

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

焦养泉, 吕新彪, 王正海, 王敏芳

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 砂岩型铀矿床的形成既需要适当的沉积环境做准备, 又与成岩环境关系密切。通过宏观沉积学和泥岩元素地球化学分析探讨了吐哈盆地西南缘水西沟群的沉积介质环境, 利用砂岩样品的流体包裹体及激光拉曼光谱分析阐明了成岩环境。研究发现, 从沉积期到成岩期研究区的水西沟群具有2种截然不同的地质环境: 沉积期泥岩矿物中 Sr/Ba 比值小于 0.3, B 平均值为 46.35×10^{-6} , 同时具有淡水动物化石组合, 显示为温暖潮湿的贫氧、淡水介质环境, 但到成岩期却演化为具有有机质参与的中低温(156.1℃)、超盐度(7.4%)成岩环境, 现今环境(地下水盐度为 7.8%)恰好与成岩环境相似。值得注意的是, 研究区铀成矿的年龄(104±1)Ma、(24±1)Ma、(7±0)Ma 与成岩期基本吻合, 表明具有有机质参与的中低温、超盐度环境也可能是砂岩型铀矿的成矿环境。

关键词: 沉积介质环境; 成岩环境; 成矿环境; 砂岩型铀矿床; 吐哈盆地。

中图分类号: P619.14

文章编号: 1000-2383(2004)05-0615-06

收稿日期: 2004-06-12

Two Distinct Geological Environments from Sedimentary to Diagenesis Stages: Examples from Sandstone-Type Uranium Deposits, Turpan-Hami Basin

JIAO Yang-quan, LÜ Xin-biao, WANG Zheng-hai, WANG Min-fang

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

Abstract: The formation of sandstone-type uranium deposits is not only related to sedimentary environment, but also related to diagenesis environment. This paper illustrates the original sedimentary environment of the Shuixigou Group using sedimentology methods and analysis results of element geochemistry in mudstone, and discusses the diagenesis environment by means of fluid inclusions and Raman spectrum analysis in sandstone in the southwestern margin of the Turpan-Hami basin. The results show that two distinct geological environments from sedimentary to diagenesis stages are observed in the Shuixigou Group. In sedimentary stage, mudstones have the Sr/Ba value of less than 0.3 and the average B content of 46.35×10^{-6} , and the fresh water faunal fossils are observed, which indicates that in-situ sedimentary environment shows warm, wet, oxygen-deficient and fresh water. However, the diagenesis environment with middle-lower temperature (156.1℃) and supersalinity (about 7.4%) as evidenced from fluid inclusions is the same as that of the present formation water with a salinity of 7.8%. The research results indicate that the mineralization ages of uranium are basically coincident with the main diagenesis stages, which are (104±1) Ma, (24±1) Ma and (7±0) Ma, respectively. So it is possible that supersaline hydrocarbon-bearing fluid with middle-lower temperature should be a favorable mineralization environment of uranium.

Key words: sedimentary media environment; diagenesis environment; mineralization environment; sandstone-type uranium deposit; Turpan-Hami basin.

砂岩型铀矿是一种新型的核能源矿产。它是含 U^{6+} 的地下水在砂岩中运移至层间氧化带边缘还原

为 U^{4+} 而富集的矿体. 这种矿床的形成既需要适当的沉积环境作准备, 又与成岩环境关系密切, 现今的地下水环境又往往制约着矿产开发的工艺选择. 人们通常可以通过常规的方法恢复古水介质环境, 但对成岩环境的认识却较贫乏. 笔者通过综合研究发现: 吐哈盆地西南缘砂岩型铀矿区的水西沟群从沉积到成岩具有 2 种截然不同的地质环境, 这样的认识主要是基于宏观沉积学研究和一系列样品的测试得到的.

