

文章编号:0258-7106 (2006) 02-0191-08

潜水层间氧化带砂岩型铀矿特征与成矿模式

——以滇西地区山间盆地为例*

孙泽轩^{1,2}, 陈洪德¹, 陈 勇², 王四利²

(1 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2 核工业 280 研究所, 四川 广汉 618300)

摘 要 文章在收集整理龙川江盆地已有的 1 200 个钻孔资料及 9 个施工钻孔资料的基础上, 编制了岩性-岩相-地球化学剖面图 58 张, 研究了盆地内砂岩型铀矿基本特征与成矿模式, 并对不同构造部位矿体的定位模式进行了探讨。认为发育于造山带内部的小型山间盆地, 由于盆地规模小, 物源丰富, 砂体发育厚度大, 再加上地层时代新, 后生氧化作用发育不充分, 氧化带发育部位上、下翼有部分砂体不能被完全氧化。典型的潜水层间氧化带除具有与层间氧化带相似的舌状体前锋氧化还原界面外, 在舌状体翼部亦形成上、下翼氧化还原界面, 从而发育氧化带前锋与上、下翼 3 个板状或透镜状铀矿体, 既不同于定位于层间氧化带前锋部位氧化还原界面附近的卷状铀矿体, 也与定位于潜水氧化带底部氧化还原界面附近的层状、似层状铀矿体有所差异。

关键词: 地质学; 潜水层间氧化带; 砂岩型铀矿; 板状或透镜状矿体; 成矿模式**中图分类号:** P619.14**文献标识码:** A

Characteristics and metallogenic models of phreatic interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposits: Case study of intermontane basins in Western Yunnan Province

SUN ZeXuan^{1, 2}, CHEN HongDe¹, CHEN Yong² and WANG SiLi²

(1 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 No. 280 Research Institute, China National Nuclear Corporation, Guanghan 618300, Sichuan, China)

Abstract

There exist abundant uranium resources in Cenozoic basins of western Yunnan. These basins, with rich potential in prospecting for sandstone-type uranium deposits, constitute one of the important sandstone-type uranium ore belts in China. The authors collected data from 1 200 previous boreholes, arranged 9 drilling holes, compiled 58 lithologic-lithofacies-geochemical profiles, studied characteristics and metallogenic models of sandstone-type uranium deposits, and investigated the locating models of uranium ore bodies at different tectonic positions in Longchuanjiang basin. It is concluded that the small-size intermontane basins developed within the orogenic belt, due to their abundant material sources, thick sand body, and relatively young strata, were only subjected to insufficient epigenetic oxidation, which has led to the incomplete oxidation of some sand bodies in the upper and lower limbs within the well-developed phreatic interlayer oxidation zone. Besides the tongue-like front oxidation-reduction interface similar to the interlayer oxidation zone, the oxidation-reduction interface is also

* 本文受到核工业地质局基础地质项目(项目编号:200223)的资助

第一作者简介 孙泽轩, 男, 1966 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事层序地层学与含油气盆地分析、铀成矿地质条件分析, 通讯地址: 四川省广汉市 205 信箱。

收稿日期 2005-04-25; 改回日期 2006-01-23。张绮玲编辑。

developed in the upper and lower limbs within the typical phreatic interlayer oxidation zone. Three planar or lenticular uranium ore bodies are therefore developed in tongue-like upper and lower limbs along the interface of phreatic interlayer oxidation zone. These ore bodies are neither similar to the curly uranium ore bodies located in the front position near the oxidation-reduction interface of the interlayer oxidation zone, nor to the stratiform and stratoid uranium ore bodies located at the bottom of the phreatic oxidation belt near the oxidation-reduction interface of the phreatic oxidation zone.

