

苏南地区构造力学与地球化学的耦合作用

孙 岩 陈 东

(南京大学地球科学系) (江苏省地矿局地质三队)

提 要 经受着变形的岩石可以发生化学变化,也就是力学-化学之间存在耦合作用。同时,受力变形的岩石还会自发地卷入提高自身结构的变化,事实上是一种自组织作用。苏南地区在区域上存在下石炭统,上二叠统和上三叠统三个成岩成矿滑动层位,表现出地层-断层-矿层三位统一体,并且在一定程度上反映出力学-化学的耦合作用和自组织矿作用,这也为该区的找矿勘探提供一个新思路。

关键词 力学-化学耦合作用 自组织作用 地层-断层-矿层三位统一体 滑动层位 苏南地区

1 构造力学和地球化学间的耦合

或简称力学-化学的耦合作用(mechano-chemical coupling)已不是一个新的概念,早在上一世纪 H·C·Sorby(1853,1863)在研究板劈理(slay cleavage)的起源和压力在矿物反应(mineral reaction)中的影响论述里就已涉及到了^[1]。特别是到了本世纪八十年代 F·K·Lehner, J·Bataille(1985)把弹性应变能, W. Bosworth(1981), W. Bosworth(1981)把位错应变能(dislocation strain energy), S. Brantly, D. Crerar(1984)和 T. Dewers, P·Ortoleva(1989)把表面或界面能(surface or interfacial energies)等的研究用力学-化学耦合作用联系起来,使其研讨耦合作用的微观机制更加深入^[2]。在此期间, P. Ortoleva(1982)首次提出变形岩石中力学-化学耦合的自组织作用(mechano-chemical self-Organization)^[3]。事实上, G. De Vore(1969), P. R. Cobbold(1977), P. Y. F. Robin(1978), R. Fletcher(1982)等在描述矿物优选分布,带状变形构造,颗粒接触间的压溶以及岩石变形和物质扩散等现象时,已间接地提到过这种自组织作用(D. Thomas, et al. 1990)^[4]。

所谓自组织作用,按照 D. Thomas & P. Ortoleva(1990)的定义是:通过某些扰动反馈机制型式(type of destabilizing feedback mechanism),包括一级相的跃迁(transition)和输运(transport),例如对流或扩散,变形受力的岩石会自发地卷入提高自身结构的变化(enhancement of textural

perturbations)。一个简单的例子是矿物的自反馈模式(model of feedback),包括岩石中微小体积单元的矿物颗粒之局部应力场(local stress field),不仅依赖于这些体积单元边界所提供的远离场的应力作用,同时也依赖于这些矿物颗粒结构周围力学性质的特征(T. Dewers, P. Ortoleva, 1990)^[4]。

不待说,以力学-化学的耦合作用,自组织作用理论研究区域性,区域性的构造地质-地球化学问题,是一个崭新的思路。这种耦合作用,自组织作用在造山带、碰撞带和前陆盆地等构造变动较强烈的地区均有明显的表示。

