

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.015

伊犁盆地南缘构造活动及对砂岩型铀矿的制约： 来自磷灰石裂变径迹与 U-Pb 定年的证据

丁波^{1,2}, 刘红旭^{1,2}, 李平^{1,2}, 蒋宏³, 张虎军³, 张宾^{1,2}

- (1. 中核集团铀资源勘查与评价重点实验室, 北京 100029;
2. 核工业北京地质研究院, 北京 100029;
3. 核工业二一六大队, 新疆 乌鲁木齐, 830011)

摘要: 为了探讨伊犁盆地南缘构造活动与铀成矿关系, 通过采取砂岩型铀矿含矿层砂岩样品, 利用磷灰石裂变径迹热年代学与 U-Pb 等时线定年的方法, 对伊犁盆地南缘构造活动与砂岩型铀矿成矿年龄进行了研究。研究结果表明: ①伊犁盆地南缘自中生代以来经历了三期强烈的隆升—剥蚀事件, 三叠纪末—中侏罗世、晚侏罗世—早白垩世、中新世—现今, 对应印支末期、燕山期与喜马拉雅期三期构造活动; ②盆地南缘中—西段砂岩型铀矿成矿年龄可分为 158 ~ 153 Ma、108 ~ 60.5 Ma、55 ~ 15 Ma, 12 ~ 0.3 Ma 四期, 盆地东段铀成矿年龄比较新, 为 7.8 ~ 5.5 Ma 之间; ③盆地南缘构造活动时间与铀成矿年龄具有非常好的对应性, 将伊犁盆地南缘铀成矿作用过程划分为三个阶段, 物源区快速抬升—含矿建造形成期及铀的预富集阶段、主成矿阶段、后生叠加改造阶段。

关键词: 伊犁盆地南缘; 构造活动; 磷灰石裂变径迹; 砂岩型铀矿

中图分类号: P619.14

文献标识码: A

THE TECTONIC ACTIVITY IN THE SOUTHERN MARGIN OF THE ILI BASIN AND ITS CONSTRAINT ON SANDSTONE-TYPE URANIUM DEPOSITS: EVIDENCE FROM APATITE FISSION TRACK AND U-PB DATING

DING Bo^{1,2}, LIU Hongxu^{1,2}, LI Ping^{1,2}, JIANG Hong³, ZHANG Hujun³, ZHANG Bin^{1,2}

- (1. CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Techniques, Beijing 100029, China;
2. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;
3. Geological Party No. 216, CNNC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: In order to explore the relationship between the tectonic activity and uranium mineralization in the southern margin of Ili basin, the method of apatite fission track and U-Pb dating was used to ascertain

基金项目: 国家科技部 973 计划项目 (2015CB453004); 中核集团集中研发项目“伊犁盆地南缘东段砂岩型铀矿定位预测与靶区优选 (地 LTD1612-4); 国防预研项目 (3210402)

作者简介: 丁波 (1991-), 男, 助理工程师, 研究方向: 矿产普查与勘探。E-mail: 18773485100@163.com

通讯作者: 刘红旭 (1977-), 男, 研究员, 主要从事砂岩型铀矿成矿作用、成矿规律以及成矿预测等方面的研究工作。E-mail: lhx100029@163.com

引用格式: 丁波, 刘红旭, 李平, 等. 伊犁盆地南缘构造活动及对砂岩型铀矿的制约: 来自磷灰石裂变径迹与 U-Pb 定年的证据 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (S1): 084-089 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.015

DING Bo, LIU Hongxu, LI Ping, et al. The tectonic activity in the southern margin of the Ili basin and its constraint on sandstone-type uranium deposits: evidence from apatite fission track and U-Pb dating [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (S1): 084-089 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.015

