

旋卷构造的控岩控矿作用

何龙清

(地矿部宜昌地质矿产研究所)

本文讨论了旋卷构造控岩控矿作用的三个问题：①应力场的递变性控制元素分布的递变和分带；②旋扭力作用下岩浆活动和矿液运移的旋转性；③旋转对称与成岩成矿预测问题。

关键词：旋卷构造；控岩控矿作用；构造应力场

人们对地壳构造的认识过程中，旋卷构造具有重大的理论意义；在解决找矿勘探和进行隐伏矿床预测中，旋卷构造也具有重要的实际意义。本文在前人工作的基础上，就旋卷构造控岩控矿作用的某些问题，作进一步的探讨。

构造应力场递变性控制元素分布的递变和分带

关于旋卷构造应力场的计算，黄庆华(1980)、王连捷(1979)、王成金(1977、

1986)、彭建兵(1980)等已做了大量的工作，在各种不同的边界条件下，建立了各种合理的数学—力学模型，其结论大同小异，主要论点有三点：第一，旋卷构造的主应力轨迹皆呈旋涡状(即对数螺线)；第二，最大剪应力轨迹呈同心圆状和径向辐射状；第三，主应力数值与半径的平方成反比，靠近砥柱(或旋涡)主应力最大；随着半径的加大，主应力值迅速减小。

在特殊的有规律变化的旋卷构造应力场中，各造岩元素和成矿元素因各自不同的地

主要造岩元素的地球化学参数表

表 1

元 素	Mg	Ca	Al	K	Na	Si
原子序数	12	20	12	19	11	14
原子量	24.305	40.08	26.98	39.10	22.99	28.09
原子体积 (厘米 ³ /克原子)	14.0	29.9	10.0	4.53	23.7	12.1
原子密度 (克/厘米 ³)	1.74	1.54	2.702	0.86	0.97	233
熔点(°C)	651	842	660.1	63.65	97.81	1410
沸点(°C)	1107	1487	2467	774	892	2355
电子构型	2P ⁶ 3S ²	3P ⁴ 4S ²	3S ² 3P ¹	3P ⁶ 4S ¹	2P ⁶ 3S ¹	3S ² 3P ²
电负性	1.2	1.0	1.5	0.8	0.9	1.9
地球化学价	2+	2+	3+, (1+)	1+	1+	4+, 4-, (2+)
原子半径(A) (12配位)	1.599	1.974	1.432	2.272	1.858	1.176
共价半径(A)	1.36	1.74	1.18	1.962	1.539	1.126
离子半径(A) (6配位)	0.66	0.99	0.51	1.33	0.97	0.42 (4+) 2.71 (4-)
电离势 (电子伏特)	7.644	6.111	5.984	4.339	5.138	8.149
还原电位 (伏特)	Mg ²⁺ →Mg, -2.375	Ca ²⁺ →Ca, -2.76	Al ³⁺ →Al, -1.662	K ⁺ →K, -2.924	Na ⁺ →Na, -2.711	SiF ₆ ²⁻ →Si+6F ⁻ , -1.2
离子电位	3.03	2.02	5.88	0.75	1.03	9.5(4+)

球化学特性, 呈现出有规律的迁移, 形成了与构造应力场相对应的元素分布的递变和分带。

1. 造岩元素

这里仅讨论最常见的6种造岩元素Mg、Ca、Al、K、Na、Si, 其地球化学参数见表1。

在岩浆岩的6种主要造岩元素中, Si元素的原子密度仅次于Al, 体积较小, 还原电位最高。相对而言, 原应最不易迁移, 但把岩浆作为整体来考察, 则不然。岩浆是特殊的粘性体和粘弹性体, 它具有固体和流体的双重物性, 并随着温度、压力的调节逐渐趋于端点状态。在有岩浆活动存在的旋卷构造中, 岩浆大多数从砥柱部位侵入, 并从应力强处向应力弱处, 即从砥柱向四周围岩扩展分异。

