胶东两类脉型金矿的矿体分段富集数学模拟*

Mathematical Simulations of Stepwise-enrichment of Orebodies About Two Style Veins of Gold Deposits in Jiaodong Area

陈国华 刘连登

（吉林大学地球科学学院，吉林 长春 130061）

Chen Guohua and Liu Liandeng

（College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China）

摘 要 胶东地区存在中深和浅成两类热液脉型金矿。金矿体在矿脉中分段富集，是脉型金矿的重要特征。本文侧重数学模拟该特征，两类金矿的样式明显不同。研究结果具有理论和应用的双重意义。

关键词 脉型金矿 金矿体分段富集 数学模拟 胶东

脉型金矿是指金矿脉中金矿体与矿化地段韵律状相间产出的金矿类型，可分为深成、中深和浅成三大类，我国深成的仅为辽北南龙王庙金矿（刘连登，1996）。中深和浅成热液金矿是我国最重要的金矿类型。胶东主要是中深的脉型金矿(富硫化物石英脉型、细脉型和网脉型)；浅成的分为 7 个亚类(贫硫化物石英脉型、富硫化物石英脉型、细脉型、网脉型、平缓构造带型、卡林型和夕卡岩型)，其中脉型金矿最重要（刘连登等，2000，2001）。

1 中深与浅成脉型金矿的矿体分段富集

脉型金矿中，金矿体在矿脉中分段产出和分段重现，即金矿体分段富集。阐释金矿体分段富集的成生原因及过程的理论，称矿体分段富集理论。从分析石英脉含矿率变化（姚凤良等，1990；刘连登等，1994）、研究分段富集规律（刘连登等，1996）到系统阐释分段富集理论（刘连登等，1999，2000），说明这一认识是在理论指导下的应用研究中逐步深化和完善的。刘连登和笔者等以脉型金矿中的矿体分段富集理论有效地指导了找矿预测，成果不仅经济效益显著，而且丰富了热液金成矿理论。就脉型金矿的矿体分段富集而言，首先是确定脉型金矿的成因类型。

（1）两类脉型金矿的矿体长度统计规律。矿体分段产出研究的内容很多，包括矿体规模、矿体深/长值、矿化地段规模及其与矿体规模的相关性等，本文数学模拟侧重统计矿体长度。

中深脉型金矿的矿体规模大而数量少。以中段为统计单位，富硫化物石英脉型的平度 1 号脉(具两期成矿叠加的特点，但以中深成因为主，归入中深脉型)，矿体长 10～243 m（29，统计数，下同）、平均 85 m（表 1）。细脉型九曲金矿的 4 号主脉，矿体长 20～330 m（16）、平均 78 m。对于网脉型的矿床来说，矿化稳定而矿体规模更大，往往呈柱状。

浅成的矿体小但数量多。平度 6 号脉，矿体长 3～93m（54）、平均 18.64 m；马家窑金矿的长 2～50 m（126）、平均 11.63 m，是中深的 1/5 左右 (表 1)。平度 6 号脉和马家窑金矿每千米矿体数为 16.03 和 26.45 个，而中深的平度 1 号脉和九曲 4 号主脉的只有 4.89 和 5.28 个，前者矿体数多于后者 3～4 倍。

