

富碲化物型金矿形成的物理化学条件

——以水泉沟金矿田为例*

张招崇 李兆鼐

(中国地质科学院地质研究所, 北京)

提 要: 通过对冀北水泉沟金矿田与偏碱性岩有关的富碲化物型金矿和不含碲化物金矿床的地质特征、黄铁矿的标型特征以及流体包裹体成分的对比分析, 揭示了富碲化物型金矿的某些共同特征及其所指示的物理化学条件。同时利用热力学分析, 从理论上阐明了这些现象的内在原因, 并提出其形成需要三个条件: ①高碲的地球化学背景场; ②有利于碲活化和迁移的物理化学条件(酸性); ③有利于碲化物沉淀的物理化学条件: 低温、高 f_{Te_2} 值和高的 $f_{\text{Te}_2}/f_{\text{S}_2}$ 比值。

主题词: 富碲化物型金矿 物理化学条件 水泉沟金矿田

80 年代以来, 由于几个特大型浅成热液金矿床的发现而使得此类金矿得到普遍重视。Bonham(1984)将其划分为高硫型、低硫型^①和碱质型(或碲化物型)^[9]; 康斯坦丁诺夫(1981)划分为 Au 型、Au-Ag 型和 Au-Te 型, 并认为 Au-Te 型与碱性岩有关^[1]。国内多数学者接受了它们的观点, 认为在碱性岩与富碲化物型金矿之间有着必然的联系。笔者(1994)通过研究国内外大量富碲化物型金矿资料, 对上述观点提出了质疑, 并初步认为, 富碲化物型金矿的形成与高 Te 的地球化学背景场有关^[2]。水泉沟金矿田中的金矿床除金家庄金矿以外, 其余均属富碲化物型金矿, 且其本身又产于偏碱性岩体中, 这似乎为研究偏碱性岩石与富碲化物型金矿之间的关系提供了极好的范例。本文的目的就是试图在理论上解开这个谜。

1 矿田地质特征

水泉沟金矿田位于尚义—崇礼—赤城 EW 向深大断裂的南部, 断裂以北为内蒙地轴, 以南为燕山沉降带。区域出露的地层有太古界桑干群变质岩系、元古界长城系和蓟县系的一套海相沉积岩系以及侏罗系火山-沉积岩系。区内断裂构造较为发育, 主要有 EW 向、NW 向和 NE 向三组, 其中以 EW 向断裂最为发育, 而尚义—崇礼—赤城东西向深大断裂控制了水泉沟杂岩体的分布(图 1)。

水泉沟杂岩体走向近东西, 长约 56 km, 宽 6~8 km, 面积约 400 km², 呈岩基产出。岩体边界总体向外倾斜, 北缘倾角陡, 约 70°~80°, 南缘倾角缓, 约 40°~50°, 水泉沟金矿田中的大多数金矿床分布在岩体的南缘(图 1)。杂岩体南北两侧围岩主要为桑干群涧沟河组透辉角闪斜

* 博士生论文

张招崇, 男, 31 岁, 副研究员, 从事火成岩和金矿研究。邮政编码: 100037

1995-10-05 收稿, 1996-04-25 修改回

① 所谓低硫和高硫指的是矿物中硫元素价态的高低(如 S^{2-} 为低硫, SO_4^{2-} 为高硫), 而不是指矿石中硫化物含量的多少

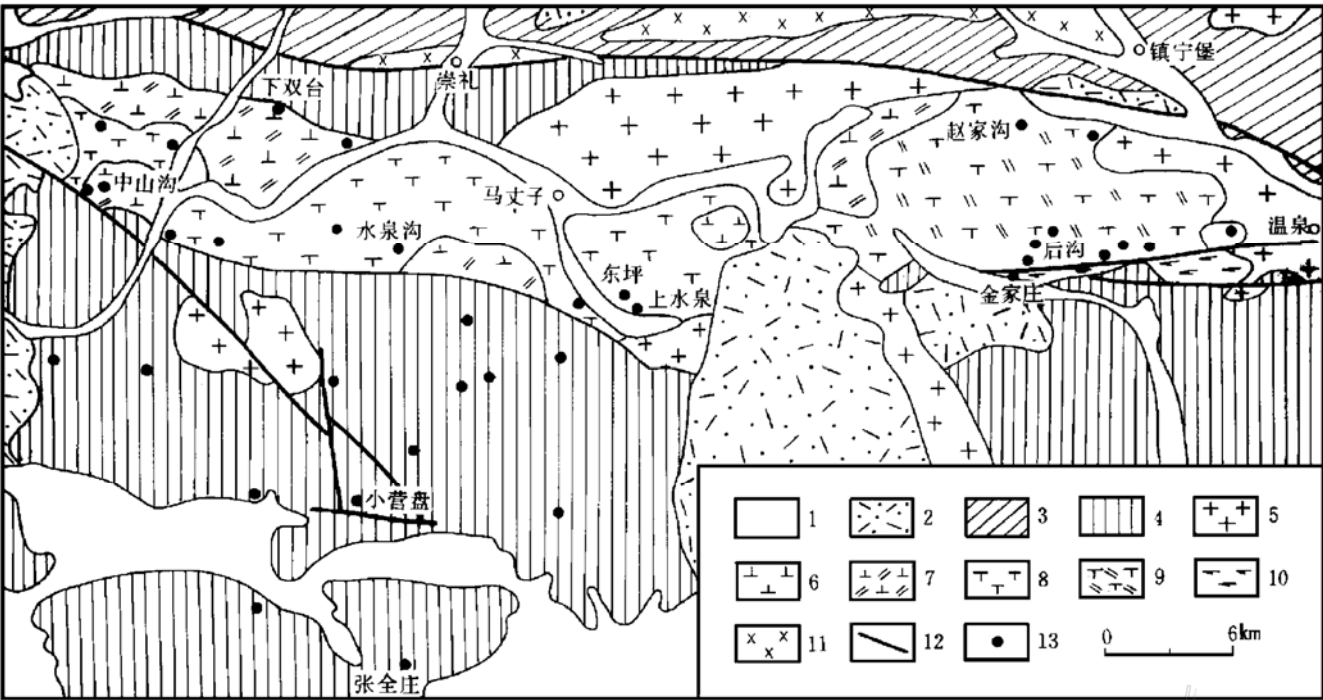


图 1 水泉沟金矿田地质简图

1—第四系;2—侏罗系;3—下元古界红旗营子群;4—太古界桑干群;5—燕山期花岗岩;6~9—印支期;6—辉石闪长岩组合;7—角闪二长岩组合;8—正长岩组合;9—碱长正长岩组合;10—元古代辉石岩;11—元古代花岗岩片麻岩;12—断层;13—金矿床(点)

Fig. 1. Diagrammatic geological map of the Shuiquangou gold orefield.

