

沉积环境有机质及在铀成矿中的作用研究

于 漫¹, 欧阳京¹, 第鹏飞¹, 王晓伟^{1,2},
王怀涛¹, 赵志雄¹, 谢 荣¹, 贾元琴¹, 王玉玺¹

(1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2. 甘肃省地矿局 第三地质矿产勘查院, 兰州 730050)

摘 要: 通过系统研究, 将沉积环境有机质分为可确定或未确定的高相对分子质量有机物质、简单物质和腐殖质 3 个主要部分, 一般称为非腐殖质和腐殖质 2 个部分。非腐殖质系指那些可被列入单独的化合物类别中的有机化合物, 主要包括糖、脂类和氨基酸; 腐殖质系指那些很难确定的不能再分成其他化合物的有机化合物, 据其溶解性质和颜色特征, 腐殖质分为黄腐酸、腐殖酸和腐黑物 3 个部分。通过氯仿提取实验和腐殖质提取实验, 证实了有机质特别是腐殖质中的黄腐酸在铀成矿过程中起着主要作用。

关键词: 沉积环境; 腐殖质; 砂岩型铀矿; 成矿作用

中图分类号: P593; P619.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2011)03-0255-07

1 概述

沉积环境有机质是指动植物死亡之后被埋藏在地层中的未腐烂分解的组织和它们的部分降解产物以及存在于地层中的微生物, 主要包括 3 个部分^[1-3]: ①可确定或未确定的高相对分子质量有机物质, 如多糖和蛋白质; ②简单的物质, 如糖、脂肪酸和其他小分子化合物; ③腐殖质。

沉积环境中有机质一般由非腐殖质和腐殖质组成。

非腐殖质(Nonhumic substances)系指那些可被列入单独的化合物类别中的有机化合物, 主要包括糖、脂类和氨基酸。

(1) 糖类(Carbohydrates): 多数岩石中糖的成分占有机质的 5%~25%, 植物残余物中的纤维素被细菌、放线菌和真菌降解合成糖。糖可以连接无机粒子进入稳定的聚合物, 也可与金属离子形成络合物。糖类主要可分为 3 个部分: ①单糖(Monosaccharides); 醛和酮的衍生物; ②低聚糖(Oligosaccharides): 由少量单糖组合而成; ③聚糖类(Polysaccharides): 由大量单糖聚合而成。不同型号和结

构类型的聚合糖具有很强的连接黏土和腐殖质胶体的作用^[4]。单糖的分子结构见图 1。

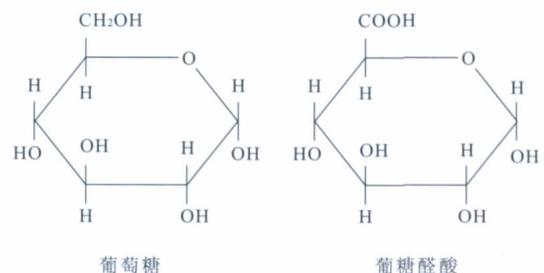


图 1 单糖分子结构示意图(据 Stevenson, 1982)
Fig. 1 Structural sketch of single sugar molecule

(2) 类脂类(Lipids): 代表岩石、土壤中有机化合物的一种组合, 包括从简单的脂肪酸到复杂的有机质化合物, 如甾醇、萜、多核碳氢化合物、叶绿素、脂肪、蜡和树脂等。岩石、土壤中的类脂类多以脂肪、蜡和树脂出现。

(3) 氨基酸(Amino acids): 氨基酸在岩石或土壤中主要的存在形式有: ①自由氨基酸存在于溶液或岩石空隙中; ②以氨基酸、缩氨酸或蛋白质连接黏土的形式存在; ③以氨基酸、缩氨酸或蛋白质连接腐殖酸胶体的形式存在, 这种连接主要靠 H⁺ 键和范

收稿日期: 2010-05-10; 改回日期: 2011-07-22

作者简介: 于漫(1973-), 女, 吉林伊通人, 硕士研究生, 岩石与矿床学专业。通信地址: 甘肃省兰州市兰州大学资源环境学院; 邮政编码: 730000; E-mail: dzyang2002@yahoo.com.cn