（2）两类脉型金矿的矿体重现规律。胶东金矿床中分段产出的矿体，其重现的规律性可分为 3 类，

* 教育部高等学校博士学科点基金资助项目（97018706）部分成果
第一作者简介 陈国华，男，1967 年生，博士，副教授，主要从事矿床学的教学和研究工作。

表 **1**　富集率统计表

中深脉型金矿							浅成脉型金矿						
矿脉	中段号	工程长/ m	矿体			富集率/ %	矿脉	中段号	工程长/ m	矿体			富集率(%)
			长度范围 / m	总长 / m	平均长 / m					长度范围 / m	总长 / m	平均长/ m	
平度金矿 1 号脉	五	620	46～220（3）	386	128.7	62.3	平度金矿 6 号脉	1	440	3～93(11)	160	16	36.4
	六	945	38～140（5）	366	3.2	38.7		2	580	4～93(9)	259	23.55	44.7
	七	797	16～240（3）	282	94.0	35.4		3	575	3～93(8)	191	21.22	33.2
	八	845	42～136（5）	426	85.2	50.4		4	704	3～70(12)	141	11.75	20.0
	九	581	22～135（4）	321	80.3	55.2		5	650	3～70(8)	230	25.55	35.4
	十	783	20～205（3）	290	96.7	37		6	420	3～55(6)	74	10.57	17.6
	十一	330	10～25（3）	50	16.7	15.2		合计	3369	3～93(54)	1055	18.64	38.8
	十二	345	60（1）	60	60	17.4							
	十三	312	28（1）	28	28	8.97							
	十四	378	243（1）	243	243	64.3							
	合计	5936	10～243（29）	2452	84.6	41.3							
九曲金矿 4 号主脉	280	880	45～175(5)	498	99.8	56.6	马家窑金矿	193	615	2～26(16)	139	8.69	22.6
	236	902	45～200(6)	627	104.5	69.5		172	646	2～50(10)	152	14.27	23.5
	206	659	70～95(5)	406	81.2	61.6		143	626	2～20(20)	143	7.53	22.8
	170	460	28(1)	28	28	6.13		110	577	2～38(13)	163	12.54	28.3
	130	338	10(1)	10	10	2.96		80	530	4～40(14)	200	14.29	37.7
	90	344	79(1)	79	79	23.0		50	540	2～33(20)	177	8.87	32.8
	50	35	0	0	0	0		20	350	2～10(12)	102	5.67	19.1
	10	40	0	0	0	0		－10	355	2～40(10)	109	11.56	30.7
	－30	700	30～280(4)	584	146	82.9		－50	152	4～9(3)	51	6.33	33.6
	合计	4358	10～280(23)	1794	78	41.2		－80	190	6～11(8)	95	11.88	50.0
								合计	4764	2～50(126)	1331	11.63	39.9

即柱列式、斜列式和段列式。其规律性的认识，已有效地指导了生产探矿。

柱列式。矿脉中柱列式分段重现是，在水平方向上的一个富集段内诸柱状矿体（陡倾或缓倾），垂直平行或斜列平行产出。网脉型的矿体，由于其深/长大、呈柱状，故以柱列式重现为其特征，尤其大型矿床更为如此。台上金矿的矿体呈柱列式产出，5～22 线间的列柱，走向长 170～700 m，控制斜深为 1300 m；37～47 线间的列柱，长 500 m、深 630 m（山东招金集团公司，2002）。界河金矿区的垂直纵投影图上，明显有三个斜列柱，Ⅳ、Ⅰ和Ⅶ号列柱依次位于 407～427 线、432～450 线和 455～480 线间（山东招金集团公司，2002），图上量取的列柱深/长值约为 3；柱与柱间为矿化地段，宽约 100～300 m。此外招远的上庄金矿、北截金矿孙家矿段、三山岛金矿等的矿体或富矿柱，亦呈柱列式重现。

斜列式。既可在走向上、也可垂向上重现。有两种表现形式，其一是控矿构造的斜列式，其内的矿脉(体)也斜列式重现。玲珑金矿九曲矿段，右列式构造，控制了矿体右列式重现（刘连登等，1996，2000）；平度石桥金矿，由列距 100 m 左右的 2、8、9 和 10 号脉组成左列式重现，受招平断裂带左行走滑时下盘派生的 NW 向次级断裂控制。其二为同一矿脉内矿体的斜列式重现，石桥金矿的 10 号脉内，一中段 106～114 线间，共有大小不等的 5 个矿体，呈列间距 4～6 m 的左列式重现（朱永正等，1996）。