1—Quaternary;2—Jurassic;3—Lower Proterozoic Hongqiyingsi Group; 4—Archean Sanggan Group;5—Yanshanian granite;6—Pyroxene-diorite association;7—Amphibole monzonite association;8—Syenite association;9—Alkaline feldspar syenite association;10—Proterozoic pyroxenite;11—Proterozoic granite gneiss;12—Fault;13—Gold deposit(occurrence).

长变粒岩、片麻岩、斜长角闪岩和二辉麻粒岩等,西部和中部被上侏罗统张家口组和白旗组不整合覆盖。岩体内部岩石组合复杂,按其侵位顺序、矿物共生组合特征以及副矿物特征等将其

表 1 水泉沟杂岩体主要岩类的岩石化学成分(%)

Table 1. Chemical composition of major rock types in the Shuiquaogou complex

岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂	烧失量	总和
云辉闪长岩(2)	58.60	1.14	16.26	3.74	3.15	0.10	3.24	5.60	4.13	2.64	0.33	0.47	0.24	0.21	99.85
角闪二长岩(5)	58.22	0.46	17.45	2.98	3.44	0.15	1.97	4.62	4.77	4.04	0.24	0.99	0.34	0.02	99.69
正长岩(7)	63.35	0.27	18.85	1.78	0.73	0.08	0.29	2.69	6.39	4.71	0.09	0.28	0.16	0.16	99.83
霓辉正长岩(5)	62.68	0.27	18.79	1.33	0.96	0.09	0.63	2.43	6.59	5.22	0.06	0.37	0.30	0.08	99.80
碱长正长岩(7)	65.34	0.07	18.18	0.85	0.44	0.05	0.34	0.60	5.03	8.02	0.05	0.21	0.26	0.02	99.46
石英碱长正长岩(3)	67.08	0.49	14.32	3.62	1.31	0.21	0.29	1.49	3.51	6.09	0.06	0.33	0.30	0.03	99.13
碱长花岗岩(4)	74.14	0.05	13.89	0.74	0.39	0.03	0.11	0.23	5.12	4.67	0.06	0.12	0.02	0.02	99.59

注:括号内数字为样品数

划分为辉石闪长岩组合、角闪二长岩组合、正长岩组合和碱长正长岩组合四个岩石组合,每个组合又由若干种不同岩石类型组成。矿物特征及岩石化学特征表明水泉沟岩体是一个钾质—高钾质的钙碱性、弱碱性和碱性岩石共存的杂岩体,但主体为弱碱性岩石^①,为东坪金矿的容矿围岩。水泉沟杂岩体的主要岩石类型的岩石化学特征见表 1。

另外,在杂岩体周围还侵入有燕山期红花梁花岗岩、温泉花岗岩、上水泉花岗岩、北栅子花岗岩体及元古代小张家口超基性岩体。其中小张家口超基性岩体为金家庄金矿的容矿围岩。

2 矿床地质特征

迄今,在水泉沟杂岩体内部及边部发现的金矿床、矿点和矿化点有数十处,其中特大型矿床 1 处(东坪金矿),中型矿床 2 处(后沟和黄土梁子金矿),小型矿点多处,而可供民采的矿化点则比比皆是。这些矿床(点)绝大多数产于岩体的内接触带,部分产于岩体的外接触带及岩体中部。如果按矿床的工业类型,可将矿田内的金矿床划分为二种类型,即“东坪式”(以石英脉型为主,伴有蚀变岩型)和“后沟式”(蚀变岩型)。但这两种类型矿床的矿化特点总体比较相似,只是在控矿构造的性质、围岩蚀变的种类及其强度等方面略有差异。为了更加明显地反映这些矿床的内在特征,笔者根据矿床的成因类型划分为富碲化物型金矿和低硫浅成热液型金矿。其中后者只有金家庄金矿,前者为矿田内除金家庄金矿以外的所有金矿床。两类金矿的矿床地质特征见表 2。

表 2 水泉沟金矿田两类矿床地质特征对比表

Table 2. Comparison in geological characteristics between two types of gold deposits in the Shuiquangou gold orefield

矿床类型	富碲化物型金矿	金家庄金矿
容矿围岩	正长质岩石	超基性岩石
矿体形态	脉状、囊状、似层状、透镜状	脉状、扁豆状
围岩蚀变	硅化、钾长石化为主,其次为绿泥石化、绢云母化、钠长石化、碳酸盐化、重晶石化	硅化、碳酸盐化为主,其次为钾长石化、绢云母化、透闪石化、蛇纹石化
金属矿物	硫化物含量低(<5%),此外还有镜铁矿、碲化物	硫化物含量高(10%~20%),还有大量的磁铁矿以及少量的银的硫盐和锰矿物
脉石矿物	石英、钾长石为主,其次有钠长石、绢云母、方解石、绿泥石、重晶石	石英、碳酸盐(方解石、菱铁矿为主,其次为钾长石、绿泥石、绢云母)
金品位	变化大(1~4089 g/t),平均 5~20 g/t	1~300 g/t,平均 10 g/t
金的成色	897~990 平均 970	594~965 平均 760
成矿时代	燕山期	燕山期
金矿物	以自然金和碲金矿为主,少量银金矿	以银金矿为主,少量自然金