1 样品和方法

所有样品均采自吐哈盆地西南缘砂岩型铀矿勘探区的钻孔岩心, 地层层位为水西沟群, 依次包含了八道湾组 (J_1b)、三工河组 (J_1s)、西山窑组下段 (J_2x^1)、西山窑组中段 (J_2x^2) 和西山窑组上段 (J_2x^3). 样品总体分为 2 类: 一类为泥岩样品, 共 36 件, 主要借助元素地球化学分析进行古沉积水介质环境恢复; 另一类为钙质胶结的砂岩样品, 共 11 件, 主要用于包裹体和激光拉曼光谱测试, 借以恢复成岩环境.

本次 36 件泥岩样品的元素含量测试数据来自武汉综合岩矿测试中心; 11 件砂岩样品的包裹体均一温度和冷冻温度测试仪器型号为英国 LABORLUX D 型显微镜和 PR600 型冷热台; 包裹体激光拉曼光谱测试仪器为英国 Renishaw RM-1000 (序列号: G92255), 采用的激发光源为 Ar^+ 激光器 ($\lambda = 514.5 \text{ nm}$), 样品上的功率为 2.5 mW, 狭缝宽度 $12.5 \mu\text{m}$.

2 沉积环境——潮湿、淡水、贫氧介质

2.1 宏观沉积标志

沉积体系分析可以揭示沉积环境的信息. 研究区的水西沟群为含煤岩系, 说明沉积期的古环境属于潮湿气候. 野外和岩心观察发现, 八道湾组、三工河组和西山窑组中段均包含湖泊或三角洲沉积环境. 湖泊环境最典型的特征是富含动物化石的水平纹理的泥质或砂泥互层的沉积结构. 而与其共生的、具有反粒序结构的沉积体属于三角洲环境. 在野外, 大量的鱼鳞、叶肢介、昆虫、叠锥和有节类植物等化石的发现, 进一步证实研究区的水西沟群为淡水介

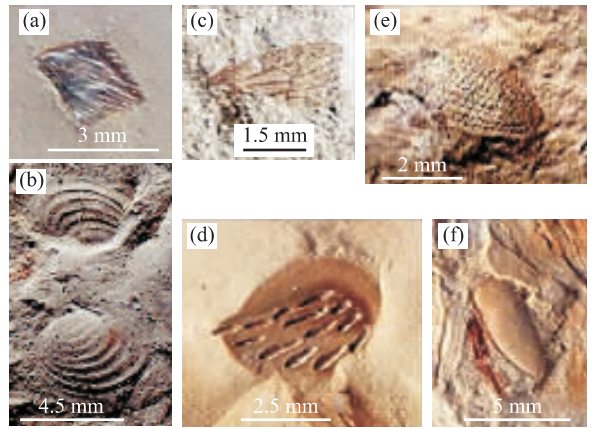


图 1 研究区指示湖泊环境的淡水动物化石

Fig. 1 Fresh water faunal fossils indicating the lacustrine environment, the southwestern margin of Turpan-Hami basin

a. 鱼鳞; b. cf. *Eosolimnadiopsis* sp.; c. 昆虫翅; d. 昆虫尾甲; e. 昆虫尾甲; f. 昆虫尾甲

质沉积环境 (图 1).

2.2 泥岩元素地球化学标志

2.2.1 B 含量——古盐度判别 微量元素硼常用来指示古盐度 (Walker, 1968; Harder, 1970; Couch, 1971; 刘宝珺和曾允孚, 1985; 汪品先, 1989). 一般而言, 海相环境下的硼含量在 $(80 \sim 125) \times 10^{-6}$ 之间, 而淡水环境的硼含量多小于 60×10^{-6} . 研究区泥岩硼含量最高值为 64.20×10^{-6} , 最小值为 12.30×10^{-6} , 平均值为 46.35×10^{-6} , 反映水西沟群的泥岩主要形成于淡水环境 (图 2).