在甘肃磁海矿区, 根据张治洮等(1982)的研究认为, 该矿区的杂岩体, 是基性岩浆分异而成的一套从基性岩到酸性岩的连续过渡系列, 杂岩体内各种岩石的空间分布, 受基础分带和旋卷动力分带的联合控制, 即两种分带的叠加。岩浆侵入后, 在旋卷构造应力场的驱动下发生半粘性流动。这种流动导致岩浆的局部分异。在南矿区、北矿区两个旋回带上, 由砥柱外围向外, 依次出现从基性岩—中基性岩—中酸性岩—酸性岩的分带现象(图1), 使得 Si^{4+} 的含量自内向外逐渐增高。

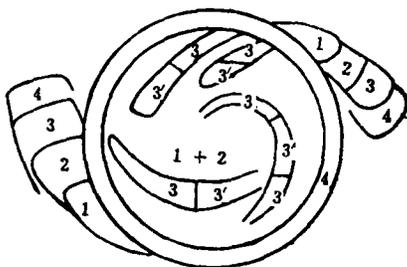


图1 磁海矿区岩石分带略图
(据张治洮等, 1982)

1—基性岩; 2—中基性岩; 3—中酸性岩;
3'—石英斜长岩; 4—酸性岩

Si元素的这种迁移现象, 在安徽沙溪矿田亦可见及。该矿田的含矿岩体中, Si^{4+} 原子数在各旋回带中从收敛端向撒开端, 由内旋扭带向外旋扭带逐渐增大, 岩石酸度增高。

Al元素的迁移比较复杂, 因为Al既作为硅酸盐的阳离子配位存在, 又代替Si—O四面体中的Si, 并随着岩石酸度的增大而增加。与6种主要造岩元素相比, Al比Si、Mg、Ca、Na、K具有更大的原子密度和更小的离子半径, 不易迁移, 却又随着 Si^{4+} 原子数的增大而含量增高, 即向外迁移。共同作用的结果, 使它的最高含量区处于旋卷构造中硅元素最高含量区的内侧。

从元素周期表得知, Mg、Ca具有相近的元素性质, Na、K亦如此(表1)。Mg、Ca相对于Na、K元素, 原子密度、电负性、还原电位均较大, 在旋卷构造应力场中, 不易迁移, 因此, Mg、Ca元素的相对高含量区位于中部, 而Na、K两元素则迁移得更远, 位于旋卷构造的外带, 形成自内而外从Mg、Ca—K、Na的有规律的元素分带和含量的递变。磁海矿区(图2)和沙溪矿田(图3)的工作得出的结论均是如此。

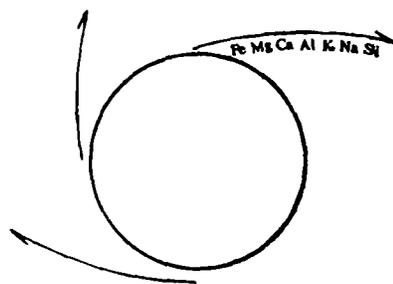


图2 旋卷动力下元素迁移示意图

(据张治洮等修改, 1982)

箭头指元素迁移方向; 元素符号位置为其含量相对增高部位

需要指出的是, 在岩浆中常见的Fe元素, 因其原子密度和还原电位均较大, 相对于上述6种元素, 最不易迁移, 往往保留在

应力最强区，使其含量相对增高。

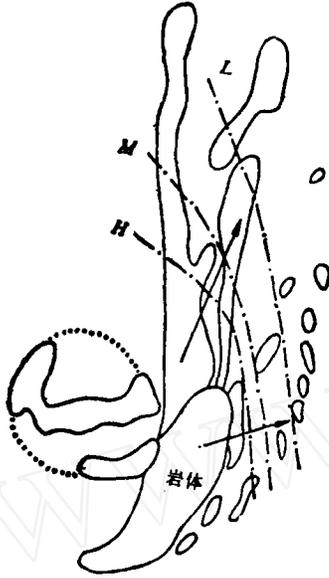


图 3 沙溪含矿岩体特征元素分布图

(据董树文, 1985)

