

文章编号: 1009-3850(2001)01-0105-08

缺氧环境中的矿床成因和成矿控制

张立生 编译

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘要: 富含有机质的沉积和变质沉积物中新的矿化工业类型, 特别是金、铀矿床的发现以及矿化与有机质关系研究的新成果使人们对缺氧环境中的矿床成因重新发生了兴趣。为了给找矿勘探提供理论依据, 本文总结了缺氧环境中的矿床成因, 提供了在成因或共生组合上与含碳地层有关各类矿床的信息, 介绍了用来确定其含矿远景的某些判据意义。

关键词: 缺氧环境; 矿床成因; 矿化工业类型

中图分类号: P611

文献标识码: A

1 缺氧环境的矿床成因

含碳岩石中的矿化可能与沉积作用、成岩作用、变质事件、岩浆事件和风化作用有关。下面举一些典型实例。

1.1 与沉积作用和成岩作用有关的矿化

海水、各种卤水和与同期火山活动有直接和间接关系的热液(海底喷气矿床)的吸附和沉淀作用, 可以看成是这个阶段的金属来源。由水体环境中的金属吸附作用形成的典型矿床有瑞典的兰斯塔德含铀黑色页岩矿床、哈萨克斯坦晚元古代和寒武纪的含钒页岩, 贵州遵义、湖南大庸、云南德泽、江西、浙江富含 V、Ni、Mo、Au 和铂族元素的寒武纪页岩以及美国宾夕法尼亚的含金属黑色页岩。

此外, 缺氧沉积物还是细菌活动所产生的黄铁矿和锰矿的主环境, 其成因可能与硫酸盐还原细菌或蓝绿藻的活动有关。

“含铜页岩”型层控铜矿化也是缺氧沉积物中的一种典型矿化。现在大多数学者都把这些原先认为是同生沉积的矿床看作是在成岩作用期间和后生作用开始时, 金属被卤水活化转移的产物。其成因可用氧化还原沉积模式来解释。

含碳沉积物中还赋存有由各种成因的热液形成的矿床(海底喷气矿床)。这些矿床形成在水/沉积物界面上(产于火山岩中的块状硫化物矿床), 或形成在缺氧沉积物的成岩阶段

(沉积岩中的海底喷气型矿床)。前者矿化一般产于火山岩和黑色页岩交界的地方,例如芬兰科塔兰泰和希图拉的 Cu-Ni 矿床、瑞典谢莱夫特地区的布利登、隆斯特勒、朗达尔和挪威喀里多尼德的福尔达尔、布灵达尔、勒肯、特威尔费勒特矿床。可以用局部缺氧结合热液流量来解释盖在矿化之上的各含碳岩石之间的空间关系。供给大量 H_2S 的溶液可以耗尽水体环境中可能有的氧。后者的情况稍微不同。例子有苏联远东的霍洛丁斯科耶矿床和里内伊恩矿床、澳大利亚的芒特艾萨、希尔顿、麦克阿瑟河矿床、加拿大的霍华德山口、沙利文矿床和德国的麦根、拉默斯贝格矿床。这些矿床的出现与世界大洋发展史中的缺氧事件在时间上是一致的。它们形成在缺氧时期,未受后期氧化作用的影响。

此外,还有其它一些与含碳沉积物有关的海底喷气矿化类型。例如我国的瓦房子、加拿大的伍德斯托克和美国的阿鲁斯托克、比利时的连内和法国的莱卡贝斯等锰矿床和奥地利的施塔特施朗宁和土耳其的尼代 Sb-Hg-As 矿床以及奥地利克莱纳里塔尔、澳大利亚杰罗伊思山、南非沃尔夫拉姆、玻利维亚阿姆塔拉和苏联巴鲁姆施文斯科耶等钨矿床。

