外生后成渗入型铀矿床的形成模式及其找矿前景

Forming Model and Prospecting Potential of Exgenetic Epigenetic Interstratal Infiltration Uranium Deposits

赵凤民

（核工业北京地质研究院，北京 100029）

Zhao Fengmin

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

摘 要 本文综合分析了国外关于外生后成渗入型铀成矿作用的模式，系统地论述了预成矿阶段、成矿阶段、成矿后阶段等铀成矿作用过程中的地质、水文地质和地球化学等方面的成矿要素。在此基础上，详细地分析了我国中新生代沉积盆地形成外生后成层间渗入型铀资源的潜力，并指出外生后成渗入型铀成矿作用是一个长期发育、多种地质因素综合作用的复杂过程。提出了中-下侏罗统、下白垩统和第三系砂岩层为我国主要的赋矿层位，以及昆仑—秦岭以北地区的成矿条件比南部地区有利、大兴安岭—太行山一线以西的中新生代沉积盆地比其东部盆地更具成矿远景的结论。

关键词 外生后成渗入型铀成矿作用 成矿模式 找矿前景

外生后成渗入型铀矿床指在表生渗入水的作用下形成的铀矿床。表生渗入作用可分为潜水渗入、裂隙渗入和层间渗入，并且都可能伴随铀成矿作用，其中层间渗入作用形成的铀矿床储量大、经济性能好，在中亚地区产有世界上最大的外生后成层间渗入型铀成矿省。上世纪 60 年代末地浸采矿工艺试验成功，该方法将原来品位低等不利因素变为有利因素，简化了采矿的工艺程序、降低了对环境的破坏和污染程度，从而使铀产品的成本大幅度降低。该类型铀资源也一跃而成为最具有经济价值的铀资源之一。同时，随着地浸工艺的不断改进和完善，矿体的边界铀品位也不断降低，有的矿床铀边界品位已降到了 0.01%以下，预计有可能降到 0.005%，使原来的矿化围岩变成了矿石，矿床的铀资源量大幅度增加。在中亚地区已探明了一批铀资源量为几万吨级、甚至几十万吨级的矿床；另外，该类型矿床还伴生有钼、铼、硒、钒、钪、钇及一些镧族元素，其中一些元素在浸出铀时可顺便浸出，其他一些元素只要对地浸工艺作适当的改进也可浸出，所有这些元素的价值几乎与铀相当。独联体国家已在探讨该类型矿床的综合利用问题（Лаверов и др.，1998）。我国从上世纪 90 年代开始，已将寻找外生后成渗入型铀资源作为铀矿找矿重点，并已在伊犁盆地、吐哈盆地等地区取得了突破性进展。在伊犁盆地成功地建立了地浸采矿工艺系统，取得了很好的经济效益。本文就外生后成层间渗入型成矿有关问题进行讨论。

1 外生后成渗入层间型铀矿床的成矿模式

独联体国家和美国对该类型铀成矿作用进行了广泛的研究，近年来我国铀矿地质工作者结合中国的具体情况也进行了深入的探讨。通过对国内外资料的综合分析，认为外生后成层间渗入型铀成矿也像其他类型铀成矿作用一样，是地壳不断演化过程中特定条件下的产物，是一个长期的过程，可以分为预成矿阶段、成矿阶段、成矿后阶段等 3 个阶段(图 1)。

1.1 预成矿阶段

预成矿阶段又可划分为两个亚阶段：盆地基底演化亚阶段和盆地赋矿层形成亚阶段。从目前的资料看，已知该类型铀矿床都产于经受多次构造岩浆活化的地体上。这些地体最大的地化特征是岩石铀的丰度值明显高于克拉克值，而且同时发育有各种成因类型的铀矿床。这是形成外生后成层间渗入型铀矿化的铀源基础。国外有的学者认为，对于在大型盆地(楚-萨雷