$H = Ti^{4+} + Fe^{3+} + Fe^{2+} + Mn^{2+}$; $M = Ca^{2+} + Mg^{2+}$; $L = K^{+} + Na^{+}$

2. 成矿元素

这里所说的成矿元素是指最常见的 6 个矿种，包括两个族的元素，一是钨钼族元素 W、Sn、Mo；二是铜族元素 Cu、Pb、Zn。它们的元素地球化学参数见表 2。因为两族元素的特性差异较大，难以相提并论，笔者分两个部分讨论。目前，对成矿元素在构造应力场中的地球化学行为研究得很少，具体矿床的研究成果也不多，下面就理想状态下讨论元素在旋卷构造应力场中的递变和分带规律。

在旋卷构造应力作用下元素的迁移和分带，主要考虑：第一，应力的递变，相对应的应当考虑元素的原子体积、原子半径、原子密度、共价半径、离子半径等一系列地球化学参数，其中半径大、密度小的元素相对向外迁移。第二，靠近砥柱（或旋涡），岩石往往比外围更加破碎，因而相对处于氧化环境之下，相对应的应当考虑元素的电子构

主要成矿元素的地球化学参数表

表 2

元 素	W	Sn	Mo	Cu	Pb	Zn
原子序数	74	50	42	29	82	30
原子量	183.85	118.69	59.94	63.55	207.2	65.38
原子体积 (厘米 ³ /克原子)	9.53	16.3	9.4	7.1	18.3	9.2
原子密度 (克/厘米 ³)	19.35	7.28	10.2	8.92	11.3437	7.14
熔点 (°C)	3380	231.91	2610	1083	327.3	419.4
沸点 (°C)	5927	2260	5560	2595	1744	907
电子构型	5d ⁴ 6s ²	5s ² 5p ²	4d ⁵ 5s ¹	3d ¹⁰ 4s ¹	6s ² 6p ²	3d ¹⁰ 4s ²
电负性	1.6(+4), 2.0(+6)	1.7(+2), 1.9(+4)	1.6(+4), 2.1(+6)	1.8(+1), 2.0(+2)	1.6(+2), 1.8(+4)	1.6
地球化学价	2+, 3+, 4+, 5+, 6+	2+, 4+	(2+), 3+, 4+, (5+), 6+	0, 1+, 2+, (3+)	0, 2+, 4+	2+
原子半径 (Å) (12配位)	1.371	1.405	1.363	1.278	1.750	1.333
共价半径 (Å)	1.30	1.41	1.30	1.17	1.47	1.25
离子半径 (Å) (6配位)	0.70 (+4) 0.62 (+6)	0.93 (+2) 0.71 (+4)	0.70 (+4) 0.62 (+6)	0.96 (+1) 0.72 (+2)	1.20 (+2) 0.84 (+4)	0.74 (+2) 0.88 (+1)
电离势 (电子伏特)	7.98	7.346	7.10	7.724	7.415	9.391
还原电位 (伏特)	$2WO_3 + 2H^{1+} \rightarrow$ $W_2O_5, -0.03$	$Sn^{4+} \rightarrow Sn^{2+},$ 0.15	$H_2MoO_4^{++}$ $6H^+ \rightarrow Mo, 0.0$	$Cu^{2+} \rightarrow Cu,$ 0.3402	$PbSO_4 \rightarrow Pb +$ $SO_4^{2-}, -0.356$	$Zn^{2+} \rightarrow Zn,$ -0.7628
离子电位	9.78(+6) 5.71(+4)	5.63(+4) 2.15(+2)	9.68(+6) 5.71(+4)	2.78(+2) 1.04(+1)	1.67(+2) 4.76(+4)	2.70(+2)

型、电负性、地球化学价、还原电位等各参数，亦即元素的地球化学亲合性；其中亲氧元素分布于内侧的氧化区，而亲硫元素倾向于外围的还原环境。第三，在综合考虑上述两点之后，还应当注意它们的化合物（即矿物）的特性，诸如温压等一系列成因条件。

