

黄金科技丛书

金银矿产选集

第十五集

冶金工业部黄金情报网
国家黄金管理局长春黄金研究所

一九九一年八月

目 录

1. 论微细浸染型金矿床的形成条件和成矿机制	郑明华 周谕峰 顾雪祥 (1)
2. 中国东部火山岩型金矿床的类型及其地质特征	林文通 (31)
3. 油田有机层位中含金性初论	帅德权 胡晓强 (43)
4. 近十年来微细浸染型金矿地质及其成矿模式发展综述	王靖才 (52)
5. 一种微细浸染型金矿金的赋存状态研究	王壁珍 (57)
6. 论微细浸染型金矿的特征指示元素	王小春 (64)
7. 岩脉与金矿化的关系	真允庆 (72)
8. 关于金矿源的几个模式研究	孙胜龙 (81)
9. 国内外金矿化探现状及对我国找金的建议	郑 转 朱仁慈 李 惠 (90)
10. 黄金市场的类型、特点、管制与交易	郭贤才 (106)
11. 吉林夹皮沟金矿床含金石英的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化年龄测定	吴尚全 (114)
12. 吉林省东部金矿密集区的基本地质特征及找矿远景	徐光荣 (126)
13. 对吉林小西南岔金矿成矿作用的新认识和找矿建议	谢贵明 (131)
14. 吉林延边东部砂金搬运距离研究	杨 翼 崔文刚 (136)
15. 内蒙热水金矿床地质特征及赋存规律	祁玉海 李昌寿 (140)
16. 内蒙呼盟甲乌拉银多金属矿床成矿模式	王大平 邵永恕 (145)
17. 内蒙金矿类型、成矿地质特征及找矿方向	郭砚田 (151)
18. 河北冀东牛心山重熔花岗岩地质地球化学特征及金矿成矿作用	舒 航 杨正光 米祥玉 孙中庆 (160)
19. 河北崇礼东坪式金矿床地质特征及矿床成因	宋官祥 (173)
20. 河北宽城峪耳崖金矿新发现重要矿床类型	吕上英 (184)
21. 山东招远道头镇金矿资源特点及其找矿方向	胡肇华 赵学谦 杨玉敬 (189)
22. 秦岭地区金矿成矿地质背景和成矿区划	罗镇宽 关 康 (194)
23. 陕西小秦岭葫芦沟金矿床化探找金效果	袁尧天 (201)
24. 小秦岭金矿田含金石英流体包裹体的有机成分及其与金矿化的关系	栾世伟 陈 梅 (209)
25. 豫西熊耳山金矿集中区地质特征、成矿作用和成矿区(带)划分	富士谷等 (215)

26. 宁夏金场子氧化带金矿床中的黄铁矿特征.....	邵洁涟 (222)
27. 甘肃白银矿区伴生金及综合利用.....	谷耀枕 (230)
28. 四川东北寨微细浸染型金矿床成矿物理化学条件和成矿过程分析	郑明华 顾雪祥 周谕峰 (234)
29. 川西北砂金矿的地质特征及开发利用途径的探讨.....	杜劲光 李 茵 (244)
30. 四川黄金坪金矿的矿石学研究.....	帅德权 毛玉元 (249)
31. 黔东南金矿的多成因成矿特征.....	裴少潭 (261)
32. 黔西南微细浸染型金矿控矿条件及找矿标志.....	陶长贵 (266)
33. 滇西浅成热液金矿的区域成矿规律与找矿前景.....	黄仲权 (374)
34. 云南个旧西矿区含银铅锌矿床成矿地质条件.....	戴福盛 (281)
35. 云南哀牢山金矿带原生金矿床的类型及控矿条件.....	俞广钧 (291)
36. 新疆穷布拉克铜银矿床的发现与主要研究成果.....	王士明 (299)
37. 广西东南金矿成矿地质特征及找矿远景.....	刘腾飞 (306)
38. 广西凤山金牙金矿—我国独特的卡林型金矿床.....	方耀奎 (314)

论微细浸染型金矿床的形成条件和 成矿机制

郑明华 周渝峰 顾雪祥

(成都地质学院)

微细浸染型金矿床,系指由热水溶液(主要为非岩浆热水溶液)作用形成的、在不同成分的容矿地层中的金呈细分散状分布并具经济价值,矿化很少受结构控制或不受结构控制(至少在手标本上如此),金一般以超显微和显微状产出,少量或极少量可以可见金出现者。

此类矿床可产于不同时代的地层中,但矿化作用则多与较新的地质事件有关。

微细浸染型金矿床60年代发现于美国卡林地区,随后根据卡林金矿床的矿化、蚀变和构造特征,相继在区域上发现了一系列类似的金矿床。这些重要矿床的发现,曾被称为美国金矿矿业史上的“轰动性事件”。

微细浸染型金矿床多成片、成带分布,常构成金的集中区。如美国内华达,自卡林矿床发现后陆续找到大小不等近30个金矿床,矿化带长达960公里,多个矿床金储量均在百吨以上。今天,内华达州金产量已占美国金的总产量的60%。近年又在原先氧化矿石之下发现了深部硫化物矿石,品位高厚度大。该地区最大的产金公司纽蒙特矿业公司在400平方公里范围内即获储量1710.5吨。1965—1988年间累计产金186吨,预计1990年产金46.5吨。我国自70年代以来,在滇黔桂三角地带陆续发现了板其、丫他、戈塘、紫木圪、烂泥沟、三岔河、高龙、金牙等微细浸染型金矿床;在川陕甘三角地带发现了东北寨、桥桥上、丘洛、拉尔玛、二台子等微细浸染型金矿床,上述矿床多可达大型以上规模(按中国标准—作者注)。此外,世界许多国家和地区也有重要发现,如加拿大、西班牙、苏联、新西兰等。目前,微细浸染型金矿床已成为世界上最重要的金矿类型之一。

就我国当前的金矿床类型而言,最重要的、规模较大者多属与花岗岩有关的矿床,这类矿床主要分布在我国北方地区,虽然对其成矿的地质背景、成矿机制和找矿方向等尚存在不同的认识,但其产出的基本特点大体上已为人们所了解。如山东招掖、吉林夹皮沟、河北金厂峪、河南小秦岭、黑龙江团结沟等等,这些矿床的发现和开发,是我国金矿地质工作者的重大成就。于是,一些时期以来人们竞相提出加强对此类矿床的研究的建议。鉴于我国金矿地质的研究史和开发史,人们多注重于研究与花岗岩有关的或与混合岩化有关的金矿床,而对于微细浸染型金矿床的研究,则起步晚且研究程度差。但从当前所取得的大量资料表明,恰恰是微细浸染型金矿床,极大可能是我国金矿地质工作取得突破的重要方向。

