

中国岩金矿床成矿系列*

陈毓川

王登红 林文蔚

(中国地质科学院, 北京)

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京)

提 要: 在对典型金矿进行成因研究的基础上, 根据对全国 666 个岩金矿床成矿特征的研究, 将中国岩金矿床初步划分为 39 个成矿系列, 简要归纳了各个不同成矿时期金矿成矿系列的特征。

关键词: 中国金矿 成矿系列 岩金矿床

1 中国岩金矿床成矿系列的划分原则及体系

对中国金矿进行成矿系列划分的原则与其他矿种基本一致, 主要考虑以下几个方面的因素: ① 不同的成矿时期, 与岩浆作用、变质作用有关的矿床成矿系列一般与地质构造运动时期相一致; ② 成矿的地质构造单元及成矿环境, 一般是相对独立的成矿地质构造单元, 相当于三级、四级构造单元; ③ 主要的成矿地质作用, 在形成一个地质构造单元的过程中, 同时伴随有成矿作用 (指岩浆成矿作用、变质成矿作用、沉积成矿作用、地质流体及地下热水成矿作用等), 作为不可分离的地质作用的组成部分, 每一种地质成矿作用在本构造单元的不同地质部位有规律地形成一组由一种或多种成矿元素组成的矿床, 如果各地质成矿作用都形成重叠较少、可以识别的各自的成矿体系, 则均可构成独立的矿床成矿系列。如果它们之间有叠加、改造而难以明显分清, 则可根据主要的地质成矿作用来确定矿床的成矿系列, 其他成矿作用的影响需要作必要的说明; ④ 可供工业或商业利用的主要元素组合。

金矿的矿床成矿系列可以采用 6 级分序的分类体系进行划分, 即矿床成矿系列组合、矿床成矿系列类型、矿床成矿系列、矿床成矿亚系列、矿床式 (类型)、矿床。在划分金矿成矿系列的过程中, 有一些金矿床的矿床成因暂时还没有确定, 难以归入岩浆、变质或沉积成因的成矿系列中, 暂且归之于产于某种岩类中的成矿系列, 待成因明确后再给以归属。另外, 根据国内外矿床学研究的进展和前苏联、德国等国家科学钻探的研究成果, 在地壳的一定深度还存在第二“水圈”, 存在矿质含量较高的热水活动带, 其成因可能是很复杂的, 但对于成矿的意义无疑又是很重要的。因此, 很可能还存在与岩浆、变质、表壳沉积作用无显著直接联系的深部含矿热水的成矿作用。也就是说, 可能还存在非岩浆也非变质成因的深部热水成因矿床成矿系列组合。这需要今后深入研究。

2 中国岩金矿床主要成矿系列

在对我国主要金矿进行深入研究、对 666 个岩金矿床进行资料整理和划分矿床成因类型

* 本文属于“八五”国家科技攻关项目 (85-901-08) 专题部分成果

陈毓川, 63 岁, 研究员, 中国工程院院士, 长期从事矿床地质研究工作。邮政编码: 100037

的基础上,依据成矿时代和主导成矿作用性质、类型的不同,将中国主要岩金矿床划分为 39 个成矿系列,其中太古宙 3 个、元古宙 3 个、古生代 9 个、中生代 20 个、新生代 4 个。

2.1 太古宙岩金矿床成矿系列

太古宙时期形成的金矿主要分布于华北地台北缘,多以花岗-绿岩型金矿的形式出现,少数以 BIF 或类似于 BIF 的形式出现。这与北美、南非等地花岗绿岩型金矿多分布于地台内部的特征有所不同。目前可以分出 3 个成矿系列:

(1) 华北陆台陆核边缘绿岩型块状硫化物 Cu、Zn、Au 成矿系列:以红透山最为典型,它占到全国 Au 总储量的 0.3%。主要产于红透山组变质岩系中,金主要承载于由黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿紧密共生构成的稠密浸染状一致密块状矿石中。值得重视的是,块状硫化物矿床中的 Cu 与 Au 可以共生也可以分离,如北美加拿大地盾和西班牙—葡萄牙伊比利亚黄铁矿带所见。因此,应注意在块状硫化物矿床外围找独立金矿。事实上,离红透山矿床不远处就有南龙王庙等独立金矿,它们构成同一成矿系列,可以互为找矿标志。