Key words: geology, phreatic interlayer oxidation zone, sandstone-type uranium deposit, planar or lenticular ore body, metallogenic model

随着中国核电建设的快速发展,对铀资源的需求大幅度增加,寻找规模大且经济可采的铀资源已成为当前铀矿地质工作者的迫切任务。砂岩型铀矿床具有规模大且适宜地浸开采的特点,因而成为世界各国研究与勘查的重点。就其成因而言,砂岩型铀矿是在盆地盖层含水层内径流过程中,含氧地下水携带着从蚀源区淋滤出来的活性铀在氧化还原界面附近还原沉淀并富集成矿。铀矿地质工作者们已普遍接受了潜水氧化带砂岩型铀矿和层间氧化带砂岩型铀矿的概念(朱西养等,2004a),前者是在顶部无区域性隔水层的前提下,潜水垂向氧化含水层砂体,从而发育潜水氧化带,铀矿体定位于潜水氧化带底部氧化还原界面附近,矿体呈层状或似层状;后者是潜水遇区域性隔水层转为层间水,沿层间氧化含水层砂体,发育层间氧化带,铀矿体定位于层间氧化带前锋部位氧化还原界面附近,矿体呈卷状。近年来,一些学者(孙泽轩,2000;孙泽轩等,2002;2003;2004;李胜祥等,2001;陈法正,2002;李国新等,2003;祝民强等,2003;刘红旭等,2004;刘武生等,2004)注意到在造山带内部发育的小型山间盆地内,赋存一种介于上述两种砂岩型铀矿之间的过渡类型——潜水层间氧化带砂岩型铀矿,它是在距盆缘不远的范围内(一般小于 10 km),潜水遇区域性隔水层转为层间水,沿层间氧化含水层砂体,从而发育潜水层间氧化带,铀矿体定位于潜水层间氧化带前锋与上、下翼氧化还原界面附近,矿体呈板状或透镜状。由于潜水层间氧化带砂岩型铀矿产于特定的构造背景下,其铀矿特征、成矿模式与潜水氧化带、层间氧化带砂岩型铀矿均有所差异。目前,研究较为详细的潜水层间氧化带砂岩型铀矿床主要分布于滇西地区,特别是在腾冲地区,现已探明 8 个中、小型砂岩型铀矿床,构成中国重要的砂岩型铀矿成矿带之一。本文以滇西地区山间盆地为例,在收集整理 1 200 个已有钻孔资料和本次施工的 9 个钻孔资料的

基础上,试图对发育于造山带内部小型山间盆地的潜水层间氧化带砂岩型铀矿特征与成矿模式进行概括总结。

1 区域地质背景

大约在 50 Ma 前后,欧亚板块与印度板块强烈碰撞(Dewey et al., 1988),一方面,造成了青藏地区的地壳增厚与隆升;另一方面,造成了青藏高原周缘微板块的挤压、逃逸与旋转(季建清等,2000),在造山带内部发育了大规模走滑带。中新世以来,位于青藏高原南缘的腾冲、保山、临沧微板块的造山带内发育了众多走滑盆地。滇西地区潜水层间氧化带砂岩型铀矿床均赋存于造山带内部发育的山间盆地内,在这种特定的构造背景下发育的山间盆地有着许多相似的特点:盆地规模小,面积一般几百平方公里;盆地基底形态呈“箕”状;盖层沉积体系发育简单,主要发育冲积扇、扇三角洲、湖泊 3 种沉积体系(朱西养等,2004b);盆地形成早期断陷带内快速堆积,以发育冲积扇沉积体系为特征;中、晚期冲积扇快速入湖,在斜坡带上发育冲积扇-扇三角洲-湖泊沉积体系组合;在断陷带内发育扇三角洲-湖泊沉积体系组合;由于物源丰富,砂体发育厚度大,在断陷带内砂体厚度可达 100 m 以上。

2 砂岩型铀矿基本特征

龙川江盆地是滇西地区主要赋矿盆地之一,盆地面积约 700 km²,现已在该盆地内探明了 5 个中、小型砂岩型铀矿床,占滇西地区已探明砂岩型铀矿床总数的 50%。这些砂岩型铀矿的主要特征简述如下。

2.1 矿床空间分布与定位

已探明的 5 个砂岩型铀矿床中,4 个矿床位于西部斜坡带,1 个矿床位于东部断陷带;矿床均定位于某个冲积扇扇体上。

2.2 赋矿层位

盆地盖层上第三系芒棒组是该盆地砂岩型铀矿找矿目的层,沉积厚度大于 1 000 m,根据其沉积特征划分为 3 段 6 层。主矿体赋存于下段第二层与中段第一层冲积扇沉积体系扇中砾质辫状河道沉积砂体中,扇三角洲沉积体系河口坝与分流河道沉积砂体中亦赋存部分铀矿体。