2.2.2 Sr、Ba 含量及 Sr/Ba、K/Na 比值——古盐度判别 Sr、Ba 含量和 Sr/Ba、K/Na 值也可以定性地判别介质古盐度. 一般来说, Sr 元素在咸水中含量一般为 $(800 \sim 1000) \times 10^{-6}$, 在淡水中的含量一般为 $(100 \sim 300) \times 10^{-6}$. 淡水沉积物中的 Sr/Ba 值小于 1, 而海相沉积物中 Sr/Ba 值大于 1 (孙镇城等, 1997; 郑荣才和柳梅青, 1999). K/Na 值越大, 介质盐度越高. 在研究区, 水西沟群 Sr 值约为 82.89×10^{-6} , $Sr/Ba < 0.3$, 反映了当时的淡水介质环境. 不仅如此, 从 B、Sr、Ba 含量, 尤其是 Sr/Ba、K/Na 比值的变化趋势上可以看出, 自八道湾组到三工河组和西山窑组古水介质逐渐变淡 (图 2).

2.2.3 相当 B 含量——古盐度判别 Walker (1968) 以伊利石理论含钾量的 8.5% 来换算纯伊利石中的“校正硼含量”, 即校正硼含量 = $8.5 \times [\text{硼测}$

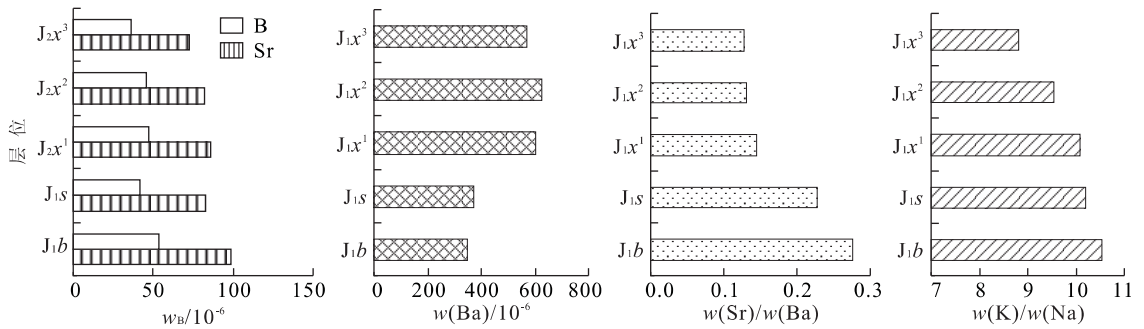


图 2 研究区泥岩中 B、Sr、Ba 含量及 Sr/Ba、K/Na 值的垂向演化(36 个样品统计)

Fig. 2 Vertical evolution charts of the content of B, Sr, Ba and Sr/Ba, K/Na values (36 samples counted)

表 1 古氧相地球化学指标(Jones and Manning, 1994)

Table 1 Geochemical indices of palaeo-oxygenation facies

古氧相	容量/(mL · L ⁻¹)	w(U)/w(Th)	w(V)/w(Cr)	w(Ni)/w(Co)	w(V)/w(V+Ni)
缺氧、极贫氧	出现 FeS ₂ , 0.0~0.2	>1.25	>4.25	>7.0	>0.77
贫氧	0.2~2.0	1.25~0.75	2.0~4.25	5.0~7.0	0.60~0.77
富氧	>2.0	<0.75	<2.0	<5.0	<0.60

定值(10⁻⁶)/K₂O(%)];由于伊利石的硼含量又与钾含量有关,为了在同等条件下对比,需计算相当于 K₂O 含量为 5%时的硼含量,称为“相当硼含量”. Walker(1968)认为,在相当硼含量 >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,而相当硼含量 <200 × 10⁻⁶ 时则是低盐度环境的沉积产物. 在研究区,依据 Walker 公式的计算结果表明,研究区相当硼含量约为 200 × 10⁻⁶,从八道湾组到三工河组和西山窑组,相当硼含量逐渐降低(图 3). 这与前 2 种方法反映的古盐度变化趋势完全一致,再次证明水西沟群的沉积环境总体为淡水介质,而且自老到新,古水介质变得更淡.

2.2.4 地球化学指标——古水介质的氧化还原性

Jones and Manning(1994)通过对西北欧晚侏罗世暗色泥质岩的古氧相研究,总结出一套古氧相的地球化学指标(表 1). 研究区 V/Cr、V/(V+Ni) 值(表 2)及 Cr、U、Ni、Co、V 等微量元素值均指示本区水西沟群泥岩沉积时期的环境为贫氧还原环境. 这与八道湾组顶部及三工河组湖泊泥岩中大量发育的菱铁矿结核层所蕴藏的还原环境信息相吻合.