德华力以及酰—氨基酸之间的共价键；④以黏蛋白的形式存在；⑤以胞壁酸形式存在。

氨基酸极易被微生物降解，在岩石或土壤中存在时间短暂。因此，岩石或土壤中的氨基酸在任何时间都处于被微生物合成与破坏之间的平衡状态。岩石或土壤中氨基酸的含量明显地受气候、湿度、植物类型及有机残余物等因素的影响。

腐殖质(Humic substances)系指那些很难确定的不能再分成其他化合物的有机化合物。本文将对腐殖质作详细阐述。沉积环境中有机质分类见图2。

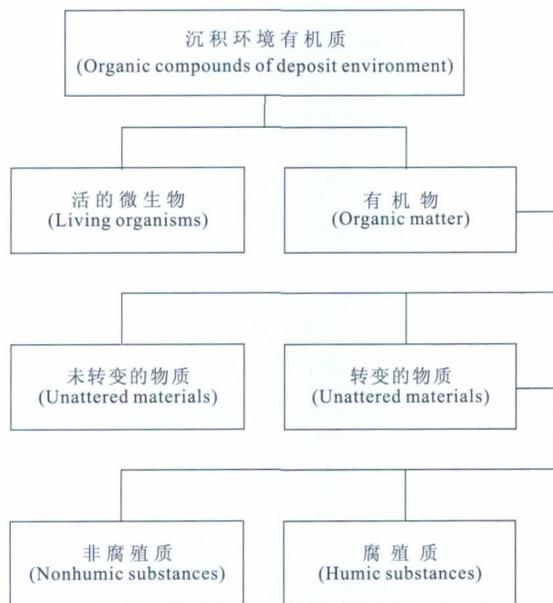


图2 沉积环境有机质分类(据 Senesi, 1994)

Fig. 2 Diagram showing classification for organic matter in sedimentary environments

在图2中，未转变的物质指在岩石中未发生任何变化的有机化合物。转变来的物质指在其母质基础上结构发生改变的物质。

2 腐殖质

2.1 腐殖质定义及分类

腐殖质在环境中(如土壤、水和沉积物中)是普遍存在的，腐殖质在地球水系统中的含量占可溶有机质总量的95%以上。其中，地表水中含腐殖质 $0.1 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ ，海水中含腐殖质 $0.5 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-6}$ ，地下水含腐殖质 $0.1 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ ；腐殖质在岩石中约占0~10%^[5-6]。

腐殖质是指发现于环境中、不能再归类于其他

化合物(如多糖、蛋白质等)的那部分有机化合物。腐殖质是植物的残骸在微生物参与下经过复杂的化学、生物的分解及合成反应生成的产物^[7-9]。

腐殖质根据颜色和溶解性质可分为3部分(图3)：①黄腐酸(Fulvic acids)，指在任何pH值条件下都可溶解于溶液中的有机化合物，呈淡黄至黄褐色；②腐殖酸(Humic acids)，是指在酸性条件下(pH<2)不溶解、但碱性条件下可溶的有机化合物，呈黑褐至灰黑色；③腐黑物(Humin)，指在任何pH值范围都不溶的那一部分化合物，其颜色为黑色^[10-11]。



图3 腐殖质的分类(据 Stevenson, 1982)

Fig. 3 Diagram showing classification for humus

鉴于目前学界对腐殖质的分类方法多种多样，认识上不尽一致，为避免造成概念上的混乱，有必要对腐殖质的分类进行说明^[12-15]。不同学者对腐殖质的分类方法主要有以下几种：

(1)将腐殖质分成3类：①胡敏素(Humin)，不溶于碱溶液而能溶于乙酰溴；②胡敏酸(Humic acids)，为碱抽提液中能被无机酸沉淀的部分；③富啡酸(Fulvic acids)，为碱抽提液用酸处理之后留在溶液中的部分。后2类(胡敏酸与富啡酸)总称为腐殖酸。

(2)将腐殖酸分成3个部分：即黄腐酸、棕腐酸和黑腐酸。这种分类可能是把腐殖质当成了腐殖酸，很多人认为腐殖质就单指腐殖酸，实际上是两个概念。

(3)土壤学将腐殖质分为2部分：①腐殖酸：指将碱溶物进行酸化后的不溶部分，即棕腐殖酸和黑腐酸(可能相当于本文分类中的腐殖酸和腐黑物)的混合物；②黄腐酸：指上述酸化过程中的溶解部分(相当于本文分类中的黄腐酸)。