2.3 氧化带发育特征

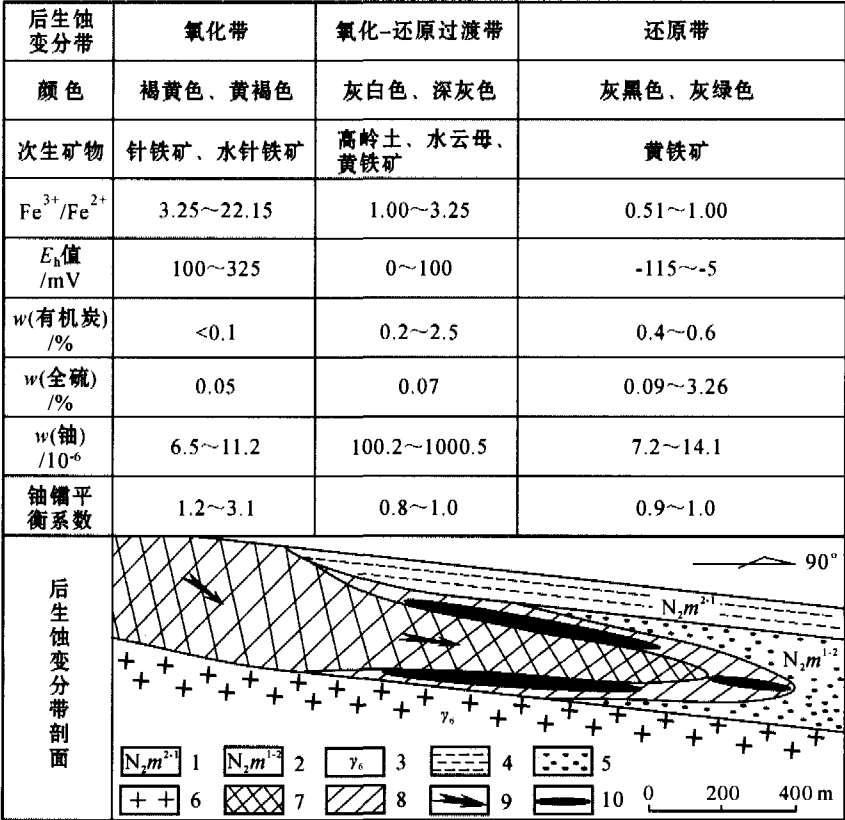
(1) 氧化带发育类型与规模 根据钻孔岩心编录资料,芒棒组碎屑岩颜色以灰、灰黑、灰白色为主,但也存在带状浅黄至黄褐色岩石。由此可见,深部芒棒组碎屑岩中发生了后生化氧化蚀变,从而发育了氧化带。按氧化带的成因,可将其划分为潜水氧化

带与潜水层间氧化带 2 种类型。其中,以潜水层间氧化带发育规模最大,氧化带距盆缘 1~3 km,厚度 30~120 m^①。

(2) 后生化氧化蚀变分带 矿床勘探实践证实,在层间地下水运动的方向上按地球化学特征可划分出氧化带、氧化-还原过渡带和还原带 3 个带。各带岩石颜色、次生矿物、 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值、有机炭含量等呈现规律性变化(图 1),但岩心编录过程中,肉眼往往不易识别氧化-还原过渡带,且其宽度变化范围较大(几十米至几公里)。

2.4 矿体空间定位

潜水层间氧化带与铀矿化关系密切,潜水层间氧化带的展布方向直接控制了铀矿体的空间展布。



注：铀镭平衡系数 $Kp=Ra/(U \times 3.4 \times 10^{-7})$

图 1 龙川江盆地西部斜坡带某铀矿床后生化蚀变分带特征示意图^①

1—新第三系芒棒组中段第一层；2—新第三系芒棒组下段第二层；3—喜马拉雅花岗岩；4—泥岩、粉砂岩；5—砂岩；6—花岗岩；7—氧化带；8—氧化-还原过渡带；9—地下水流向；10—铀矿体

Fig. 1 Geological sketch map showing characteristics of the epigenetic alteration zone of a certain uranium deposit on the western slope of Longchuanjiang basin

1—The first bed of the middle member of Mangbang Formation; 2—The second bed of the lower member of Mangbang Formation; 3—Himalayan granite; 4—Mudstone and siltstone; 5—Sandstone; 6—Granite; 7—Oxidation zone; 8—Oxidation-reduction zone;

9—Direction of groundwater flow; 10—Uranium ore body

① 孙泽轩,姚毅锋,李国新,陈勇,陈志国. 2003. 滇西龙川江盆地地浸砂岩铀资源评价项目成果报告. 核工业 280 研究所.