the tectonic activity and metallogenic age of sandstone-type uranium deposits by adopting the sandstone sample of the ore bearing layer. The above research can draw some conclusions. Firstly, the southern margin of Ili basin experienced three periods of intense uplift and denudation, which were the late Indosinian tectonic activity from late Triassic to middle Jurassic, Yanshanian tectonic activity from late Jurassic to early Cretaceous and Himalayan period tectonic activity from Miocene to present respectively. Secondly, the metallogenic age of sandstone-type uranium deposits in the middle-west section of the southern margin of the basin can be divided into four stages: 158 ~ 153 Ma, 108 ~ 60.5 Ma, 55 ~ 15 Ma and 12 ~ 0.3 Ma, while the metallogenic age of sandstone-type uranium deposits in the east section was relatively new, ranging from 7.8 to 5.5 Ma. Thirdly, the tectonic activity and the metallogenic age of sandstone-type uranium deposits in the southern margin of the basin have a good correspondence. The process of uranium mineralization can be divided into three stages: rapid uplift of the source area-the formation stage of ore-bearing construction and the pre-enrichment stage of uranium, pre-enrichment, the primary mineralization and post-superimposition reconstruction stage.

Key words: southern margin of the Ili basin; tectonic activity; apatite fission track; sandstone-type uranium deposit

0 引言

已有研究认为砂岩型铀矿的形成是多种控矿要素(包括构造、古气候、岩性-岩相、地下水等)综合控制的结果^[1]。其中构造要素是铀成矿作用的主控要素,贯穿于盆地演化与铀成矿作用的各个环节,通过控制铀源、古气候、沉积建造、补—径—排水动力系统、后生改造等来影响铀成矿过程,故认为构造活动是控制铀成矿最为关键的因素。

伊犁盆地是中国西北部重要的能源基地之一,盆地南缘斜坡带亦是新疆地区重要的煤炭基地和砂岩型铀矿产地,其中已发现的铀矿床皆处于盆地南缘中—西段,东段至今还没有较大的突破^[2-4]。相关学者对伊犁盆地南缘中生代构造演化进行了研究,认为盆地南缘经受多期次的构造抬升剥蚀事件,控制了盆地南缘砂岩型铀矿的形成^[5-7],但是对盆地南缘东西段构造差异演化与铀矿成矿内在关系研究相对较少。因此,文章通过采取伊犁盆地南缘东段含矿层砂岩样品,利用裂变径迹热年代学方法反演伊犁盆地南缘的构造活动时间与期次,结合铀成矿年龄的研究,查明伊犁盆地南缘构造活动与铀成矿之间的时空配置关系,为该区后续铀矿勘查部署提供帮助。