前苏联学者把腐殖质分为可溶于水的白腐酸(креповая и алскеновая кислоты)、可溶于酒精的棕腐酸(гиматомелановая кислота)和不溶于水和酒精的黑腐酸。

由此可见，腐殖质及其分类不尽一致，各学者根

据研究目的不同而采用不同的分类方案。中外大量有关腐殖质方面的研究成果,包括著名的研究腐殖质方面的专家 Stevenson, Schnitzer 及 Jeffrey S. G 等的成果都将腐殖质据其溶解性质和颜色特征分为 3 部分,即黄腐酸(Fulvic acids)、腐殖酸(Humic acids)和腐黑物(Humin)^[9-10,11]。英文名都是统一的,中文名是本文作者采用了以往已使用的较合理的名词。

2.2 腐殖质的一般特点

腐殖质的分子大小和分子量范围较广,分子量从几百到几千,一般情况下,源自土壤岩石中的腐殖质比源自水体中的腐殖质分子要大。腐殖质的元素组成因其来源不同、地区不同、提取方法不同而有所区别,但其基本结构是相似的。腐殖质的元素组成比较有限, $w(C) = 40\% \sim 60\%$, $w(O) = 30\% \sim 50\%$, $w(H) = 4\% \sim 5\%$, $w(N) = 1\% \sim 4\%$, $w(S) = 1\% \sim 2\%$, $w(\text{灰分}) = 0 \sim 0.3\%$ 。与黄腐酸相比,腐殖酸含有相对高的 H, C, N 和 S, 较少的 O。腐黑物的结构与腐殖酸基本相似,只不过在结构中连接着更多的无机物^[9-10]。

腐殖质由烃基或芳香核的骨架组成,它们主要由氧和氮与一些官能团,如羧基、酚和醇羟基、酮和醌基呈交叉连接。

腐殖质的一个显著特性是,可与金属离子、氢氧化物、矿物质、有机质(包括有害农药污染物)等相互反应,形成在化学和生物稳定性上各不相同的可溶或不溶络合物。

腐殖质是由植物残体经生物化学作用的降解及微生物的作用而形成,其最终产物为复杂有机结构,这种结构的特点是比其母物质更具有稳定性。

腐殖酸是一种在加热时会分解的黑棕色无定形物,相对密度 $d = 1.330 \sim 1.448$, 相对分子质量为 $4950 \times 10^{-24} \sim 1150 \times 10^{-24}$, 腐殖酸易与碱金属的氢氧化物发生中和反应,生成水溶性的腐殖酸盐。一价金属腐殖酸盐能溶于水,盐的水溶液呈碱性;二价金属腐殖酸盐难溶于水;三价金属腐殖酸盐基本上不溶于水。腐殖酸的骨架是由一个或数个不太大的芳核通过醚键、亚胺键、羰基、较短的烷烃桥键随机连接构成。在这些芳核和桥键上,随机分布着羧基、羟基、羰基烯醇基、氨基、醌基、甲氧基等多种官能团。这些活性基团的存在决定了腐殖酸的酸性、亲水性、离子交换性、络合能力及较高吸附能力等性质。芳核通常由 2~5 个环缩合而成。其中可能包括 5 元或 6 元的芳杂环。少量的肽链残片、糖基残片、烷基基、金属离子等通过共价键或配位键连接在芳核或官能团上。几个这种相似的结构单元之间可通过氢键、金属离子桥、电荷转移或络合等形式而缔合成巨大的复合体。腐殖酸的分子结构模型^[9,17-22]见图 4。

电镜下观察($\times 12\,000$ 倍)可看出腐殖酸是由一串直径 $d = 6 \sim 8$ nm 的球状粒子组成^[13](图 5)。随着 pH 值的升高,粒子的分散性增加,经测定,粒子的平均直径 $d = 5$ nm。在电镜下可看到腐殖酸的粒子不是互相连接成十分紧密的球体,而是形成疏松的、多孔的、直径大小不同的孔隙式网状结构,呈海绵状立体结构。据研究,这种结构具有很重要的意义:正是这种空隙使腐殖酸具有捕获或固定有机或无机物(包括金属元素)的作用。腐殖酸在电镜影像中显示出整体相对松弛和开放式的结构。腐殖酸中氮的含量愈大,粒子间的连接愈紧密。