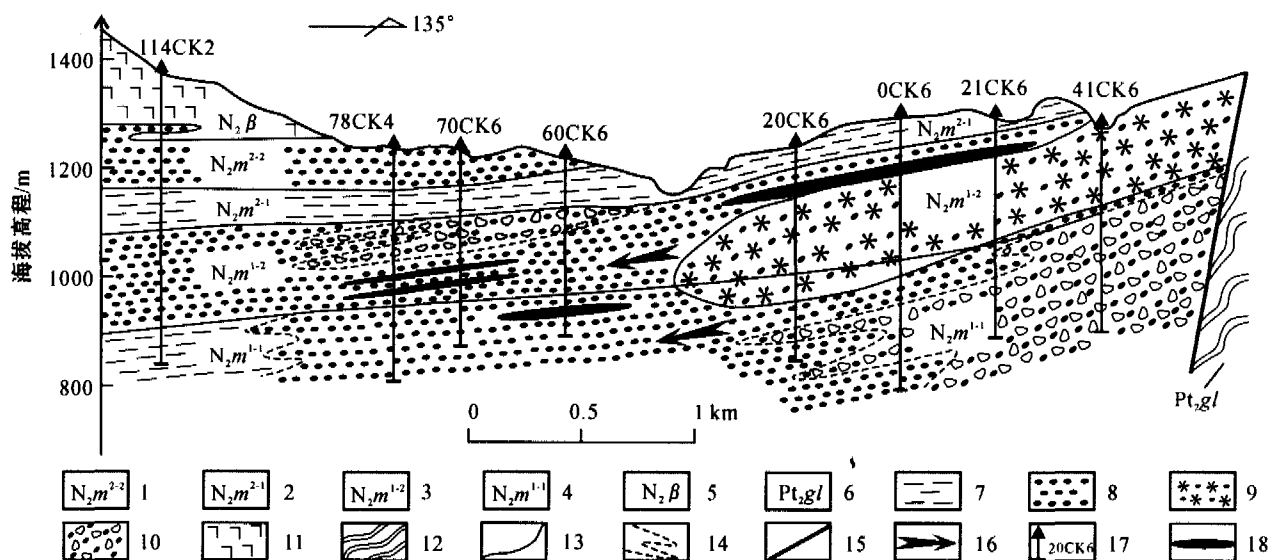


图3 龙川江盆地东部断陷带某铀矿床勘探剖面示意图^①

1—芒棒组中段第二层; 2—芒棒组中段第一层; 3—芒棒组下段第二层; 4—芒棒组下段第二层; 5—上新世玄武岩; 6—中元古界高黎贡山群; 7—泥岩、粉砂岩; 8—砂岩、砂砾岩; 9—后生氧化砂岩、砂砾岩; 10—砾岩; 11—玄武岩; 12—变质岩; 13—地质界线; 14—相变界线; 15—断层; 16—地下水流向; 17—钻孔位置及编号; 18—铀矿体

Fig. 3 Exploration section of a certain uranium deposit in the eastern rift zone of Longchuanjiang basin

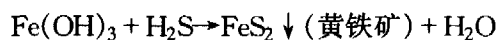
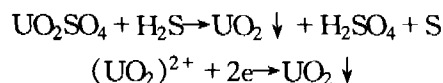
1—The second bed of the middle member of Mangbang Formation; 2—The first bed of the middle member of Mangbang Formation; 3—The second bed of the lower member of Mangbang Formation; 4—The first bed of the lower member of Mangbang Formation; 5—Pliocene basalt; 6—Middle Proterozoic Gaoligongshan Group; 7—Mudstone and siltstone; 8—Sandstone and glutenite; 9—Oxidized sandstone and glutenite; 10—Conglomerate; 11—Basalt; 12—Metamorphic rock; 13—Geological boundary; 14—Facies change boundary; 15—Fault; 16—Direction of groundwater flow; 17—Location and serial number of drill hole; 18—Uranium ore body