由表 2 可知,除容矿围岩性质不同以外,其它主要区别还表现在:富碲化物型金矿矿石中硫化物含量低,并出现较多的碲化物,围岩蚀变以强烈的硅化和钾长石化为特征,金矿物除自然金外,还出现碲金矿,而银金矿则很少见,自然金成色高是这类矿床的特点;金家庄金矿矿石

① 张招崇,1995,冀北水泉沟杂岩体的成因机制及其与金的成矿作用关系的研究,中国地质科学院博士论文

中硫化物含量高,没有出现碲化物而出现银的硫盐。围岩蚀变以硅化和碳酸盐化为主,金矿物以银金矿为主,有少量自然金。

3 黄铁矿的标型特征

黄铁矿是矿田内各个矿床中含量最高的金属硫化物,形成于金矿化的多个阶段,是金的一种十分重要的载体矿物和富集矿物。因此黄铁矿的标型特征对金矿床的成因具有重要的指示意义。

3.1 形态标型

黄铁矿的晶体形态主要有立方体{100}、八面体{111}和五角十二面体{210},少见菱形十二面体{110}。多数学者认为,黄铁矿的晶体形态可以反映成矿环境及成矿介质条件,其一般规律是:立方体晶形的黄铁矿出现在低硫逸度的条件下;五角十二面体晶形的黄铁矿则反映了温度适中以及硫逸度大的条件;八面体晶形则反映了低温、弱碱及高 As 的条件^{①[3]}。以东坪为代表的富碲化物型金矿的黄铁矿以出现立方体晶形为特征,其它晶形十分罕见,三个世代的黄铁矿在晶体形态上并无大的差别,由此反映了它形成于低硫逸度的条件。金家庄金矿主成矿期(即多金属硫化物阶段)时的黄铁矿晶形为五角十二面体,反映了主成矿期是高硫逸度的条件。

值得注意的是,位于水泉沟杂岩体南部以太古界绿岩为容矿围岩的小营盘金矿,其矿石中亦含有碲化物,其黄铁矿的晶形也以{100}晶形为主;而同区同样以绿岩为容矿岩石但不含碲化物的张全庄金矿,其黄铁矿的晶形为立方体和五角十二面体^[4],这与东坪和小营盘金矿含硫化物少以及张全庄金矿富含硫化物这一事实一致。因此,以上事实表明,低硫逸度对形成碲化物可能是有利的。

3.2 成分标型

矿田内金矿床黄铁矿的微量元素含量见表 3。由表 3 可见,水泉沟富碲化物型金矿的黄铁矿中金的含量普遍高于金家庄金矿。另一重要特点是 Te 的含量普遍较高,如东坪 7 号样,最高可达 1100×10^{-6} ,表明 Te 大量进入硫化物晶格中(Te 的克拉克值仅为 $0.001 \times 10^{-6}[10]$),这与 Te 在地球化学性质上与 S 相近有关。所以如果矿石中硫化物的大量形成,将导致成矿溶液中 f_{Te_2} 的降低。

4 流体包裹体地球化学及成矿物理化学条件

4.1 流体包裹体成分特征

本区金矿床石英中流体包裹体的气液成分见表 4。从表 4 中可以看出。

(1)阳离子一般以 K^+ 和 Na^+ 为主, Mg^{2+} 较低。

(2)阴离子中,除金家庄金矿以 SO_4^{2-} 为主以外,其它均以 Cl^- 为主。据有关资料报道^[11~14],美国的 Greeple Creek、斐济的 Emperor、古巴的 Florencia、巴布亚新几内亚的 Porgera 等富碲化物型金矿以及我国四川省石棉县大水沟独立型碲(金)矿床流体包裹体也均以富含 Cl^- 而

① 孙岱生,黄铁矿成因形态学研究,中国金矿床成因矿物学和找矿矿物学论文选集,1987,37~43

表 3 水泉沟金矿田黄铁矿微量元素含量(10⁻⁶)

Table 3. Minor element contents of pyrite from the Shuiquangou gold orefield

矿区	序号	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	As	Sb	Bi	Se	Te
东坪	1	130	142	180	320	120	14	10	0.5	0.5	2.3	0.23	130
	2	4.0	19	54	72	190	44	10	0.5	0.5	2.2	2.3	40
	3	30	14	5	140	30	25	10	0.5	0.5	0.5	16	21
	4	213	98	16	130	140	25	10	0.5	0.5	5.4	0.39	76
	5	19	15	13	2300	28	43	10	0.5	0.5	2.4	0.72	23
	6	76.1	77.2	150	4700	130	28	27	10	14.4	3.7	390	892
	7	90.7	548	220	800	90	25	4	84	1.6	0.5	11	1100
	8	275.0	142	2800	8100	350	6						1775
	9	85.10	7.00	51	2090	53	232	356	7.90				
	10	2500	0	500					8300				600
	11	4500	0	0					8100				600
后沟	12	703	77	82	1300	37	25	61	7.8	0.5	0.5	1.1	5.5
中山沟	13	17	530	220	9500	170	38	10	3.1	0.5	176	0.69	445
	14	19.5	106	10	3200	42	42	4	7.1	1.9	7.5	2.5	1.3
赵家沟	15	27.5	124	6	7300	130	60	7	9.6	0.2	46.5	6.9	0.32
金家庄	16	0.7	26	160	58	520	56	42	129	0.5	8.1	1.1	11
	17	59	293	160	1500	540	34	10	154	0.5	254	0.43	204
	18	0.35	70	0.12	0.025	0.027	188	116					
	19	0.05	15	0.03	0.001	0.01	26	20					

注：1~7 和 12~15 据蒋心明等(1992)张宣地区与偏碱性杂岩体有关的金矿床成矿规律及找矿方向的研究；16~19 据彭岚等(1992)^[5]；空白处代表未分析该元素