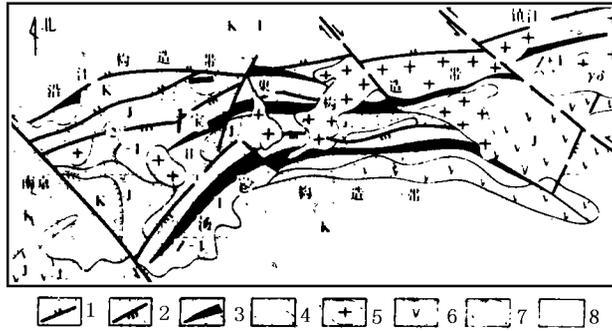
2 苏南下扬子前陆盆地地区广泛发育区域性的层滑-倾滑断裂构造

依据野外地质观察和室内微观测试(主要包括岩石力学、岩石物理和岩石流变参数等)资料分析,自老至新、基底到盖层的地层层位中,可以划分众多的极易成为层滑-倾滑、推覆-拉覆的滑脱层位,以区域构造而论,基底滑动层(下震旦统张八岭组)和志留系滑动层(中下志留统坟头群);以成矿构造而论,下石炭统滑动层(金陵组、高骊山组、和州组),上二叠统滑动层(龙潭组)和上三叠统滑动层(黄马青组)则为区域主干的滑动层位、成岩成矿滑动层位(孙岩等, 1984, 1991^[5,6];郭令智、施央申等, 1988^[7])。事实上,地块、岩块和层的滑动,抑或岩板(slab)、岩席(sheet)和岩片(slice)的滑动,尽管在静力学(几何学)、运动学和动力学上可以找出许多差别,诸如几何学上不同规模大小;运动学上不同流变特点;动力学上不同动力来源等,然而它们的滑动要素、滑脱机理和力学本质等基本上一致的。即它们的底面均存在一个滑脱层位、层滑层位;两侧都为走滑断层所限,还可细分为左行走滑断层和右行走滑断层;前后则是沿倾向滑动(由顺层到切层),可再分成前缘逆向倾滑断层和后缘正向(或为和缓压性)倾滑断层。即在整体上、空间上构成薄皮层块构造(孙岩、施泽进等, 1992)。苏南地区的区域构造和成矿构造都反映出这些特征(图 1)

3 三个易于薄皮层状构造滑动成矿的层位实例

(1)宁镇地区铜山铜钼矿和苏州地区光福铅锌银矿均与下石炭统层滑断裂有关,它们或是沿金陵组,高骊山组和和州组泥岩、泥灰岩层构造含矿杂岩成矿;抑或是沿平行主干断裂的次级断层裂隙所穿过的中上石炭统的黄龙组、船山组灰岩层的构造含矿杂岩成矿(图 2、图 3)。

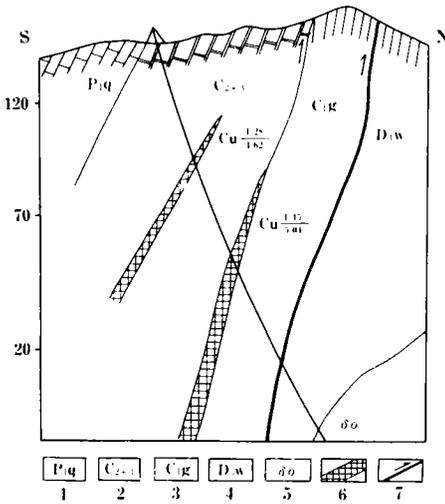
苏州西部地区不同时代地层一些微量元素的平均含量如表 1 所示,其中石炭-二叠系碳酸盐类地层 Sn、Ag、Bi、Au、Ca、Zn、Mn 等元素的平均含量明显地高于同时代地层组的平均含量。而更为突出的是,下石炭统滑动层位高骊山组地层的 Mn、Sn、Zn、Co、Ni、Mo、W 等相对高于相邻的碎屑岩(上泥盆统五通组)和碳酸盐岩(中石炭统黄龙组)层位的含量。



1. 区域正向倾滑断层 2. 区域逆向倾滑断层 3. 褶皱构造带 4. 不整合界限 5. 花岗岩 6. 中酸性火山岩 7. 中上侏罗统沉积 8. 沉积岩区(据葛肖虹实测修改,1986)

图1 苏南宁镇地区薄皮层块构造图

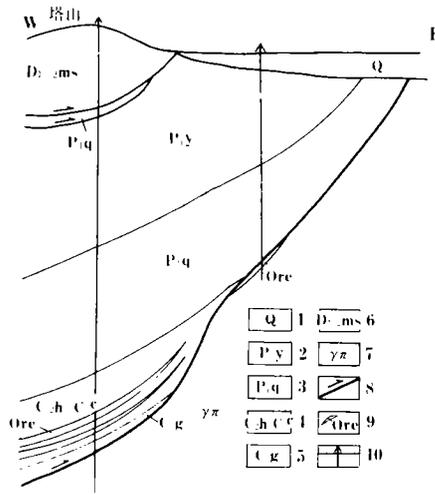
Fig. 1 Thin-skin structural bodies(layers and blocks) in Ning zhen Area of the South Jiangsu Region