从表2可看出，在W、Sn、Mo 3种元素之中，以Sn元素的原子半径最大、密度最小，应迁移得最远，W、Mo相近，离子半径亦是如此。同时，3种元素的原子密度的大小顺序是W—Mo—Sn；另一方面，从元素的地球化学亲合性看，钨元素亲氧，钼元素亲硫，锡元素介于二者之间，且亲氧性较亲硫性强。综合上述特点，同时考虑到矿物的密度、成因条件、矿液运移等因素，在旋卷构造中，自砥柱（或旋涡）向外，这3种元素的相对应的矿种的排列顺序应为W—Mo—Sn。

铜族元素Cu、Pb、Zn主要形成硫化物矿床，其中Pb元素具有强亲硫性和弱亲氧性，常形成复合键，Cu元素具有最强的亲硫性，呈共价键，Zn元素亦具有强亲硫性，亦呈共价键，但较Cu元素弱。另一方面，Pb元素的原子密度较另二者大得多，Cu、Zn两种元素的原子体积、原子密度、原子（共价）半径等十分相近。因此，Pb元素主要分布于靠近砥柱（或旋涡）的区域；而Zn、Cu两元素则应考虑其地球化学亲合性，Zn元素应当较Cu元素更靠近砥柱（或旋涡）分布。综上所述，在旋卷构造中，它们形成的相对应矿种的富集区应是自内而外按Pb—Zn—Cu顺序排列。

应当指出，上述的元素分布顺序，是指它们相对集中的区域。在实际矿床中，其间各元素的分布有一定的重叠和交叉，且常共生在一起。

这种分带现象在陕西木龙沟矿区表现得较为明显。该矿区总体上为一帚状构造，矿体产于花岗闪长斑岩接触带的夕卡岩内，其

中一系列矿种的富集部位，自砥柱向撇开端依次是Fe—Mo—Zn—Cu（图4）。与前述的

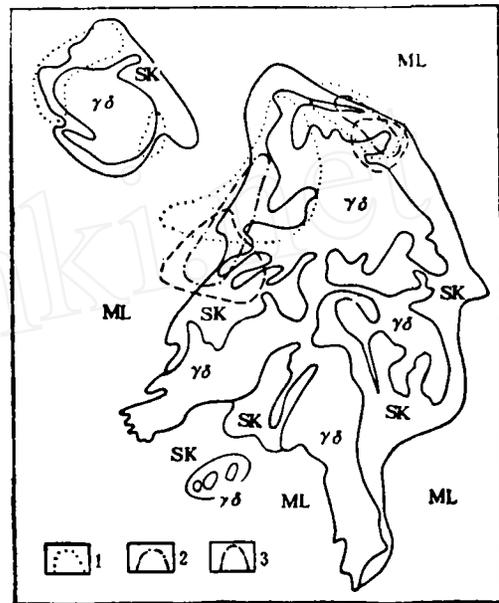


图4 木龙沟矿区地质简图

（据陕西地质局资料简编）

γδ—花岗闪长斑岩；SK—夕卡岩；

ML—白云质大理岩；

1—铜矿富集范围；2—锌矿富集范围；

3—铁矿富集范围

理想状态下元素的分带现象基本吻合。另外，在沙溪斑岩铜矿田，仅对铜矿的富集规律做了较为深入的工作，认为该矿田的铜矿体主要富集于帚状构造的应力中区，这种结论具有一定的理论和实际意义。

旋扭力作用下岩浆活动和矿液运移的旋转性

以往，人们认为岩浆的侵入和矿液的运移大多是简单的直线状。而具体矿床中，由于构造应力的作用、构造发育程度的不同、围岩性质的差别和岩浆、矿液本身性质的差异，岩浆的侵入方式和矿液的运移轨迹是十分复杂的，在旋卷构造应力的作用下，大多呈螺旋式活动。