育规模相对较小,氧化带距盆缘一般几公里。由于盆地规模小,物源丰富,砂体发育厚度大,再加上地层时代新,后生氧化作用发育不充分,潜水面间氧化带发育部位上、下翼有部分砂体不能被完全氧化,从而形成上、下两翼的氧化还原界面(这可用水槽实验中中部水流速度快,而边缘由于管壁的粘滞作用水流速度慢来合理解释)。因此,典型的潜水面间氧化带除具有与层间氧化带相似的舌状体前锋氧化还原界面外,在舌状体翼部亦形成上、下翼氧化还原界面(图4b)。

3.2 成矿模式

(1) 铀的沉淀机制 铀以六价氧化物形式迁移,以四价氧化物形式沉淀。潜水面间氧化带砂岩型铀矿的成矿过程就是来自含矿含水层中的六价铀转变成四价铀的过程。矿床勘探实践证实,矿区范围内地下水 pH 值多以小于 6.5 的弱酸性水为主,其含铀含氧水中的活性铀以 UO_2SO_4 、 $(\text{UO}_2)^{2+}$ 形式

存在。当含活性铀的地下水流经氧化还原界面附近时,氧化还原电位急剧降低(0~100 mV),地球化学环境由氧化转为还原,在氧化还原界面附近发生一系列的地球化学反应,活性铀被还原为四价铀的氧化物而沉淀:



析出的四价铀的氧化物沉淀一方面可被炭质与粘土吸附,聚集分布于细分散的炭质与粘土周围;另一方面,可形成胶状、显微粒状沥青铀矿或粉末状再生铀黑集合体充填于砂岩孔隙中,从而富集形成砂岩型铀矿。与铀沉淀相伴生的化学反应是黄铁矿的生成,区内多数矿床中出现与黄铁矿共生的沥青铀矿。

(2) 成矿模式 前已述及,砂岩型铀矿是含氧地下水中携带的活性铀在盆地盖层含水层内径流过程中,活性铀在氧化还原界面附近还原沉淀并富集

① 孙泽轩,朱西养,姚毅锋,向清友,王四利,陈勇. 2004. 云南省腾冲县龙川江盆地团田地区铀矿普查报告. 核工业 280 研究所。

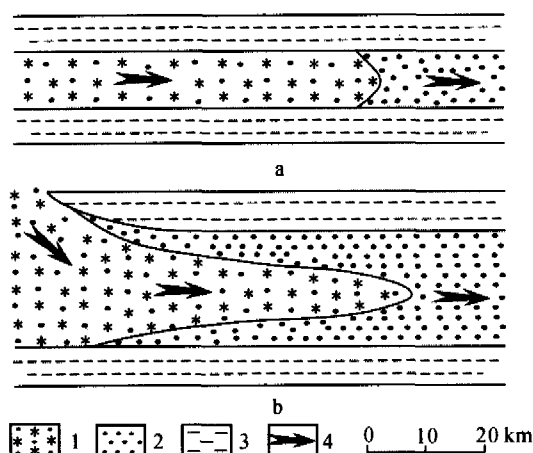


图 4 典型层间氧化带(a)与潜水层间氧化带(b)模式对比示意图

1—后生氧化透水砂岩层; 2—原生灰色透水砂岩层;
3—隔水层; 4—地下水流向

Fig. 5 Model comparison between the typical interlayer oxidation zone (a) and the phreatic interlayer oxidation zone (b)

1—Epigenetic oxidized permeable sandstone layer; 2—Original gray permeable sandstone layer; 3—Impermeable layer; 4—Direction of groundwater flow

而成,成矿的关键条件是必需存在氧化还原界面(亦称地球化学障或氧化-还原过渡带)。正如潜水氧化带层状、似层状铀矿体定位于潜水氧化带底部氧化还原界面附近;层间氧化带卷状铀矿体定位于层间氧化带舌状体前锋部位氧化还原界面附近;潜水层间氧化带发育了舌状体前锋和上、下翼 3 个方向的氧化还原界面,含氧水中的活性铀既可在氧化带舌状体前锋氧化还原界面附近还原沉淀并富集形成板状或透镜状铀矿体,亦可在氧化带舌状体翼部氧化还原界面附近还原沉淀并富集形成上、下翼板状或透镜状铀矿体,从而形成氧化带前锋和上、下翼 3 个板状或透镜状铀矿体。

