文章编号: 1001- 3873(2005)06- 0719- 04

沉积环境中古盐度的恢复

——以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例

王敏芳, 焦养泉, 王正海, 杨 琴, 杨生科
(中国地质大学 资源学院, 武汉 430074)

摘 要: 用锶钡法、硼元素法、钾钠比值和沉积磷酸盐法推算了吐哈盆地西南缘水西沟群沉积古水介质环境。认为, 在水西沟群沉积时期, 古水介质总体为淡水环境[m(Sr)/m(Ba)<1、m(B)为 12.30×10^{-6}~64.20×10^{-6}], 且自八道湾组—西山窑组沉积时期古水介质逐渐变淡: 八道湾组沉积时期, 古水介质盐度平均为 2.28‰; 三工河组沉积时期, 平均为 2.23‰; 西山窑组沉积时期, 平均为 2.07‰. 此外, 对恢复沉积环境古盐度的其他方法进行了讨论, 并指出了各种方法的局限性。

关键词: 古盐度; 地球化学; 吐哈盆地; 沉积环境
中图分类号: TE112.221 **文献标识码**: A



盐度是指介质中所有可溶盐的质量分数, 是区别海相和陆相环境的主要标志之一[1]。古盐度是指保存于古沉积物之中的盐度[2], 是指示地质历史时期中沉积环境变化的一个重要标志。古盐度只能间接地视沉积物或海洋生物壳体的成分进行理论上的推算[3]。研究区位于吐哈盆地西南缘, 研究层位自上而下为八道湾组(J_1b)、三工河组(J_1s)和西山窑组(J_2x)。

1 恢复古盐度的微量元素法

元素一般分为常量元素(含量大于 1.0%)和微量元素(含量小于 1.0%)[2,4]。目前, 常用的微量元素法一般有锶钡法、硼元素法和锶钙法等[2,3]。在使用微量元素法进行沉积环境古盐度的恢复时, 应该依据采样环境、采样组分的不同, 有针对性、选择性地进行微量元素测量和盐度恢复方法的选择。

(1) 锶钡法 锶和钡是碱土金属中化学性质较相似的 2 个元素, 它们在不同沉积环境中由于其地球化学行为的差异而发生分离, 因此, 可以使用锶钡比值作为古盐度的标志[5,6]。研究认为, 锶比钡迁移能力强, 当淡水与海水相混时, 淡水中的 Ba^{2+}与海水中的 SO_4^{2-} 结合生成 $BaSO_4$ 沉淀, 而 $SrSO_4$ 溶解度大, 可以继续迁移到远海, 通过生物途径沉淀下来。因此, Sr 质量分数与 Ba 质量分数的比值[m(Sr)/m(Ba)]是随着远离海岸而逐渐增大的, 依据该比值的大小可以定性地反映古盐度, 从而进行沉积环境古盐度的恢复。一般来讲, 淡水沉积物中 m(Sr)/m(Ba)值小于 1, 而海相沉积物中 m(Sr)/m(Ba)值大于 1, m(Sr)/m(Ba)值为 1.0~0.5, 为半咸水相[7]。我国学者研究也认为, 锶钡比值有随盐度增高而增大的趋势, 在粘土或泥岩中该比值大于 1 者为海洋沉积, 小于 1 者为大陆沉积[8]。

笔者在吐哈盆地西南缘侏罗系水西沟群样品中, 尝试用锶钡法对古环境进行恢复(表 1)。结果表明,

表 1 西南缘水西沟群泥岩中 B、Sr、Ba 的分析结果

层位	样号	质量分数 10^{-6} Sr	B	Ba	m(Sr)/m(Ba)	层位	样号	质量分数 10^{-6} Sr	B	Ba	m(Sr)/m(Ba)
J_1b	w14	125	59.3	356	0.35	J_1s	w28	98.2	60.9	370	0.27
J_1b	w23	55.1	49.4	224	0.25	J_1s	w31	135	54.8	511	0.26
J_1b	w24	74.7	63.1	358	0.21	J_2x	w5	95.8	34.3	701	0.14
J_1b	w25	161	39.6	485	0.33	J_2x	w6	113	35.5	744	0.15
J_1b	w26	110	57.7	384	0.29	J_2x	w32	78.2	43.6	609	0.13
J_1b	w27	68.5	52.5	292	0.23	J_2x	w33	73.3	58.4	562	0.13
J_1s	w11	50.9	12.3	238	0.21	J_2x	w34	86	42.8	675	0.13
J_1s	w12	80	37.6	403	0.2	J_2x	w35	68.7	49.7	609	0.11
J_1s	w13	48.6	42.2	176	0.28	J_2x	w29	102	61.4	649	0.16
J_1s	w21	98	46.4	560	0.18	J_2x	w30	96.6	55.9	503	0.19
J_1s	w22	67.4	36.5	338	0.2						