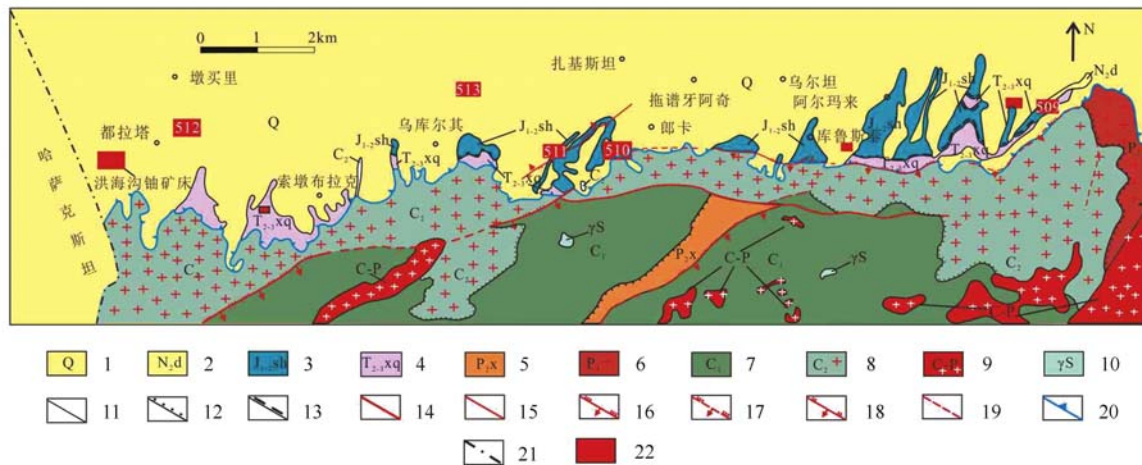
1 成矿地质概况

伊犁盆地是在石炭纪—二叠纪裂谷基础上发

展演化而成的内陆中生代山间断陷—坳陷复合型盆地,呈西宽东窄的三角形夹持于天山造山带内(中国境内段),归属哈萨克斯坦—准噶尔板块南部中天山隆起带中的伊犁—中天山微地块^[8-9]。伊犁盆地铀矿床主要位于狭义的伊犁盆地南部斜坡带之上,自西向东发育有洪海沟、库捷尔太(512)、乌库尔其(513)、扎吉斯坦(511)、蒙古古尔(510)等铀矿床,皆为典型的层间氧化带型。上述铀矿床组成东西长约 70 km 的铀成矿带,是中亚地区南巴尔喀什—伊犁铀矿省的重要组成部分(图 1)。该铀成矿带含矿层为中下侏罗统灰色含煤碎屑岩沉积建造,发育冲积扇、河流沉积,其中工业铀矿化分别赋存于八道湾组(J_1b)、三工河组(J_1s)、西山窑组(J_2x)和头屯河组(J_2t)砂体中(图 2)^[8]。

2 样品采集与分析测试结果

3 个磷灰石裂变径迹所用砂岩样品皆取自伊犁盆地南缘东段砂岩型铀矿含矿层,其中 Apf-31 为钻孔灰白色致密细砂岩,而 Apf-30 与 Apf-33 皆为地表出露的粗砂岩。磷灰石单矿物挑选在北京大学岩矿实验室完成;磷灰石裂变径迹的测试在中科院高能物理研究所完成。具体实验操作流程见文献[10]。 ζ 常数法径迹年龄计算过程采用的磷灰石的 Zeta 常数为 353 ± 10 。测试结果如表 1 所示。文章磷灰石裂变径迹的封闭温度采用 $(110 \pm 10)^\circ\text{C}$,部分退火带温度为 $60 \sim 120^\circ\text{C}$,年龄误差 $\pm 1\sigma$ 。



- 1—第四系松散堆积物；2—新近系上新统独山子组褐色砂质泥岩；3—中—下侏罗统水西沟群灰色砂砾岩、含砾粗砂岩；
- 4—中—上三叠统小泉沟群灰色、杂色砂砾岩及泥岩；5—上二叠统晓山萨依组灰岩夹砂砾岩；6—下二叠统中—酸性火山岩；
- 7—下石炭统深灰色碳酸盐；8—上石炭统中—酸性火山岩；9—石炭纪—二叠纪花岗岩；10—海西晚期侵入辉长岩；
- 11—整合地质界线；12—角度不整合地质界线；13—平行不整合地质界线；14—区域性大断裂；15—一般断裂；
- 16—逆冲断裂；17—推测逆冲断裂；18—逆断层；19—推测断层；20—盆地边界；21—国界线；22—铀矿床

图1 伊犁盆地南缘铀矿地质图简图^[8]

Fig. 1 A brief geological map of uranium deposits in the southern margin of the Ili basin^[8]

表1 伊犁盆地南缘东段砂岩型铀矿含矿层砂岩中磷灰石裂变径迹分析数据一览表

Table 1 The table of apatite fission track analysis data in ore-bearing sandstone of sandstone-type uranium deposits in the southern margin area of the Ili basin

样品编号	取样位置	层位	岩性	颗粒数 (n)	$\rho_d(N_d)$ / $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$	$\rho_s(N_s)$ / $\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$	$\rho_i(N_i)$ / $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$	U / $\times 10^{-6}$	$P(\chi^2)$ /%	平均年龄 /Ma ($\pm 1\sigma$)	径迹平均长度 (N)/ μm
Apf-30	苏阿苏沟	$J_{1-2}sh$	灰白色 细砂岩	27	1.013 (2534)	0.435 (84)	7.009 (13527)	86.5	80.3	1.1 ± 0.1	12.63 ± 0.25 (56)
Apf-31	苏阿苏沟	$J_{1-2}sh$	灰白色 粗砂岩	24	1.003 (2508)	5.243 (1088)	0.861 (1787)	10.7	0.3	117.7 ± 7.1	11.77 ± 0.15
Apf-33	达拉地	$J_{1-2}sh$	黄色 粗粒砂	25	0.982 (2456)	7.420 (1087)	0.915 (1341)	11.7	28.9	139.0 ± 7.5	12.39 ± 0.14