3.4 不同构造部位矿体定位模式探讨

矿床勘探实践表明,并非所有潜水层间氧化带中 3 个板状或透镜状铀矿体都发育。在不同构造部位,由于区域性隔水层发育特征或者是水力坡度的差异,矿体定位模式亦存在一定的差异,未发育上翼矿体或缺少下翼的矿体,甚至上、下翼矿体都不发育的现象均可见到。

在斜坡带,由于地层产状并非完全水平,再加上地下水径流区与排泄区存在水力坡度,因此,含水层内部地下水流速最快的部位往往是倾向下部隔水层(亦可以是基底)的方向,潜水层间氧化带的发育亦

倾向下部隔水层方向。据统计,当水力坡度小于 0.3 时,铀矿体可能定位于潜水层间氧化带前锋和上、下翼(图 5a)或者定位于潜水层间氧化带前锋和上翼(图 5b);当水力坡度大于 0.3 时,潜水层间氧化带上、下翼的矿体往往呆不住,可能向氧化带前锋迁移,从而仅发育潜水层间氧化带前锋的矿体(图 5c, 5d)。

在断陷带,由于砂体发育厚度太大,潜水氧化的深度仅限于当地侵蚀基准面以上部分,致使潜水层间氧化带下翼与区域性隔水层之间距离太大,对铀的富集不利,从而只发育潜水层间氧化带前锋和上翼的矿体(图 6),龙川江盆地东部断陷带某矿床勘探实践已是有力的佐证。

4 主要认识与找矿意义

4.1 主要认识

潜水层间氧化带砂岩型铀矿赋存于造山带内部发育的山间盆地内,在这种特定的构造背景下发育的山间盆地规模小,砂体发育厚度大,后生氧化作用发育不充分。典型的潜水层间氧化带除具有与层间

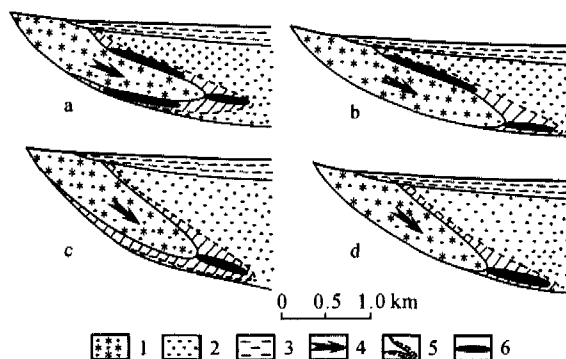


图 5 斜坡带潜水层间氧化带砂岩型铀矿体定位模式示意图

a、b 反映水力坡度小于 0.3 的情况, c、d 反映水力坡度大于 0.3 的情况

1—后生氧化透水砂岩层; 2—原生灰色透水砂岩层; 3—隔水层;
4—主要地下水流向; 5—氧化-还原过渡带; 6—铀矿体

Fig. 5 Location model of the ore body in the phreatic interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposit on the slope zone

1—Epigenetic oxidized permeable sandstone layer; 2—Original gray permeable sandstone layer; 3—Impermeable layer;
4—Direction of groundwater flow; 5—Oxidation-reduction transitional zone; 6—Uranium ore body

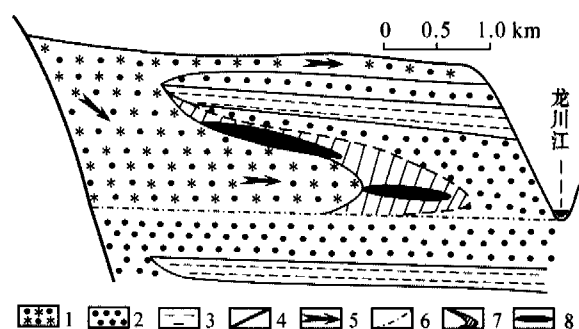


图6 断陷带潜水层间氧化带砂岩型铀矿体定位模式示意图

1—后生氧化透水砂岩层; 2—原生灰色透水砂岩层; 3—隔水层;
4—断裂构造; 5—主要地下水流向; 6—侵蚀基准面;
7—氧化-还原过渡带; 8—铀矿体

Fig. 6 Location model of the ore body in the phreatic interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposit in the rift zone