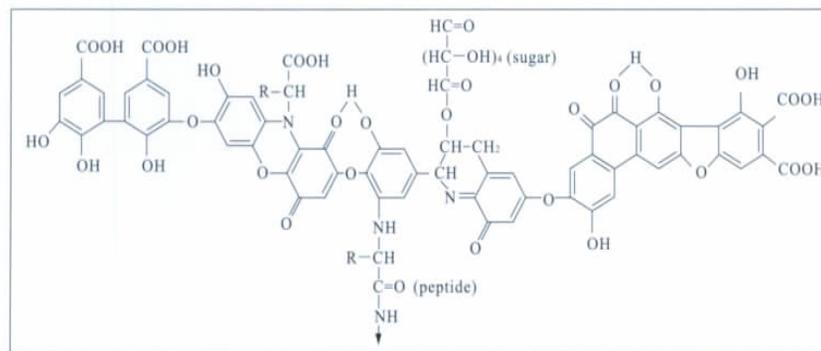


图 4 腐殖酸的分子结构模型

Fig. 4 Diagram showing structure of humic acid molecule



图5 腐殖酸 SEM 图(据 Davies,1998)

Fig.5 SEM diagram of humic acid

酸性条件下腐殖酸的特征是：①呈海绵状多聚结构，被相对较大的孔、洞所穿透；②这种海绵状多聚结构呈自由态，由直径 $d=5\text{ nm}$ 的球体相互交织而成；③这种结构对较小的 pH 值表现敏感：pH < 3 时，结构呈伸长纤维状；pH = 3~7 时，结构呈海绵状；pH = 7~10 时，结构发生明显变化，呈均一的球粒状。

通过电镜下观察，不同来源腐殖酸的聚合程度是不同的^[23]。褐煤、泥炭和土壤中提取的腐殖酸的粒子直径 $d=6\sim 50\text{ nm}$ ，显示出从褐煤→泥炭→土壤越来越松散的腐殖酸结构。这主要是由于腐殖化的过程影响着腐殖酸的空间结构。

黄腐酸的结构与腐殖酸基本相似(图6)，区别在于黄腐酸相对分子质量较低，为 $2\ 132 \times 10^{-24} \sim 1\ 150 \times 10^{-24}$ 。黄腐酸能溶于酸、碱和水。水溶液呈酸性。相对低分子量的黄腐酸可与一些过渡金属离子形成可溶的络合物，对金属离子具有增溶效果，从而影响其迁移；而相对高分子量的腐殖酸则对多价离子起着“下沉”作用。因此，黄腐酸与腐殖酸在

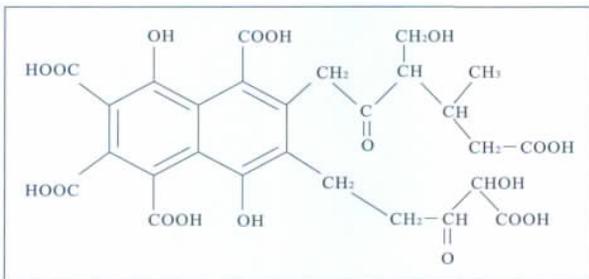


图6 黄腐酸分子结构模型(据 Buffle,1992)

Fig.6 Diagram showing structural model of fulvic acid

金属的迁移与沉淀富集过程中所起的作用是不同的^[25]。

黄腐酸与腐殖酸相比，结构中含较多的氧，而碳的含量较低。更重要的是黄腐酸中含更多的活性含氧官能团^[16]。黄腐酸的总酸度要比腐殖酸高很多，这决定了黄腐酸的化学活动性要比腐殖酸强得多。另外，黄腐酸中氧的含量主要存在于官能团(COOH, OH 和 C=O 等)，而在腐殖酸中氧的存在主要是在分子核结构中，两种官能团的区别是，腐殖酸只有较小一部分氧是在 COOH, OH 和 C=O 中，而在黄腐酸中大多数氧都分布在官能团中^[26]。



图7 腐殖质化学成分的变化(据 Stevenson,1982)