斜列式重现规律也可在垂直纵投影图上表现出来，此时，矿体的侧伏现象明显。灵山沟金矿在 1974 年的找矿突破，关键就是利用“侧伏再现”规律（姚凤良等，1990）。玲珑西山矿段 108 号脉，矿体呈透镜状和豆荚状，总体由 SWW-NEE 向斜列式排列，明显 NEE 向侧伏（徐九华等，1982），Ⅸ、Ⅵ、Ⅱ和Ⅺ号矿体尖灭的标高依次下移，分别尖灭于 280、175、160 和 140 m 标高左右，构成左列式。

段列式。主要表现在垂向上。矿体发育构成的富集段，近似水平展布；富集段与富集段之间被贫矿段间隔；矿列为规模较大的矿体有规律的排列构成，呈斜列状或直列状平行展布。段列相交成格状，交汇处矿体规模大。平度 1 号脉为二段 3 列式，十中段（－140 m 左右）以上为Ⅰ富集段，规模较大的矿体有 1、2、5、13、14 和 15 号矿体，段宽约 220 m；十三中段（－260 m 左右）以下为Ⅱ富集段，其下界尚未控制，由脉内最大的 22 号矿体组成；Ⅰ和Ⅱ富集段间的贫矿段，有 16、18、19、20 和 22 号矿体，规模极小。富集段略向 NE 侧伏，侧伏角约 10°～12°。5、18、19 和 22 号矿体，1、7 和 13 号矿体，2、9 和 15 号矿体，构成了平行的三个矿列。九曲矿段的 4 号主脉也为段列式，矿体呈二段 5 列式展布。

以上为中深成金矿的矿体分段富集规律。胶东浅成金矿的矿体也具斜列式、柱列式或段列式重现。平

度 6 号脉（富硫化物石英脉型），在走向和垂向上均为左列式，列间距 5～7m，尖灭矿体与重现的矿体有部分重叠。烟台金矿（网脉型）矿体小（刘连登等，1998），成群分布，用包络矿研究时（刘连登等，2000），其呈向北侧伏、侧伏角约 30°、宽 150m、长 600m 的一个斜柱。旧店金矿 3 号脉，朱永正等（1996）称“二行 3 列式”，实际与本文的二段 3 列式相当，Ⅰ富集段赋存－20～80 m 标高、Ⅱ富集段于－150～－50 m 标高；4 个矿列近于平行等距分布，列间距约 50 m，向 SW 侧伏、侧伏角约 70°。

2 两类脉型金矿的矿体分段富集数学模拟

矿体数量多、相对规模大的地段即为富集段，反之为贫矿段。富集段—贫矿段—富集段的韵律性变化，提供了周期性函数的数学模拟思路。本文选取了中深和浅成热液的各两个金矿，利用分段富集率——单位长度内的矿体长度百分率，进行垂向分段富集模拟分析。