1.2 缺氧沉积物中的变质矿化类型

在变质作用过程中,含碳地层中的金属可以局部活化转移;这种含碳地层可能是不含大量有机质的岩石中金属和硫的来源,或者可能仅仅是作为变质矿化的合适的岩性环境。第一种情况涉及铀、金矿床。这类铀矿床本质上是多成因的。在沉积物形成期间被有机质聚积起来的铀,在非常浅的接触变质或区域变质条件下被活化移到脆性变形带中。这类矿化的典型见于德国隆讷堡地区的浅变质含碳沉积物中。黑色页岩中变质成因的金矿床产于高级变质区(绿片岩相上部),例如苏联的苏霍伊洛格和穆龙套及中欧莫尔达努比亚地区变质成因的金矿床。

含碳沉积物中的其它金属矿床可能是变质活化转移形成的,例如乌干达含碳变质岩中的钨矿床,苏联卡累利阿、叶尼塞和阿尔丹山脉含碳粉砂泥质岩中的白钨矿化和西加利福尼亚矿床中的 Sb、Hg 和 As 矿化。

1.3 含碳地层中与超变质作用、局部熔融和侵入-喷出岩浆杂岩上升有关的矿化

在岩浆作用中,岩浆岩和火山岩与含碳的沉积物和变质沉积物之间的相互作用非常复杂。含碳岩石在深熔作用过程中的混染作用还可以使熔融体富集金属和硫。例如澳大利亚维多利亚金矿区中含金银高的含石墨花岗岩、苏联阿尔马雷克斑岩铜矿床、加拿大西北部高级变质区剪切带中的铀矿床都与含碳地层的深熔作用和混合岩化作用有关。法国的脉状铀矿床是通过花岗岩类在含碳沉积物发生深熔作用的过程中富集了铀,而后又由于热大气降水的循环把铀萃取出来所形成的。大气降水从富碳沉积物中萃取金属形成不同类型的矿化,而大气降水的循环受侵入杂岩上方热流上升的控制。这种成因可能适用于卡林型金矿床。产于元古宙含碳地层和早古生代熔岩及凝灰角砾岩中的哈萨克斯坦型金银矿床、吉尔吉斯黑色页岩和沥青质碳酸盐岩中的 Hg-Sb-As 矿化或西班牙产于早古生代石墨化剪切带中的圣安东尼奥 Sb-W-Hg 矿床的成因与石炭纪花岗岩类的热前锋有关。

1.4 缺氧的沉积物和变质沉积物中的渗滤金属矿化

在风化作用过程及渗滤矿化的形成中,含碳沉积物在形成铀、铜和其它金属矿床中起着重要作用。有很多文章讨论过有机质在形成砂岩型铀矿化中的作用以及石墨在形成“非整

合型”矿床中的作用。莱茵山脉中马斯贝格黑色页岩铜矿化的成因也可以用表生作用来解释。

2 含碳地层中金属矿化的控制

2.1 含碳地层中金属矿化的构造控制

缺氧沉积物中的矿化在很大程度上受沉积盆地的大地构造位置控制(图1)。兹概述如下:

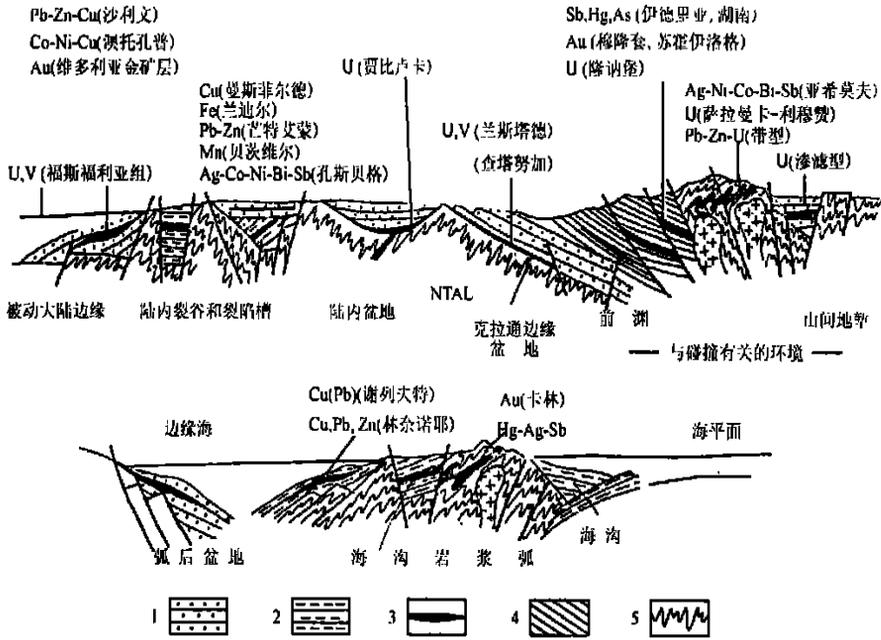


图1 含碳地层中各种矿化类型的大地构造位置及典型矿床实例示意图

1 沉积地层; 2 火山沉积地层; 3 含碳的沉积物和变质沉积物; 4 浅变质地层; 5 深变质地层

大洋盆地缺氧沉积物中的矿化 含大量有机碳的大洋深水沉积物含金属很少,但也有 一些富含铀、钒和其它金属(这可能与水热射气有关),形成裂谷中的块状硫化物矿床。例如 挪威勒肯和惠达尔矿床的上覆含碳沉积物。

活动大陆过缘缺氧沉积物中的矿化 有重要意义的金属矿化与岩浆弧,即与 Dickinson (1976)的岩浆带和推覆带有关。这类矿化中最著名的是“卡林型”金矿化。常见组分是古洋 壳中的含碳沉积物。“继承性”含碳地层是后生矿化的非常常见的矿源,它形成于一般与热 流增高有关的构造活化期。许多后生脉状矿床可能也与含碳沉积物中金属的活化转移有 关,如北美科迪勒拉的许多 Hg-Ag-Sb 矿床和秘鲁安第斯山的 Co-Ni-Ag-U 矿化。

活动大陆过缘的含碳沉积物常常沉积在各种海沟、岩浆弧中及其附近、弧内和弧后盆地 中。其中有许多海底喷气的硫化物矿床,例如瑞典谢莱夫特地区的矿床和外贝加尔的霍洛 德宁斯科耶及叶尼塞的利奈诺伊德矿床。

碰撞边缘缺氧沉积物中的矿化 碰撞边缘的含碳沉积物可以分为继承性的和碰撞过程中产生的形成物。继承性含碳地层中的矿化有德国隆讷堡的变质成因铀矿床和苏霍伊洛格、穆隆套金矿床。可以用碰撞环境中金属的活化转移来解释南斯拉夫和中国的许多后生 Sb-Hg-As 矿床, 英格兰南部和克鲁什内山的 Ag-Ni-Co-Bi-Sb 矿床及巴伐利亚石墨化剪切带中的铀矿床。

活动边缘的含碳地层堆积在前陆磨拉石盆地和边缘(复理石)盆地以及山间槽谷中。它们是某些渗滤型铀矿床的主岩。

被动大陆边缘缺氧沉积物中的矿化 被动大陆边缘的缺氧地层主要是浅水沉积物, 常含大量铀、钒和其它金属, 但一般达不到经济富集。北美福斯福里亚组中的铀、钒矿化可以看成是这类矿化的代表。

克拉通边缘盆地和克拉通内盆地缺氧沉积物中的矿化 该成因显然与世界大洋平面变化有关的克拉通边缘盆地和克拉通内盆地的缺氧沉积物中有许多含铀、钒黑色页岩矿床, 例如查塔努加含铀页岩、爱沙尼亚的含钒页岩、哈萨克斯坦早古生代的含钒片岩和与石墨化剪切带有关的不整合型铀矿床。

大陆裂谷和裂陷槽缺氧沉积物中的矿化 该大地构造环境中最为重要的矿床有含铜黑色页岩矿床、沉积岩中的海底喷气铅锌矿床、兰迪尔型海底喷气矿床、变质成因的金矿床和各类后生的脉状 Co-Ni, Pb-Zn 和 As 矿床, 这些脉状矿床的成因可能与缺氧沉积物中的金属裂谷侵入杂岩热前锋的影响活化转移有关。