Fig.7 Diagram showing composition change of humus

腐殖质中 COOH 基含量与相对分子质量呈负相关，低相对分子质量黄腐酸中以 COOH 形态的氧比例较高。在酸性介质中，所有腐殖酸和黄腐酸都具有还原性质。由黄腐酸→腐殖酸→腐黑物的一些化学组成变化见图7，一般由泥炭到褐煤，腐殖酸/黄腐酸比率迅速下降。而随深度的增加，该比率也不断降低^[9]。

3 有机质与铀成矿的关系

通过实验，证实了有机质与铀的成矿作用存在一定的关系。

3.1 样品采集

样品采集原则是系统采样，样品产自吐哈盆地西南部某矿区的钻孔中，为产于侏罗系中的同一矿带中不同部位的岩石，共 10 个样品，分别作了铀和

有机碳含量的测试(表 1)。

3.2 氯仿抽提实验

3.2.1 实验主要器材与试剂

双列 6 孔恒温水浴锅 2 台;250 ml 蛇形脂肪抽提器 10 套;化学纯三氯甲烷若干瓶;其他还有橡胶

管、量筒、大张滤纸、天平等。

3.2.2 实验步骤

(1)将滤纸裁成小块叠成筒状,将经密闭式化验制样粉碎机粉碎的岩石样品用天平称取 10 份,每份 50 g,分别放入 10 个纸筒中,然后放入抽提样品室。

表 1 岩石样品分析

Table 1 The rock sample analysis

编号	深度/m	岩性	$w(U)/10^{-6}$	$w(C_{\text{有机}})/\%$	氯仿“A” $w(U)/10^{-6}$
S ₁	290	褐黄色含砾细砂岩	1.0	0.07	4.01
S ₂	338	灰绿色粗砂岩	33	0.96	54.1
S ₃	332.6	粉黄色含砾细砂岩	3.0	0.05	4.74
S ₄	341	灰绿色含砾细砂岩	13	0.25	16.53
S ₅	347	灰绿色细砂岩	13		19.72
S ₆	356	深灰绿色含砾细砂岩	7.0	0.11	11.33
S ₇	329.35	深灰色含砾细砂岩	280	—	351.2
S ₈	330	灰绿色含砾细砂岩	16	0.98	26.4
S ₉	321	灰绿色含砾细砂岩	13	0.65	21.61
S ₁₀	310.8	黄粉色细砂岩	3.0	0.08	5.45

(2)用球型溶剂瓶称取三氯甲烷 180 ml,并放入少量铜条,将冷凝管、抽提样品室、溶剂瓶等联接好,安装在水浴锅上。按上述步骤分别安装其他 9 套抽提器。

(3)用一截较短的橡胶管将冷凝管的下接口连在另一只冷凝管的上接口,依次将 5 个抽提器连在一起。用一长截橡胶管接上一侧抽提器的下接口作进水管,用另一个橡胶管连在另一侧抽提器的上接口作为出水口。将进水管接上水龙头。按上述步骤安装另一组 5 个抽提器。

(4)将 2 组水浴锅装入适量自来水,温度表调至 75℃,接上电源,不间断抽提 1 星期。

3.2.3 岩石样品抽提物铀含量分析

对用上述方法抽提的 10 个样品的抽提物分别进行铀含量分析(表 1)。从表 1 看出,S₁ 抽提物中的 $w(U)=4.01\times 10^{-6}$;S₃ 和 S₆ 抽提物中的 $w(U)$ 平均值为 4.59×10^{-6} ,与岩石样品中 $w(U)$ 的平均值(3×10^{-6})相比只是略有富集;S₂,S₅,S₇,S₈ 和 S₉ 抽提物中的 $w(U)$ 平均值为 71×10^{-6} ,与岩石样品的 $w(U)$ 平均值(3×10^{-6})相比,也只是略有富集。

