特征及古环境[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(4): 399-406.
- [38] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. Chemical Geology, 2006, 232(1): 12-32.
- [39] 宗毅, 沈玉林, 秦勇, 等. 贵州织金上二叠统泥岩地球化学特征及层序界面响应[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3239-3248.
- [40] 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1265-1273.
- [41] LERMAN A, BACCINI P. Lakes—chemistry, geology, physics [J]. Journal of Geology, 1978, 88(2): 249-250.

The geochemical characteristics of trace elements and paleoenvironmental evolution of black rock series in the lower Cambrian Qiongzhusi Formation from Huize area, eastern Yunnan province

CHENG Yong^{1,2}, HU Yuzhao¹, LI Piyou¹, LU Ping²

(1. Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, China;

2. Mining Engineering Faculty, Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, China)

Abstract: Black rock series are widely distributed at certain horizons in the world. They are significant in respects of discussion of pattern and mechanism of distribution of chemical elements in the shallow earth, reconstruction of history and process of the earth evolution, exploitation and utilization of mineral resources and environmental protection. The trace element analysis of systematic samples collected from section of black rock series of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation at Laolin village of Dahai town of Huize county in the east Yunnan province show that : ① Pb and Zn are highly enriched, B, Cu, V and U relatively enriched, Sr strongly depleted, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ of the samples significantly lower than that of the continental crust average value and all this is the indication of low overall weathering degree thus can be used as the information of paleo-environment; ② the value of $w(\text{V})/w(\text{V} + \text{Ni})$ reflects the salinity change of decrease and increase of ancient water body from saline water-semi-saline water to fresh water-semi-saline water; ③ strong depletion of oxyphile element Sr indicates the dominant reductive environment of Qiongzhusi formation; $w(\text{V})/w(\text{V} + \text{Ni})$ illustrates an anaerobic environment of the ancient water body without strong stratification and in this sedimentary period is generally , and the water experience a transient oxidation environment when the argillaceous limestone and silty dolomite forms in the lower part, and the water is in a transient sulfide environment when the carbonaceous shale forms in the middle and upper part. ④ $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ indicates that the paleoclimate in this sedimentary period was generally warm and humid, while there is a short hot and dry climate when lower part sediment, which corresponds to the ancient water medium with high salinity and oxidation in the lower part. This study is of certain guiding significance for learning the formation background of black rock series ore deposits, exporting mineral resources and evaluating and selecting target area of shale gas.

Key Words: Qiongzhusi Formation; black rock series; trace elements; geochemistry; sedimentary environment; Huize area; Yunnan province