(2) 华北陆台陆核边缘太古宙铁硅质岩建造 Fe、Au 矿床成矿系列。至少有 4 个矿床,已知储量为全国总量 0.1%。典型产地有山西五台地区条带状铁硅质岩建造中的柏枝岩、东腰庄、康家沟、小板峪、上扬花等,规模均小,但柏枝岩组、龙华群等层位均有找矿远景。

(3) 华北陆台陆核边缘太古宙海相火山-喷气沉积绿岩建造金、铁、(铜、铅、锌)矿床成矿系列。包括 33 个矿床,占总储量 5.8%。分布于河北、辽宁、吉林、内蒙古等地,赋矿层位有八道河群王厂组、鞍山群三道沟组等,成矿类型主要是脉型,并常受到后期地质成矿作用叠加、改造等的影响,如金厂峪、小营盘、排山楼、红花沟、莲花山、夹皮沟等。

2.2 元古宙岩金矿床成矿系列

(1) 华北陆台陆内山前盆地砾岩型金矿成矿系列:砾岩型金矿在世界上意义重大,我国在塔里木盆地周边等地也开始工作。山西灵丘产于新元古代溱沱河超群四集庄组中的老潭沟金矿、冀东双子山一带砾岩中的金矿化(如半壁山)可能属于此类。

(2) 吉黑褶皱带元古宙陆缘海相火山-喷气沉积铁硅质岩建造铁、金矿床成矿系列:有 3 个矿床,占总储量 0.2%。以黑龙江东风山金矿最典型,产于佳木斯中间地块条带状含铁建造中,以未经韧性变形的绿岩带铁建造含金最好,可成独立金矿。

(3) 鄂西黄陵背斜与新元古代花岗岩类有关的金(银)、铅、锌矿床成矿系列:在不同的构造-岩体部位形成不同成因类型的矿床,如圈椅尚钾长花岗岩外接触带崆岭群中的水月寺式含 Au 石英脉型金矿、黄陵斜长花岗岩内部断裂破碎带中的板仓河式石英脉型或硅化蚀变岩型金矿、三斗坪和端坊溪石英闪长岩与崆岭群接触带的茅坪式石英脉型金矿,等等。

2.3 古生代岩金矿床成矿系列

(1) 祁连活动带加里东期海相火山喷气沉积块状硫化物铜、铅、锌、金、银矿床成矿系列:占总储量 0.2%。AuAg 主要伴生于块状硫化物矿床中,但产值较高。一般块状矿石中含 Au 较高,晚期硫化物又高于早期,在氧化带中常常次生富集,如白银厂、陈家庙、小铁山。

(2) 阿尔泰构造带与海西期火山-侵入作用有关的铁、铜、锌、金、(银)矿床成矿系列:占总储量 1.3%,有 5 个矿床。可分为两个亚系列:一个是产于块状硫化物矿床中的阿舍勒式伴生金矿;另一种是产于晚古生代碎屑岩地层中与中酸性侵入岩具有或远或近联系的多拉纳萨依式独立金矿,包括赛都、萨尔布拉克、阿克希克等金矿。

(3) 天山构造带与海西期火山-侵入作用有关的铜、铅、锌、金矿床成矿系列：有6个矿床，占总储量1.2%。以西天山的阿希金矿和东天山的金山沟金矿为代表，他们均与火山机构有关，属于中低温火山热液型金矿。也是我国时代较老的陆相火山岩型金矿。

(4) 西准噶尔构造带与海西期火山-侵入作用有关的铬、金矿床成矿系列：有8个矿床，占总储量1.9%。该系列是洋中脊成矿系列的典型代表，但由于后期中酸性岩浆侵入作用以及区域变质作用的影响而复杂化。铬铁矿与金矿常常分离，但金矿中可含Cr，如托里金矿带中有一类富铬高铜型石英脉，矿物组合以黄铁矿-铬铁矿-黄铜矿-重晶石为特点。