通常情况下, Ni/Co、U/Th、V/Cr、V/(V+Ni) 指标的变化应该是一致的(Jones and Manning, 1994),但研究区 U、U/Th、Ni/Co 表现不十分明显(表 2). 究其原因,可能受成岩期含氧含铀水的影响所致.

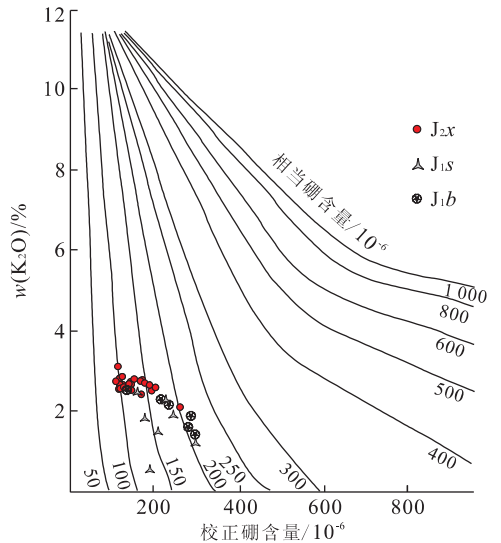


图 3 相当硼含量换算曲线(Walker, 1968)

Fig. 3 The calculating curve of the corresponding boron

表 2 水西沟群泥岩中微量元素比值

Table 2 Microelement ratios in mudstone of Shuixigou Group, the southwestern margin of Turpan-Hami basin

地层单元	w(U)/w(Th)	w(V)/w(Cr)	w(Ni)/w(Co)	w(V)/w(V+Ni)
J _{2x} ³	0.28	2.55	6.13	0.77
J _{2x} ²	0.33	2.49	6.91	0.78
J _{2x} ¹	0.41	2.65	6.15	0.74
J _{1s}	0.33	2.30	6.49	0.81
J _{1b}	0.26	2.00	6.19	0.84

表 3 吐哈盆地西南缘铀成矿区成岩包裹体基本特征

Table 3 Basic characteristics of fluid inclusions in uranium mineralization zone, the southwestern margin of Turpan-Hami basin

样号	大小/ μm	气液 比/%	均一 温度/°C	冷冻 温度/°C	盐度/ %	备注	样号	大小/ μm	气液 比/%	均一 温度/°C	冷冻 温度/°C	盐度/ %	备注
H31-4-9	3	5	154			□	K11	3	5	167			□
H31-4-9	4	5	160			□	K11	4	5	184			□
H31-4-9	3	5	147			□	K11	6	10	141			□
H31-4-9	3	7	132			□	K11	4	10	165	-4.5	7.2	□
H31-4-9	4	5	136			□	K11	4	10	163			□
H31-4-9	3	5	163			□	K11	4	10	166			□
H31-4-9	3	5	153			□	K11	6	10	150	-4.3	6.9	□
H31-4-9	4	5	171			□	K2	4	5	164			□
H31-4-9	4	5	180			□	K2	5	5	149			□
H31-4-9	3	5	145			□	K2	5	5	96			□
K1	3	5	140			□	K2	5	5	105			□
K1	4	5	178			□	K2	6	5	162			□
K1	3	5	160			□	K2	4	5	141			□
K1	6	5	156			□	K2	3	5	124	-4.9	7.7	□
K1	4	5	154			□	K2	3	5	128	-3	7.9	□
K1	4	10	161	-6.4	9.5	□	K2	5	5	142			□
K1	4	5	152			□	K2	5	5	122	-5.1	8	□
K1	4	5	176	-4.6	7.3	□	K2	4	10	167			□
K1	3	5	178			□	K2	8	10	144			□
K1	6	20	☆			▲	K2	4	5	133			□
K1	8	30				□	K380	8	10	240			□
K1	4	5	165	-5.2	8.1	□	K380	6	5	148			△
K3	3	5	131			□	K380	3	5	138			△
K3	5	5	124			□	K380	5	5	140			△
K3	4	5	164	-5.5	8.6	□	K380	3	5	152	-4.4	7	△
K3	6	5	170			□	K380	4	5	161	-4	6.5	△
K3	3	5	174			□	K380	3	5	194			△
K3	3	5	145	-4.5	7.2	□	K380	4	5	192			△
K3	3	5	131			□	K380	4	5	132			△
K3	8	5	117			□	K380	3	5	138	-3.4	5.6	△
K3	5	5	132			□	K380	4	5	134			△
K3	5	5	180			△	K380	3	5	138			△
K3	10	5	163	-3.9	6.3	△	K380	3	5	183			△
K3	5	10	156	-4.7	7.5	△	K380	6	20	192			油+水
K11	3	5	128			□	K380	12	30	193			△
K11	4	5	143	-4.3	6.9	□	K380	6	10	250			■
K11	5	5	133			□							□