大多数含铜页岩矿床都形成在裂谷的最早期, 产于浅海裂谷杂岩的含碳沉积物中, 如欧洲二叠系和赞比亚罗恩群中的矿床。而海底喷气的铅锌矿床和重晶石矿床则与裂谷发育的前进阶段有关, 矿化既产于浅海沉积物中(芒特艾萨、麦克阿瑟河、拉默斯贝格和麦根矿床), 也产于深海杂岩中(加拿大沙利文, 澳大利亚布罗肯希尔)。德国兰迪尔地区的铁矿床和许多锰矿床也具有海底喷气成因。裂谷和裂陷槽地区的高热流异常将埋藏水加热并使黑色页岩中的硫和微量元素活化转移, 形成细脉浸染的铀、金矿床(加拿大阿比蒂比矿带、澳大利亚巴拉腊塔、本迪戈和韦德本矿床)、挪威的孔斯贝格 Co-Ni-As-Ag 矿床和西非的脉状铅锌矿床。

2.2 含碳地层中矿化的时间控制

在地球地质历史演化中, 含碳地层中矿化的成因受不可逆事件(大气圈和生物圈的产生)和可逆过程的控制。在新元古代和显生宙时期, 最重要的可逆过程具有构造上的特征, 这造成周期性地形成超大陆及超大陆在全球裂谷作用期内解体、大西洋型大洋的打开和随后发生碰撞。这种周期性如图 2 所示, 它决定了其它一系列地质事件, 如大的造山期或世界大洋平面的变化, 同时也决定了含碳地层中一些矿化的分布型式。

铀钒页岩的分布型式证明, 它们的成因与大洋打开阶段海平面的上升(寒武纪和白垩纪的矿床)或与局部海平面的上升有关, 例如美国泥盆系查塔努加组或二叠系福斯福里亚组的情况就是这样。这些时期的古侵蚀平原洪水泛滥, 由于水环境的营养补给和海藻污染而导致缺氧, 金属由大陆或大洋深部补给。