作者简介 赵凤民，男，1937 年生，研究员，长期从事铀矿地质和勘查领域的科研与战略决策工作。

苏盆地)中远离盆缘形成的该类型矿床，蚀源区的铀源不起主要作用，铀主要来自赋矿层本身。对赋矿层的不同的地球化学岩石类型的铀含量分析结果表明(表 1)，黑色和灰色岩石在成矿过程中确有铀的析出，而浅色和红色岩石则没有（Анкудинов и др.，1988)。实际上楚-萨雷苏盆地矿化带与盆缘之间主要为浅色岩石和红色岩石，不能作为成矿的主要铀源，而且黑色、灰色岩石的铀严格的讲也是来自于蚀源区；在成矿作用时盆地周围的蚀源区也是层间水的补给区，是大气降水和岩石首先作用的地区，分析表明岩石中的铀有明显的丢失。达尔马托夫矿床蚀源区流纹岩风化壳中铀丢失达 60%，伊犁盆地南缘蚀源区花岗岩铀的丢失平均达 44.3%，这些丢失的铀正是铀成矿的主要来源。可见，形成一个富铀的盆地基底是形成外生后成层间渗入型铀矿化的基础。

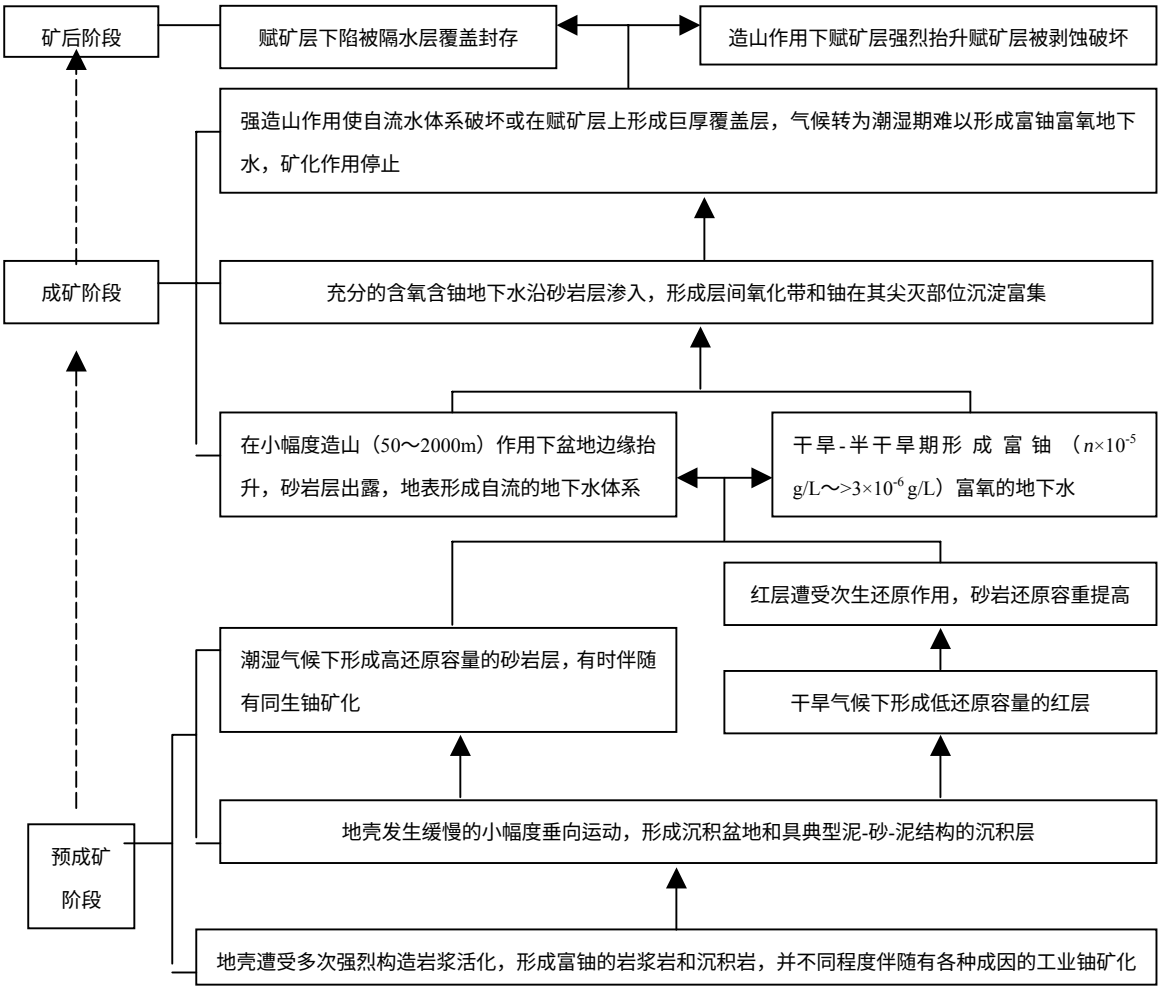


图 1　外生后成层间渗入型铀矿形成的地质演化模式

表 **1**　不同地球化学类型沉积岩中铀的平均含量($w_U/10^{-6}$)