应该指出,我国具有微细浸染型金矿床产出的良好地质构造背景,许多地层层位的含金性极佳,金矿点和矿化现象星罗棋布,并在许多地区(贵州、广西、四川、云南、西藏、陕西、河南、湖南、湖北、吉林等)发现了一批重要的金矿床。显而易见,对此类矿床详加研究并取得规律性认识,对在我国顺利开展金矿地质工作和金矿床的发现,改善我国金矿资源面貌具有十分重要的意义。

一、微细浸染型金矿床的矿石建造类型

微细浸染型金矿床,虽然其容矿地层可能是多种多样的,但在元素的地球化学组合上却表现出明显的共性。根据国内外的已有资料,微细浸染型矿床的产出地层多为含碳量较丰者,矿床内具有一套固定的元素组合,即Au、Ag、Hg、Sb、As、(Tl)组合。换言之,即金的矿化与汞、锑、砷等的矿化关系异常密切。上述元素组合不仅表现于矿石中,而且在矿源层中也清晰显示。另一方面,微细浸染型金矿床则贫于Cu、Pb、Zn等常见贱金属,因而在其他金矿中普遍出现的铜、铅、锌硫化物,在微细浸染型矿床中则极少出现或缺失,仅在某些特殊条件下形成的微细浸染型矿床可见较多的贱金属硫化物。然而,在微细浸染型金矿床的矿石中,则无一例外地产出黄铁矿(含量不同而已),并成为金的主要载体。

由上可见,微细浸染型金矿床在物质组成和元素地球化学组合上有许多显著的共同特点,但在标型矿物上,不同地区和不同时代产出的矿床则往往不同。这样,人们就有可能将微细浸染型金矿床划分出不同的矿石建造。不同矿石建造的出现,显然与该地区的地质地球化学背景以及成矿的物理化学条件的差异有关。

1、金—雄(雌)黄矿床

此类矿床以矿石富砷为特征,其表现形式为矿床中出现相当普遍和含量的砷矿物,砷矿物主要为雄黄和雌黄,尤其前者往往其数量可达工业开采的程度。

金—雄黄建造矿床,通常产于碎屑沉积建造或火山碎屑沉积建造的破碎带中。矿区内及其相当范围的区域内无显著的岩浆活动。

矿体的直接围岩一般为炭质板岩、千枚岩和细粉砂岩。矿体大体顺层或沿破碎带呈似层状或透镜状产出。矿石构造为脉状、网脉状、浸染状、角砾状、糜棱状等。矿石中的标型矿物主要为雄黄(呈块状、斑杂状产出),还可见微量的毒砂、自然砷、辉锑矿等。黄铁矿极细小。脉石矿物为方解石和石英。金为超显微金,偶见显微金。

此类建造矿床成矿多阶段显见,其中以雄黄—石英阶段和雄黄—碳酸盐阶段最为重要,是金的主要矿化阶段。金的含量与地层中有机炭的含量为同步消长的正相关关系;地层中粘土矿物的吸附似乎也起重要作用,但可能不是主要的金载体。

金—雄黄建造矿床,近年来在我国有重要发现,其中以四川松潘东北寨矿床、桥桥上(大寨)矿床等最为著名。尤其东北寨金矿床,是我国西部地区发现的规模最大的层控金矿床,其主要地质特征可与美国西部的卡林型金矿床类比。由于矿床储量、矿物组合特殊以及层控性质典型,从而引起人们的广泛兴趣。

2、金—毒砂建造矿床

此类建造矿床也以矿石中富砷为特征，但矿床中则以毒砂和砷黄铁矿的广泛产出现为标志。毒砂则为此类建造矿床的标型矿物。

矿床多产于碎屑岩和粘土岩中，或为两者的互层。矿化以含金的石英细脉或细网脉或浸染状产生，矿体呈似层状、透镜状，其产状与容矿层的产状大体一致，但也有不一致者。容矿层含炭量亦高，故多呈深灰色、灰黑色和灰色。

金以显微状和超显微状产出，与毒砂和黄铁矿关系十分密切，而毒砂的含量最为突出。此外，容矿层中的粘土矿物也有吸附金，尤其水云母是重要的载金矿物。

矿石除毒砂和黄铁矿为主的金属矿物外，有些矿床中还出现少量的雄黄、辉铋矿等。脉石矿物主要为石英，少量方解石。

金—毒砂建造矿床，近年来在我国西南地区有许多重要发现。自七十年代贵州的板其、丫他矿床发现以后，继续发现了规模可观的贵州紫木函、烂泥沟、戈塘矿床，广西的金牙、高龙矿床等一系列金矿床，从而构成了在黔、桂、滇所谓的“金三角地带”。以紫木函矿床规模最大。该矿床矿体呈似层状和透镜状产于断裂破碎蚀变带中，矿体与围岩呈渐变过渡关系，但岩性对金矿化和金的富集具有重要影响。

金—毒砂建造矿床在我国微细浸染型金矿床中占有举足轻重的地位。在我国西南地区发现此类建造矿床的远景极佳。

3、金—辉铋矿建造矿床

此类建造矿床以矿石中出现大量的辉铋矿为特征。矿床赋存于一套火山—碎屑岩和海底喷流岩中。前者如四川的丘洛，赋矿地层（三叠系）由玄武岩、玄武质凝灰岩、角砾状灰岩和砂板岩组成；后者如甘肃拉尔玛，赋矿地层（下志留统）由硅岩、粉砂质板岩和碳质板岩、泥板岩组成。

矿石中矿物组成较为复杂，但主体矿物为辉铋矿，多呈团块状、脉状产出，矿体风化后常见大量的黄色铋华。金与辉铋矿关系密切，一般呈同步消长关系。此外，矿石中可见到少量和微量的辰砂、雄黄、贱金属硫化物。非金属矿物主要为石英、方解石、重晶石等。黄铁矿不仅颗粒细，而且常呈莓状产出。