河北西郝庄铁矿对这方面工作研究得最早(图5),铁矿体围绕闪长岩体呈螺旋式分布。这表明,在旋卷构造应力场作用下,含

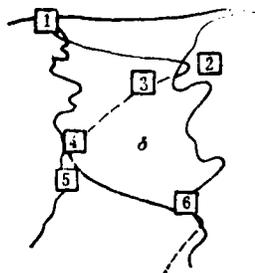


图5 西郝庄铁矿剖面示意图

(据华北地科所铁矿队,1977)

δ—闪长岩类;1~6—矿体编号

铁矿液(或矿浆)自下而上呈螺旋式运动,在此运移的轨迹上,于最有利的容矿空间里富集成矿。

原华北地质科研所铁矿队对邯鄹地区矿山村铁矿田研究得出:该矿田内,从蔡村至固镇一带,为一巨大的似层状岩体;在矿田中心的石板坡、马家脑一带,作环状分布的中奥陶统碳酸盐岩中,展布一系列弧形褶皱,构成一个涡轮状褶皱群。根据矿田内岩体的种种特点认为,矿田东部北北东向断裂是岩浆入侵的通道,岩浆由此上升后,顺层侵入,往西达整个矿田。在旋卷构造应力场的作用下,处于半塑性状态中的岩浆被动地产生了旋流运动,形成了与围岩构造线一致的岩体流线,构成了整个矿田涡轮状构造的特殊的一部分。

在该矿田内,磁铁矿中 TiO_2 含量的多少,可以相对地表明成矿温度的高低。虽然 TiO_2 的含量较低,却呈现有规律的变化,从涡轮状构造撒开端向收敛端, TiO_2 含量逐渐降低,即成矿温度逐渐降低,表明矿液沿各旋回带自撒开端向收敛端运移(图6)。即在该矿田内,因为铁元素本身的特性,矿田中部犹如一个大旋涡,对其具有极大的吸力,使得矿液自撒开端向收敛端呈涡轮状运移,

富集成矿。

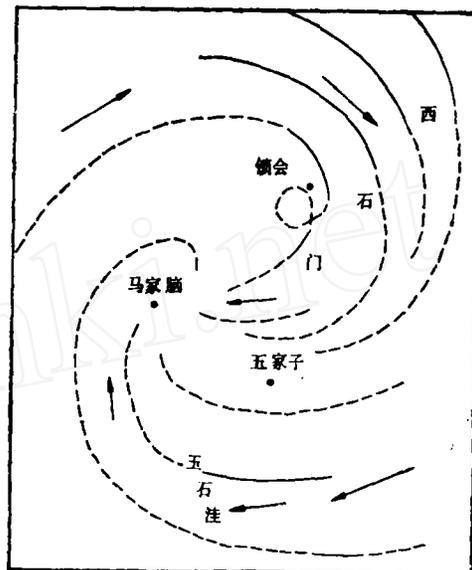


图6 矿山村矿田矿液运移平面示意图

(据华北地科所铁矿队,1978)

弧线和箭头示理想矿液流线及流向

下面,再简单介绍广东天堂多金属矿区^①,它位于吴川—四会断裂带内,该断裂带除了具有强烈的挤压特点外,还具有平面上反时针扭动的特点。矿区中部的屋背岭岩体侵入于屋背岭向斜核部,岩体呈椭圆状,一系列矿体、岩脉及夕卡岩均围绕岩体中心作环状展布;在剖面上,岩体锯齿状超覆于围岩之上,形成一个上缓下陡复杂的树枝状岩株,矿体、夕卡岩、岩脉和围岩均呈雁行排列,倾向岩体。

这种特别的岩体和矿体形态,究其原因是在区域构造应力场的作用下,屋背岭岩体沿着向斜核部呈反时针螺旋式侵入。这种侵入作用的主动旋扭力,形成了岩体本身呈上宽下窄的漏斗状岩柱,在岩柱周围,产生了环状裂隙,成为矿液上升的良好通道及容矿场所(图7),在这种构造条件下,形成了本矿区岩体、矿体的特殊的形态和产状。