地化类型	陆　地			滨　海				浅、深 海	
	山麓相	冲积平原相		水下三角洲相		浅滩相		浅海相	深海相
		河床	河漫滩	前三角洲	三角洲前缘	周期性干旱区	滨海		
黑色岩石		6.1	7.4	5.8	7.4	7.1	5.6		4.1
灰色岩石		4.8	5.6	5.0	5.6		5.1	2.6	
绿色岩石				2.4		2.2		1.9	
白色岩石	1.7	2.0					1.4		
红色岩石		1.4	2.0			1.8			
层间氧化岩石		2.0	4.7	1.5	4.7		2.9	1.5	

外生后成层间渗入型矿化可产于各种成因和规模的盆地之中，但是其赋矿层位都具有典型的泥-砂-泥结构，主要为河流相、三角洲相和滨海相。砂体以在空间上大而稳定，厚度小和具多韵律层为特征。在中亚的中央克孜尔库姆成矿省南部的泽拉布

拉克矿区赋矿的 K_{1-2} 岩层总厚度为 109～880 m，其中有 16 层赋矿砂体；在北部的布肯套矿区赋矿的 K_2 岩层总厚度 140～440 m，其中有 12 层赋矿砂体。这种稳定的泥-砂-泥结构多形成于远离造山带相对稳定的构造背景下，是地壳小幅度垂向运动或海侵海退的产物。中亚地区的赋矿砂岩层形成于年轻地台上的盆地边缘。应该指出，形成泥-砂-泥结构的地段往往也是同生富铀砂体容易形成的地方，故有时伴随同生铀的富集。在一些垂向差异运动强烈的盆地，虽然也可以形成泥-砂-泥的结构层，但在空间上相变快、砂体厚度变化大、泥岩层在空间上不稳定，从而影响渗入成矿作用的发育而不利于成矿。

1.2 铀成矿阶段

层间渗入铀成矿作用由以下几个过程组成：在盆地中形成承压自流的水动力机制；自流水补给区铀元素被浸出和随地下水沿砂岩层迁移；在层内地化学障附近铀元素沉淀富集。

自流水机制的形成首先是盆地周边小幅度抬升使砂岩层出露地表，大气降水能够渗入，与此同时在地下水渗入方向的前方发育地下水的排泄通道，这一般为穿沉积盖层断裂、下切古河道等。这种地带往往处于造山带和稳定地体之间，俄罗斯专家一般将该区称做次造山带或构造活化区。其地貌特征是地形高差在 500～2000 m 之间。在造山带内或其前缘垂向差异较大，并伴随有褶皱和断裂产生，不利于形成良好的自流水机制；在盆地大幅度坳陷和沉积巨厚新的沉积层时，地下水的渗入机制则可变为渗出机制。在划分有利构造活化区时，要注意造山作用的演化史，这对造山带广泛发育的中国更加重要，现在的造山带在其发展的某个时期也可能属于有利成矿的构造活化区。

铀在自然界呈四价和六价状态。六价铀在水溶液中易变为铀酰离子团(UO_2^{2+})，可形成各种溶于水的铀酰络合物而随水溶液迁移。所以铀活化迁移的条件是出现一个氧化的环境，这要求大气氧不仅在地表参与铀元素的氧化，而且部分要随水进入层间水系统，保障水溶液处于氧化状态使铀能够向深部迁移。成矿地下水的特征为：氧的浓度 n mg/L，E_h＞+150～+200 mV，pH＞7。这种地下水形成于缺少浓密植被和富含有机质土壤的干旱气候区，所以干旱、半干旱气候是铀活化迁移的主要条件，对于干旱气候区形成外生后成层间渗入型成矿作用的困难是可能出现补给水量的不足。如干旱的中亚地区进行计算表明，大气降水只能满足成矿需要水量的 1/10。一种观点认为成矿作用可需的水主要是来自相邻的造山带。依据之一是主要赋矿层层间渗入水的 δD 为-110‰～-120‰，δ^{18}O 为-12‰～-16‰，与造山区冰川水中的含量相近。因此，在次造山区和造山区发育有统一的自流渗入水体系时，对形成外生后成层间渗入型矿化最为有利。