1. 下二叠统栖霞组 2. 中上石炭统黄龙组, 船山组
3. 下石炭统高骊山组 4. 上泥盆统五通组 5. 石英闪长岩 6. 矿体 7. 逆断层

图2 宁镇地区铜山铜钼矿19勘探线示意剖面图(据江苏省地矿局,1990,修改)①

Fig. 2 Sketch of the drill-hole line in Tongshan Cu-Mo Mine



1. 第四系 2. 下二叠统塘桥组 3. 下二叠统栖霞组
4. 中上石炭统黄龙组、船山组 5. 下石炭统高骊山组
6. 中下泥盆统茅山群 7. 花岗斑岩 8. 逆断层 9. 矿体 10. 钻孔

图3 苏州地区光福塔山示意地质剖面(据江苏省地矿局,1990,修改)②

Fig. 3 Sketch of geological profile of Tarshan in Guangfu Pb-Zn-Ag Mine

① 江苏省地矿局第三地质大队. 宁镇地区多金属矿的成矿条件及预测研究报告. 1990, 28~99

② 江苏省地矿局第四地质大队. 苏州西部地区多金属矿的成矿条件及预测研究报告. 1990, 109~116.

表1 苏州西部地区地层微量元素平均含量^①

Average content of microelements in strata in the West Suzhou Area

地 层	项目	Mn	Sn	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Ag	Mo	As	Cd	Bi	W	Au	Hg
上石炭统	X	160	1	5.75	7.75	7	5	15	0.09	0.59	1.3	0.96	0.11	0.56	0.95	5.76
船山组(C _{3c})	K	1.07	6.67	1.92	6.2	4	0.54	2.08	2.33	0.39	0.87	4.38	2.2	2.43	2.07	
中石炭统	X	400	2.5	11	12	15	7	12	0.35	1.50	2.25	0.45	1.28	0.47	1.8	4.0
黄龙组(C _{2h})	K	1.42	16.7	0.6	2.94	1.25	0.64	1.22	8.63	0.09	1.5	1.55	25.2	1.15	4.5	
下石炭统	X	430	5.7	22	2.8	86.7	10	25	0.44	3	2.8	0.21	0.10	2.5	1.13	9.1
高骊山组(C _{1g})	K	0.46	3.9	0.48	2.33	1.6	0.63	0.53	4.39	1.76	0.35	0.88	0.38	0.96	1.66	
上泥盆统	X	282	5	25	27	42	8.45	15	0.14	3	7	0.21	0.41	1.43	0.99	7.9
五通组(D _{3w})	K	1.75	2.22	0.89	1.8	1.14	1.39	1.07	1.79	2.52	1.41	2.07	1.95	1.4	1.65	

注:表中X为地层微量元素平均含量,单位ppm,其中Au,Ag含量单位ppb。

K为浓度比率,即研究区内地层平均含量/整个苏南区域地层平均含量。

①同第3页注②。

(2)丹徒地区韦岗铁矿在构造上受到发生在二叠系的逆冲断裂控制,有的成矿层位已延到三叠系(图4),在矿井中可见主要矿带砂卡岩和矿体方向都与地层层位和倾滑断层相平行(图5)。

韦岗铁矿花岗闪长斑岩(蚀变、未蚀变)、砂卡岩、大理岩等的化学全分析资料如表2所示:

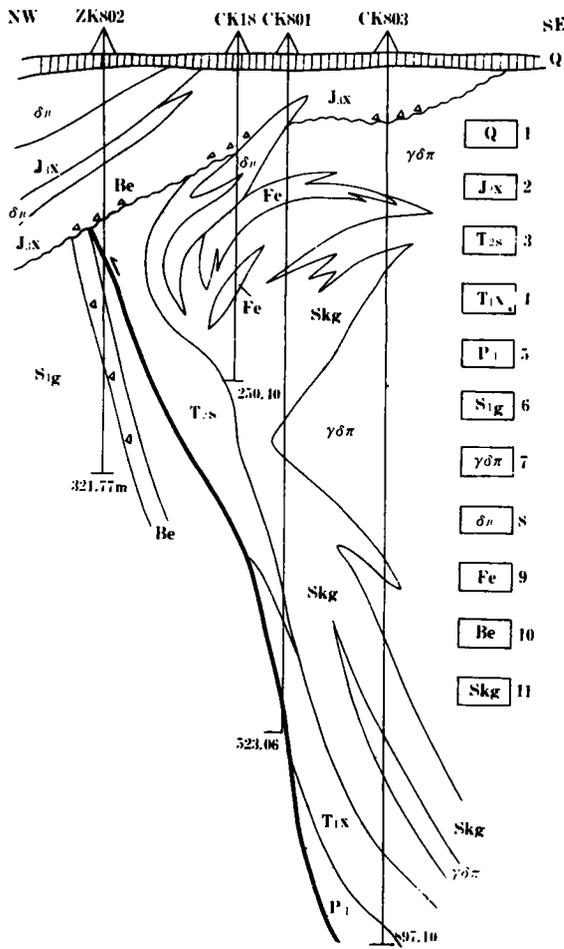
表2 苏南韦岗铁矿和凤凰山铁矿各种岩石化验分析数据

Table 2 Analysis of rocks in Weigang and Fenghuangshan Fe-Mine

分 析	韦 岗 铁 矿 ^①				凤 凰 山 铁 矿 ^②		
	花岗闪长斑岩		砂卡岩	大理岩	断 层 构 造 岩		
	蚀 变	未 蚀 变					
SiO ₂	66.40	66.22	40.60	7.58	47.74	60.63	86.89
TiO ₂	0.40	0.45	0.52	0.08	0.78	0.78	0.30
Al ₂ O ₃	14.57	15.40	9.95	2.03	19.63	19.26	5.70
Fe ₂ O ₃	1.37	1.50	11.52	0.07	19.18	3.53	0.44
FeO	0.99	2.30	2.42	0.53	0.00	0.46	2.43
MgO	1.67	2.08	4.24	0.96	0.18	1.70	0.02
MnO	0.04	0.05	0.31	0.01	0.73	0.007	0.016
CaO	5.36	3.45	27.67	50.12	0.34	0.29	0.21
Na ₂ O	4.95	4.52	0.10	0.13	0.08	0.37	0.14
K ₂ O	0.82	3.60	0.02	0.45	0.13	6.80	2.83
P ₂ O ₅					0.30	0.08	0.07
烧失量					10.22	4.74	0.52

①据江苏地矿局地质三队,1980

②南京大学地球科学系中心实验室,林雨萍、胡美玲分析



1. 第四系 2. 上侏罗统西横山组 3. 中三叠统上肖龙组 4. 下三叠统下青龙组 5. 二叠统 6. 下志留系高家边组 7. 花岗闪长斑岩 8. 闪长玢岩 9. 铁矿体 10. 角砾岩 11. 砂卡岩

图4 丹徒地区韦岗铁矿第八勘探线示意图

Fig. 4 Profile of the 8th drill hole Line in Weigang Fe-Mine, Dantu Area

鉴于矿区内的花岗闪长岩、砂卡岩和大理岩等的产状均大致平等地层层面,都不同程度受到层滑断裂的影响,蚀变的角砾中已有角砾化现象,故上述岩石同未受构造变动岩石及围岩在化学成份有所差异, SiO₂ 增加明显,据矿区地质报告计算蚀变的花岗闪长岩同围岩相比带入 9.6%。

(3) 江宁地区凤凰山铁矿位于闪长岩同上三叠统黄马青组砂页岩的接触带里,实际是一个层滑断裂带,主矿体产状 N30°~50°E/NW∠30°~55°,地层产状 N37°E/NW∠30°~58°,两者基本是一致的,只是矿体产状在延伸方向上略呈不规则状罢了(图 6)。