收稿日期: 2005- 03- 30 修订日期: 2005- 05- 26
基金项目: 国土资源大调查地质调查项目, 吐哈盆地西南缘砂岩型铀矿远景区水西沟群层序地层与沉积体系分析(20001010174003)资助

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

作者简介: 王敏芳(1980-), 女, 江苏泰州人, 在读博士研究生, 能源地质工程, (Tel)027- 62074671(E- mail)wang_minfang@163.com

侏罗系水西沟群泥岩沉积时水介质条件为淡水环境，并且随着地层年代变新（$J_1b—J_1s—J_2x$），水介质环境是逐渐变淡的。

（2）硼元素法　硼是微量轻元素，与其他元素具有明显不协调的分布关系[9]。硼又是易溶元素，主要富集在地球表层的各类岩石和水体中，而在地幔岩石中含量较低[9,10]。由于硼对沉积环境及各种地质作用具有明显的指示意义，引起人们对探索硼及硼同位素的测试技术及其分配理论的广泛兴趣[9-19]。一般而言，海相环境下硼质量分数为（80～125）×10^{-6}，而淡水环境样品硼质量分数多小于 60×10^{-6}。在吐哈盆地西南缘侏罗系水西沟群样品中，硼质量分数最大值为 64.20×10^{-6}，最小值为 12.30×10^{-6}，平均值为 46.35×10^{-6}（表 1），反映了水西沟群泥岩主要形成于淡水环境；地层年代从老到新（$J_1b—J_1s—J_2x$），硼质量分数也显示出逐渐变低的趋势，这也反映了水西沟群沉积环境是逐渐变淡的。

Walker[13]提出以伊利石理论含钾量的 8.5%来换算纯伊利石中的“校正硼质量分数”，即校正硼质量分数=8.5×［硼测定值（10^{-6}）/K_2O（%）］；而伊利石的硼质量分数又与钾质量分数有关，为了在同等条件下对比，需计算相当于 K_2O 为 5%时的硼质量分数，称为“相当硼质量分数”。Walker[13,14]研究认为，在相当硼质量分数大于 400×10^{-6} 时古海水为超盐度环境，（300～400）×10^{-6} 为正常海水环境，（200～300）×10^{-6} 为半咸水环境，而相当硼质量分数小于 200×10^{-6} 时则是低盐度环境的沉积产物。在吐哈盆地西南缘，笔者选取了 36 个泥岩样品，依据 Walker 的公式进行了换算和作图（图从略）。结果表明，研究区相当硼质量分数约 200×10^{-6}，八道湾组—三工河组—西山窑组，相当硼质量分数是逐渐减小的，这与锶钡法和硼质量分数古盐度恢复法确定的沉积环境变化是一致的。

同时，利用硼质量分数，可以对古盐度进行定量计算。常用的计算公式通常有两个：

（1）Adamas 公式[7]

$$S_p=0.097\,7x-7.043, \qquad (1)$$

式中　S_p——古盐度（‰）；

x——相当“硼质量分数”（计算古盐度时需换算成 10^{-6}）。

（2）Couch 公式[7]

$$S_p=\lg B'-0.11/1.28, \qquad (2)$$

式中　B'——校正“硼质量分数”（计算古盐度时需换算成 10^{-6}）。

研究表明，Couch 公式更适合于陆相地层，可靠性最好[7]。在鄂尔多斯盆地，郑荣才[7]分别应用（1）式和（2）式对长 6 油组沉积环境的古盐度进行分析和计算。结果表明，长 6 油组沉积时湖泊水体的古盐度为 0.940‰～1.076‰。

笔者应用 Couch 公式对吐哈盆地西南缘水西沟群沉积古盐度进行了推算（表从略）。结果表明（图 1），侏罗系水西沟群沉积时期古盐度为 1.94‰～2.38‰，属淡水-微咸水，且自老到新（$J_1b—J_1s—J_2x$），水介质环境是逐渐变淡的：八道湾组沉积时期，古盐度平均为 2.28‰；三工河组沉积时期，古盐度平均为 2.23‰；西山窑组沉积时期，古盐度平均为 2.07‰。