注：测试在中科院高能物理研究所完成；当 $P(\chi^2) > 5\%$ 时，取池年龄进行年龄数据解释； $P(\chi^2) < 5\%$ 时，取平均年龄进行年龄数据解释。

3 伊犁盆地南缘裂变径迹反映的隆升—剥蚀和构造活动

结合文献 [5] 研究成果表明 (图 3)，盆地南缘西段含矿层整体经历了四期的热演化历史 (图 1)：①203 ~ 167 Ma，物源区快速隆升—剥蚀事件；②167 ~ 145 Ma，含矿建造形成与埋藏过程，经历了一段时间的退火作用；③145 ~ 75 Ma，盆地整体抬升—剥蚀事件，导致了伊犁盆地南缘西段大范围缺失上侏罗统和白垩系；④12 ~ 0 Ma，含矿层抬升—剥蚀事件，因察布查尔山再次隆起导

致盆缘快速抬升。

伊犁盆地南缘东段样品的磷灰石裂变径迹反演结果表明，盆地南缘东段整体经历四期的热演化历史 (图 3)：① 240 ~ 175 Ma，物源区隆升—剥蚀事件；② 175 ~ 145 Ma，含矿建造形成与埋藏过程，经历了一段时间的退火作用；③ 145 ~ 75 Ma，盆地整体抬升—剥蚀事件，导致了伊犁盆地南缘东段大范围缺失上侏罗统和白垩系；④ 12 ~ 0 Ma，因察布查尔山再次隆起导致盆缘地区快速抬升。此外，有部分样品记录了 5 ~ 0 Ma 快速抬升—剥蚀事件，与盆地南缘东段构造活动明显强于西段是相符的。

综合上述研究得出伊犁盆地南缘自中生代以

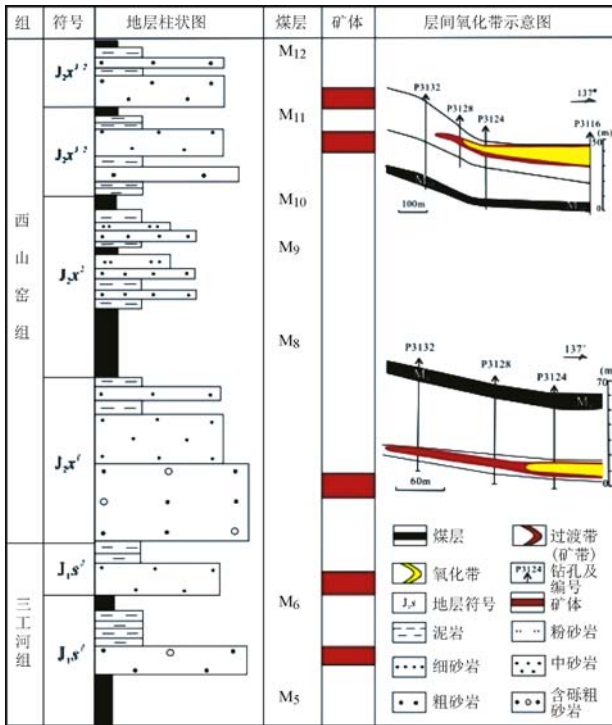


图 2 伊犁盆地南缘砂岩型铀矿含矿层柱状图^[8]

Fig. 2 The column-map of sandstone-type uranium deposits in the southern margin area of the Ili basin^[8]

来主要分为三期强烈的隆升—剥蚀事件：①三叠纪末—中侏罗世、②晚侏罗世—早白垩世、③中新世—现今，对应的印支末期、燕山期与喜马拉雅期三期构造活动，需要强调的是伊犁盆地南缘东西段构造演化存在差异是喜马拉雅期构造活动的结果，东段活动强度与抬升幅度明显高于西段，这也是造成盆地东西段砂岩型铀矿存在差异的原因。