还原的环境是铀沉淀的有利场所。铀矿化带在空间分布上严格受层间氧化带尖灭部位控制。渗入水中的 E_h 值和铀含量在此地段突然降低，表明氧化还原地球化学障是铀沉淀富集的主导因素。但对铀矿体不同部位铀价态的分析表明，在最新形成矿化的卷头部分铀以六价形式为主，达到总铀量的 87%；向卷尾方向四价铀含量逐渐增加，到尾部变得以四价铀为主，可达到总铀量的 75%。可见，铀最初沉淀时是以六价形式为主，即铀的沉淀不完全由还原作用引起。事实上氧化-还原地球化学障是一个综合地球化学障，是水溶液体系和原生岩石进行综合反应的场所，铀的沉淀也是综合反应的结果，可以被炭化植物残屑等吸附，也可以因水溶液的 pH 值和水温的改变，微生物的活动以及水动力机制的变化等使水溶铀酰络合物变得不稳定而沉淀。在中亚地区一些还原容量很低的砂岩体中也发育铀矿化，如别什卡克铀矿床的赋矿砂层由海滩石英砂组成，含还原物质极少，其层间发育的层间氧化作用甚至难以用肉眼辨认，仍形成了工业铀矿化。强调这点，不但有助于对成矿作用的认识，而且对区域成矿条件分析重要意义。外生后成层间渗入型铀矿化作用可持续几—几十百万年，一些中新生代盆地的成矿作用现在还在进行，其成矿作用的长短主要取决于盆地地质构造的稳定性。

1.3 矿后阶段

在盆地的自流水机制受到破坏和气候变为暖湿气候后，外生后成层间渗入型成矿作用都可能停止。盆地自流水流机制的破坏主要有以下几种情况：①盆地所在地区造山作用变强，盆地快速下降和沉积巨厚的碎屑岩层，使原来的渗入水流体系变为渗出体系；②在伸展的背景下，在盆地边缘出现深的裂陷，使赋存的含水层和水补给区隔离；③盆地整体缓慢拗陷或海侵，新形成的泥岩层超覆于赋矿砂体之上，将其封闭。在以上情况下，形成的铀矿体都能得到保存，在埋深不大(一般小于 500 m)的情况下可以开发利用。还有一种情况是盆地本身升降不但可改变地下水的流动体系，而且含矿层和矿化体可能遭到强烈剥蚀，由于原矿体遭到强烈破坏和处于地下水位之上而难以开发利用。

2 中国中新生代盆地形成外生后成层间渗入型铀资源潜力的分析

中国是一个中新生代沉积盆地广泛发育的大陆，共有大小盆地 1270 个，其中面积大于 10 000 km^2 的盆地 24 个，盆地的总面积约 2 400 000 km^2（表 2）（程裕祺等，1994）。国内外的铀矿地质工作者都对我国在盆地中找矿持乐观的态度，现在根

据前面提出的成矿模式对其成矿潜力进行分析。

2.1　中新生代盆地产出的大地构造背景

中国大陆是由几个不同时代和演化史的陆块组成，与北面盛产铀矿的欧亚大陆相比有一定的差异。欧亚板块是世界上最古老的板块之一，演化时间长，特别是其南缘构造岩浆演化强烈、铀元素分异充分，形成了长 15000 km、宽 500～1500 km 的巨型放射性地化异常带。在该带内基底出露区发育有一批大型或超大型内生和复成因的铀矿床，为在带内形成外生后成层间渗入型铀矿床准备了极其丰富的铀源。中国陆块群形成的时间较晚，不同地区构造岩浆和铀的分异程度差异大：铀元素分异程度最高的是华南地区，这里也是内生和复成因铀矿床发育最多的地区；在华北地台南北缘、天山、祁连、昆仑、大兴安岭等地区铀的分异程度也较高，在这些地区中也发现了一些中小型内生铀矿床。总的看来，中国主要大型盆地的铀源条件比中亚地区差，但也具备形成外生后成层间渗入型铀成矿作用的能力。

表 2　中国中新生代沉积盆地概况

级别	面积/km²	数量	总面积/km²	比例/%
巨型盆地	＞10 万	5	1219149	50.6
大型盆地	1～10 万	19	403145	16.7
中型盆地	0.1～1 万	149	402931	16.7
小型盆地	＞0.1 万	1097	382584	16
总计		1270	2407089	100