断裂带系统的断层岩采样化学分析数据一并列于表 2,力学-化学的耦合作用和自组织作用显著,解释详后。

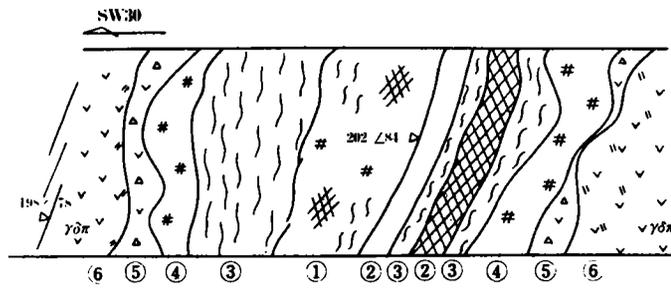
4 以构造力学-地球化学的耦合作用新思路分析上述石炭系、二叠系和三叠系的中低温层控矿床,比之以前单纯从地层和矿层的关系探讨矿床成因机制会有更进一步地认识:

(1) 上述几个实例中层滑断裂活动起着制约作用,事实上地层-断层-矿层三者

是统一的,亦即层序地层-层滑断层-层控矿床三者是统一的。这样就不单单只是仅与矿源层之间的关系,而是涉及到在层控作用中的层序层控(strata-bound),层控(layer-bound)和带控(banding-bound)中的沉积含矿杂岩,是作为矿源层,一般不具开采价值,下石炭统地层和部分上泥盆统地层中常见之。这种沉积含矿杂岩经层间滑动,切层滑动、岩板逆冲和层控逆冲,由弱至强的断裂构造活动则形成构造含矿杂岩,这是经构造成岩作用改造过的矿源层,故层滑层位中一些常量和微量元素的含量高于相邻非滑动层位是之(表 1)。这也反映了构造动力与地球化学中的耦合,故发育到构造成矿杂岩,即为动力成岩成矿,如苏南地区上泥盆统和下石炭统的粘土

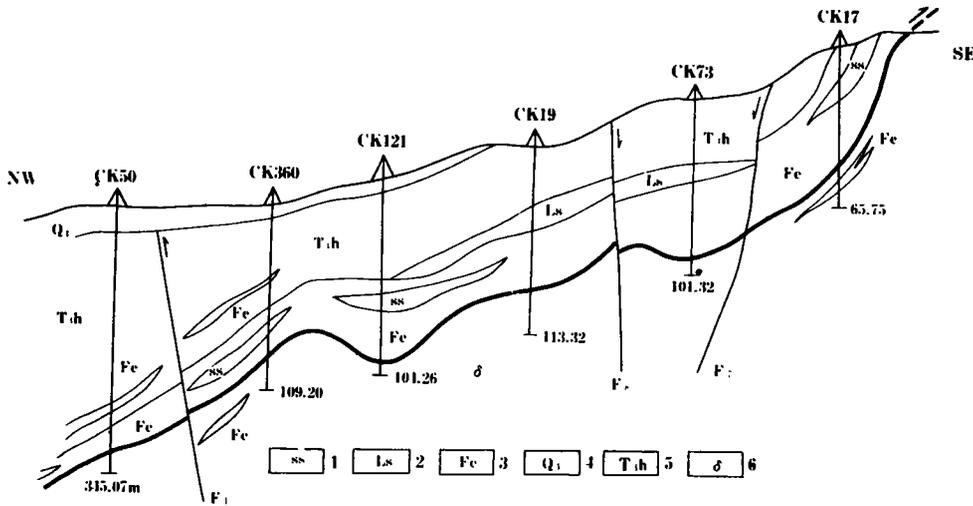
矿、高岭土矿。而上述几个实例，则是有热液叠加，形成热液成矿杂岩(图5)。

(2)苏南韦岗铁矿和凤凰山铁矿中，与构造变动，层滑运动有关的岩带， SiO_2 有明显地带入和增加，在中低温的矿化蚀变作用中硅化作用是极为普遍的，此绝非偶然，此系同构造动力的分异作用密切相关(Sun Yan et al; 1984)^[9]，更值得提出的是，在矿区的层滑成矿断裂带中 SiO_2 、 FeO 等在还原条件下易产生的氧化物同围岩相比