地球地质历史含铜页岩矿床的分布有很大差别。它们的出现可以追溯到全球裂谷构造

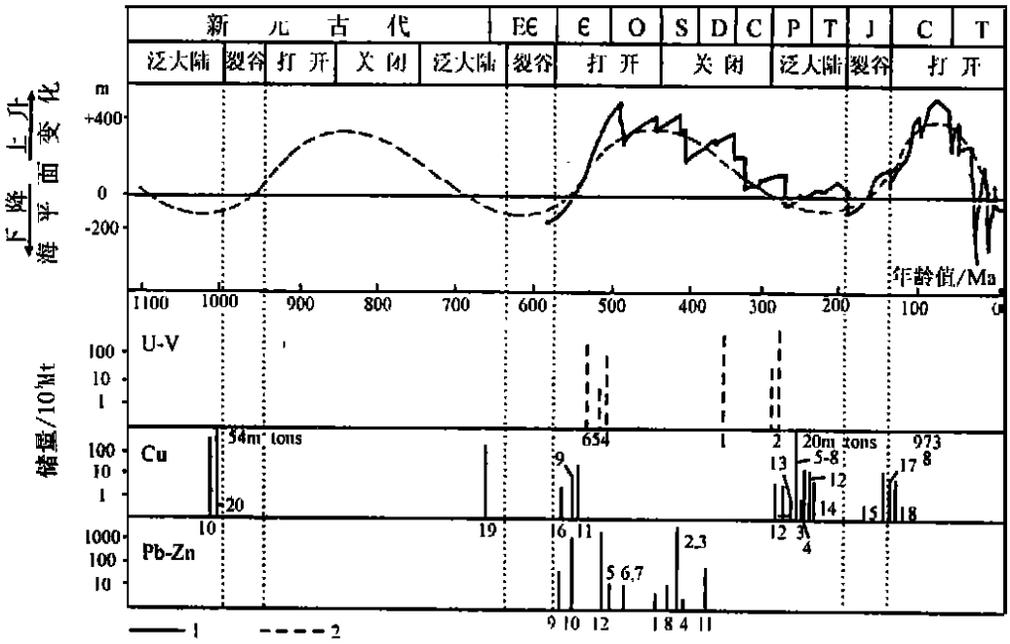


图2 新元古代和显生宙时期含碳沉积物中铀钒矿床、含铜黑色页岩和含碳沉积物中海底喷气Pb-Zn矿床的分布与全球构造大旋回和世界大洋平面变化的关系。全球裂谷作用、大西洋型大洋打开和超大陆生成的阶段(据Nance等, 1986; 海平面变化据Vail等, 1978; 各个矿床的储量据Laznicka, 1985)

含铀、钒黑色页岩矿床: 1. 美国查塔努加; 2. 美国福斯福里亚组; 3. 澳大利亚累西腓-奥林达; 4. 瑞典阿伦页岩; 5. 苏联拜科努尔; 6. 苏联塔拉斯-卡拉套; 7. 摩洛哥朱索菲亚; 8. 摩洛哥胡里卜盖; 9. 摩洛哥卡林达。

含铜黑色页岩矿床: 1. 美国克雷塔; 2. 美国曼格姆; 3. 秘鲁唐娜巴西利亚; 4. 苏联基洛夫; 5. 德国里歇尔斯多夫; 6. 德国曼斯菲尔德; 7. 波兰扎亚兹克; 8. 波兰谢罗谢维采; 9. 苏联叶尼塞; 10. 美国怀特派恩; 11. 苏联勒拿; 12. 苏联门格沙尔克; 13. 苏联齐尔加兰; 14. 中国鹿厂; 15. 中国云南洼陷; 16. 摩洛哥塔拉特德瓦姆; 17. 摩洛哥艾因塞弗拉; 18. 安哥拉卡舒埃瓦斯; 19. 澳大利亚巴拉; 20. 津巴布韦的矿床(罗恩安蒂洛普、穆富利拉、谦比希等)。

含碳沉积物中的海底喷气Pb-Zn矿床: 1. 意大利撒丁的矿床; 2. 德国麦根; 3. 德国拉默尔斯贝格; 4. 苏联阿尔申斯科耶; 5. 法国桑坦; 6. 法国卡尔布瓦尔; 7. 奥地利阿茨贝格; 8. 伊朗库奇克; 9. 日本田老; 10. 加拿大法罗安韦尔; 11. 加拿大汤姆和贾森; 12. 加拿大霍华德山口。注释: 1. 铀矿床; 2. 钒矿床

打开之前或刚刚打开之后世界大洋平面低的时候。换言之,它们是在原始大陆裂谷发育阶段中或裂谷停止活动的最后阶段,即在沉积物发生负荷变质作用的条件下,借助埋藏卤水将全属萃取、活化转移形成的。

含碳沉积物中海底喷气铅锌矿床的地质年代分布与含铜黑色页岩不同。它们的分布与全球裂谷作用及其发生的周期无关,初步认为它们的成因可能与局部的拉张构造及寒武纪初、奥陶纪和早晚泥盆世时全球大洋的缺氧时期相吻合有关。中生代和第三纪时期没有这类铅锌矿床,这是因为相对于早古生代(15~20Ma)来说,这些时期缺氧的时间非常短暂(小于5Ma)。

在持续时间较长的周期中,缺氧环境的成矿作用不仅受可逆变化而且出受不可逆变化的影响(图3),其中最为重要的是,在2200~2000Ma时期中形成了充氧大气圈。它是唯一有