4 伊犁盆地砂岩型铀矿成矿年龄

结合相关学者应用 U-Pb 等时线定年的方法对伊犁盆地南缘砂岩型铀矿成矿年龄的研究资料表明铀矿成矿作用具有明显的阶段性和继承性，其持续时间长（中生代到新生代），具有多期成矿、叠加富集的特点，具体的铀成矿年龄如表 2^[2,11-13]，由于盆地南缘东西段构造活动的差异，导致东西段铀矿床成矿年龄存在差异，中—西段砂岩型铀矿成矿年龄可分为 158 ~ 153 Ma、108 ~ 60.5 Ma、55 ~ 15 Ma，12 ~ 0.3 Ma 四期，而盆地东段铀成矿年龄比较新，为 7.8 ~ 5.5 Ma 之间。

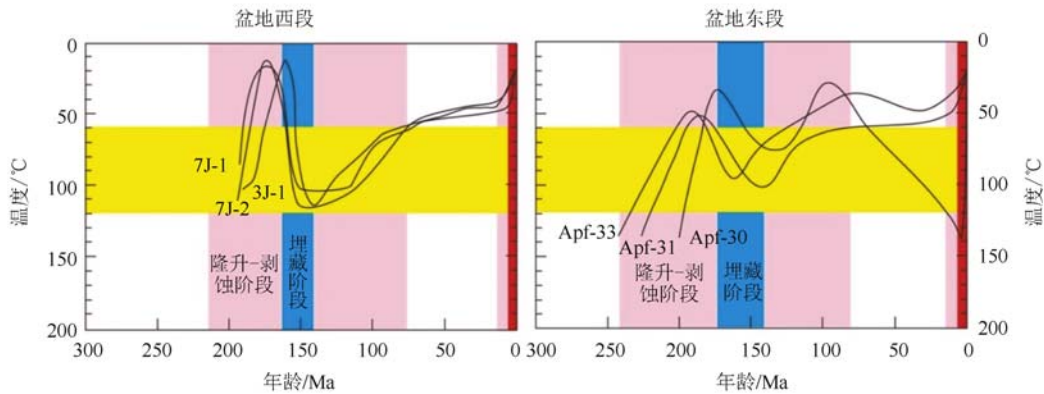


图 3 伊犁盆地南缘砂岩型铀矿含矿层磷灰石裂变径迹反演结果

Fig. 3 The apatite fission track inversion results of sandstone-type uranium deposit in the southern margin of the Ili basin

表 2 伊犁盆地南缘典型砂岩型铀矿床成矿年代表/Ma

Table 2 Metallogenic ages of sandstone-type uranium deposits in the southern margin area of the Ili basin/Ma

矿床名称	J ₃	K	E ₁	E ₂	E ₃	N ₁	N ₂	Q ₁₋₃	Q ₄	数据来源
洪海沟								0.6		刘旭等 ^[2]
库捷尔太 (512)		108 ~ 69		51 ~ 25		19, 12 ~ 3		2 ~ 0.7		秦明宽 ^[12] ; 夏毓亮等 ^[13] ; 夏毓亮等 ^[13]
乌库尔其 (513)						12 ~ 2				刘旭等 ^[2]
扎吉斯坦 (511)				60.5 ~ 30, 25 ~ 15, 12 ~ 0.3						夏毓亮等 ^[13]
蒙其古尔 (510)	158 ~ 153	82	55		28.3 ~ 12.1, 9.2 ~ 5.1, 3.8 ~ 2.6					刘旭等 ^[2]
达拉地 (509)						7.8 ~ 5.5				朱杰辰 ^[11] ; 夏毓亮等 ^[13] ; 夏毓亮等 ^[13]

5 伊犁盆地构造活动对砂岩型铀矿的制约

结合上述盆地构造活动与铀成矿年龄的研究,以构造演化为主线,大体可将伊犁盆地南缘铀成矿作用过程划分为三个阶段:物源区快速抬升—含矿建造形成期及铀的预富集阶段、主成矿阶段、后生叠加改造阶段,而伊犁盆地南缘东西段铀成矿差别主要集中后生改造阶段,具体如下所述。