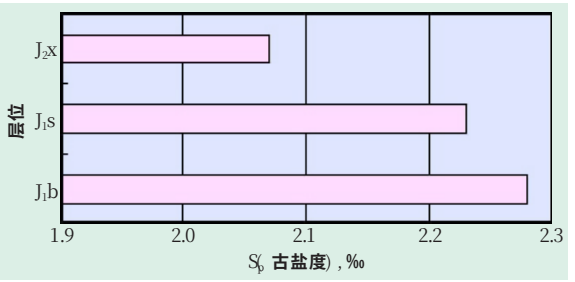

图 1　吐哈盆地西南缘水西沟群古盐度垂向演化

2　恢复古盐度的常量元素法

（1）钾纳比值法　钾和钠是活动性极强的碱金属元素，在水体中分布均一，其含量是盐度的直接标志[7]。水体盐度越高，钾和钠就越易被粘土吸附或进入伊利石晶格，且钾相对钠的吸附量亦越大。笔者对吐哈盆地西南缘侏罗系水西沟群 21 个泥岩样品进行了钾质量分数与钠质量分数比值的计算，表明地层年代自老到新（$J_1b—J_1s—J_2x$），水西沟群沉积时期的水介质环境是逐渐变淡的（图 2）。这与前面通过 B 元素、相当硼质量分数，以及 m（Sr）/m（Ba）值所表征的特点是一致的。

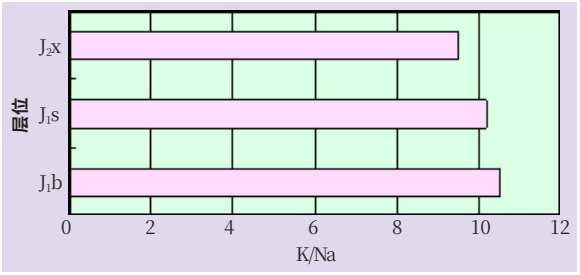

图 2　吐哈盆地西南缘泥岩中 K/Na 的垂向演化

（2）沉积磷酸盐法　此法是 Nelson[20]提出的。他发现，在现代或古代的沉积物中，都含有少量的磷酸盐。在海相沉积物中主要是磷灰石 $Ca_{10}(PO_4)_5(CO_3)(F,OH)_2$；非海相土壤中主要为磷铝石 $AlPO_4\cdot 2H_2O$ 和红磷铁矿 $FePO_4\cdot 2H_2O$ 及羟磷灰石 $Ca_{10}(PO_4)_5(CO_3)(F,OH)_2$[2]。Nelson 在研究中发现“磷酸钙比值”［m（磷酸钙）/m（磷酸铁+磷酸钙）］与盐度呈线性关系，并提出了回归方程[20]：

$$F_{cap}=0.09+0.026S_p, \qquad (3)$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中　F_{cap}——磷酸钙比值。

笔者利用 Nelson 公式, 对吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩样品进行了沉积古水介质盐度的推算(表从略)。结果表明, Nelson 公式推算出的古盐度值与 Couch 公式推算出的古盐度值不同, 总体上是 Nelson 公式推算出的古盐度值较 Couch 公式推算出的古盐度值小, 差值为-1‰, 产生这种现象的原因还有待进一步论证。但推算结果同样也表明, 侏罗系水西沟群沉积古水介质环境为淡水-微咸水环境, 且自老到新(J_1b—J_1s—J_2x), 水介质环境是逐渐变淡的。

值得注意的是, 应用此法进行古盐度的恢复时, 需要确保测试数据结果的可靠性, 即要仔细分析数据来源, 选择具有代表性的样品进行古盐度的恢复, 否则, 会得出与地质现象完全相悖的结论[17]。

3　其他方法讨论

(1) 锶钙法　除了上述两种常用的微量元素法(锶钡法和硼元素法)外, 人们也常用锶钙法对沉积环境进行古盐度的恢复。特别是对湖泊沉积物进行古盐度恢复时, 常常采用此法。因为湖泊表层沉积物中生长数量众多的介形类, 它们在生长过程中有 8 次左右的脱壳过程, 这样在沉积物中就留下了大量的壳体化石, 其矿物组成主要是低镁方解石。Chivas 等[21, 22]首先通过对多个属种的介形类壳体及其宿生水体中的微量元素进行研究, 获得了介形类壳体的 Mg^{2+}、Sr^{2+}质量分数以及宿生水体中 Mg^{2+}、Sr^{2+}质量分数的分配系数, 从而对古盐度进行了推算[2]:

$$S_p=1/A[(Sr/Ca)_{介形类}/K_d(Sr)-B], \quad (4)$$

式中　A, B——常数, 可以根据现代湖水 Sr^{2+}、Ca^{2+}质量分数与盐度的测定获得;

$K_d(Sr)$——Sr 的分配系数: $K_d(Sr)=[m(Sr)/m(Ca)]_{介形类}/[m(Sr^{2+})/m(Ca^{2+})]_{湖水}$.