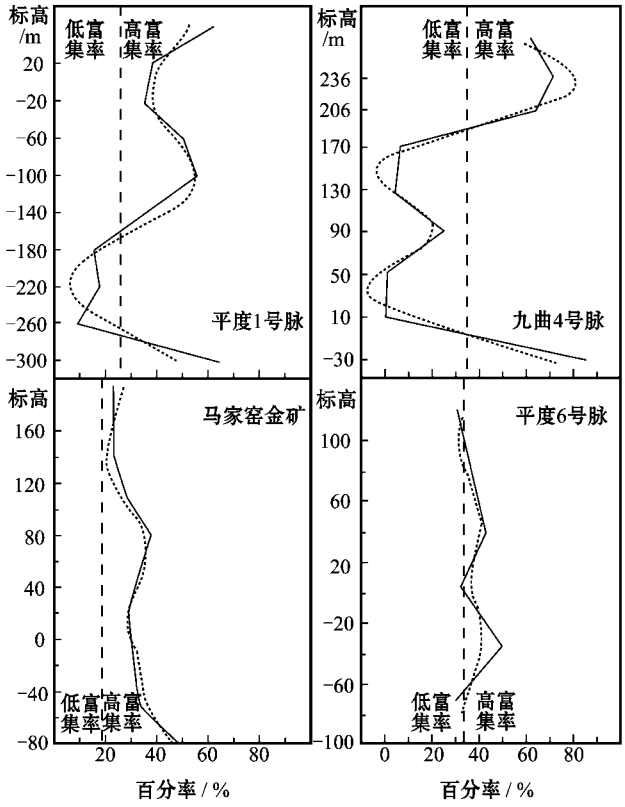


图 1 含矿率垂向变异与数学拟合图

中深成金矿－平度 1 号脉、九曲 4 号主脉；浅成金矿－平度 6 号脉、马家窑金矿

（1）两类脉型金矿的矿体分段富集率。平度 1 号脉开采矿段，累计有 10 个开采中段，各中段控制矿脉长 312～945 m、矿体长 28～243 m，富集率 8.97%～64.27%、总体 41.3%（表 1，以累计矿体长除以累计矿脉，下同）。自－140 m（十中段）始，至－260 m（十三中段），富集率最低，为 13.7～24.7%，形成贫矿段；其上为第Ⅰ富集段，富集率介于 35.4%～62.3%；其下为第Ⅱ富集段，富集率 64.3%（图 1）。九曲中深成 4 号主脉，为 52 号脉系的主矿脉，9 个开采中段，206～10 中段（206~10 m 标高），富集率最低，为 0%～23.0%，形成贫矿段；其上为第Ⅰ富集段，富集率 56.6%～69.5%；其下为第Ⅱ富集段，富集率 82.9%（图 1）。

平度浅成 6 号脉，共有 6 个开采中段，控制矿脉长 420～704 m，矿体累计长 74～280 m，富集率 17.6～44.7%、总体 38.8%。 马家窑浅成金矿，共有 10 个开采中段，控制矿脉长 152～646 m，含矿体累计长 51～200 m，富集率 22.6%～50%、总体 38.8%（表 1）。

（2）两类脉型金矿富集率波形模拟参数与结果。本文研究时，一个中段提取一个数据对（标高 x，富集率 y），

并在模拟前先用克立格法进行数据插值，加密数据对。模拟用基本公式为：

$$y = a + b \times \cos(2\pi x / l + \phi)$$

式中 a、b、l 和 ϕ 分别指偏幅、振幅、波长和初相位。其为一个简单的波形函数，为满足富集率实际变化的复杂性，采用波形分解模拟。即先拟合波长最大的波，其剩余值再拟合次一级波，依次分解拟合。本文中，二次波形的合成已能满足研究要求。

中深平度 1 号脉的模拟拟合度为 76.1325，两级波形函数的偏幅、振幅和波长依次为 36.06779 和 0.850172、16.35277 和 14.30834、356.5 m 和 196.2 m，九曲 4 号主脉的拟合度为 96.6987，系数为 32.42010 和 0.08444、35.09856 和 20.89515、371.8 m 和 131.5 m；浅成的平度 6 号脉拟合度为 89.4607，系数值为

22.89212 和 0.70787、29.60516 和 6.4086、1900 m 和 39.4 m，马家窑金矿拟合度为 83.4258、系数值为 34.27571 和 0.05746、－6.40860 和－2.67768、284.5 m 和 85.0 m。理论合成曲线（图 1 的虚线）与实际变异折线有很好的吻合程度。

（3）两类脉型金矿模拟曲线矿床地质释义。胶东两类脉型金矿的矿体赋矿部位，受控矿构造面的形态控制，可以是波峰（刘石年，1987；孙丰月，1987），也可以是波峰(构造面)变异部位（刘连登等，1994）。构造面的形态是成矿前后和/或成矿期多期应力作用下的合成面，但主导作用的可能只是两期应力，当两期应力的峰峰叠加，则断面上凸(峰)；而峰谷叠加，断面则起伏不大；若谷谷叠加，断面则下凹(谷)（刘石年，1987）。构造面变异的数量、强度和范围，影响着数学模拟曲线的峰谷数量、振幅、波长。矿体分段富集数学模拟的大小两个波长的曲线合成，隐含了构造的信息。