(5) 东天山—北山构造带与海西期酸性岩浆活动有关的铁、金、银、铜、铅、锌矿床成矿系列：有20个矿床，占总储量3.0%。在小岩体附近常形成金矿，如西滩、康古尔塔格、大东沟、西凤山等；在大岩体附近则常见铁矿，如雅满苏、磁海、尾垭等。在北山褶皱带，花岗闪长岩侵入于泥盆系形成两类矿化：产于岩体中的石英大脉型金矿小而富，产于断裂破碎带中的网脉状金矿品位低但规模大。除了石英脉型金矿外，还有火山岩型、蚀变岩型和夕卡岩型等多种成因类型，如马庄山、金窝子、照壁子、拾金坡、金沟井、老金厂等。

(6) 华北陆台北缘阴山褶皱带与海西-印支期中酸性岩浆作用有关的金、银、铜、铅、锌矿床成矿系列：有13个矿床，占总储量0.9%。主要沿内蒙地轴一些EW向深大断裂分布，如乌拉山—大青山南麓深断裂附近的哈达门沟金矿、临河-集宁深断裂附近的后梅力更沟、十五号村、北腮忽洞、后石花、酒馆、红召、白石崖等金矿。

(7) 大兴安岭褶皱带与海西期中-酸性岩浆作用有关的金、银、铜、铅、锌矿床成矿系列：有8个矿床，占总储量1.5%。常常是多金属共生，如多宝山、21号站、24号桥、宽河、桦皮窑、红叶子、卜地营子等，其中多宝山多金属矿床中Au的规模达到特大型。

(8) 东准噶尔构造带与海西期火山-侵入作用有关的铁、铜、锡、金矿床成矿系列：有6个矿床，占总储量0.1%。常常存在碱性花岗岩。典型矿床如金山、金山沟、南明水、清水泉、板房沟、阿达克等。找矿前景较好。

(9) 武夷-云开隆起区与加里东期侵入活动有关的金、(铜、铅、锌)矿床成矿系列：有19个矿床，占总储量0.5%。规模不大，但产地颇多，如桂东南平南县的三门、六八、黄腾旗，昭平县的石柱、隆盛、古袍、容光、天秀，腾县的桃花、钦兴，广东的民强等。

2.4 中生代岩金矿床成矿系列

中生代是我国金矿的盛产期，除了存在与岩浆作用明显有关的成矿系列之外，还有相当数量的金矿容于古生代地层中，在空间上与岩浆作用的关系不明显，但成矿时代明显晚于围岩，成矿区可见一些脉岩，也有一些深部存在隐伏岩体的资料（如物探），但总体上是岩浆热液还是地下热水成因尚有待于深入研究，但往往形成成矿集中区，因而找矿前景较好。

(1) 乡城—赠科褶皱带与印支期中酸性火山-侵入作用有关的铅、锌、金、银、汞矿床成矿系列：有2个矿床，占总储量0.3%。印支期火山岩发育，矿产丰富，金银伴生出现，矿床类型可以是海底喷气-沉积成因也可以是火山热液充填交代成因，如嘎村、嘎依穷等。

(2) 右江褶皱带陆内坳陷（滇黔桂三角区）印支-燕山期产于碳酸盐岩-碎屑岩中的金、锑、砷、汞、(银)矿床成矿系列：有31个矿床，占总储量4.2%。包括滇黔桂金三角陆内凹陷褶皱盖层中的众多金矿，是我国卡林型或类卡林型金矿的主要产地之一。典型矿床如广西的金牙、高龙、平塘、八渡、那比、平山、叫曼、明山、天马、龙川、金竹洞、浪金等，贵州的紫木幽、戈塘、烂泥塘、板其、丫他、册阳及云南的革当、堂上等30多个独立金矿。

此类金矿以外被认为是层控矿床^[1],但矿床实际上在多种地层、多种岩性的围岩中产出,成矿时代明显晚于围岩($64 \times 10^6 \sim 172 \times 10^6$ a),而与矿区幔源基性、超基性脉岩的成岩时代相近($77 \times 10^6 \sim 176 \times 10^6$ a)^[2],具有幔源流体成矿的一些特点,可能与地幔柱作用有关。滇黔桂地区除了存在长期作用的环形分布的高热流场(温度高达 $200 \sim 300$ °C)^[3]以外,还具有莫霍面隆起、等轴状环形航磁异常、重力异常、环形构造和穹隆构造等特征^[4]。在广西金牙金矿的黄铁矿和毒砂表面发现含铂汞金矿、汞金矿和铂金矿的显微金粒,王奎仁等认为“铂的来源可能与该区有隐伏的基性或超基性岩体有关”^[5]。这些都有助于推测金的地幔来源。