沈吉、王苏民等[23]对内蒙古岱海古盐度定量复原的研究就利用了锶钙法, 首先获取 Sr 的分配系数 $K_d(Sr)$, 再取得 A、B 的常数值, 最后进行岱海古盐度的定量复原, 在此不再赘述。

(2) 同位素法　此法一般常用以下 3 种方法: ①氧同位素法。通常采用 $m(^{18}O)/m(^{16}O)$ 作为同位素的表征。利用氧同位素法, 对荷兰某上新世河口的盐度随 $\delta(^{18}O)$ 值的变化进行了研究(图 3)。在我国内蒙古岱海, 沈吉等[25]建立了古盐度与氧同位素的定量关系, 在此不再赘述; ②碳同位素法。通常采用 $m(^{13}C)/m(^{12}C)$ 作为同位素特征的表征。利用碳同位素研究古盐度并不很常用。其研究原理是, 由于大气中二氧化碳的含量低, 所以淡水中溶解的二氧化碳量大多来自土壤和腐殖土, 这些二氧化碳源的 ^{13}C 大多已耗尽, 从而导致了湖泊和河流中的低 $\delta(^{13}C)$ 值, 因此, 淡水沉积物中 $\delta(^{13}C)$ 大多为-5‰～+15‰. 反之, 在海相灰岩中, $\delta(^{13}C)$ 为-5‰～+5‰. 沈吉等[26]对江苏固城湖湖泊沉积物中碳同位素进行了研究, 结果表明 $\delta(^{13}C)$ 值与古气候关系密切; ③硼同位素法。硼有 2 种稳定同位素(^{10}B 和 ^{11}B), 其自然界丰度分别为 19.9%和 80.1%. 硼同位素组成一般用 $\delta(^{11}B)$ 表示:

$$\delta(^{11}B)/‰=\left\{\frac{[m(^{11}B)/m(^{10}B)]_{样品}}{[m(^{11}B)/m(^{10}B)]_{标准}}-1\right\}\times 1\,000, \quad (5)$$

式中, $m(^{11}B)/m(^{10}B)$ 是指质量分数比值。

标准为美国国家标准局(NIST)的 SRM951 硼酸样品, NIST 推荐的 $m(^{11}B)/m(^{10}B)$ 值为 4.043 62±0.001 37[11].

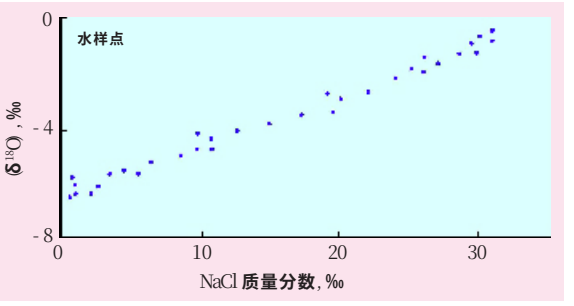

图 3　荷兰某河口水样的 $\delta(^{18}O)$ 值随盐度的变化[24]

硼同位素组成以海水为最高, 其次为海相沉积物, 而陆相沉积物中硼质量分数及硼同位素组成变化较大[9](图从略)。利用此法对古盐度进行定性恢复, 一般采用下面的指标进行推测: 现代海相沉积物的 $\delta(^{11}B)$ 值为-6.6‰～+4.8‰, 而古代海相沉积物的 $\delta(^{11}B)$ 值稍低, 为-17.0‰～5.6‰; 陆相沉积物硼同位素组成变化较大, $\delta(^{11}B)$ 值为-31‰～+10‰, 平均值为-4‰[27]。

综上所述, 笔者采用锶钡法、硼元素法、钾钠比值法和沉积磷酸盐法推算吐哈盆地西南缘水西沟群沉积古水介质环境, 得出的结论认为, 在水西沟群沉积时期, 古水介质环境总体为淡水环境, 并且自八道湾组沉积时期到三工河组沉积时期和西山窑组沉积时期古水介质是逐渐变淡的[19]。

致谢: 作者对中国地质调查局资源调查部、中国核工业地质局及其所属 203 研究所、中国地质大学等部门的大力支持和帮助深表谢意!

参考文献:

[1] 何起祥. 沉积岩和沉积矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1978. 319-327.

[2] 游海涛, 程日辉, 刘昌岭. 古盐度复原法综述[J]. 世界地质, 2002, 21(2): 111-117.

[3] 王海峰, 俞剑华, 方一亭. 皖南赣北宁国组和胡乐组沉积环境的古盐度特征及其地质意义[J]. 地层学杂志, 1994, 18(1): 10-16.