贫 S(S²⁺ 和 HS⁻ 等硫的存在形式无法测出而均以 SO₄²⁻ 报出)为特征。由此表明，富碲化物型金矿成矿流体中富含 Cl⁻ 而贫 S 不是偶然的。

表 4 水泉沟金矿田流体包裹体成分

Table 4. Fluid inclusion constituents of the Shuiquangou gold orefield

序号	单位	液相成分							气相成分							产出位置
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Cl ⁻	CO ₂	CH ₄	CO	H ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	
1	$\mu\text{g/g}$	0.75	0.77	2.89	3.12	1.86	1.44	3.56	7.46	0.47	0.00	0.11	0.00	0.00	607	中山沟
	(mol)	0.019	0.033	0.072	0.13	0.019	0.080	0.100	0.17	0.029	0.00	0.055	0.00	0.00	33.722	
	(mol%)	4.19	7.28	15.89	28.70	4.19	17.66	22.08	0.50	0.09	0.00	0.16	0.00	0.00	99.25	
2	$\mu\text{g/g}$	2.75	4.38	5.92	0.31	1.50	5.75	8.62	63.44	0.06	0.00	0.17	0.00	0.00	1352	下双台
	(mol)	0.071	0.19	0.148	0.013	0.016	0.319	0.243	1.442	0.004	0.00	0.085	0.00	0.00	75.111	
	(mol%)	7.10	19.00	14.80	1.30	1.60	31.90	24.30	1.88	0.01	0.00	0.11	0.00	0.00	98.00	
3	$\mu\text{g/g}$	1.75	1.46	3.97	0.31	0.57	1.38	3.10	2.87	0.04	0.00	0.10	0.00	0.00	334	赵家沟
	mol	0.045	0.063	0.099	0.013	0.006	0.077	0.087	0.065	0.003	0.00	0.05	0.00	0.00	18.556	
	mol%	11.54	16.15	25.38	3.33	1.54	19.74	22.31	0.35	0.02	0.00	0.27	0.00	0.00	99.37	
4	$\mu\text{g/g}$	2.51	3.46	1.58	0.62	1.29	1.13	6.21	35.45	0.08	0.00	0.10	0.00	0.00	1035	后沟金矿
	mol	0.064	0.15	0.04	0.026	0.013	0.023	0.175	0.806	0.05	0.00	0.05	0.00	0.00	57.5	
	mol%	12.05	28.25	7.53	4.90	2.45	11.86	32.96	1.38	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	98.52	
5	$\mu\text{g/g}$	1.82	5.28	2.14	1.01	5.41	0.57	14.84	25.58	0.18	0.00	0.01	0.00	2.34	265	后沟金矿
	mol	0.047	0.23	0.054	0.042	0.056	0.032	0.418	0.581	0.011	0.00	0.005	0.00	0.084	147.22	
	mol%	5.35	26.17	6.14	4.78	6.37	3.64	47.55	3.77	0.07	0.00	0.03	0.00	0.55	95.58	
6	$\mu\text{g/g}$	0.25	0.12	1.48	0.25	12.22	1.90	3.49	48.58	1.06	4.74	0.64	0.00	0.00	886.01	金家庄
	mol	0.006	0.005	0.037	0.006	0.127	0.106	0.098	1.104	0.066	0.169	0.32	0.00	0.00	49.242	
	mol%	1.56	1.30	9.61	1.56	32.99	27.53	25.45	2.17	0.13	0.33	0.63	0.00	0.00	96.74	
7	$\mu\text{g/g}$	0.75	1.89	1.70	0.39	18.84	0.22	2.71	102.43	0.05	0.51	0.06	0.00	3.40	779.25	金家庄
	mol	0.019	0.082	0.043	0.016	0.196	0.012	0.076	2.328	0.003	0.018	0.03	0.00	0.012	43.297	
	mol%	4.28	18.47	9.68	3.60	44.14	2.70	17.12	5.10	0.01	0.04	0.07	0.00	0.03	94.77	
8	$\mu\text{g/g}$	3.01	0.69	5.13	0.31	1.57	4.12	6.43	5.59	0.08	0.00	0.06	0.00	0.00	662	东坪
	mol	0.079	0.03	0.128	0.013	0.016	0.229	0.181	0.127	0.005	0.00	0.03	0.00	0.00	36.778	
	mol%	3.99	4.45	18.99	1.93	2.37	33.98	26.85	0.34	0.01	0.00	0.08	0.00	0.00	99.56	
9	$\mu\text{g/g}$	1.01	1.69	5.53	1.88	1.29	1.75	8.06	22.39	0.36	0.00	0.12	0.00	0.00	883	东坪
	mol	0.026	1.073	0.138	0.078	0.013	0.097	0.227	0.509	0.023	0.00	0.06	0.00	0.00	49.056	
	mol%	11.42	11.20	21.17	11.96	1.99	14.88	34.82	1.03	0.05	0.00	0.12	0.00	0.00	98.81	
10	$\mu\text{g/g}$	0.90	6.33	0.00	0.03	3.08	0.17	3.08	1.868	0.00	0.016	0.00	0.00	0.0063	43.795	东坪
	mol	0.023	0.275	0.00	0.001	0.032	0.009	0.087	0.044	0.00	0.002	0.00	0.00	0.0002	2.431	
	mol%	5.39	64.40	0.00	0.23	7.49	2.11	20.37	1.71	0.00	0.08	0.00	0.00	0.01	98.20	
11	$\mu\text{g/g}$	1.23	6.67	0.00	0.00	4.11	0.28	7.47	1.0873	0.00	0.048	0.00	0.00	0.0081	17.5671	东坪
	mol	0.0315	0.029	0.00	0.00	0.0428	0.0156	0.2104	0.0306	0.00	0.0017	0.00	0.00	0.0003	0.976	
	mol%	5.34	49.13	0.00	0.00	7.25	2.64	35.64	2.88	0.00	0.17	0.00	0.00	0.05	96.77	
12	$\mu\text{g/g}$	3.36	10.76	0.00	0.06	6.52	0.22	12.85	1.766	0.1654	0.3271	0.00	0.00	0.0501	17.993	东坪
	mol	0.0605	0.4678	0.00	0.0025	0.0679	0.122	0.362	0.0401	0.0103	0.0117	0.00	0.00	0.0088	0.9996	
	mol%	6.22	48.08	0.00	0.26	6.98	1.25	37.21	3.77	0.97	1.10	0.00	0.00	0.17	93.99	