1—Epigenetic oxidized permeable sandstone layer; 2—Original gray permeable sandstone layer; 3—Impermeable layer; 4—Fault; 5—Direction of groundwater flow; 6—Erosional datum plane; 7—Oxidation-reduction transitional zone; 8—Uranium ore body

氧化带相似的舌状体前锋氧化还原界面外,在舌状体翼部亦形成上、下翼氧化还原界面,形成氧化带前锋及上、下翼3个板状或透镜状铀矿体,既不同于定位于层间氧化带前锋部位氧化还原界面附近的卷状矿体,也与定位于潜水氧化带底部氧化还原界面附近的层状、似层状矿体有所差异。

潜水层间氧化带砂岩型铀矿是一种介于潜水氧化带与层间氧化带砂岩型铀矿之间的过渡类型,如果后生氧化作用发育充分,其上、下翼的矿体将向氧化带前锋迁移,最终向层间氧化带砂岩型铀矿过渡,并形成卷状矿体。

4.2 潜水层间氧化带砂岩型铀矿找矿方法及矿床勘探注意事项

下一步找矿过程中,应充分收集前人资料,特别是深部钻孔资料,开展室内系列编图,首先确定冲积扇体的位置;其次在冲积扇体及扇前扇三角洲沉积体系砂体上开展以探索深部潜水层间氧化带发育程度与铀矿化信息为主要目的的物、化探方法,查明深部潜水层间氧化带发育程度及铀矿化信息在地表的显示程度;最后选择有利地段开展深部探索工作。

矿床勘探过程中,潜水层间氧化带上翼与前锋的铀矿体很容易被发现,然而,潜水层间氧化带下翼的铀矿体很容易被忽略。在斜坡带,潜水层间氧化带下翼的铀矿体储量往往占据矿床总储量的1/3。

因此,在斜坡带矿床勘探过程中,施工钻孔深度应考虑揭穿潜水层间氧化带下翼10~15 m为宜。

References

- Chen F Z. 2002. Metallogenic geologic prerequisites of sandstone-type uranium deposits and target areas selection[J]. *Uranium Geology*, 18(3):138~143(in Chinese with English abstract).
- Dewey J F, Shackleton R M and Ceng C. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[EB/OL]. <http://www.royalsoc.ac.uk/Phil.Trans.R.Soc.Lond.A327:379~416>.
- Ji J Q, Zhong D L and Zhang L S. 2000. Kinematics and dating of Cenozoic strike-slip faults in the Tengchong area, western Yunnan: Implications for the block movement in the southeastern Tibet plateau[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(3):336~349(in Chinese with English abstract).
- Li G X, Sun Z X, Yao Y F and Huang D Y. 2003. Analysis on metallogenic conditions and prospect of sandstone-type uranium deposits in meso-cenozoic basin, Bayinbaolige uplifted zone[J]. *Uranium Geology*, 19(3):123~132(in Chinese with English abstract).
- Li S X, Chen Z B, Chen Z Y, Xiang W D and Cai Y Q. 2001. Application potential of sequence stratigraphy to prospecting for sandstone-type uranium deposits in continental depositional basins[J]. *Uranium Geology*, 17(4):204~215(in Chinese with English abstract).
- Liu W S, Wang Z B and Xie Y X. 2004. New understanding of ore-formation of in-situ leachable sandstone-type uranium deposits in Erlan basin[J]. *Uranium Geology*, 20(2):65~70(in Chinese with English abstract).
- Liu H X, Guo H and Wei S Y. 2004. Tectonic evolution of Chagannuoer basin and its relationship to uranium metallogenetic process[J]. *Uranium Geology*, 20(6):344~351(in Chinese with English abstract).
- Sun Z X. 2000. Regional metallogenic prognostic criteria of sandstone-type uranium deposits in Cenozoic basins in western Yunnan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 20(3):212~215(in Chinese with English abstract).
- Sun Z X, Li G X, He F Y and Wei Y J. 2002. Analysis on depositional system and prospect of sandstone-type uranium deposits of Bayanhua formation in Yilemen basin[J]. *Uranium Geology*, 18(1):22~27(in Chinese with English abstract).
- Sun Z X, Li G X, Yao Y F and Huang D Y. 2002. Regional geologic-tectonic evolution and its relationship to sandstone-type uranium deposits in Shama area[J]. *Uranium Geology*, 19(4):195~205(in Chinese with English abstract).
- Sun Z X and Yao Y F. 2004. The types and prediction of regional metallogenic criteria of sandstone-type uranium deposits in meso-cenozoic basins, Bayinbaolige uplifted zone[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(4):43~48(in Chinese with English abstract).
- Zhu M Q, Wu R G, Yu D G, Chen A P and Shen K F. 2003. Characteristics of uranium mineralization and depositional system of Host sediments, Bayantala basin, Inner Mongolia Autonomous region[J].