(1) 含矿建造形成期及铀的预富集阶段

晚三叠世,受印支晚期构造运动的影响,物源区发生快速抬升—剥蚀,为盆地含矿建造的形成提供了充足的物源。此外,伊犁地区古气候开始由干旱—半干旱性气候向温湿性气候转变;至早中侏罗世,随着盆地的伸展断陷,在盆地内沉积了一套灰色含煤碎屑岩系,发育形成了多套泥(煤)—砂—泥(煤)岩性结构的韵律层,砂体中多富含大量有机质碎屑及黄铁矿等还原性物质,同时也伴随着铀的早期沉积预富集作用,这为后期铀的富集准备了良好的容矿建造和充足的还原剂及吸附剂。

(2) 主成矿阶段

晚白垩世—古近纪,受燕山晚期构造运动的影响,使得伊犁盆地整体处于弱挤压条件下,造成盆缘地层抬升掀斜,中下侏罗统逐渐出露地表并遭受剥蚀及淋滤改造,并造成下白垩统(K_1)乃至上侏罗统(J_3)在盆缘地段大面积缺失,形成 J_3/K_2 之间区域性不整合面,可作为主成矿阶段开始的标志。随着地质构造活动的发展,上白垩统与新近系覆盖于中下侏罗统之上,来自南部蚀源区的含铀含氧承压水渗入到层间砂体中,形成大规模层间氧化带,这一阶段为主成矿阶段,与铀矿年龄108~60.5 Ma、55~15 Ma是相对应。

(3) 后生叠加改造阶段

新近系以来,受喜马拉雅山构造运动的影响,印度板块与欧亚板块碰撞拼接远程效应,造成察布查尔山发生强烈隆升,伊犁盆地南缘在东西方向上表现出明显的构造差异。盆地中西段在此时依旧保持稳定的斜坡带,此时的铀成矿作用属于弱构造背景下的继承性叠加富集成矿,早期形成的铀矿化在蚀源区含铀含氧水的改造作用下,不断向盆地内部迁移改造。此外,盆缘逆冲挤压作

用致使含矿层中形成大量的裂隙及层间小断层,这为含矿层顶底板煤层中的煤成气等还原性流体的渗出提供了良好的运移通道,极大的增加了目的层砂体的还原容量,从而形成巨大的地球化学反差,使得铀快速沉淀富集,在局部残留矿体以及层间氧化带前锋线附近形成富大矿体,与测得的12~0.3 Ma铀矿年龄是相符合的。而在盆地东中东段蚀源区与含矿层强烈隆升,蚀源区老地层向上覆地层的逆冲,这在一定程度上阻隔了蚀源区含氧含铀水对含矿目的层的渗入改造,造成铀成矿停止;含矿层大幅度强烈抬升剥蚀,可能造成伊犁盆地南缘东段前期已形成的矿体遭受剥蚀,形成富铀地下水向盆地中运移,被煤层吸附还原可形成煤岩型铀矿,如达拉地煤岩型铀矿床,这也与7.8~5.5 Ma成矿年龄是相符合的,这也可能是造成伊犁盆地东段至今还未突破的原因。

参考文献/References

- [1] 黄世杰. 层间氧化带砂岩型铀矿的形成条件及找矿判据[J]. 铀矿地质, 1994, 10(1): 6-13.
HUANG Shijie. Formation conditions and prospecting criteria for sandstone uranium deposit of interlayered oxidation type [J]. Uranium Geology, 1994, 10(1): 6-13. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘红旭, 张晓, 丁波, 等. 伊犁盆地南缘砂岩型铀成矿模式与找矿方向[J]. 铀矿地质, 2015, 31(S1): 198-205, 212.
LIU Hongxu, ZHANG Xiao, DING Bo, et al. Metallogenic model and prospecting orientation of sandstone type uranium deposits in the southern margin of Yili basin [J]. Uranium Geology, 2015, 31(S1): 198-205, 212. (in Chinese with English abstract)
- [3] 韩效忠, 李胜祥, 郑恩玖, 等. 伊犁盆地新构造运动与砂岩型铀成矿关系[J]. 新疆地质, 2004, 22(4): 378-381.
HAN Xiaozhong, LI Shengxiang, ZHENG Enjiu, et al. Neotectonic activity characteristics of Yili Basin and its relation to the formation of sandstone-type uranium deposits [J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(4): 378-381. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王勇, 陈正乐, 刘健. 伊犁盆地南部新构造特征及其对砂岩型铀矿的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(4): 486-494.
WANG Yong, CHEN Zhengle, LIU Jian. Neotectonics in southern Yili basin and its control of sandstone-type uranium deposits [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(4): 486-494. (in Chinese with English abstract)
- [5] 宫红良, 陈正乐, 胡远清, 等. 伊犁盆地白垩纪剥露事件的