2.2　中新生代盆地的形成演化特点

中国大陆处于欧亚板块、太平洋板块和印度板块之间，他们的作用直接制约着我国中新生代盆地的形成和演化。总体上，可分为受印度板块影响的西部盆地群和受太平洋板块影响的东部盆地群。西部中新生代盆地所处的地质背景是三叠纪末该区已由挤压阶段转入松驰阶段，早-中侏罗世总体上处于伸展构造环境（许效松等，1997）；这时又是气候的潮湿期，所以在许多盆地都形成了具有稳定的泥-砂-泥结构的灰色沉积层，它们是十分有利的成矿层位。中-晚侏罗世气候进入干燥期，沉积了不利于成矿的红色岩层（赵文智等，2000）。侏罗纪后随着印度板块向北俯冲的逐步加强，使该区盆地处于一种挤压的应力背景下。白垩纪到老第三纪期间，由于挤压强度较小该区仍处于一种相对稳定的构造环境，气候仍具干旱特征，故沉积了以红色为主夹灰色砂岩、泥岩、泥灰岩及灰岩的红层；该层中的灰色砂体或红色砂体遭受后生还原后都能作为外生后成层间渗入型成作用的赋矿层。45 Ma 前印度板块和中国板块相碰撞，渐新世晚期到中新世盆地四周开始强烈抬升，一些盆地内部强烈坳陷，覆盖了巨原的红色磨拉石沉积；第四纪，有的盆地继续下陷形成了几百米甚至上千米的沉积物，因此从渐新世开始在大部分盆地中就难以形成有利的成矿砂岩层。与此同时，强烈的垂向差异运动使有些侏罗纪－白垩纪形成的盆地遭受破坏，原形成的有利成砂岩层有的被剥蚀。

中国东部中新生代盆地的形成和演化主要受太平洋板块运动的影响，在始新世后印度板块向北的碰撞对一些盆地的演化也影响很大。按地层特征分析，以大兴安岭-太行山-武陵山为界两边盆地差别很大。西边的盆地在侏罗纪时处于相对稳定的背景条件下，形成了具典型泥-砂-泥结构的沉积层；早白垩世基本继承了侏罗纪盆地的格局，晚白垩世大部分地区抬升、沉积范围缩小，出现了不利于成矿的内陆盐湖相沉积；第三纪，大部分地区处于干旱-半干旱的气候区，沉积了不利于成矿的红色碎屑岩层。东边的盆地在侏罗纪处于强烈伸展的构造背景下，具断陷特征，以火山碎屑沉积为主；白垩纪，除继承和发展侏罗纪的盆地外还出现了一些初始盆地，仍伴随有火山碎屑沉积，这都不利于层间渗入成矿作用，只是在北部相对稳定的一些盆地内沉积了具泥-砂-泥结构的地层；第三纪后进入干旱期，以红色碎屑沉积为主。

2.3　中新生代盆地外生后成层间渗入型成矿作用

从现有的资料分析，中国中新生代盆地外生后成层间渗入型矿化开始于燕山运动晚期，即在晚白垩世随着盆地周围地区的抬升，侏罗系地层抬升剥蚀，形成自流的地下水体系。在一些有利地区(鄂尔多斯盆地北部等)出现了铀的成矿作用(107 Ma±期矿化)。进入喜马拉雅运动期，西北地区南部的一些盆地(吐哈盆地等)周边抬升，形成自流的水体系，同时伴随铀成矿作用(48 Ma±和 28 Ma±期矿化)。随着造山带北移，这些盆地周边大幅度逆冲抬升，水流体系破坏或盆边大幅度坳陷和沉积巨厚的碎屑沉积，使渗入成矿作用停止。这时处于北面的一些盆地(伊犁盆地等)则处于造山带外缘的构造活化区，出现了有利的成矿条件和发生成矿作用(12 Ma±期矿化)。到喜马拉雅运动的晚期，西部的大多数盆地已处于造山带之中，总体上是一个不利于外生后成渗入型成矿的背景下，但在一些构造活动相对稳定的盆地边缘，成矿作用仍在进行(伊犁盆地 2～1 Ma 期矿化)。喜马拉雅运动期，中国东部总体上处于伸展背景下，垂直裂陷和隆升作用发育，结果使有的原型盆地破坏、小型盆地下陷和沉积了相变块的碎屑层；在靠近喜马拉雅造山带的盆地受来自西部的挤压，盆地褶皱变形、盆边形成大量逆冲断层