此类建造矿床一般含金性较好，金多为超显微状或显微状存在。金品位多在十几ppm至百余ppm。铋在有些矿床中可以工业开采。

金—辉铋矿建造矿床，近年来在我国各地均有发现，并具相当工业价值，著名的有四川的丘洛、若尔盖，甘肃的拉尔玛，以及湖北、贵州等地。

4、金—辰砂建造矿床

此类建造矿床多分布于汞矿区或含汞背景值高的地层中。在此类地质背景中，Au和Hg的含量关系显示典型的同步消长关系，显然，这是由于Au和Hg具有相近的物理参数以及相近的迁移途径和方式使然。

金—辰砂建造矿床是以矿石中富含辰砂和/或黑辰砂（辰砂可达工业开采含量）而

著称。根据产出的地质背景和化学成分，一般可分为两个亚类：一类产于火山岩或火山沉积碎屑岩系中，矿体多沿碎裂化、片理化和角砾岩化带分布，矿石中除主要矿物辰砂和黑辰砂外，尚伴生少量的黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿等；二是产于含碳质较丰的碳酸盐岩层中，矿石中除辰砂为主体外，尚伴生有雄黄、辉锑矿、自然砷等。

此类建造中的金主要呈次显微状金产生，少量（约10%）呈显微金出现。但在氧化带中有时可见到自然金粒（明金）。

金—辰砂建造矿床分布相当广泛。由于Au和Hg的相类似的某些地球化学特性，使得有可能在Hg矿区内发现Au的富集地段。世界上一些著名金矿床即是在原先汞矿床的基础上发现的，如美国内华达的金—汞矿床。由汞矿向金矿发展的许多有说服力的矿例的发现表明，有目的地检查汞矿床、矿化和异常区，就可能在研究程度较高的地区以及汞活动的聚合区寻找到金汞建造矿床。

此类建造矿床在我国有很好的远景，特别在湘黔汞矿带中前景更佳，已经发现的一些矿床如湖南衡东石峡、贵州的三都—丹寨等就是明证。

5、金—铜硫化物建造矿床

此类建造矿床以金和铜紧密共生为特征。矿床中Au和Cu的含量均可达到工业品位，在有些矿床中除Cu外，Pb和Zn亦有相当含量，从而构成金—多金属建造矿床。

矿床多产于碳酸盐系地层中，矿体赋存于破碎角砾岩化带中呈板状、囊状和脉状产出。矿石的化学成分以Au、Cu为主，伴生Ag、Pb、Zn、Co、Ni等。主要金属矿物为黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、黄铁矿等；脉石矿物为石英、方解石、重晶石等。金以超显微金和显微金形式为主赋存于黄铁矿以及铜矿物中，也见少量微粒或细粒单体嵌布于石英、碳酸盐矿物和黄铁矿的晶隙中。

此类建造矿床见于我国秦巴地区，其中有名的，如陕西二台子矿床等。

综上所述，微细浸染型金矿床，可按矿石中共生的主要硫化物（该硫化物约占除黄铁矿外全部硫化物总量的90%左右）而划分出不同的矿石类型，如表1所示：

表 1 微细浸染型金矿床的矿石建造类型

矿石建造	共有矿物	标型矿物	伴生矿物（主要）	我国矿例
金—雄黄	黄铁矿	雄 黄	自然砷 毒砂	东北寨、桥桥上等
金—毒砂	黄铁矿	毒 砂	雄黄 辉锑矿	板其、丫他、金牙、高龙等
金—辉锑矿	黄铁矿	辉锑矿	辰砂、雄黄、贱金属硫化物	丘洛、若尔盖、拉尔玛等
金—辰砂	黄铁矿	辰 砂	黑辰砂、雄黄、辉锑矿	石峡、三都—丹寨等
金—黄铜矿	黄铁矿	黄铜矿	斑铜矿、辉铜矿、少量方铅矿、闪锌矿	二台子等

除上述主要矿石建造外，在我国尚报导有所谓“碳硅铀型金矿床”。此类矿床产于

碳酸盐地层中（有机碳含量高），或产于硅岩层中。金与沥青铀矿关系密切，实属金—沥青铀矿建造矿床。但目前此类建造矿床尚未发现规模较大者，一般多属矿点或以伴生金出现。

二、微细浸染型金矿床的含矿主岩

含矿主岩，人们往往将热液矿化与其某些有机联系割裂开来，仅注意含矿主岩本身性质或含矿主岩提供矿质的一面，而忽略了热液选择其作为矿质载体的另一面。本文所指的含矿主岩，指在热液矿化过程中作为矿质载体的原岩而言。

微细浸染型金矿床的含矿主岩，主要有不纯的碳酸盐岩、细碎屑岩（包括粉砂岩、粘土岩、黑色页岩等）、火山沉积岩、火山岩和喷流岩（硅岩）等。显然，揭示含矿主岩与金矿化的内在联系无疑十分重要。

就上述岩类而言，虽岩性各异，但也存在若干共性，主要表现为：

（1）在化学成分上总含有较多的碳酸盐物质，除碳酸盐岩层外，在细碎屑岩和火山沉积岩中的胶结物，均产出众多的碳酸盐的微晶；

（2）岩石一般呈灰、深灰和灰黑色，这与岩石中含较多有机碳及其衍生物有关。岩石中还常含有一定量的同生成岩黄铁矿（一般在0.1—1%），表明含矿主岩的原始物质是在较还原的环境中沉积的；

（3）岩石的碎屑物较细小（一般小于0.2mm），含较多的泥质物。岩石的层理发育，孔隙度较高；

（4）主岩不仅具有为矿液提供矿质的矿源层的性质，而且是作为矿液活动时金等成矿物质的载体主岩存在的。

（一）不纯碳酸盐岩

作为含矿主岩的不纯碳酸盐岩，多为薄层粉砂质、泥质、碳质石灰岩或白云岩。在此类主岩中，Hg和Ba的异常相对显著，故易形成Hg—Au建造矿床。

不纯碳酸盐岩之所以能成为含矿主岩，显然与此类岩石的化学性质活泼、质地复杂和具一定孔隙度等利于含矿溶液的流动和交代作用有关。

业已证明，此类矿床的矿质主要是通过后期热液溶滤主岩而来的，换言之，乃“就地取材”。

众所周知，在不纯碳酸盐岩中除方解石、白云石外，还含有较多的粘土矿物、石英和燧石，以及成岩黄铁矿和有机碳。原岩中的金主要呈胶体金或粉金被粘土矿物和碳质吸附，或呈卟啉物质存在。岩石中的碳酸盐矿物，特别是作为胶结物的亮晶方解石一般不含金。就原岩中的吸附金而言，似应属不稳定金，易于在热液作用下被活化而进入溶液中。以有机络合物形式存在的金来说，若遇氧化性相对较强的热液，也可因有机物部分氧化分解而使其中的金脱离束缚而进入溶液。实验表明，在低于300℃的较还原的条件下，金可通过介质与还原硫作用，形成金的硫氢络离子发生溶解。这些还原硫多来自岩层内被破坏分解的黄铁矿和有机质中的硫。显然，此种热液乃具弱还原性质的介质，从而既能有效地分解在同生成岩期强还原条件下生成的硫化物和有机碳，而且可避免使之完全氧化失去与金络合的能力。