注:1~4 和 8~9 的原始数据引自蒋心明等(1992);6~7 引自彭岚等(1992)^[5];10~12 为本文资料;10~11 为主成矿期石英;12 为灰色玉髓状石英

4.2 成矿物理化学条件

各矿床的均一法温度测定结果表明,温度变化范围较大:富碲化物型金矿的温度为 120~350 ℃,主成矿期为 200~300 ℃;金家庄金矿温度变化范围为 250~400 ℃,主成矿期为 250~320 ℃。

富碲化物型金矿的盐度为 1.5~11.5wt%NaCl,属中—低盐度,压力为 30~84MPa,属中—低压力,其形成深度相当于 1~2.83 km。根据流体成分可以计算出其它物理化学参数(表 5)。在此需要说明的是,在以往对成矿的物理化学参数的计算中, f_{Te_2} 均很少被考虑到。事实上, f_{Te_2} 对碲化物的形成起到至关重要的控制作用,同时可以为富碲化物型金矿的矿物共生组合提供理论依据。

表 5 水泉沟金矿田某些成矿物理化学参数

Table 5. Some metallogenic physicochemical parameters of the Shuiquangou gold orefield

序号	矿区	pH	Eh	$\lg f_{\text{O}_2}$	$\lg f_{\text{S}_2}$	f_{Te_2}
1	东坪	6.08~7.49	-0.58~0.86	-32~-30.5	-10.08~-6.36	-7.72~4.00
2	后沟	6.58~8.09	-0.56~-0.84	-32.5	-11.14~-7.15	-8.78~-4.97
3	中山沟	6.71~7.27	-0.94~-0.96	-32	-10.18~-9.79	-7.82~-7.43
4	下双台	6.85	-0.78	-30	-1.74	-8.38
5	赵家沟	5.81~7.14	-0.61~0.85	-30	-8.90	-6.54
6	金家庄	5.02~7.29	-0.09~-0.75	-30.5~-24.5		

关于自然金中银的含量与温度之间的关系,White 等(1975)根据实验得出了如下关系式^[15]:

$$\mu_{\text{Ag}}^{\text{Au-Ag}} = \mu_{\text{Ag}}^0 + RT \ln N_{\text{Ag}} - 5650 - 1600(1 - N_{\text{Ag}}) - 1.375T(1 - N_{\text{Ag}})^2$$

式中: $\mu_{\text{Ag}}^{\text{Au-Ag}}$ 为 Ag 在 Au-Ag 固溶体中的化学势; μ_{Ag}^0 为在标准条件下的化学势(在此取其值为 0); N_{Ag} 为 Ag 在 Au-Ag 固溶体中的百分比; R 为气体常数, T 为温度(K)。

利用已知关系式 $\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i$,可以得出 f_{Te_2} 与 Au-Ag 固溶体中的银含量与温度之间的关系式^[15]:

$$\lg f_{\text{Te}_2} = (1/4.576T) \{ -50087 + 16.10T - 18.296T \lg N_{\text{Ag}} + 4(1 - N_{\text{Ag}})^2 [5650 - 1600(1 - N_{\text{Ag}}) - 1.375T] \}$$

$$\lg f_{\text{Te}_2} = (1/4.576T) \{ -55592 + 22.87T - 18.296T \lg N_{\text{Ag}} + 4(1 - N_{\text{Ag}})^2 [5650 - 1600(1 - N_{\text{Ag}}) - 1.375T] \}$$

上两式适用的温度范围分别为 298.15~478.15K 和大于 478.15K。根据本区矿床与碲化物共生的自然金成色及成矿温度可以得出各个矿床的 f_{Te_2} (表 5)。计算结果表明,富碲化物型金矿均具有高 f_{Te_2} 的特点。另外,在一定温度条件下,对上两式方程两边分别求导数后可得出 $(\lg f_{\text{Te}_2}) < 0$,表明 $\lg f_{\text{Te}_2}$ 随 N_{Ag} 增大而降低,所以 f_{Te_2} 与自然金的成色呈正相关关系。这一点也

可以由其它地区的富碲化物型金矿中高的自然金成色得到证明:如前面所述的美国的 Creepie Creek、斐济的 Emperor 以及巴布亚新几内亚的 Porgera 金矿,其金的成色均在 900 以上^[11,12,14];再如我国江苏的漂水金矿,其金的成色一般在 950 以上,最高可达 970 以上^[6];而在小秦岭地区,从杨寨峪经金洞岔,到文峪金矿,其多金属硫化物(主要是方铅矿)的含量逐渐增加,而碲化物的含量则逐渐降低,其金的成色也逐渐降低。^[7]

某些常见的碲化物的形成可由下面的反应式表示:



在此利用一般的热力学公式:

$$\lg K = -\Delta G^\circ / (2.303RT) \quad (5)$$

这样,我们就可以从方程(5)求得在一定 f_{S_2} 条件下的 f_{Te_2} - T 图解(图 2)。从图 2 可以看

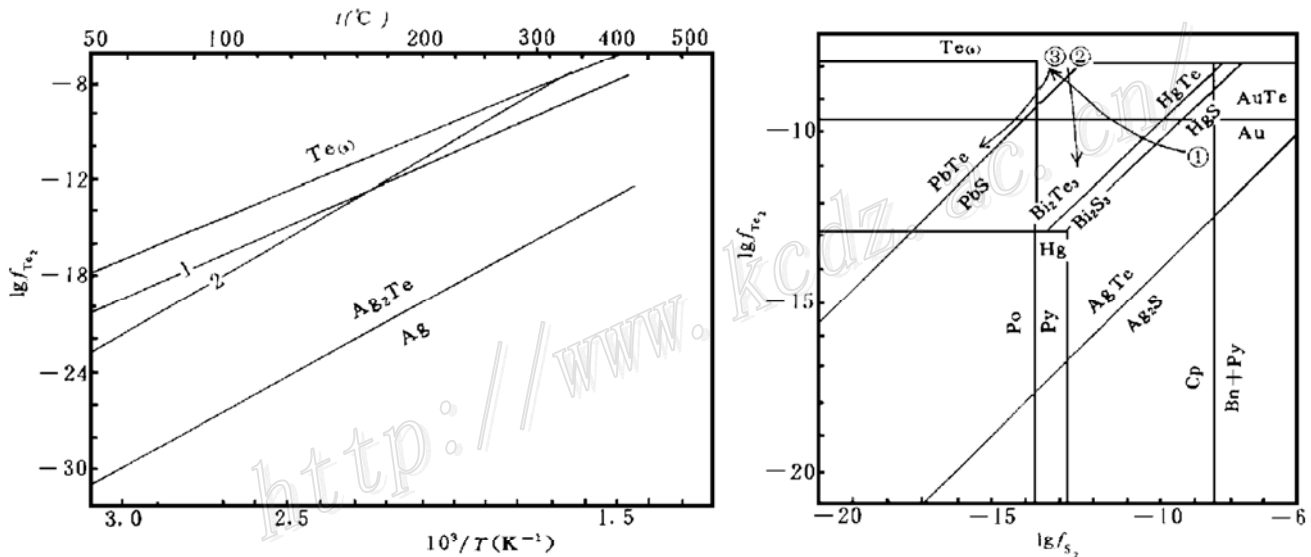


图 2 f_{Te_2} - T 图解(左图)

(据 Afifi 等,1988)^[16]

1—为 Au-AuTe₂ 单变反应;2—方铅矿-碲铅矿单变反应(f_{S_2} 在磁铁矿-黄铁矿-赤铁矿时的缓冲线)

Fig. 2. f_{Te_2} - T diagram showing locations of some telluride reactions at different f_{S_2} buffers(left).

1—Gold-calaverite;2—Galena-altaite when f_{S_2} =magnetite-pyrite-hematite.

图 3 270℃时 f_{Te_2} - f_{S_2} 图解(右图)

Po—磁黄铁矿;Py—黄铁矿;Cp—黄铜矿;Bn—斑铜矿;①—东坪金矿;②—斐济 Emperor 金矿^[2];③—美国 Boaloler 碲矿^[17]

Fig. 3. Stabilities of some sulfides and tellurides as functions of S_2 and Te_2 fugacities at 270℃ (right).

Po—Pyrrhotite; Py—Pyrite; Cp—Chalcopyrite; Bn—Bornite; ①—Dongping gold deposit; ②—Emperor gold deposit, Fiji; ③—Boulder County tellurium deposit, U. S. A.

出,在相同的 f_{Te_2} 条件下,低温对形成碲化物有利,而在温度较高的条件下,要形成碲化物,则需要更高的 f_{Te_2} ,显然要使流体中具有更高的 f_{Te_2} 则相对较为困难。这可以解释为什么碲化物

主要出现在浅成低温热液矿床中以及成矿中晚期,即温度降低时的条件。

如果我们假设温度(T)一定,那么我们就可以建立起 f_{Te_2} 对 f_{S_2} 图解(图 3)。对于没有相应硫化物的碲化物而言,如碲金矿,变换方程(5),则有如下方程式:

$$\lg \text{Te}_2 = C \quad (6)$$

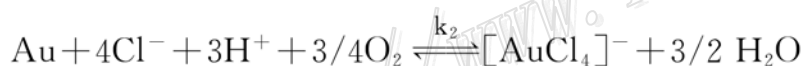
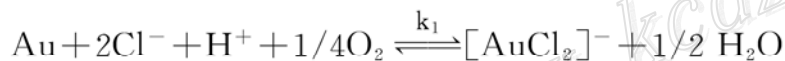
其中 C 为常数,所以碲金矿的单变反应在图 3 中表现为一条平行于横座标的一条直线,即碲金矿的形成与 f_{S_2} 无关。而对于其它任何具有相应硫化物的碲化物而言,变换方程(5)都可以有如下的表达式:

$$\lg f_{\text{Te}_2} = a \lg f_{\text{S}_2} + b \quad (7)$$

(7)式表明了,这些碲化物的单变反应在图 3 上表现为不同斜率的直线。因此,从图 3 可以看出,在一定温度条件下,高的 $f_{\text{Te}_2}/f_{\text{S}_2}$ 比值对形成碲化物有利。因而在相同 f_{Te_2} 时,低的 f_{S_2} 对形成碲化物有利,这可以解释大多数富碲化物型金矿中硫化物含量较低的原因。相反,如果硫化物含量较高,则有许多 Te 呈类质同象的形式代替 S 而进入硫化物晶格中,从而就会降低流体中的 f_{Te_2} ,也不利于碲化物的形成。因此,有利于碲化物沉淀的物理化学条件是低温、高 f_{Te_2} 高 $f_{\text{Te}_2}/f_{\text{S}_2}$ 比值。

4.3 活化、迁移的物理化学条件

前已述及,富碲化物型金矿流体中以 Cl^- 为主,而大量的实验表明,在高温条件下, Au 以 Cl 的络合物形式迁移^[18],所以推测金的溶解淋滤形成金氯络合物的过程可由下列反应式表示:



它们的化学反应平衡常数分别为:

$$k_1 = [\text{AuCl}_2]^- / [\text{Cl}^-]^2 [\text{H}^+] (f_{\text{O}_2})^{1/4}$$

$$k_2 = [\text{AuCl}_4]^- / [\text{Cl}^-]^4 [\text{H}^+]^3 (f_{\text{O}_2})^{3/4}$$