等，这些情况都不利于外生后成层间渗入型成矿作用的发育。东北地区远离造山带，处于相对稳定的地质背景，有利于成矿作用进行。

2.4 中新生代以来中国大陆古气候变化特征

早-中侏罗世，除四川、云南、贵州外中国大部分地区处于潮湿或半干旱-潮湿的气候区。从晚侏罗世开始干旱气候逐渐扩大，早白垩世南疆和华东南地区都已处于干旱气候区。到早第三纪干旱气候区进一步扩大，除东北、华北和西藏、云南、贵州、广东、广西南部的地区外，全国大部分地区都处于干旱的气候区。这个先期潮湿后干旱的变化符合形成外生后成层间渗入型铀矿的气候条件，从地区上看中国西北部和东北西部地区最为有利。

2.5 中新生代沉积盆地找矿前景

将上述有关成矿因素按地区列于表 3。从中可以看出各地盆地的成矿条件差异很大。总的趋势是昆仑-秦岭以北地区较南部地区有利；大兴安岭-太行山以西地区较东部地区有利。以上分析没有考虑到局部因素，而局部因素有时在成矿中可起到至关重要的作用。这就要求在具体划分远景区时，在分析大环境背景时充分研究和分析局部因素。

表 **3** 中国中新生代沉积盆地外生后成层间渗入型铀成矿条件

成矿条件	西部盆地		东部盆地			
	北部地区	南部地区	西带北部	西带南部	东带北部	东带南部
盆地基底富铀性	＋＋	＋＋	＋＋	＋＋	＋＋	＋＋＋
赋矿层形成条件	＋＋＋	＋＋＋	＋＋＋	＋＋＋	＋＋	＋
成矿期构造活化程度	＋＋	＋	＋＋	＋	＋＋	＋
古气候变化	＋＋＋	＋＋	＋＋＋	＋＋	＋＋	＋＋
探明该类型矿床情况	有	？	有	？	有？	无

注：＋＋＋具备成矿的良好条件；＋＋基本具备成矿的条件；＋部分具备成矿的条件。

与中亚地区盆地成矿条件进行比较，中国中新生代盆地对形成外生后成层间渗入型铀矿最大的不利因素是喜马拉雅造山作用的强度大、原型盆地的结构遭受破坏或沉积了巨厚的碎屑覆盖层，难以保留长数百公里的有利于成矿的盆缘稳定斜坡带，即形成区域性层间氧化带和超大型矿床的条件，但完全具备形成万吨级矿床的条件。只要科学地选区和加大区调工作量，一定会在寻找外生后成层间渗入型铀矿方面有新的突破。最后需要强调：在盆地中可形成多种成因的铀矿化，有的也具有很高的经济价值，故进行盆地成矿预测时要全面进行分析，以对盆地潜在铀资源有正确的评价。

3 结 论

外生后成层间渗入型铀成矿作用是一个长期发育的过程，是多种地质因素综合作用的结果，只有出现最佳组合时才能形成大矿、好矿，一个环节的缺失和改变都可能使铀成矿作用不发生或终止。外生后成渗入型铀成矿作用的模式可系统地分为预成矿阶段、成矿阶段、成矿后阶段等 3 个阶段，每个阶段都有其一定的演化历史和成矿条件特征。在成矿条件上，昆仑—秦岭以北的中新生代沉积盆地比南部盆地有利；大兴安岭—太行山一线以西的中新生代沉积盆地比其西部盆地更具有成矿潜力。中国中新生代沉积盆地有利的成矿层位主要为中-下侏罗统（西部）和下白垩统（东部），其次为第三系的砂岩层。

参 考 文 献

程裕淇，等. 1994. 中国区域地质概论. 北京：地质出版社

许效松，等. 1997. 中国西部大型盆地分析及地球动力学. 北京：地质出版社

赵文智，等. 2000. 中国西北地区侏罗纪原型盆地形成与演化. 北京：地质出版社

Лаверов Н П, Абдульмонов И Г, Бровин К Г, и др. 1998. Подземное вышелачивание полиэлементные руд．М：Издательство академии горых наук

Анкудинов Е В,и др. 1988. Радиогидрогеодогические исследования при прогнозировании и поисках урановых месторождений связанных с зонами пластового окисления．М：Недра