[4] 赵峰华, 任德怡, 张军营, 等. 煤中有害元素的研究现状

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

及其对环境保护的意义[J]. 煤矿环境保护, 1998, 12(2): 20-23.
[5] 史忠生, 陈开远, 史 军, 等. 运用锶钡比判定沉积环境的可行性分析[J]. 断块油气田, 2003, 10(2): 12-16.
[6] 孙镇城, 杨 藩, 张枝焕, 等. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 133-137.
[7] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20-25.
[8] 同济大学地质系. 海陆相地层辨认标志[M]. 北京: 科学出版社, 1980. 171-175.
[9] 肖荣阁, 蔡克勤, 大井隆夫, 等. 硼及硼同位素地球化学在地质研究中的应用[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 361-368.
[10] 蒋少涌. 硼同位素及其地质应用研究[J]. 高校地质学报, 2000, 6(1): 1-16.
[11] Cantanzaro E J, Champion C E, Garner E L, et al. Boric acid: Isotopic and assays standard reference materials [J]. U. S. National Bureau Standards Special Publication, 1970, 260, (17): 70.
[12] Degens E T, Williams E G, Keith M L. Environmental studies of Carboniferous sediments, Part 1: geochemical criteria for differentiating marine and fresh-wa ter shales [J]. AAPG Bulletin, 1957, 41: 2 427-2 455.
[13] Walker C T, Price N B, Wales S. Departure Curves for Computing Palaeosalinity form Boron in Illites and Shales [J]. AAPG Bulletin, 1963, 47: 833-841.
[14] Walker C T. Evaluation of boron as a palaeosalinity indicator and its application to off-shore prospects [J]. AAPG Bulletin, 1968, 55: 571-778.
[15] Harder H. Boron content of sediment as a tool in facies analysis [J]. Sediment, Geol. 1970, 4(2): 153-175.
[16] Couch E L. Calculation of palaeosalinities from boron and clay mineral data [J]. AAPG Bulletin, 1971, 55: 1 829-1 837.
[17] 刘宝珺, 曾允孚. 岩相古地理基础和工作方法[M]. 北京: 地质出版社, 1985.
[18] 汪品先. 古海洋学概论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
[19] 焦养泉, 吕新彪, 王正海, 等. 从沉积到成岩两种截然不同的地质环境——吐哈盆地砂岩型铀矿研究实例[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(5): 615-620.
[20] Nelson B. Sedimentary phosphate method for estimating paleosalinities [J]. Secience, 1967, 168: 917-920.
[21] Chivas A R, Deckker P, Shelley J M G. Strontium content of ostracods indicates paleosalinity [J]. Nature, 1986, 316: 251-253.
[22] Chivas A R, Deckker P, Shelley J M G. Magnesium content of non-marine ostracod shells: a new palaeo-salini meter and paleothermometer [J]. Paleogeogr. Paleoclimatol, 1986, 54: 43-61.
[23] 沈 吉, 王苏民, Matsumoto R, 等. 内蒙古岱海古盐度定量复原初探[J]. 科学通报, 2000, (17): 1 885-1 888.
[24] 肖普夫. T J M[美]. 古海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 1984. 200-201.
[25] 沈 吉, 曹建廷. 岱海湖水盐度与氧同位素定量关系的建立[J]. 第四纪研究, 2000, 20(2): 206-208.
[26] 沈 吉, 王苏民, 羊向东. 湖泊沉积物中有机碳稳定同位素测定及其古气候环境意义[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(4): 400-404.
[27] Oi T Nomura M, Musashi M, Ossaka T, et al. Boron isotopic composition of some boron minerals [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1989, 53: 3 189-3 195.

Recovery Paleosalinity in Sedimentary Environment
—An example of mudstone in Shuixigou group, southwestern margin of Turpan-Hami basin

WANG Min-fang, JIAO Yang-quan, WANG Zheng-hai, YANG Qin, YANG Sheng-ke
(College of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The paleoaqueous environment of Shuixigou group deposit in southwestern margin of Turpan-Hami basin is predicted by using Sr-Ba, B, K/Na and phosphate methods. The results show the fresh-water environment in the period of Shuixigou group with Sr/Ba ratio of less than 1 and B content ranging from 12.30ppm to 64.20ppm, and paleosalinity from 2.28‰ of J_1b to 2.23‰ of J_1x, averaging 2.07‰. Also, the other methods to recover paleosalinity in sedimentary environment are discussed and their limitations are presented in this paper.

Key words: paleosalinity; geochemistry; Turpan-Hami basin; sedimentary environment

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net