注:包裹体类型均为原生包裹体。包裹体产状:□表示包裹体产于钙质胶结物中;△表示包裹体产于石英裂隙中;☆, 200 °C以上不均一、气泡不变化;▲, 油+气;■, 均一后,不能复原,均一为气相。

3 成岩环境

3.1 包裹体测试——古流体温度、盐度判别

在研究区,笔者选择了6块钙质胶结程度强烈的样品进行包裹体测试(表3),这些样品的CaCO₃平均含量高达23.2%。但是总体来看,包裹体含量较少,它们主要产于方解石胶结物中,少量产于石英的微裂隙中。包裹体平均大小4.5 μm、气液比

6.8%、均一温度156.1 °C、冷冻温度-4.5 °C、盐度7.4%(图4)。其中,无机包裹体占优势,有机包裹体仅占5.5%。由此可见,该区的成岩环境是一种中低温的超盐度环境,其盐度比现今正常海水高出3.9%。

3.2 流体包裹体激光拉曼光谱测试——古流体成分和盐度判别

笔者对5个典型砂岩样品进行了激光拉曼测试。测试表明,成岩流体的主要成分不仅有水、CO₂

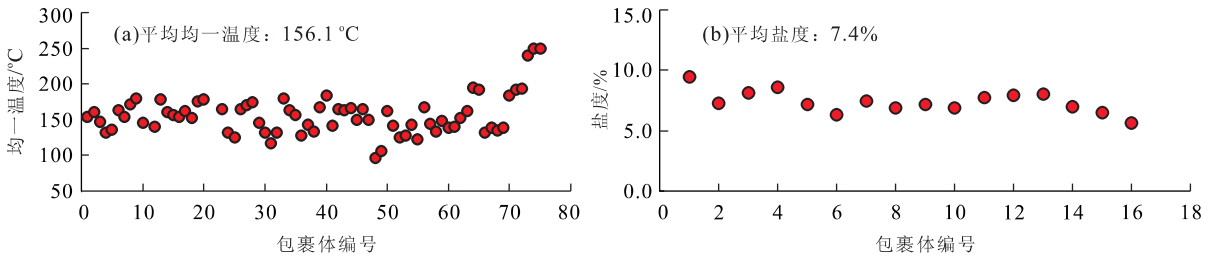


图 4 吐哈盆地西南缘铀成矿区成岩环境参数

Fig. 4 Parameters about diagenesis environment in uranium mineralization zone, the southwestern margin of Turpan-Hami basin