需要指出的是, 同样为不纯碳酸盐岩, 但若彼此的成分、组构有差异, 其热液矿化情况可相去甚远。例如卡林矿床, 含矿层由彼此互层的两种在成分、组构上均不同的不纯碳酸盐岩组成(表2)。其中具明显纹理的泥质、砂质白云岩或钙质泥质(类型I)远比纹理不明显的薄层砂质含泥粒的粒泥状碳酸盐类岩石(类型II)金矿化好。Radtke等人(1980)通过研究认为, 前者的孔隙度和渗透率高, 有利于含矿溶液的运移和矿质的沉淀。但是此作用在多大程度上受控于主岩的孔隙度和渗透率, 这还是个值得进一步探讨的问题。对于微细浸染型金矿来说, 成矿时含金溶液沿连通性极好的断裂破碎带

表2 卡林金矿床罗伯茨山组上部两种类型容矿岩石的矿物特征

组 成	泥质砂质白云岩(类型I)	砂质含泥粒的粒泥状碳酸盐类岩石(类型II)
矿物组成特征	方解石 5—20%, 细粒	泥粒 40—65%, 粒度 50—300 μm
	白云石 25—45%, 菱形晶, 粒度 30—50 μm , 早期成岩	n %
	石英 20—30%, 棱角状, 粒度 50—100 μm , 含 1—3% 燧石	10—20%, 棱角状粉砂级—砂级
	伊利石 15—20%, 与碳质混在一起, 富集在由水流形成的纹层(0.5—2 mm)中	1—5 %
	蒙脱石 极少量	极少量
	高岭石 极少量	极少量
	黄铁矿 0.5—1 %	微量
	有机碳 0.3—0.8 %	0.2—0.4 %
	副矿物 少量, 种类多, 有长石、锆石、角闪石、独居石、金红石等	同类型 I
生物碎屑	除常见的骨针外, 仅含少量化石碎片	生物碎屑可高达 20%, 包括腕足、棘皮、海百合、骨针碎屑

(据 Radtke 等, 1980)

上返, 并由主通道扩散到旁侧渗透性相对较差的微细裂隙和细小间隙中, 进而金发生沉淀, 其中有相当多的金是沉淀于岩石更次级的毛细孔内, 而不是象许多其它类型热液矿脉那样, 矿质多沿溶液运移的主要通道沉淀。因此, 在这类矿床中, 含矿层内岩石的矿化程度, 在很大程度上取决于岩石的显微渗透性, 而不简单是岩石所在地段的断裂发育程度。

由上述可知, 在地下一定深度, 富含有机质或伴有黑色岩系地层的碳酸盐岩, 只要其内有金存在, 是不难在热液作用下形成含金流体的, 而这些流体在适宜的条件下完全可能将金卸载于某一局部地段形成矿床。

很显然,碳酸盐岩地层中是否含有一定量同生成因的原始金物质,乃此类金矿床形成的关键条件之一。对于成分较纯的碳酸盐岩地层,因岩石中缺乏金物质载体—粘土及有机质,层内几乎无金存在,从而不具备形成含金溶液的前提条件;而对于完全不含或少含碳酸盐物质的碎屑岩地层,尽管有时其内可能存在一定量的金,但因岩石化学性质相对惰性,不利于热液与之充分作用,限制了金活化进入溶液的程度,从而降低了成矿的可能性。对于处于上述两种岩性之间的不纯碳酸盐岩地层,因既含吸附金的矿物质,又具较活泼的化学性质,必然有利于成为一种含金溶液形成的母源。

然而,自然界不纯碳酸盐岩地层金的含量并非处处一致,而在很大程度上随构造环境的不同则有所差异,这必然会对后期成矿有所影响。因此,找出自然界中含一定数量金的不纯碳酸盐岩地层的分布规律,无疑是探寻此类金矿的重要一环。

我们根据全球范围内的产金不纯碳酸盐岩沉积的发育特征,认为其形成的构造环境主要为被动陆缘锥形大洋的陆棚带。例如,位于北美科迪勒拉地区的卡林成矿带,在沉积泥盆—志留系含矿主岩物质时,就处于被动陆缘的陆棚环境;又如陕西二台子金矿赋矿的碳酸盐沉积建造为泥盆纪扬子板块北缘被动陆缘型裂陷构造发展阶段的产物。这种构造环境,坡度一般较缓,沉积范围较广,环境相对稳定,致使此带既有化学沉积,也有一定量的陆缘细粒及粘土质剥蚀物沉积。由于此环境大洋较窄,陆棚沉积中含有一定数量来自洋底的金物质。但是,目前人们对于作为矿源岩的不纯碳酸盐岩地层原始金的供给规律,基本还未予以认真研究,这不免有些遗憾。从板块构造的发展旋回来看,此类金矿的形成过程大体是:板块裂开的发展期(幼年—青年期)形成不纯碳酸盐岩含金沉积建造,板块碰撞后的造山末期,原岩建造通过热液改造而最终在由造山作用派生出的断裂构造的适宜部位形成金矿床。如卡林金矿带古生代形成的含金沉积建造,在中生代—新生代期间,受太平洋板块与北美板块碰撞的影响,发育了一系列高角度断裂,并伴有中酸性岩浆活动,在这一过程中原沉积建造中的金被活化而成矿。我国陕西二台子金矿同样也是在后期扬子陆块与华北陆块碰撞过程中最终形成的。