可能使铀、钒和铜在风化作用过程中活化转移的事件。因此,在 2800 ~ 2100Ma 期间的含碳沉积物中铀、钒的含量非常高不是偶然的,其情形与最老的含铜页岩矿化是一样的。图 3 还表示了主要造山作用的周期(据 Condie, 1976)和推测超大陆形成、解体及海浸的周期(据 Nance 等, 1986)。全球裂谷作用以虚线表示。与图 2 一样,出现含钒、铀黑色页岩的主要时期恰好与海浸的时期一致。相反,大部分后生铀矿化(早期地层中的“不整合型”矿床和晚期地层中的变质型和脉型矿床)形成的时代与主要的造山期是一致的。这证明铀沉积在缺氧环境中并在其后构造岩浆活化阶段中形成矿胎。

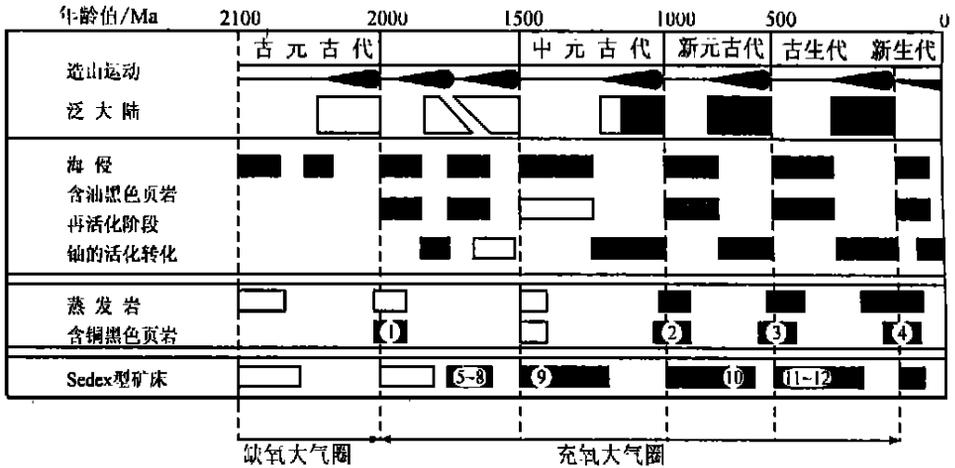


图 3 2500Ma 间含碳沉积物中铀、铜和海底喷气 Pb-Zn 矿床的时间分布模式图

主要造山阶段、全球裂谷作用阶段(点划线)、超大陆形成的时限和主要海浸阶段(据 Nance 等, 1986); 铀的再活化和活化转移阶段(据 Robertson 等, 1978)。含铜黑色页岩矿床: 1. 苏联乌多坎; 2. 美国怀特派恩和津巴韦的矿床; 3. 澳大利亚巴拉和苏联叶尼塞; 4. 德国曼斯菲尔德、波兰谢罗谢维采及其它几个矿床。海底喷气的 Pb-Zn 矿床: 5. 澳大利亚布罗肯希尔; 6. 澳大利亚莱迪洛雷塔; 7. 澳大利亚麦克瑟词; 8. 澳大利亚芒特艾萨; 9. 加拿大沙利文; 10. 美国达克敦; 11. 德国麦根; 12. 德国拉然尔斯贝格。空的长方形: 推测的阶段和作用

有意思的是含铜黑色页岩的分布与主要蒸发岩建造产出之间的关系,这在图 3 中看得很清楚。一般都认为裂谷构造中的大型蒸发岩矿床形成在裂谷构造被海水淹没之后。这意味着,蒸发岩的出现是形成这种矿化的先决条件。

2.3 缺氧沉积物中矿化的岩性控制(判据)

研究含碳沉积物的化学成分对于评价其含矿远景有重大意义。图 4 是用于此目的的各种含矿粉砂质泥岩的 K_2O/Na_2O 图解。它表明,有机碳含量高于 5%但没有矿化的沉积物(油页岩)覆盖了很大范围,其 K_2O/Na_2O 比值的范围很宽。相反,含铀的含碳沉积物(①区)或含铜黑色页岩(②区)以 K_2O/Na_2O 比值高为特征。这些沉积物以伊利石为主,可能来源于大陆上风化的岩石。 K_2O/Na_2O 比值高说明没有基性凝灰质物质;而 Na_2O 高, K_2O/Na_2O 比值变化不定则表示沉积岩中有基性凝灰质物质存在。钾高于钠和 K_2O/Na_2O 比值非常稳定说明 U、Cu、V 矿化的发育与火山活动没有直接关系。为了进行比较,将黑色页岩(伴有海底喷气硫化物矿化的岩石)中的 K_2O/Na_2O 比值投到了图上。这时,我们看到这两种氧化物