- 裂变径迹证据 [J]. 地质力学学报, 2007, 13 (1): 42 - 50.
- GONG Hongliang, CHEN Zhengle, HU Yuanqing, et al. Cretaceous denudation of the Ili basin as revealed by fission-track thermochronology [J]. Journal of Geomechanics, 2007, 13 (1): 42 - 50. (in Chinese with English abstract)
- [6] 韩效忠, 李胜祥, 蔡煜琦, 等. 伊犁盆地南缘隆升剥蚀及其盆地南部的沉积响应 - - 利用磷灰石裂变径迹分析 [J]. 岩石学报, 2008, 24 (10): 2447 - 2455.
- HAN Xiaozhong, LI Shengxiang, CAI Yuqi, et al. Uplift-denudation in the south margin and its sedimentary response in the southern Yili basin; analysis apatite fission track method [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (10): 2447 - 2455. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王军堂, 王成渭, 冯世荣. 伊犁盆地盆 - 山构造演化及流体演化与砂岩型铀矿成矿的关系 [J]. 铀矿地质, 2008, 24 (1): 38 - 42.
- WANG Juntang, WANG Chengwei, FENG Shirong. Structure and fluid evolution of Yili basin and their relation to sandstone type uranium mineralization [J]. Uranium Geology, 2008, 24 (1): 38 - 42. (in Chinese with English abstract)
- [8] 丁波. 蒙古古尔铀矿床烃类逸散过程中流 - 岩反应及与铀成矿关系 [D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2017.
- DING Bo. The interaction between fluid and rock and its relation with the uranium metallogenetic in the process of oil-gas escaping in Mengqiguer Uranium Deposit [D]. Beijing: Beijing Resources Institute of Uranium Geology, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张国伟, 李三忠, 刘俊霞, 等. 新疆伊犁盆地的构造特征与形成演化 [J]. 地学前缘, 1999, 6 (4): 203 - 214.
- ZHANG Guowei, LI Sanzhong, LIU Junxia, et al. Structural feature and evolution of Yili basin, Xinjiang [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6 (4): 203 - 214. (in Chinese with English abstract)
- [10] 周祖翼. 低温年代学: 原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- ZHOU Zuyi. Low temperature thermochronology: principles & applications [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [11] 朱杰辰. 新疆一些铀矿成矿时代特征 [J]. 铀矿地质, 1987, 3 (3): 184 - 190.
- ZHU Chenjie. Characteristics of metallogenetic epoch of some uranium deposits in Xinjiang [J]. Uranium Geology, 1987, 3 (3): 184 - 190. (in Chinese)
- [12] 秦明宽. 新疆伊犁盆地南缘可地浸层间氧化带型砂岩铀矿床成因及定位模式 [D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 1997.
- QIN Mingkuan. Genesis and localization model of sandstone uranium deposit of in - situ leachable interlayered oxidation zone type in the southern Margin of Yili Basin [D]. Beijing: Beijing Resources Institute of Uranium Geology, 1997. (in Chinese)
- [13] 夏毓亮, 林锦荣, 刘汉彬, 等. 中国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学研究 [J]. 铀矿地质, 2003, 19 (3): 129 - 136, 160.
- XIA Yuliang, LIN Jinrong, LIU Hanbin, et al. Research on geochronology of sandstone - hosted uranium ore - formation in major uranium-productive basins, northern China [J]. Uranium Geology, 2003, 19 (3): 129 - 136, 160. (in Chinese with English abstract)