(二) 细碎屑岩类

作为含矿主岩的细碎屑岩类主要包括粉砂岩、粘土岩和黑色页岩,有时这些岩石可浅变质成板岩或千枚岩。

虽然在内华达卡林矿床中,以此类岩性作为含矿主岩的矿石相对于不纯碳酸盐岩是次要的,但从世界范围来看,特别是在我国,此类岩性的含矿主岩所占的比例却是很大的。

以此类岩性作为含矿主岩的热液矿物组合特点是雄黄含量一般较多。

对于这类含矿主岩来说,原始矿物主要为碎屑石英、陆源和自生粘土矿物(常为水云母)、方解石、白云石、黄铁矿、有机质等。这类岩石在矿物成分上的一个很大特点是,含有数量很多的碳酸盐类矿物。事实上,此类岩性与不纯碳酸盐岩在矿物成分上是渐变过渡的,只是相对于后者陆源碎屑物略多些而已。因此,这些岩石也与不纯碳酸盐岩一样,既有大量粘土矿物,又含较多的碳酸盐矿物,故而同样具备了与不纯碳酸盐岩相似的成矿基本条件。

此类含矿主岩所处的含矿层可分出三种沉积建造,即以卡林成矿带部分地段为代表

的粉砂岩—泥质岩—碳酸盐岩沉积建造，以我国黔西南—桂西北一带为代表的粉砂岩—粘土岩沉积建造和以我国川西北东北寨、桥桥上金矿为代表的黑色页岩—碳泥质粉砂岩沉积建造。

在卡林矿带上的许多矿床，其含矿层岩性为不纯碳酸盐岩夹暗灰色钙质粉砂岩钙质泥质和灰泥质页岩等。此沉积建造中的细碎屑岩类因其组分的活泼性、岩石的渗透性不及碳酸盐类岩石，自然最终在矿化规模及矿化程度上显得略逊于后者。

以细碎屑岩类独立组成含矿层的沉积建造，是我国微细浸染型金矿床的一个特色。例如，自七十年代末以来，主要集中发现于黔西南、桂西北一带的数十个微细浸染型金矿床（矿点），其含矿主岩主要为泥质粉砂岩、细砂岩、粘土岩和少量碳质页岩等。而近年来在川西北地区发现的此类金矿化的含矿主岩主要由碳质页岩经浅变质而成的碳质板岩、千枚岩，这类含矿主岩向下可逐渐过渡为泥质粉砂岩、细砂岩类岩石。目前人们对于由细碎屑岩类独立构成的沉积建造，如何成为含矿主岩的机制了解还远远不够。如包括诸如矿质的来源，控制金从原岩中活化以及从矿液中沉淀富集于含矿主岩内的主要因素等。

从基本由细碎屑岩组成的原始沉积建造特征来看，构造环境与不纯碳酸盐岩有些类似，但地壳活动稍强，表现为陆地隆起剥蚀程度略大，盆地凹陷相对加深加宽。目前人们普遍认为以泥岩—泥质粉砂岩—杂砂岩组成的复理石建造，多可能形成于高能浊积环境。这种环境甚至比陆棚带含有更多的海底喷流作用带来的金，无疑为后期成矿创造了有利条件。至于黑色岩系沉积，则既可发育于深海富有机质盆地中，也可发育于浅海区域的泻湖、海湾等较封闭的环境中。由于这种环境氧化还原电位很低，可促使呈溶解状的高价态金属离子还原而沉淀下来，并为碳质物吸附，或呈金属有机化合物存在。因此，一般黑色岩系具有较高的金属含量。

这类细碎屑岩的后期热液矿化部位，常发育在与碳酸盐地层在空间上紧密相伴的层段，两套不同岩性的地层多呈断层或不整合接触。例如，在四川东北寨金矿区，碳酸盐地层与碎屑岩地层以断层相接触，构造破碎和热液蚀变在两侧地层中均见发育，但金矿化却仅发育于碳质千枚岩（板岩）中，而且矿化程度与相伴的不纯碳酸盐层的厚度存在一定的正相关关系。桂西北、黔西南一带的金矿化也不同程度具有类似特征。

前已述及，不纯碳酸盐岩若含金，则很可能成为后期热液矿化时金的母源。这种成因的矿液在沿通道上返途中，若遇厚度较大的断裂发育的细碎屑岩类地层，可使流入该建造中的矿液在物化条件上发生较大变化，导致矿液中物质变得不稳定而使Au迅速沉淀。

对于富含有机质页岩而言，很可能是因为提供了一种强还原环境，而使矿液中呈络离子迁移的金还原沉淀，并导致作为还原剂的有机质自身发生氧化而被部分消耗。例如东北寨矿区的碳质千枚岩（板岩）在受到后期矿液作用后，有机质含量相对于原岩普遍降低，平均为原岩的 $3/4 - 1/3$ 左右。据21件样品所作的Au—有机质回归分析表明，两者呈显著负消长关系，相关系数为 -0.74 。

以上所述的是细碎屑岩作为物理化学障，使它源矿质发生沉淀的情形。至于细碎屑岩本身是否能在作为含矿主岩的同时，又兼有主要矿源岩的作用，目前尚未见到有关于此

方面确切证据的报导。近年来,有人提出重新认识温压梯度,特别是压力梯度在矿质活化—迁移—沉淀过程中所起的作用,认为在后期构造作用下,褶皱而转入地下较深部位初始沉积建造中的矿质,是能够在地下较高温环境中,在较高应力状态下,发生活化而进入流体成为矿液的。这种矿液在压力梯度驱使下上返至浅部地段,因温压的降低,矿液中的矿质失去赖以活动的外部条件,并通过结晶沉淀再次转入稳定状态。不难看出,在此过程中流体是作为被动介质而搬运活化的矿质的。然而,鉴于众多的事实已表明,此类金矿化的流体多来源于天水,因此很难想象,下渗的雨水能够自由的进入地下长期处于高压状态的环境中而作为转移金的介质。若上述温压梯度成矿机制以热液介质来源于岩石内部的水或同生水来解释,则又与天水来源和成矿与岩石变质在时代上不一致的事实相矛盾。因此,这种成矿机制目前看来还难以自圆其说。

对于富含矿质的黑色岩系,作为此类金矿化矿源的条件是充分的,但在很多矿床中,含矿的黑色岩系地层厚度有限,与其内已探明的金储量在比例上很不协调。如东北寨金矿区,含矿黑色岩系地层仅厚60—100m,而在剔除热液叠加影响后所算得的黑色岩系原始丰度值为6.29ppb(另一数据为7.75ppb)。此值虽然高于该区金含量的本底值,但要靠自身矿质的活化,提供出形成目前规模的金矿床,热液改造过程的地下水循环深度就至少应达15km以上。显然,这难以令人置信。