① 据陈挺光1982年资料。



图 7 天堂矿区成矿构造力学分析示意图

(据陈挺光, 1985)

1—岩体上升, 围岩下降; 2—平面上岩体相对围岩作反时针扭动; 3—矿液、岩浆呈反时针螺旋式上升

旋转对称与成岩成矿 预测问题

构造形迹的发育是受构造应力场支配的。构造形迹所组成的构造图象与构造应力场图象具有明显的一致性。反映对称的应力场形成反映对称的构造图象(如山字型构造), 旋转对称的应力场形成旋转对称的构造图象(如旋卷构造)等。

前面已提及旋卷构造应力场的计算及其结果, 黄庆华(1980)应用弹性稳定理论来描述旋卷褶皱构造的变形图象, 从另一侧面反映了旋卷构造形变场的变化规律。计算结果表明, 在旋卷构造应力场中, 地块挠度的空间分布及由它组成的褶皱单元的形态、数目, 与岩石的力学性质、地块的几何边界和边界力有关。当旋转地块的砥柱半径远小于撒开半径时, 使该地块开始屈曲所需的力偶小, 旋卷地块被屈曲成的褶皱波数少, 褶皱波为长波, 旋卷图象比较松卷, 旋转对称次数少, 对称程度较低; 反之, 若旋卷地块砥柱半径愈接近撒开端的半径时, 使地块屈曲所需的力偶愈大, 旋卷地块被屈曲成的褶皱波数多, 褶皱波为短波, 旋卷图象显得紧卷, 旋转对称次数较多, 对称程度较高。这是在理想状态下得出的结论, 虽然自然界的情况十分复杂, 但仍具有这种特点, 其中以涡轮状构造最为典型。

李四光教授在《地质力学概论》中所论述的环绕班达海的旋卷构造(具体为涡轮状构造), 如果从这个角度观察, 就会发现它主要由3个巨型的弧形隆起带(地背斜)和3个巨型的弧形凹陷带(地向斜)组成。它们构成了以班达海为轴心的旋转对称的构造图象。前面所论述的矿山村涡轮状构造和磁海涡轮状构造都具有这种特点。

下面, 重点讨论广东观音岩涡轮状构造的旋转对称和成岩成矿预测问题。观音岩涡轮状构造位于吴川—四会断裂带内的北北东向复向斜南西段, 产于石炭系灰岩中, 面积约45km², 该构造大致以观音岩为中心, 周围发育一系列不对称的弧形褶皱, 呈涡轮状。在这些褶皱之间还散布着许多平行褶皱轴的纵向断层。由这些褶皱和断层组成的旋回带均向外弯曲。在地貌上, 中心部位地势低平, 四周被孤立的高峰环绕, 如旗鼓岭、英武岭、锡山和大、小南山等, 其下大多有花岗岩类小岩体侵入, 中心部位则未见岩体出露^①, 根据区域构造和该构造本身的发育特点认为, 此涡轮状构造外围相对旋涡作反时针方向扭动。

沿观音岩旋涡轴围分布的一系列褶皱和断层, 具有较为明显的旋转对称, 其和包括英武岭背斜、锡山背斜、小南山断褶束、太湖向斜、旗鼓岭向斜和新村向斜(图8), 显示出6次旋转对称的特点(包括背斜和向斜)。从该构造的展布范围看, 其外围半径约为旋涡半径的5倍, 与黄庆华理论计算的结果基本吻合。

涡轮状构造控制着岩浆的侵入, 现在已知的英武岭岩体、锡山岩体和小南山隐伏岩体都产于各旋回带褶皱的轴部, 同时由于岩浆的上侵而局部形成穹窿构造。基于上述资料 and 观点认为, 除英武岭、锡山、小南山3