的比值变化很大,受控于风化富钾大陆岩石与同期盆地火山作用产物相混合的程度。 K_2O - MgO - Na_2O 三角图解(图5)也证实了这个结论。图5还说明,含钾、钒的缺氧沉积物一般都比含铜黑色页岩的 MgO 含量低。

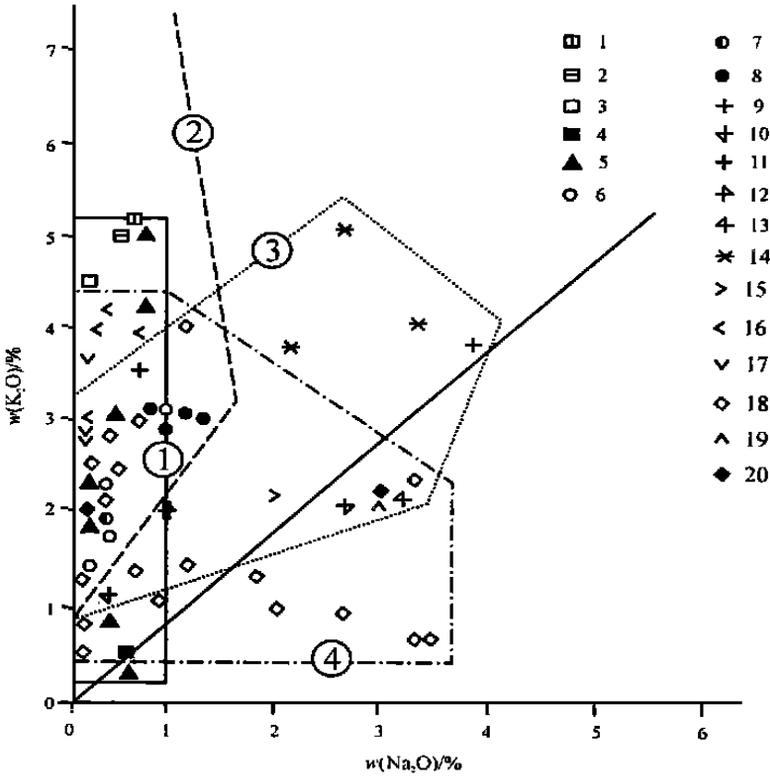


图4 含铀、钒的含碳沉积物(1),含铜的含碳沉积物(2),无矿化油页岩(3)和赋存有海底喷气 Pb-Zn 矿化的含碳沉积物(4)的 K_2O - Na_2O 图解(据 Kribek, 1989)

1~5. 含铀、钒的黑色页岩: 1 瑞典阿伦页岩; 2 美国查塔努加页岩; 3. 苏联爱沙尼亚的含铀黑色页岩; 4 澳大利亚朱利亚克里克组; 5. 中国寒武纪含铀、钒页岩。6~8. 含铜黑色页岩: 6. 波兰含铜页岩; 7. 津巴布韦的铜矿床; 8. 澳大利亚卡潘达矿床。9~14. 矿化的油页岩: 9. 英格兰基默里奇组; 10. 美国莫里组; 11. 美国格林河组; 12. 丹麦克伦哈根组; 13. 美国蒙特雷组; 14. 巴西伊拉蒂组。15~20. 赋存有海底喷气 Pb-Zn 矿床的含碳沉积物: 15. 芬兰奥托孔普; 16 瑞典斯泰肯约克; 17. 澳大利亚伍德拉文; 18. 苏联卡累利阿的海底喷气 Pb-Zn 矿床; 19. 澳大利亚坎博尔达; 20. 美国育空海气喷气矿床