那么,在何种条件下,又在多大程度上,作为含矿主岩的细碎屑岩同时又具有矿源岩的作用呢?关于这一问题,应该说目前所知甚少,是今后值得探讨的问题。

(三)火山岩、火山沉积岩

产于火山岩中的热液金矿,含矿主岩主要为中性—酸性或碱性火山岩,矿床形成于近地表环境,工业矿体就位浅(通常<1000m),矿化既有以浸染状交代体出现者,也有呈受构造控制强烈的脉状、网脉状和细脉浸染状出现者。因此,在以往的文献中,这类矿床多被称作“浅成热液型”、“第三纪型”、“闹堂型”或“(古)热泉型”矿床。但就成矿的地球化学作用而言,此类矿床与典型的产于沉积岩中的微细浸染型(卡林型)金矿床之间可能没有多大差异(Romberger, 1986)。因而,在此将其视为微细浸染型金矿中的一种特殊类型。

产于火山沉积岩中的“层状浸染型”金矿,因也具有中低温热液成因特点,且矿石主要具细脉浸染状矿化形式,故也纳入微细浸染型金矿床类型中来讨论。作为火山沉积岩的含矿主岩主要为各类火山凝灰岩或凝灰质粉砂岩、砂岩。

与卡林型金矿相比,这类火山岩、火山沉积建造的金矿床,其中的金矿物粒度稍大,显微金占较大比例;热液矿物种类较多,除自然金、黄铁矿、毒砂、辉锑矿、雄(雌)黄、辰砂外,常还发育银矿物、碲化物、贱金属硫化物和硫盐等,致使其它一些金属含量也常达工业品位而成为复合矿石;脉石矿物除石英、玉髓、方解石、重晶石外,还可有石膏、明矾石、冰长石、绿泥石等。

以火山岩为主岩的浅成低温热液金矿床,根据其热水溶液的pH值、矿物组合及矿石形成深度,一般又可分出三种类型,即热泉型、石英—明矾石型、石英—冰长石型。

热泉型金矿的含矿主岩主要为斑状或角砾状流纹岩。金矿化主要发育于火山岩穹窿中心及其有关断裂地热系统的较浅部位。金矿物呈细粒浸染状分布于硅化火山角砾岩中

和硅华中。此类矿床的实例有美国郎德山、麦克劳林、德勒马等。

石英—明矾石型金矿的含矿主岩主要为英安岩、安粗岩和流纹英安岩等火山岩。这类火山岩常发育于沉积岩区，特别是产有蒸发岩的地区。矿化多发生于火山口环状断裂带中或其它火山机构内部。热液矿物组合中可有硫砷铜矿、含银硫酸盐、金银碲化物、贱金属硫化物等。脉石矿物中石英—明矾石—叶蜡石组合分布广泛，常见含刚玉、硬水铝石、红柱石，并发育粘土矿物蚀变。此类矿床的实例主要有美国戈德菲尔德、萨来特维尔及日本Iwato。

石英—冰长石型金矿又称克里德型浅成热液金矿床，含矿主岩一般为具双峰演化特点的火山岩建造中的钙碱性火山岩，岩石类型有安山岩、英安岩、粗安岩、流纹英安岩和流纹岩等。伴有金矿物产出的石英—碳酸盐脉产于这些火山岩内，并以发育大量石英和冰长石为特征。金矿化同样受火山岩穹窿和破火山口地带的环状断裂、节理等构造控制。这类矿床的实例主要有美国科罗拉多的克里德、墨西哥的帕丘卡和日本的Toyoha。

上述三类金矿中的矿质一般认为主要来自于赋矿火山岩地段之下的基底岩石建造中。这些基底岩石大体上可分出三类，类型不同对于金矿化规模、矿物组合影响不同，其一般规模如下：

(1) 含蒸发岩的碳酸盐岩：因这类基底岩石能提供出较多盐分形成高盐度强淋滤液，故所形成矿床规模较大，富含银和贱金属，但金含量较贫。据认为矿质是以氯化络合物的形式被活化迁移的。

(2) 碎屑岩和变质沉积岩：因无蒸发岩，故缺乏高盐度的流体，因此形成的矿床规模中等，贫贱金属，但富金和银。

(3) 花岗岩或火山岩：因基底岩中盐类组分更为缺乏，故矿床规模较小，贫贱金属，银、金品位较低。

鉴于这类矿床的产出，与钙碱性火山岩活动间隙期的热液活动密切相关，因此形成的构造环境主要应为板块消减带上方的陆壳浅部，即岛弧区。此处有能产生火山作用的贯通断裂发育。此外，在大陆裂谷边缘、转换断层带内等环境也可产生出。目前这类矿床在环太平洋带上分布较多，成矿时代很新，主要为第三纪和第四纪，这显然与太平洋板块向周围陆块俯冲有关。我国东部因距太平洋板块俯冲带相对较远，处于环太平洋外带，成矿条件略逊于其内带，但在地质历史时期，有利这类矿床产出的环境在我国境内多有发育。因此，研究和寻找此类矿床应是一个不容忽视的课题。

火山沉积岩为含矿主岩的此类矿床的典型代表，当推加拿大的赫姆洛超大型金矿床。此矿床含矿主岩时代很老，并已发生变质，其原岩为一套酸性火山岩和凝灰质沉积岩建造，矿体整合产于霏细岩系与凝灰砂岩地层之间。目前有人认为该矿床实际上就是类似现代热泉金矿的古老产物。

另外，在一些以碎屑岩为含矿主岩的建造中，有时可见一些中基性—基性火山物质，如玄武质凝灰质砂岩、火山凝灰岩等。这些建造的产区或其附近有时在地质历史上还相伴发育细碧角斑岩火山沉积建造。这些特征表明，这类含矿岩系主要形成于拉张性盆地中，如弧后裂陷盆地、大洋盆地和大陆裂谷等构造环境。尽管有此特征的沉积建造

在全球范围内各个历史时期均有分布,但目前对于在此类建造中以火山沉积岩或凝灰质沉积岩为含矿主岩的微细浸染型金矿化特点还缺乏研究,尚未找出更多的规律。不过至少有一点是可以确信的,那就是在这种构造环境中,火山喷发作用必然能够从地下深处带出较丰富的金物质到地表,形成金含量较高的火山岩或凝灰岩,而成为同期热液或后期热液改造的金源岩。