(3) 武夷—云开隆起区与印支-燕山期酸性火山-侵入作用有关的金、银、钨、锡、铋、钼矿床成矿系列:有 52 个矿床,占总储量 3.7%。矿带内的金银矿化自云开隆起向两侧具有中间 Au 两边 Ag 的分带性,如广东西部有河台、新洲、东田等金矿,粤东有凡口、厚婆坳、庞西洞等银矿,桂东南的蚀变岩型金银矿如金山、中苏、望天洞等也以 Ag 为主。

(4) 东南沿海大陆边缘与燕山期陆相中酸性火山-侵入活动有关的金、银、铜、铅、锌、非金属矿床成矿系列:有 15 个矿床,占总储量 0.9%。此列矿床主要有两种产状,武义弄坑、天台大岭口、黄岩五部、龙泉八宝山及永康柏岩等金银或金铅锌矿床产于上侏罗统磨石山组火山岩或其中的爆破角砾岩筒中;东阳罗山、遂昌银坑山等金银矿床则产于前寒武陈蔡群变质岩中,但成矿时代属于燕山期。福建紫金山铜金矿床具有上金下铜的分带性。

(5) 山东莱芜陆内构造裂陷带与燕山期富钠质中基性火山-侵入作用有关的铁、金、银、铜、铅、锌矿床成矿系列:有 3 个矿床,占总储量 0.4%。有喷气沉积叠加剪切带型和石英脉型两种成因类型的金矿,如王家庄金铜矿、归来庄金矿、铜井金铜矿等。

(6) 长江中下游陆内构造裂陷带与燕山期基性-中酸性火山-侵入作用有关的铁、铜、铅、锌、银、金、非金属矿床成矿系列:有 36 个矿床,占总储量 8%。Au 主要伴生产出,但也发现了独立的夕卡岩型金矿。同熔型杂岩体是主要的含 Au 岩体,成矿岩体多为小岩体。马山、包村、鸡冠石、洋鸡山等矿床以金为主,新桥、鸡笼山、大团山、冬瓜山、花树坡等矿床可分别圈出金矿体和铜矿体,而铜录山铜矿中的 Au 可综合利用。围岩蚀变以夕卡岩化为主,矿化分带明显,一般由侵入体向外表现为 $\text{Cu-Au-Ag} \rightarrow \text{Au-Ag} \rightarrow \text{Pb-Zn-Ag}$ 。

(7) 胶东地块边缘隆起带与燕山晚期花岗岩类有关的金、银(铜)矿床成矿系列:有 50 个矿床,占全国总储量 14.7%,是我国目前具有最大工业意义的一个金矿成矿系列。包括石英脉型玲珑式金矿和蚀变岩型焦家式金矿两种主要成因类型,以玲珑、焦家、新城、三山岛、大尹格庄、台上、上庄、河江、望儿山、仓上、河西等大型、特大型金矿为代表。

(8) 中条山—小秦岭地块边缘隆起带(陕豫晋三角区)与燕山期花岗岩类有关的金、银、(铜)、铅、钼矿床成矿系列:有 39 个矿床,占总储量 8%。与胶东系列(第 22 系列)具有较多相似之处,但富产钼矿,如金堆城、南泥湖。小秦岭文峪、娘娘山和华山 3 个岩体控制或影响到文峪、杨家峪、东闯、金铜盆、上宫、嶂峪等几十个金矿床的分布。成矿类型以石英脉型为主,已发现含 Au 石英脉千余条,其中河南 600 多条,陕西 500 多条,均不同程度含 Au。与胶东相比,小秦岭地区岩体少,出露面积小,可能剥蚀程度低,因而找矿前景尤其是深部破碎带蚀变岩型金矿的找矿前景值得重视。

(9) 华北陆台北缘与燕山期中酸性岩浆作用有关的金、银、(铜)、铅、锌矿床成矿系列:有 102 个矿床,占总储量 8.8%。金矿主要集中于蒙南、冀北、冀东、辽南的赤峰—北

票—阜新、兴隆—宽城、张家口—赤城一带。典型矿床如峪耳崖、下大堡、安家营子、东坪、后沟、中山沟、黄土梁、北沟、石垛口、赵家沟、三道河等。容矿围岩以太古宇、元古宇中高级变质岩为主, 岩浆岩发育, 以燕山期为主。钾化明显, 并具有深源成矿的某些特点。