3 结论

综上所述,就其化学特性而论,缺氧环境中的沉积物和变质沉积物显然是一种能供类型极不相同的矿化定位的环境。

在沉积作用阶段,缺氧沉积物是微量元素和硫的储集库。但只有在非常特殊的条件下,即只有当海底热液活动使沉积物富集金属时,沉积下来的金属才能形成矿床。

有重要经济意义的矿床类型只形成在成岩作用、变质作用或有利构造条件下的渗滤活

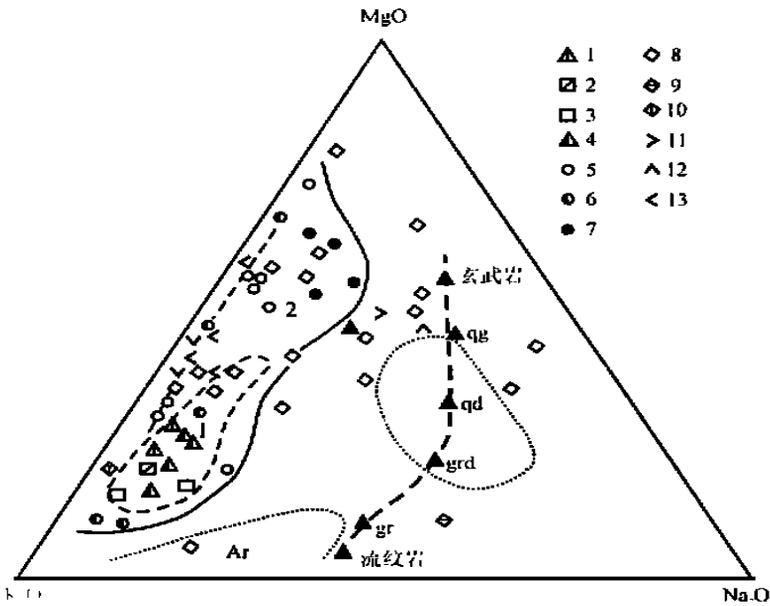


图5 含铀、钒黑色页岩(1区);含铜黑色页岩(2区)和作为海底喷气硫化物矿床主岩的含碳沉积物(由于数据相当分散未划出其区域)的 $K_2O-MgO-Na_2O$ 图解(据 Kribek, 1989)

图解表示了一些火山岩和岩浆岩、硬砂岩、长石砂岩和砂岩的趋势线。1~4. 含铀、钒黑色页岩; 1. 瑞典阿伦页岩; 2 美国查塔努加页岩; 3. 苏联爱沙尼亚含铀黑色页岩; 4 中国寒武纪的含钒黑色页岩。5~7. 含铜黑色页岩; 5. 津巴布韦的黑色页岩; 6. 澳大利亚卡潘达矿床; 7. 波兰含铜页岩。8~12 赋存海底喷气 Pb-Zn 矿床的黑色页岩; 8. 苏联卡利阿的海底喷气矿床; 9. 澳大利亚皮尔巴拉断块的矿床; 10. 美国育空地区的海底喷气矿床; 11. 芬兰奥托孔普; 12. 澳大利亚卡潘达; 13. 瑞典斯泰肯约特。G. 硬砂岩; Ar. 长石砂岩、砂岩; bi 黑云母; g 辉长岩; qg 石英辉长岩; qd 石英闪岩; Gr. 花岗岩; grd 花岗闪长岩; i 伊利石

化转移之后。因此,含碳地层中的矿床在多数可以称作多成因的。

含碳地层中的矿床有两种形成方式:直接的,即通过有机质对金属的吸附、有机金属络合物或含矿溶液的还原作用形成;间接的,即经形成的矿床(主要是硫化矿床)在缺氧环境中免受后来的氧化和破坏。

译自 B.Křibek “Metallogeny, structural, lithological and time controls of ore deposition in anoxic environments.” Mineralium Deposita, 1991, 26(1): 122—131.