① 据陈挺光等1982年资料。

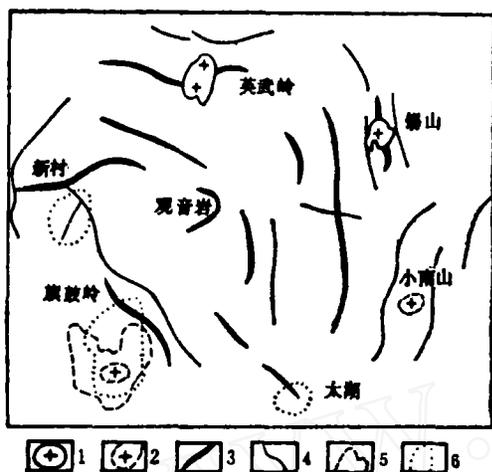


图 8 观音岩旋卷构造略图

(据陈挺光等, 1982)

1—褶皱轴; 2—断裂; 3—花岗岩体; 4—实测及推测隐伏岩体; 5—磁异常; 6—金属异常

个岩体外, 在另外 3 个旋回带的褶皱轴部, 亦可能有隐伏岩体存在。其中, 旗鼓岭已发现磁异常, 更说明了这种看法的合理性。另一方面, 该涡轮状构造的各弧形褶皱, 平面上多呈“S”形弯曲, 与区域构造是不协调的, 这绝非偶然现象。从已知有岩体存在的 3 个旋回面可以认为, 当岩浆自下而上侵入时, 在这种外旋相对反时针扭动的应力场作用下, 其平面上呈反时针旋转上升, 而在岩体周围形成外圈相对岩体顺时针扭动的局部应力场, 使各褶皱在不改变其总体轴向的情况下呈“S”形弯曲。旗鼓岭向斜的“S”形弯曲较为强烈, 从另一侧面为隐伏岩体的存在提供了证据。

观音岩涡轮状构造, 不仅控制着岩体的

分布, 同时还控制着成矿作用。每一个小岩体的内外接触带及围岩中都赋存有大致相似的夕卡岩型铁锡多金属矿床。同时在岩体顶部和四周成群地分布有钨锡矿脉。这些为数众多的矿点密集于每个小岩体的周围, 总体又一群群地环绕涡轮状构造分布。它们的成矿条件和涡轮状构造密切相关。已经有岩体出露的英武岭、锡山两个矿区, 因其顶部已被剥蚀, 工业价值较小, 而在小南山隐伏岩体顶部产出的小南山矿区, 已颇具规模。

在太湖、旗鼓岭、新村 3 个弧形褶皱轴部及其附近, 已分别有 Sb、As、Mo 异常、Hg 重砂晕、W 重砂晕存在, 其中前二者分别产有白木桥铋矿点、旗鼓岭多金属矿点。特别是旗鼓岭矿区, 从多方面资料综合分析认为, 其下部应有隐伏岩体存在, 可能蕴藏有较小南山矿区更大规模的夕卡岩型锡多金属矿床和脉状钨锡矿床, 可作为该区突破重点。

上面, 本着理论与实际相结合的原则, 综合分析讨论了旋卷构造控岩控矿作用的 3 个问题, 因为有些工作刚刚开始, 实际资料甚少, 在分析过程中难免存在一些问题, 另外, 在引用资料方面也可能有偏差, 敬请同行们不吝赐教。

主要参考文献

- [1] 陈挺光, 《南岭地质矿产文集》(第 1 辑), 地质出版社, 1985
- [2] 华北地质科学研究所一室铁矿研究队, 《地质力学文集》(第 3 集), 地质出版社, 1978
- [3] 张治洪等, 《地质力学文集》(第 6 集), 地质出版社, 1982
- [4] 董树文, 《国际交流地质学术论文集》, 为二十七届国际地质大会撰写, 2, 地质出版社, 1985

Rock Formation and Ore Controlling

Actions of Vortex Structures

He Longqing

Following three issues related to the rock formation and ore controlling actions of vortex structures are discussed in this paper: 1-the successive variation of stress field controls the successive variation of element distribution and zoning; 2-under the action of rotation shearing force the magmatic activity and mineralizing solution migration occur in a whirry form; 3-the symmetry of vortex structure and the diagenetic and metallogenetic prognosis problems.