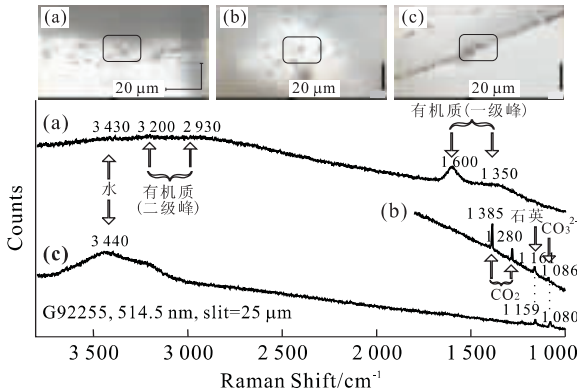


图 5 吐哈盆地西南缘铀成矿区典型包裹体的激光拉曼光谱测试

Fig. 5 Raman spectrum of typical inclusions in uranium mineralization zone, the southwestern margin of Turpan-Hami basin

a. 样品 K-1-1, 钙质胶结物中的包裹体; b. 样品 K-3-2, 钙质胶结物中的包裹体; c. 样品 K-3-1, 石英裂隙中的包裹体

和 CO₃²⁻, 同时还有有机质(图 5)。

Mernagh and Wide(1989)曾经使用激光拉曼光谱特征峰计算过流体的盐度, 计算公式如下

$$\omega_{(eq)} = 62.725 \times S_k - 22.927 \quad (1)$$

式中: $\omega_{(eq)}$ 为盐度; $S_k = D \times Z$; $D = 2 - (Y/X) / (I_1 / I_2)$; $Z = (Y - X) / [(Y + X) / 2]$ 。

其中: Y 为 3 300~3 800 cm⁻¹ 的积分面积, X 为 2 800~3 300 cm⁻¹ 的积分面积, I_1 、 I_2 分别为 3 400 cm⁻¹ 和 3 200 cm⁻¹ 处的拉曼强度。

Seyed *etal.* (2000) 对上述公式进行过成功的

验证. 针对研究区, 笔者也进行了计算, 发现成岩流体盐度可达 7.26%~8.87%(表 4), 这从另一个角度证实成岩环境的高盐度特征。

4 沉积、成岩环境与现今环境的对比

上述分析可以用图 6 所示的模式给予总结. 研究区的水西沟群从沉积期到成岩期具有 2 种截然不同的地质环境: 沉积期为温暖潮湿的贫氧、淡水介质环境, 但到成岩期却演化为具有有机质参与的中低温、超盐度成岩环境, 现今环境恰好与成岩环境相似. 值得注意的是, 研究区铀成矿的年龄与成岩期基本吻合, 那么具有有机质参与的中低温、超盐度环境也可能是砂岩型铀矿的成矿环境。

沉积期 208~154 Ma	铀成矿期 U-Pb 同位素年龄: (104±1) Ma、(24±1) Ma、(7±0) Ma	
	成岩期	
温暖潮湿的贫氧、淡水介质	具有有机质参与的中低温、超盐度成岩环境	艾丁湖 干旱炎热 超盐度介质 盐度: 7.8% 矿化度: 8.46~ 12.16 g/L pH: 7.10~ 7.33, 水化学类型: Cl·SO ₄ -Na 型
	流体温度: 156.1 °C 流体盐度: 7.4%	· 干旱炎热 · 超盐度介质 · 年均降水量: 14 °C · 年降水量: 6.9 mm · 年蒸发量: 3 723 mm · 湖水盐度: 20% · 湖水矿化度: 210 g/L
沉积环境	成岩环境	现今环境

图 6 研究区不同阶段地质环境的比较

Fig. 6 Comparison of different geological environments 图中铀成矿年龄据徐高中(2003)、周巧生和李占游(2003); 地下水信息据吴伯林等(2004); 艾丁湖信息据杨发相等(1996)、王亚俊和吴素芳(2003)

表 4 吐哈盆地西南缘铀成矿区成岩流体盐度计算参数与结果

Table 4 Calculated parameters and results in uranium mineralization zone, the southwestern margin of Turpan-Hami basin

样号	Y	X	I _{3400 cm⁻¹}	I _{3200 cm⁻¹}	D	Z	S _k	$\omega_{(eq)} / \%$
K-3-1	491 357.7	225 354.6	1 832	1 106.7	0.682 8	0.742 3	0.506 9	8.87
K-3-2	486 463.7	223 275.2	1 695.2	1 051.2	0.648 9	0.741 6	0.481 3	7.26