(10) 湘西(黔东)—湘中陆内断陷边缘与燕山期花岗岩类有关的金、钨、铋、(铜、铅、锌)矿床成矿系列: 有35个矿床, 占总储量2.3%。以元古宇板溪、冷家溪群为主要容矿围岩, 地表岩浆作用较弱, NE向构造控矿较明显。典型矿床如沃溪、漠滨、黄金洞、柳林叉等。成因类型以石英脉型为主, W和Sb是特征性的共生或伴生元素, 矿物组合以自然金-辉铋矿-白钨矿-黄铁矿-石英-方解石为特征, 成矿温度以中温为主, 成矿热液以变质水为主, 成矿分带在某些地区较明显, 如雪峰山地区。

(11) 江南古陆东南缘沿深断裂带与燕山期中酸性火山-侵入作用有关的铜、铅、锌、金、银、铀矿床成矿系列: 有23个矿床, 占总储量8.4%。赣东北深大断裂对铜厂与富家坞的铜钼金铅锌矿、银山与冷水坑的铅锌银铜金矿、相山式铀铅锌矿及金山金矿具有明显的控制作用。既有伴生金矿(如德兴银山、铜厂), 也有独立金矿, 均可达到大型以上规模, 后者还受到层间破碎带控制, 可能有部分变质热液成矿。

(12) 秦岭西段(川陕甘三角区)陆内断陷边缘与印支-燕山期岩浆作用有关的钨、铋、金、汞、铀、砷、(银)矿床成矿系列: 有24个矿床, 占总储量2.1%。典型矿床如拉尔玛式金-铋-铜-铀矿床、东北寨式金-铀矿床、511式铀矿床等。成矿类型多样化, 包括热液脉型、淋积型、微细浸染型等多种, 围岩也多样化, 跟岩体关系密切的有甘肃的李坝、金山、庙山、马家、唐藏等金矿, 大水金矿可能跟斑岩有关。

(13) 东秦岭西段印支褶皱带与燕山期中-酸性岩浆作用有关的金、银、铜、铅、锌矿床成矿系列: 有10个矿床, 占总储量1.2%。主要在陕西境内, 包括风县的庞家河、八卦庙, 周至县的马鞍桥、磨子沟, 太白县的双王, 汉阴县的黄龙、茅垭子, 镇安县的二台子、马家沟等。规模最大的双王和马鞍桥均与角砾岩有关, 反映多次构造破碎, 角砾以钠长石质为特点, Au主要在黄铁矿中, 但以Au-Te组合为特征。

(14) 秦岭碰撞带东段中-新元古代火山沉积变质-中生代岩浆热液叠加改造形成金、银、(铅、锌、铜)矿床成矿系列: 有17个矿床, 占总储量2.1%。主要分布于鄂北豫南, 典型矿床如银洞坡、老湾、祁子堂、银洞沟、黑龙潭、白云、熊家沟、许家坡等。矿体主要赋存于元古宇地层中, 矿化可能具有初始富集特征, 但又受到中生代热液作用的叠加, 变质作用也较明显。

(15) 川西上古生界碳酸盐岩-(变)碎屑岩中的金、铋、铜、铅、锌、铋、砷(铀)矿床成矿系列: 有10个矿床, 占总储量0.8%。包括上三叠统年务组中的普弄巴、丘洛、嘎拉、石龙礼俄、西躬金矿、曲嘎寺组中的耳泽金矿、泥盆系城门组中的董家沟-门子沟金矿、白垩系中的黄铜尖子等金矿。可见矿床可赋存于不同时代的不同围岩中, 矿体形态也多变, 有脉状、板状、透镜状等, 构造控矿较明显。

(16) 康滇地轴边缘与燕山(喜山)期花岗岩类有关的金、银、铜、铅、锌、铋、砷矿床成矿系列: 有11个矿床, 占总储量0.9%。典型矿床如茶铺子、机器房、金台子、黄金坪、偏岩子、康定、金山、菜籽地、大桥、小街-新山等金矿, 以偏岩子氟镁石型较为特殊, 在石棉县一带有金、砷、铋、砷、铜共生矿床, 如大水沟砷-金矿。