虽然两类金矿的总体富集率相似，变化于 38.8%～41.3% 间，但两类金矿的模拟结论明显不同。若以 $x=(|a|+|b|)/2$ 划线（图 1 的虚直线），左侧为低富集率、右侧为高富集率。浅成的马家窑金矿和平度 6 号脉变异小，靠近该线。其原因如下：① 浅成的物理化学条件变化大，在成矿的构造范围内，矿质金沉淀的速率大，从而使矿体产出的“随机性”相对增大、矿化强度分散、矿体规模小，最终导致富集率变异小；② 品位分形研究表明，浅成脉型金矿的具三个分维值，中深的两个（仇广乐等，2001），分别代表对金品位有影响的成矿阶段数。当浅成的三个阶段在成矿的构造范围内“随机性”成矿，增加了矿化地段数量、减小了矿化地段规模，故而进一步降低富集率变异性，导致拟合曲线的峰谷变化更小；③ 浅成的脉型金矿矿体延深浅，其曲线缺少明显的贫、富矿段（富集率）之分。当富集率曲线急剧降低，往往显示矿体延深尖灭，如平度 6 号脉。

中深成脉型金矿的曲线变异大，在虚直线两侧摆动明显，富集率具高—低—高的韵律性变化。这是由于中深成矿物理化学条件相对稳定，矿质金有足够的时间运移到构造的有利部位沉淀，使富集率的变化与构造的有利程度密切相关，随构造的有利—不利—有利条件，富集率显示显著的高—低—高变化，拟合曲线的峰谷变化大。因此可明显划分出富集段与贫矿段。据中深成脉型金矿矿体富集率拟合曲线的周期性，理论上可以判别富矿段和贫矿段的规模和标高范围、矿体富集程度等。如平度 1 号脉，其模拟曲线显示高富集率范围为 230 m 左右，类推第 II 富集段尚可下延 200 m 左右。

3　讨论与结论

脉型金矿中矿体分段富集是普遍特征，其可分为柱列式、斜列式、段列式 3 种重现范式。表征矿体分段富集的富集率，可用波形分解的方法模拟为两个波长不同的周期性函数。其既隐含有构造的信息，又隐含有矿床成因的信息，还具有指导生产的实际意义。具体结论如下：① 浅成脉型金矿的模拟曲线变异性小，反映成矿时物理化学条件变化大，矿化分散，缺少富集段和贫矿段的划分标志；② 中深成的金矿，变异性大，可明显划分富集段与贫矿段；③ 依据函数式的周期性变化，理论上可以推断富矿段和贫矿段的规模和标高范围、矿体富集程度等。

矿体分段富集数学模拟的两个波长的周期性函数，如何与两期主要应力合成的构造面之间建立对应关系，还不清楚。脉型金矿的金矿体分段富集，是在同一矿体富集域内进行的。矿体富集域，是指一定的垂深范围内，包容矿体的分段富集段。文献中通常说的第二富集段，本文称第二富集域，主要是避免与矿体富集段混淆。我国的脉型金矿是否有第二富集域，目前所知甚少。即使玲珑金矿矿体垂深控制已达 1500 m 左右，仍无明显的标志说明这个问题。本文所述的脉型金矿矿体柱列式、斜列式、段列式 3 种重现范式的研究，属同一个富集域的。

参　考　文　献

仇广乐，刘连登，陈国华，等. 2001. 山东莱西北泊金矿床本质特征. 黄金，22（6）：6～10.
刘连登，陈国华，刘青廷，等. 1998. 烟台金矿床本质特征描述及其意义. 矿床地质，17（增刊）：295～298.
刘连登，陈国华，吴国学，等. 2000. 中国金矿地质研究述评. 黄金，21（1）：1～11.
山东招金集团公司. 2002. 招远金矿集中区地质与找矿. 北京：地震出版社. 438.
姚凤良，刘连登，孔庆存，等. 1990. 胶东西北部脉状金矿. 长春：吉林科学技术出版社. 234.