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友好合作深表谢意!特别感谢王瑞江、郑大瑜、陈跃辉、张金带、简晓飞、李有良、李占双、王金平、李占游、周巧生、权建平等人对本项研究的高度重视和热情指导,同时感谢张文淮、何谋鑫所做的测试工作。

References

- Couch, E. L., 1971. Calculation of palaeosalinities from boron and clay mineral data. *AAPG*, 55: 1829—1837.
- Harder, H., 1970. Boron content of sediment as a tool in facies analysis. *Sediment Geol.*, 4 (2): 153—175.
- Jones, B. J., Manning, A. C., 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 111: 111—129.
- Liu, B. J., Zeng, Y. F., 1985. Basic and work methods of lithofacies paleogeography. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Mernagh, T. P., Wide, A. R., 1989. The use of laser Raman microprobe for the determination of salinity in fluid inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 765—771.
- Seyed, J. M., Yao, S. Z., Lu, X. B., 2000. Determination of salinity in fluid inclusions with laser Raman spectroscopy technique. *Journal of China University of Geosciences*, 11(4): 406—409.
- Sun, Z. C., Yang, F., Zhang, Z. H., et al., 1997. Depositional environment and petroleum forming from Cenozoic saline lakes. Petroleum Industry Press, Beijing, 133—137 (in Chinese).
- Walker, C. T., 1968. Evaluation of boron as a palaeosalinity indicator and its application to offshore prospects. *AAPG*, 55: 571—778.
- Wang, P. X., 1989. Introduction to paleoceanography. Tongji University Press, Shanghai (in Chinese).
- Wang, Y. J., Wu, S. F., 2003. Environment change over the Aydingkol lake region in Turpan basin, Xinjiang. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25 (2): 229—231 (in Chinese with English abstract).
- Wu, B. L., Xu, G. Z., Li, W. H., et al., 2004. Metallogenic conditions of in-situ leachable sandstone-type uranium deposits and dynamic evolution of the Turpan-Hami basin. *Geology in China*, 31 (1): 102—107 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G. Z., 2003. Tectonic evolution and its control over ore formation of interlayer oxidized zone sandstone type uranium deposit at southern margin of Turpan-Hami basin. *Uranium Geology*, 19 (3): 137—140 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F. X., Mu, G. J., Zhao, X. Y., 1996. Analysis on the shrinkage of Aiding lake and the environmental variation in the area around the lake. *Arid Land Geography*, 19 (1): 73—77 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R. C., Liu, M. Q., 1999. Study on palaeosalinity of Chang-6 oil reservoir set in Ordos basin. *Oil & Gas Geology*, 26 (1): 20—25 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q. S., Li, Z. Y., 2003. Geological characteristics and ore prospects of underground leaching sandstone-type uranium deposits on the southwestern margin of the Turpan-Hami basin. *Geology in China*, 30 (2): 186—191 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 刘宝珺, 曾允孚, 1985. 岩相古地理基础和工作方法. 北京: 地质出版社.
- 孙镇城, 杨藩, 张枝焕, 等. 1997. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成. 北京: 石油工业出版社, 133—137.
- 汪品先, 1989. 古海洋学概论. 上海: 同济大学出版社.
- 王亚俊, 吴素芬, 2003. 新疆吐鲁番盆地艾丁湖的环境变化. 冰川冻土, 25 (2): 229—231.
- 吴伯林, 徐高中, 李卫红, 等, 2004. 吐哈盆地地浸砂岩型铀矿成矿条件与盆地动力学演化. 中国地质, 31 (1): 102—107.
- 徐高中, 2003. 吐哈盆地南缘构造演化及其对层间氧化带砂岩型铀矿成矿作用的控制. 铀矿地质, 19 (3): 137—140.
- 杨发相, 穆桂金, 赵兴有, 1996. 艾丁湖萎缩与湖区环境变化分析. 干旱区地理, 19 (1): 73—77.
- 郑荣才, 柳梅青, 1999. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究. 石油与天然气地质, 26 (1): 20—25.
- 周巧生, 李占游, 2003. 吐哈盆地西南缘地浸砂岩型铀矿地质特征及找矿前景. 中国地质, 30 (2): 186—191.