1. 含矿混杂角砾岩 2. 铁矿体(Fe_3O_4) 3. 劈理片理化构造
4. 砂卡岩 5. 破碎花岗岩闪长斑岩 6. 蚀变花岗岩闪长斑岩 7. 花岗岩闪长斑岩

图5 丹徒地区韦岗铁矿-50m中段2号采场构造剖面
Fig. 5 Structural profile at 50m Level of Weigang Fe-Mine



1. 页岩 2. 灰岩 3. 铁矿 4. 第四系 5. 上三叠统黄马青组 6. 闪长岩

图6 江宁地区凤凰山铁矿第六勘探线示意构造剖面图

Fig. 6 Structural sketch profile of the 6th Line, Fengluangshan Fe-Mine Jiangning Area

成递增趋势，如 SiO_2 为 $47.74 \rightarrow 60.63 \rightarrow 86.89\%$ ；而在氧化条件下易产生的氧化物同围岩相比则成递减趋势，如 H_2O 为 $10.22 \rightarrow 4.74 \rightarrow 0.52\%$ ， Fe_2O_3 亦然(表2)。不待说，这种氧化物含量递增、递减的变化是显示有序特征，是在构造动力作用下，变形受力的岩石自身自发地卷入到提高其结构，由均一向分层，由单一向复杂的变化，这种构造分层、分异分层和化学分层的自发变化，即为 D. Thomas & P. Ortoleva (1990)所指出的自组织作用^[4]。苏南地区与层滑作用有关的成矿作用，也都在不同程度上反映出自组织成矿作用。

运用力学-化学的耦合作用、自组织作用这种非线性理论指导找矿勘探，无疑是一种新的思路，可期在我国第二轮普查找矿，向“四新”(新地区、新领域、新深度和新矿种)进军中取得新的突破。

参考文献

- 1 H C Sorby. On the direct correlation of mechanical and chemical forces. Royal Society of London Proceedings, 1863, V. 12, 538~600
- 2 T Dewers and P Ortoleva. Mechano-chemical coupling in stressed rocks. Geochim Cosmochim. Acta, 1989, V. 53, 1243~1258
- 3 P Ortoleva, et al. Kinetics of metamorphic Layering in anisotropically stressed rocks. Am. J. Sci., 1982, V. 282, 617~643
- 4 D Thomas and P Ortoleva. Differentiated structures arising from mechano-chemical feedback in stressed rocks. Earth-Science Reviews, 1990, V. 29, 283~298
- 5 孙岩,沈修志等. 层滑断裂与层控矿床——以苏皖南部的上古生界地层为例, 1984, (5): 430~436
- 6 孙岩. 施泽进等. 层滑—倾滑断裂构造与油气地质研究. 南京大学出版社, 1991, 1~181.
- 7 郭令智, 施央申, 孙岩等. 下扬子区前陆盆地逆冲推覆构造研究. 南京大学学报(自然科学版), 1988, (1): 1~9.
- 8 孙岩. 沈修志等. 苏皖南部层控断裂中杂岩的发育特征. 中国科学院地质力学所所刊, 第7号, 141~152.
- 9 Sun Yan et al. Preliminary Analysis of Some Chemically Determined Data from the Compressive Faut Zone of Dayu, Jiangx; Province. Geochemistry, 1984, V. 3, 285~294

ON THE TECTONOMECHANO-GEOCHEMICAL COUPLING IN THE SOUTHERN JIANGSU PROVINCE

Sun Yan

(Department of Earth Sciences, Nanjing University)

Chen Dong

(Third Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources, Jiangsu Province)

Abstract

Rock deformation may be coupled by chemical changes, that is the so-called mechanochemical coupling. And the rocks themselves could be involved by autonomous enhancement of textural perturbation which is in fact the self-organization mechanism of the stressed rocks during the coupling. In the South Jiangsu Area occur three (lower Carboniferous Series, Upper Permian Series and Upper Triassic Series) rock-forming and ore-forming slip stratum reflecting integration of stratum-fault-ore layer and mechano-chemical coupling and self-organization ore formation. Understanding of the phenomenon would throw a new light to ore prospecting in the area.