- Journal of East China Geological Institute, 26(3):208~216(in Chinese with English abstract).
- Zhu X Y, Peng X J, Wang Y L, Zhang C J, Wang Z C, Wang J P and Liu J H. 2004a. Isotope geochemistry of Shihongton interlayer oxidized zone type sandstone uranium deposit[J]. Mineral Deposits, 23(4): 443~451(in Chinese with English abstract).
- Zhu X Y, Sun Z X, Chen H D, Hou M C and LI G X. 2004b. Characteristics of sedimentary system and sandstone-type uranium mineralization in Longchuanjiang basin, western Yunnan[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 31(3): 267~272(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈法正. 2002. 砂岩型铀矿的成矿地质条件与战略选区[J]. 铀矿地质, 18(3): 138~143.
- 季建清, 钟大赉, 张连生. 2000. 滇西南新生代走滑断裂运动学、年代学及对青藏高原东南部块体运动的意义[J]. 地质科学, 35(3): 336~349.
- 李国新, 孙泽轩, 姚毅锋, 黄大友. 2003. 巴音宝力格隆起带中新世代盆地砂岩型铀矿成矿条件及远景分析[J]. 铀矿地质, 19(3): 123~132.
- 李胜祥, 陈肇博, 陈祖伊, 向伟东, 蔡煜琦. 2001. 层序地层学在陆相沉积盆地内砂岩型铀矿找矿中的应用前景[J]. 铀矿地质, 17(4): 204~215.
- 刘红旭, 郭 华, 卫三元. 2004. 查干诺尔盆地构造演化与铀成矿作用关系[J]. 铀矿地质, 20(6): 344~351.
- 刘武生, 王正邦, 谢佑新. 2004. 二连盆地可地浸砂岩型铀成矿的再认识[J]. 铀矿地质, 20(2): 65~70.
- 孙泽轩. 2000. 滇西新生代盆地砂岩铀矿区域预测判据[J]. 四川地质学报, 20(3): 212~215.
- 孙泽轩, 李国新, 何发扬, 魏云杰. 2002. 伊勒门盆地巴彦花组沉积体系及砂岩型铀矿找矿远景分析[J]. 铀矿地质, 18(1): 22~27.
- 孙泽轩, 李国新, 姚毅锋, 黄大友. 2003. 沙麦地区区域地质构造演化及其与砂岩型铀矿的关系[J]. 铀矿地质, 19(4): 195~205.
- 孙泽轩, 姚毅锋. 2004. 巴音宝力格隆起带中新世代盆地砂岩铀矿类型及区域预测判据[J]. 矿物岩石, 24(4): 43~48.
- 祝民强, 吴仁贵, 余达淦, 陈安平, 申科峰. 2003. 内蒙古巴彦塔拉盆地砂岩型铀矿地质特征与主沉积物体系归属[J]. 华东地质学院学报, 26(3): 208~216.
- 朱西养, 彭新建, 汪云亮, 张成江, 王志畅, 王金平, 刘建华. 2004a. 新疆十红滩层间氧化带型砂岩铀矿同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 23(4):443~451.
- 朱西养, 孙泽轩, 陈洪德, 侯明才, 李国新. 2004b. 滇西龙川江盆地沉积体系特征与砂岩铀矿成矿[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(3): 267~272.