在我国地史上,拉张性盆地沉积建造分布地域很广。例如,伴随特提斯海槽的扩张活动,玄武质火山沉积岩几乎遍及我国整个西南地区和西北部分地区的二叠纪—三叠纪沉积建造中。对次级构造域中包括微细浸染型金矿在内的金乃至其它矿种的成矿系列,显然今后很有必要在整体上予以系统研究。

(四) 硅质岩

这是一种近年来在我国境内发现的一种新类型金矿床。典型矿区位于西秦岭褶皱系南缘川甘交界地带。含矿岩系为寒武系太阳顶硅质岩类沉积建造。该建造厚近千米,为块状硅岩与板岩互层,夹石墨透镜体、碳化沥青,并有燕山期火成岩脉侵入。金矿体多沿层内断裂破碎带分布。含矿主岩主要为硅质岩,其次为碳硅质板岩、英安质角砾岩、玢岩等次火山岩,热液金属矿物主要有黄铁矿、辉锑矿、辰砂、毒砂、雄黄、自然金、黝铜矿、碲化物等,脉石矿物主要有重晶石、方解石、石英等。自然金中可能有相当部分呈显微金产出。硅岩型矿石含碳质较高,多呈灰黑色。热液矿化时代大致被认为是燕山期,金矿源很可能就是含矿的硅岩建造。

对于硅岩建造中的主要岩石—硅岩来说,色深且呈致密细粒块状,其矿物成分往往较单一,一般石英和玉髓石英含量在90%以上,其余主要是粘土矿物,方解石及有机质。硅岩原岩中含Au 5—30ppb,平均17ppb左右,可见当时沉积环境中较好的金源。

对于能够形成如此巨厚硅岩建造的原始沉积环境,我们认为大洋盆地或弧后扩张盆地环境。此环境中,由于含大量海底喷流作用带来的矿质,故含金丰度颇高,加之硅岩性脆,容易在后期构造应力作用下破碎产生连通性极好的构造裂隙系统,从而使岩石具极佳渗透性,成为后期热液矿化的重要矿源岩。据实验,较大硅岩块比相同体积的黑色页岩能够浸泡溶解出更多的矿质。因此,矿石中的金主要直接来自于硅岩建造的可能性很大。

硅岩作为含矿主岩的金矿类型的发现,不仅对于我国找金工作是一个突破,而且对于金矿成因理论的充实发展也具有十分重要的意义。

三、微细浸染型金矿床金的赋存状态

对金的赋存状态的了解,不仅对于选矿、冶炼加工具有实际的重要意义,而且对认识成矿过程中金的活化、迁移和沉淀,以及为建立成矿模式等也具有理论意义。

在微细浸染型金矿床中由于很难用光学显微镜发现金矿物,故长期以来金在此类矿床中的确切赋存状态,一直是争论的问题。

如前所述,微细浸染型矿床中的卡林金矿直到本世纪60年代才被人们所发现,在几乎整个60年代中,人们对用化学分析法圈定出的此类矿床中金的矿体,其中金的赋存状

态是始终令人迷惑不解的主要问题。八十年代，人们为探索 and 解决此问题曾作过不懈的努力，取得了初步的认识。

有证据表明，在各类含矿主岩中的微细浸染型金矿床，其中金主要以显微和超显微状产出，一般颗粒小于 $0.5\mu\text{m}$ 。据目前了解，主要存在以下几种赋存形式。

(一) 包体金 此种金主要包裹于黄铁矿晶粒中，其次也出现于毒砂、辰砂、石英和方解石等矿物中。

此种形式的金，在矿石中最为常见，是金的主要赋存形式。在矿床中金与黄铁矿的关系十分密切，例如美国卡林金矿带中的黄铁矿含金量普遍高于矿石（Radthe 等，1972，1985；Hausen和Park，1985）；我国东北寨金矿床中的热液成因黄铁矿的富集地段，往往含金量也高。在一些矿石类型中（黄铁矿碳质千枚岩），约60%的金赋存于黄铁矿中；贵州的板其、丫他金矿床中，黄铁矿也是主要的载金矿物（表3）。

鉴于赋存于黄铁矿中的金，其颗粒级细而不易被识别，所以曾有一些研究者（Radthe，等，1972，Wells和Mullens，1973；Hausen，1983）推测，金是与黄铁矿之间呈固溶体关系。我国一些研究者也因测得黄铁矿中有高含量的金，而认为两者呈类质同象（固溶体）关系。但是，有不少的研究者通过电子探针、扫描电镜、透射电镜以及X射线衍射等测试手段，证明这种关系存在的可能性是极小的。因为在对几乎所有此类金矿中富含黄铁矿的探针分析中，均未发现固溶体金产出的特有金均匀分布现象。在陕西二台子金矿中，含金黄铁矿通过穆斯鲍尔谱和X射线衍射测定，发现它们和不含金的黄铁矿的参数几乎完全一致。这表明金在黄铁矿中没有进入晶格。最近 Bakken 等人（1989）用俄歇扫描电镜，在卡林矿区的金矿石中获得了清晰度很高的包体金图象，这些包体金粒的直径一般在50—200 Å之间，主要包裹于黄铁矿之中，少量在辰砂和石英中。

以上列举的事实，无疑可以表明，微细浸染型金矿床中包裹金存在形式是确凿无疑的。

此外，含包体金的黄铁矿，在成分上和结晶习性上，也显示出某些特点。一般含金黄铁矿的As含量普遍较高。如卡林、科特兹等矿床中，金呈微细颗粒更多地分布于黄铁矿中和较大黄铁矿的富砷边缘（Wells和Mullens，1973）。我国二台子、板其、丫他、东北寨、桥桥上等矿床中的富砷黄铁矿，也无一例外地表现出比一般黄铁矿含金量高出许多。在结晶习性上，各矿床则表现的不尽一致，在卡林金矿床中，高含量金的黄铁矿主要呈微末级的极细粒的多孔球状集合体（Hausen，1981）；我国东北寨金矿床中，含金黄铁矿分为细粒和较粗粒两种，前者多呈立方体晶出，后者则多呈五角十二面体晶出。

(二) 吸附金 金在含矿主岩中可被粘土物质和碳质物所吸附，并以此成为微细浸染型金矿床中金的主要赋存形式之一。

我国贵州板其金矿床，矿石中的金约有93%与水云母有关（表3）。诚然，在经电镜扫描后也发现水云母中含有极细粒的含金黄铁矿。在东北寨金矿床中，约40%以上的金与伊利石和碳质物有关（视矿石类型不同而定）。最近贵州地矿局研究人员对紫木由