实验结果表明,用氯仿抽提出的岩石有机质对砂岩铀矿的形成所起作用并不大。

3.2.4 岩石样品氯仿抽提物成分分析

沥青质组成很复杂,研究也较少,一般认为主要由碳、氢化合物和少量含氧成分组成,其特点是氧化程度低。沥青质是在泥炭阶段生成的,合成这些物

质的原料是腐殖酸,以及纤维素、果胶质、脂肪和蛋白质分解的中间产物。一些因氧化作用形成的非腐殖质(类腐殖质)在铀的迁移、络合和固定中也起到作用。

由此可以看出,由于与铀发生作用的成分较少,铀的富集可能主要与沥青质和一些类腐殖质大分子有关。

4 腐殖质提取实验

氯仿抽提实验表明,非腐殖质在铀矿形成过程中所起的作用并不很大。因此,我们把研究重点放在腐殖质上。

4.1 主要实验步骤

(1)样品仍然采用吐哈盆地西南部的 10 个样品。

(2)用浓度 0.1 N 的氢氧化钠与 0.1 M 的焦磷酸钠以 1 : 1 比例配制的混合液,与岩石样品(固液比 1 : 10)在室温下抽提。

(3)将抽提液用 1 M 的稀盐酸酸化,使腐殖质沉淀出来,随后用蒸馏水洗涤,用离心机分离沉淀的腐殖酸。

(4)将酸析的腐殖酸用冻—融技术使之沉淀析出,然后冷冻干燥可分离出腐殖酸。

(5)用非离子型树脂 XAD-8 从酸析、冰融滤液

表2 岩石样品中黄腐酸和腐殖酸铀的质量分数
Table 2 Uranium content of humic acid and fulvic acid

样号	S ₁		S ₂		S ₃		S ₄		S ₅	
	FA	HA	FA	HA	FA	HA	FA	HA	FA	HA
w(U)/10 ⁻⁶	25.60	7.26	1635.23	2.17	39.77	27.13	122.01	5.71	171.47	8.56
样号	S ₆		S ₇		S ₉		S ₁₀			
	FA	HA	FA	HA	FA	HA	FA	HA		
w(U)/10 ⁻⁶	88.20	2.27	10237.30	68.51	399.35	41.75	41.01	23.45		

注:FA.黄腐酸;HA.腐殖酸。

等水溶液中回收黄腐酸,最后经冷冻干燥得到黄腐酸。

4.2 实验结果分析与结论

通过以上分离过程,将岩石中的腐殖酸和黄腐酸提取出来,并分别作了铀含量的分析(表2)。

从表2可以看出:

(1)在腐殖质中,主要是黄腐酸中铀的质量分数与氯仿抽提物中铀的质量分数相比有了大幅度地富集;初步说明与其他非腐殖质有机物相比,腐殖质与铀的关系更为密切。

(2)黄腐酸中铀的质量分数明显高于腐殖酸中铀的质量分数,说明铀主要富集在黄腐酸中,也就是说黄腐酸与铀的关系最为密切。可以得出这样的结论,就是在吐哈盆地西南部砂岩铀矿的成矿过程中,有机质起到了重要的作用,而且在铀矿沉淀富集时起最主要作用的是腐殖质中的黄腐酸。

研究表明,在自然界中有机质与金、银、锑等多种元素的成矿都有很密切的关系,本文只是以吐哈盆地砂岩铀矿为例,通过实验证实有机质与铀矿成矿之间的关系^[25-26]。

参考文献:

- [1] 中国科学院地球化学研究所. 有机地球化学[M]. 广州:科学出版社,1982.
- [2] 伍越寰,李伟昶,沈晓明. 有机化学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1994.
- [3] 斯温 F M. 陆相有机地球化学[M]. 钱吉盛,译. 北京:科学出版社,1979.
- [4] Senesi. Humic substances in the global environment and implications on human health[C]//Proceedings of the 6th International Meeting of the International Humic Substances Society, Monopoli (Bari), Italy, September 20-25, 1992.
- [5] Rashid M A. Geochemistry of Marine Humic Compounds[M]. Springer,1985.
- [6] Saster I, Martinez M, Vicente M A, et al. Characterization of humic substances from a reservoir in central Spain: A comparison of the terrestrial and aquatic sediments[M]//Senesi N, Miano T M. Humic Substances in the Global Environment and Implications on Human Health. Elsevier Science B V, Amsterdam. 1994:883-888.
- [7] Haider K. Advances in the basic research of the biochemistry of humic substances[M]//Senesi N, Miano T M. Humic substances in the Global Environment and Implications on Human Health. Elsevier Science B. V, Amsterdam,1994:91-107.
- [8] Hayes M H B, Wilson W S. Humic substances, peats and sludges: Health and environmental aspects[M]. Woodhead Publishing,1997.
- [9] Jeffrey S Gaffney, Nancy A Marley, Sue B Clark. Humic and Fulvic acids[M]. American Chemical Society Publication, 1996.
- [10] Stevenson F J. Humus chemistrygenesis, composition, reaction[M]. New York:Wiley & Sons Inc,1982:225-231.
- [11] Maccarthy P, Clapp C E, Malcolm R L. Humic Substances in Soil and Crop Sciences; Selected Reading [M]//Proceedings of a Symposium Cosponsored by the International Humic Substances Society. Amer Society of Agronomy, Wisconsin, 1990.
- [12] Orlov D S. Humic substances of soils and general theory of humification(Russian Translations Series) [M]. Taylor & Francis, 1995.
- [13] Davies G, Ghabbour E A, Khairy K A. Humic Substances: Structures, properties and uses[M]. Royal Society of Chemistry (Great Britain), 1998:113-117.
- [14] Tsu-Chang Hung, Pei-Jie Meng, Aileen Chuang. Species of Trace metals, organic residues and humic substances in sediments from the Taiwan Erhjin river and Coastal Areas[J]. Chemistry and Ecology, 2000, 17(3):195-214.
- [15] Schulten H-R. A new approach to the structural analysis of humic substances in water and soils; humic acid oligomers [C]//Gaffney J S, Marley N A, Clark S B. Humic and fulvic acids: isolation, structure and environmental Role. American Chemical Society symposium series, Washington, 1996: 42-56.
- [16] Schnitzer M. A chemical structure for humic acid. chemical, ¹³C NMR, colloid chemical, and electron microscopic evidence[M]//Senesi N, Miano T M. Humic substances in the global environment and implications on human health. Elsevier, Amsterdam, 1994: 57-69.
- [17] 招录基, 张德和. 黄腐酸与稀土金属离子络合行为的研究[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1981.

- [18] Czech. The acidobasic and complexation properties of humic acids [M]. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 1998.
- [19] Canan Cabbar H. Effects of humidity and soil organic matter on the sorption of chlorinated methanes in synthetic humic-clay complexes[J]. *J Hazard Mater*, 1999, 68(3):217-26.
- [20] Erdem F Idiza, Donald Carlisle, Kaplana I R. Interaction between organic matter and trace metals in a uranium rich bog, Kern County, California, USA[J]. *Appl. Geochem*, 1986, 1(5):573-590.
- [21] Ying-jie Zhang, Nicholas D Bryan, Francis R Livens, et al. Complexing of metal ions by humic substances [J]. *ACS Symposium Series*, 1996, 651:194-206.
- [22] Wood S A. The role of humic substances in the transport and fixation of metals of economic interest (Au, Pt, U, V) [J]. *Ore Geology Review*, 1996(11):2-6.
- [23] Lawrence Mayhew. Humic substances in biological agriculture[J]. Reprinted from *ACRES—A Voice for Eco-Agriculture*, 2004, 34(1-2):83-90.
- [24] Buffle J. A critical comparison of studies of complex formation between copper(II) and fulvic substances of natural waters[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1980, 118(1):29-44.
- [25] 何立千. 生物技术黄腐酸的研究和应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2000.
- [26] Martina Havelcová, Jirí Mizera B, Ivana Sýkorová, et al. Sorption of metal ions on lignite and the derived humic substances[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(1):559-564.

Effect of organic matter in sedimentary environment on formation of uranium ore

YU Man¹, OUYANG Jing¹, DI Peng-fei¹, WANG Xiao-wei^{1,2},

WANG Huai-tao¹, ZHAO Zhi-xiong¹, XIE Rong¹, JIA Yuan-qin¹, WANG Yu-xi¹

(1. College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. The Third Institute of geology and mineral resources of Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Systematic research on organic matter in the sedimentary environment reveals three organic matters, i. e. high molecular weight organic matter, simple organic matter and humus. Generally they are called humus and non-humus. Non-humus (Nonhumic substances) are those that can be included in a separate category of organic compounds including mainly sugar, lipids and amino acids. Humus (Humic substances) are those that are difficult to identify and can not be classified into other organic compounds and according to their solubility and color they are divided into, humic acids, and black rot complex (Humin) and chloroform extraction and humus extraction experiments show that organic matter, especially for fulvic acid plays an important role in formation of uranium ore.

Key Words: Sedimentary environment; humic substances; mineralization