由此可以得出以 $[\text{AuCl}_2]^-$ 和 $[\text{AuCl}_4]^-$ 形式溶于溶液中的数量(以络合物浓度表示)为:

$$\lg [\text{AuCl}_2]^- = \lg k_1 + 2 \lg [\text{Cl}^-] + 1/4 \lg f_{\text{O}_2} - \text{pH}$$

$$\lg [\text{AuCl}_4]^- = \lg k_2 + 4 \lg [\text{Cl}^-] + 3/4 \lg f_{\text{O}_2} - 3\text{pH}$$

因此以金氯络合物形式溶解于溶液中金的总量为:

$$\lg C_{\text{Au}} \approx \lg k_1 + \lg k_2 + 6 \lg [\text{Cl}^-] + \lg f_{\text{O}_2} - 4\text{pH}$$

所以,溶液溶解淋滤出的金从热力学上分析,是 Cl^- 浓度、 f_{O_2} 、 pH 的函数,亦是温度的函数(平衡常数 k 是温度的函数)。具体地说, Cl^- 的浓度、温度、 f_{O_2} 和酸度增高(pH 的降低),其从岩石中淋滤出金的能力也越强。水泉沟偏碱性杂岩体,其氧化度较高, Cl^- 浓度高,由它所产生的早期含矿流体可能继承了这一特点,因此具有较强的淋滤金的能力。

对于 Te 的活化和迁移机制还没有作过相应的实验研究,也没有作过深入的探讨。Thompson 等(1985)在论述 Creep Creek 金矿时,只是简单地提及 Te 以碲基络合物的形式迁移^[11],但碲基络合物的具体形式怎样则没有说明。从 Te 的地球化学性质来看, Te 与 S 同处一族,一般呈分散状态分布在硫化物中,所以硫化物中 Te 的含量一般较高,当硫化物在酸性溶液作用下发生分解时, Te 可能被同时释放出来:



由此分析,酸性条件对 Te 的活化有利,所以 Te 的活化条件与 Au 的活化条件一致。

5 成矿机制探讨

本区太古界桑干群变质岩的主要岩性(斜长角闪岩和变粒岩)测定结果表明,碲的含量为 $(0.5 \sim 1.2) \times 10^{-6}$ (蒋心明,1992),是地壳克拉克值 (0.001×10^{-6}) 的 500~1200 倍,表明本区具有高 Te 的地球化学背景场,这为碲化物的形成提供了物质基础,因此同区除水泉沟金矿田存在富碲化物型金矿以外,在绿岩中也发现存在富碲化物型金矿,如小营盘金矿。据有限的资料表明,我国其它产有富碲化物型金矿的地区,其 Te 的背景场均较高,如位于华北地台南缘的熊耳—小秦岭地区(产有上宫、北岭和杨寨峪等大、中型富碲化物型金矿),其熊耳群和太华群地层 Te 的含量为克拉克值的几倍至几十倍^①。所以高 Te 的地球化学背景场为碲化物的形成提供了重要的物质基础,同时也决定了富碲化物型金矿往往具有成片成带分布的特点,如美国富碲化物型金矿分布有两个成矿带:一是科罗拉多成矿带;另一是蒙大拿成矿带^[19]。

水泉沟杂岩体 Te 的含量为 $(0.1 \sim 0.7) \times 10^{-6}$,平均为 0.256×10^{-6} (20 个样品,蒋心明,1992),是克拉克值的 10~70 倍,平均 26.5 倍,表明岩浆有提供 Te 的能力。

硫、铅同位素研究表明(张招崇,1995),水泉沟金矿田的富碲化物型金矿成矿物质主要来自于水泉沟杂岩体,部分来自于太古界桑干群变质岩;金家庄金矿则主要来自于其围岩——小张家口超基性岩,部分来自于水泉沟杂岩体和太古界桑干群变质岩。氢、氧同位素研究表明(张招崇,1995),富碲化物型金矿的主成矿期流体的水是大气降水和再平衡岩浆水混合的混合水,晚期则基本上以大气降水为主;金家庄金矿主成矿期流体的水为以再平衡岩浆水为主的混合水。因此,结合区域地质特征,水泉沟金矿田矿床的形成过程可简述如下:

太古代中晚期,火山-沉积作用形成本区初始的层状上壳岩系^[8],并形成 Au 和 Te 的初始富集。海西末期,西伯利亚板块和中朝板块碰撞发生闭合,由于碰撞以后发生的拉伸作用,使得先存的尚义-崇礼-赤城深大断裂在印支期发生再次活动,并诱发了上地幔发生了部分熔融,形成了水泉沟偏碱性杂岩体(其中的部分的岩石的形成时代可持续到燕山期)。水泉沟杂岩体的侵入不仅带来了丰富的 Au 和 Te 等元素,而且提供的巨大热能使得大气降水发生对流循环,并不断淋滤出周围岩石的成矿物质。由于水泉沟杂岩体中硫的含量较低,使得成矿溶液中有较高的 $f_{\text{Te}_2}/f_{\text{S}_2}$ 比值,从而导致了碲化物的沉淀。而在金家庄矿区,由于其围岩为小张家口超基性岩,有丰富的硫源不断供给,所以热液中 $f_{\text{Te}_2}/f_{\text{S}_2}$ 比值一直较低,因而没有发生碲化物的沉淀。

综上所述,碱性岩在富碲化物型金矿形成过程中所起作用有以下几个方面:

(1)碱性岩浆的侵入起到热源,加热地下水,并使 Au 和 Te 发生活化和迁移的作用。

(2)碱性岩浆提供了部分矿化剂:水和挥发性组分。

(3)碱性岩浆及其固结岩石提供了部分 Au 和 Te 的来源。

(4)碱性岩浆期后的再平衡岩浆水还可能产生了一个有利于 Au 和 Te 活化和物理化学条件。

① 任富根等,熊耳群火山岩系金的成矿作用问题,《秦巴金矿论文集》,1993,190~204

因此碱性岩与富碲化物型金矿的关系不是一个简单的直接的分异演化关系,而是存在着间接的有机的联系。

6 结 论

(1)富碲化物型金矿通常具有硫化物含量低、金成色高、黄铁矿的晶形以{100}为主及流体包裹体成分中高 Cl^- 、低 SO_4^{2-} 的特点。

(2)形成富碲化物型金矿需要三个必要条件:①高Te的地球化学背景场;②有利于Te活化和迁移的物理化学条件——酸性(低的pH值);③有利于碲化物沉淀的物理化学条件,低温、高 f_{Te_2} 及高的 $f_{\text{Te}_2}/f_{\text{S}_2}$ 比值。

(3)碱性岩与富碲化物型金矿的关系,不是简单的直接的分异演化关系,而是有着间接的有机的联系。

参 考 文 献

- 1 徐国风,邵洁涟. 火山岩型次火山岩型金矿床的成矿模式和在世界上的分布. 地质科技情报, 1995, 4(2): 138~146
- 2 张招崇,李兆鼐. 一个值得重视的金矿类型——碲化物型. 贵金属地质, 1994, 3(1): 59~64
- 3 陈光远,孙岱生. 成因矿物学和找矿矿物学. 重庆:重庆出版社, 1987, 231
- 4 银剑钊,史红云. 河北省张全庄金矿黄铁矿的标型特征及其成因意义. 黄金, 1994, 15(1): 6~11
- 5 彭岚,马配学,金光惠等. 冀北超基性岩区金矿床地质特征及其找矿方向. 北京:地质出版社, 1992, 66
- 6 汪建明,宁仁祖,丁浩华等. 江苏省硅化带型金-碲矿床的地球化学特征. 矿床地质, 1985, 4(4): 57~67
- 7 罗镇宽,关康,王曼祉等. 中国金矿床概论. 天津:天津科学技术出版社, 1993, 308
- 8 沈保丰,骆辉,李双宝等. 华北地台绿岩带地质与矿化. 北京:地质出版社, 1994, 202
- 9 Bonham H F. Three major types of epithermal precious-metal deposits. Geol. Soc. America Abstracts with Program, 1984, 16: 499
- 10 Greenland L. The abundances of Se, Te, Ag, Pd, Ce and Zn in chondritic meteorites. Geochim. et Cosmochim. Acta, 1967, 31: 849
- 11 Thompson T B, Trippel A D, Dwelley P C. Mineralized veins and breccias of the Cripple Creek district, Colorado. Econ. Geol., 1985, 80: 1169~1688
- 12 Ahmad M, Solomon M, Walshe J L. Mineralogical and geochemical studies of the Emperor gold telluride deposit, Fiji. Econ. Geol., 1987, 82: 345~370
- 13 Bortnikov N S, Kramer K H, Genkin A. D et al. Paragenesis of gold and silver tellurides in the Florencia deposit, Cuba. Inter. Geol. Rev., 1988, 30: 294~330
- 14 Richards J P, Kerrich R. The Porgera gold mine, Papua New Guinea: magmatic hydrothermal to epithermal evolution of an alkalic-type precious metal deposit. Econ. Geol., 1993, 88: 1017~1052
- 15 White J R, Orr R L, Hultgren R. The thermodynamic properties of silver-gold alloys. Acta metall., 1975, 5: 746~760
- 16 Afifi A M, Keylly W C, Essene E J. Phase relations among tellurides, sulfides oxides: II Applications to telluride-bearing ore deposits. Econ. Geol., 1988, 83: 395~403
- 17 Kelly W C, Goddard E N. Telluride ores of Boulder County, Colorado. Geol. Soc. America Mem., 1969, 109: 237
- 18 Seward T M. The transport and deposition of gold in hydrothermal systems, In: Foster R P, ed. Gold'82: Rotterdam, A. A. Balkema, 1984, 165~181
- 19 Thieben S E, Sprey P G. The geology and geochemistry of Cretaceous-Tertiary alkaline igneous rock-related gold-sil-

ver telluride deposits of Montana, U. S. A. Mineral Deposits, Balkema, Rotterdam, 1995, 199~202

PHYSICOCHEMICAL CONDITIONS FOR THE FORMATION OF TELLURIDES-RICH GOLD DEPOSITS AS EXEMPLIFIED BY THE SHUIQUANGOU GOLD OREFIELD

Zhang Zhaochong and Li Zhaonai

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Key words: tellurides-rich gold deposit, physicochemical condition, the Shuiquangou gold orefield

Abstract

With the Shuiquangou gold orefield as the example, the authors have studied the physicochemical conditions for the formation of tellurides-rich gold deposit. Located on the southern side of the Shangyi-Chongli-Chicheng deep fault (the boundary between Inner Mongolia geobelt and Yanshan subsidence zone) in central northern margin of the North China platform, the Shuiquangou gold orefield is intimately related to Shuiquangou slightly alkaline complex in time and space. With the exception of the Jinjiazhuang gold deposit, all the gold deposits in the orefield are tellurides-rich type ones characterized commonly by high gold fineness, low sulfide content, {100} crystal form for pyrite, dominant Cl^- and low concentration of SO_4^{2-} in ore fluids, with the first feature indicating high Te_2 fugacity and the last three suggesting low S_2 fugacity. So far as physicochemical conditions are concerned, thermodynamic analysis shows that low pH values are favorable for the mobilization and migration of Te, whereas low temperature, high Te fugacity and high $f_{\text{Te}_2}/f_{\text{S}_2}$ ratios are favorable for the precipitation of tellurides. Based on these understanding combined with regional distribution of tellurides-rich gold deposits and geochemical background of Te, the authors have advanced three prerequisites for the formation of tellurides-rich gold deposits and also pointed out that between alkaline rocks and tellurides-rich gold deposits there exists indirect organic connection rather than the simple direct magmatic differentiation and evolution relationship.