表3 板其、丫他金矿床中矿石内各矿物中的金分布情况

矿物名称	金在各矿物中含量 (g/t)		金在各矿物中的分布 (%)		备 注
	板 其	丫 他	板 其	丫 他	
黄铁矿	45.89	83.20	5.03	62.125	包括白铁矿
毒砂	75		0.30		
碳质	53.60	27.32	0.09	0.48	
水云母	75	5.20	92.99	35.01	
石英	1.76	0.24		1.82	
碳酸盐	0.03	0.75		0.55	含重晶石等
钛铁矿	2.94		0.02		
磁铁矿	6.50	0.61	0.02	0.005	
辉锑矿		1.32		0.01	

金矿床的研究也指出, 含矿层中凡粘土质多的地段, 金矿化变好。上述种种现象显然是金以吸附状态产出的反映。在湖南石峡金矿床中, 人们对矿石进行透射电镜观察, 见到埃洛石和褐铁矿表面吸附有细小圆粒状的次显微状金, 有的甚至进入了埃洛石的管状晶体的空心部位。在卡林金矿床中, 一些研究者 (Bakken 等人, 1989) 也获得了直径为 200—1000 Å 的游离金吸附于伊利石矿物上的清晰俄歇扫描电镜图象。Chao 等人 (1986) 也利用 X 射线荧光同步辐射先进技术, 探明了卡林原生金矿石的游离金产于伊利石或网脉状的交代石英等矿物中。由电镜等手段所直接观察到的吸附金, 无疑是金以此类赋存形式存在的直接证据。

(三) 粒间金 此种形式是金赋存在热液矿物晶粒之间。此种赋存形式虽然较为次要, 但在许多情况下无疑仍是存在的。如卡林成矿带上的格彻尔矿床, 在矿石中可见到游离金产于石英颗粒与粘土矿物颗粒之间的现象比比皆是。我国贵州一带的微细浸染型矿床, 特别是金—辰砂建造矿床中, 能见到金嵌布于石英、方解石等的粒间, 粒度在 0.001mm 左右。

(四) 裂隙金 此种赋存形式系指金出于脉体或矿物裂隙间。但此种赋存形式在微细浸染型金矿床中较次要, 偶见而已。在卡林金矿床中可见到在黄铁矿的裂隙中充填有自然金 (尽管极细小); 我国四川东北寨金矿床在靠近地表的矿石中, 也偶见充填于石英裂隙内的显微金粒。贵州三都—丹寨一些金—辰砂 (辉锑矿) 建造矿床中也见报导自然金呈次显微粒状充填于黄铁矿的显微裂隙中。

综上所述可见, 微细浸染型金矿床中金赋存形式是多种多样的, 但有主有次。迄今几乎尚未真正地在此类矿床中鉴定出呈晶格金或化合物形式的金存在, 尽管有些研究者曾提出过, 但其可信度较低。不过, 我们注意到在东北寨金矿床的矿石中, 尚有少部分金不能为常规的氰化液所浸取, 这可能意味着还存在某种形式的金至今尚未被认识。我们倾向于认为这可能是一种与有机物化合的金。

对于微细浸染型金矿床中的金多以显微状和超显微状产出的问题,至今尚少有专文论述,作者认为,可能由以下诸原因导致的:

(1) 热液活动成矿温度较低,深度较浅(压力小),这可引起在短时间内就失去呈硫(氢)络合物形式迁移的金赖以结晶成较粗粒的必要条件;

(2) 矿石和含矿主岩中含有较多的粘土矿物、碳质物以及快速降温过程中所形成的大量热液矿物(如黄铁矿等),从客观上提供了大量的分散捕金质点;

(3) 在微细浸染型金矿床形成时,一般成矿溶液量较少或补给缓慢,因而无法在短暂的沉淀过程中迅速地提供金质。其结果是金的沉淀与同时或准同时形成的黄铁矿、石英等热液矿物争夺空间过程中被后者所包裹或围限,失去了生长的空间;

(4) 由于显微裂隙极易受外界构造活动的影响或易被热液沉淀物充填而封闭,使得热液矿化过程中的矿液在岩石显微裂隙中的流动通道经常变化,从而出现一些早结晶的微细金的后继矿源被切断。

总之,探讨此类矿床中金特有产出形式的原因,是一个非常复杂的问题,尚须进一步探索。

四、微细浸染型金矿床金的成矿机制和成矿模式

鉴于人们在建立模式时所强调的具有成因意义的特征不尽一致,更鉴于微细浸染型金矿床在矿石建造特征、容矿主岩类型、矿化与蚀变的分带、构造控制的性质与程度,以及流体的化学性质与化学成分的演化等特征的差异多于共性,从而使人们难以从总体上把握和识别此类矿床的基本概念。

当前,在微细浸染型金矿床的成矿模式中,以下三种模式基础较好可供选择,即主要产于沉积岩系地层中的真正意义上的卡林型金矿床的流体混合—冷却模式;产于火山岩系地层中的金矿床的流体沸腾—酸化模式;以及产于喷流岩中的金矿床的海底喷流模式。

(一) 混合—冷却模式

真正意义上的卡林型金矿床,系下渗雨水与沉积地层广泛交代的产物。流体的混合与冷却,以及由此引起矿液成分和性质的改变,是导致金沉淀的有效机制。区域规模或局部规模地热梯度的加大,乃是矿化期间溶液迁移的驱动力。构造—岩浆活动则可能提供了驱动成矿系统的热量。在发生此种热扰动之前,地下水和较深部的孔隙水接应于水文平衡状态。由于岩层的渗透率和孔隙度随深度加大而减小(具体取决于含水层的性质),因而较深部的孔隙水会有颇长的停留时间,特别是在难于透水的地质层中更是如此。在此条件下,深部带中的孔隙水与储水层接近于化学平衡,且变得愈来愈显还原性,当储水层岩石中含大量硫化物和有机碳时尤其如此。在此化学演变过程中,流体从储水层淋滤出各种组分,这些组分与流体正在发生还原的成分是相容的。与此同时,较浅部的水由于从大气圈得到补给而受到一定程度的充氧作用。从浅部补给系统向深部静止状态的转变则是逐渐的,中间有一过渡性混合带。因此,有两种不同的地下水环境:下面是深部还原的溶液环境,上面则是充氧较多的溶液(图1a)。

随着地温梯度自下而上升高,在上述两个带之间的界面上出现了凸起(多出现在裂