(17) 昆仑—阿尔金—柴达木地块北缘褶皱带与印支期中酸性岩浆有关的铅、锌、金矿床成矿系列：有 13 个矿床，占总储量 2.3%。包括滩涧山、五龙沟、泥旦沟、细金沟、松树南沟、西朵克日等金矿；在锡铁山、德尔尼、赛什塘等块状硫化物矿床的伴生金也相当可观。

(18) 粤中陆陷边缘上古生界碳酸盐岩-碎屑岩中金、银、汞、(铅、锌、铜) 矿床成矿系列：占总储量 0.5%。以广东长坑金矿为代表，产于含碳硅质岩的层间破碎带，热水硅化及热液矿物将破碎的硅质岩重新胶结，期间伴随有金的沉淀。

(19) 太行山-五台山断隆与燕山期花岗岩类有关的金、银、铜、铅、锌矿床成矿系列：有 17 个矿床，占总储量 1%。金矿床或产于花岗闪长岩、石英斑岩及爆破角砾岩之内（如耿庄、刘庄金矿），或产于接触带（如高凡、辛庄金矿），或产于围岩之中（如太古宇五台群中的义兴寨金矿、太古宇阜平群团白口组中的石湖金矿），常以后者规模最大。部分矿床具有燕山期岩浆热液对于五台群同生金矿改造的特点，如磨峪沟金矿、鹿沟金矿。

(20) 吉黑褶皱带系与燕山期中一酸性岩浆作用有关的金、银、铜、铅、锌、(钼) 矿床成矿系列：有 27 个矿床，占总储量 4.6%。多产于岩体接触带及其内外，多大、中型矿床，如小西南岔、兰家、大黑山、刺猬沟、农坪、九三沟、杜家河、大安河、老柞山等金矿，团结沟金矿为特大型。

2.5 新生代岩金矿床成矿系列

(1) 哀牢山构造碰撞带与喜山-燕山期超基性—中酸性岩浆作用有关的金、镍、铜、铅、锌、锑、宝石矿床成矿系列：有 9 个矿床，占总储量 3%。云南墨江金厂、镇沅老王寨、元阳大坪、祥云马厂箐等金矿属于此列，它们主要是燕山期—喜山期的酸性或碱性岩浆作用将海西-印支期基性岩或元古宙闪长岩中的金活化出来而形成，或碱性岩本身就含矿。

(2) 濒西太平洋火山岛弧与新生代中酸性火山岩有关的金、银、铜、铅、锌矿床成矿系列：有 5 个矿床，占总储量 0.4%。台湾北部新华夏系与宜兰—新竹纬向构造联合、复合的弧形部位，产有一系列金、银、铜矿，主要形成于喜山期，成因类型主要有火山热液型和/或斑岩型，典型矿床有金瓜石金铜矿、九份金矿、武丹坑金矿等。

(3) 西藏雅江碰撞带与喜山（燕山晚）期超基性花岗岩类有关的铬、金、银、铜、铅、锌矿床成矿系列：占总储量不足 0.1%。Au 主要伴生在罗布莎铬铁矿及甲马赤康等地的铜、铅、锌、银矿床中。

(4) 澜沧江地块边缘褶皱带与喜山-燕山晚期中酸性火山-侵入作用有关的铜、铅、锌、金、银矿床成矿系列：有 7 个矿床，占总储量 1.3%。在玉龙、马拉松多、多霞松多等斑岩铜矿及鹤庆北衙、耿马等夕卡岩型铅锌矿中有伴生金矿，其中玉龙铜矿的伴生金达到大型。

参 考 文 献

- 1 郑明华. 层控金矿床概论. 成都: 成都科技大学出版社, 1989, 1~120.
- 2 张峰, 杨科佑. 黔西南微细浸染型金矿床裂变径迹成矿时代研究. 科学通报, 1992, (1).
- 3 庄新国. 桂西北地区古地热场特征及其在微细浸染型金矿床形成中的作用. 矿床地质, 1995, (1): 82~89.
- 4 王砚耕. 黔西南构造与卡林型金矿. 北京: 地质出版社, 1994, 1~201.
- 5 王奎仁, 周有勤, 孙立广等. 中国几个典型卡林型金矿床金的赋存状态研究. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1994, 1~78.