

砂金矿床形成规律探讨

杨尔煦

(冶金工业部地质局)

河流中金粒约与大于其粒径30倍的砾石运动规律相仿。河流对金粒有富集、分选和贫化作用。矿源层剥蚀时,若河流富集作用大于贫化则可形成矿床。用参数计算可求出砂金品位(或剖面金量)的两种曲线。

关键词: 砂金矿床; 形成规律; 定量分析

30多年来,尤其是近10年来,我国勘探了大量砂金矿床。许多地质学家从不同角度论述了砂金矿床的成矿规律,但多属定性研究。由于砂金矿床成矿的复杂性,给定量研究带来了困难,本文试图通过砂金矿床成矿的若干参数,即从定量的角度,来探讨砂金矿床的特征,借以寻找一种新的研究方法。

砂金矿床形成的机制

砂金矿床的类型很多,诸如残坡积型、细谷型、河谷型、河漫滩型等等。而分布最广、储量最多而又最典型者是三、四级河流中的河谷型砂金矿床。如所周知,这种河谷型砂金矿床的典型剖面是:最下部为基岩,其上有一层厚薄不一的碎石层,通常含金;再上是砾石层,是主要的含金层;然后是粗中粒砂、细砂。再上面盖了一层砂质粘土。这样的层次通常是一层,有时可反复出现砾石、粗中细粒砂和粘土层。现代河流往往在这些河谷沉积的一侧或表面。河流不破坏沉积相序时,砂金矿就保存下来。

现在从河流水动力学的角度来讨论一下砂金颗粒在水中的运动情况。砂金的比重很大(16.5~18.3),要起动一颗砂金需要多大的流速,尚无现成公式。本文借用起动一颗砂砾石的流速公式^①:

$$U_c = \eta \sqrt{\frac{r_s - r}{r}} g D_s \left(\frac{h}{D_s} \right)^m \quad (1)$$

式中: U_c ——起动流速;

η ——综合系数;

m ——为1/6;

h ——河流深度;

D_s ——砾石直径;

r_s ——砾石比重;

r ——水的比重(为1)。

代入系数后

$$U_c = \eta \sqrt{\frac{r_s - r}{r}} g \cdot D_s^{1/3} h^{1/6} \quad (2)$$

若是一颗砂金,则公式为:

$$U_c = \eta \sqrt{\frac{r_{Au} - r}{r}} g \cdot D_{Au}^{1/3} h^{1/6} \quad (3)$$

(2)、(3)式相等时,即相同水速条件下,则有

$$\sqrt{\frac{r_s - r}{r}} g \cdot D_s^{1/3} = \sqrt{\frac{r_{Au} - r}{r}} g \cdot D_{Au}^{1/3} \quad (4)$$

为简化起见,砂金比重取17.5,砾石比重取2.65,则

$$D_s = 10^{3/2} \cdot D_{Au} = 31.6 D_{Au} \quad (5)$$

一般砂金颗粒的直径为0.1~2.5mm,根据(5)式,相当于砾石直径为3.2~79mm。按照我国的《砂金矿地质勘探规范》,这个砾径范围相当于细到粗砾。也就是说,砂金颗粒在河流中运动和保存的力学特征,和细到粗砾石是一样的。这一认识,与实际

① 武汉水利电力学院:《河流泥沙工程学》,1980年。

中砾石层是主要含金层的结论一致。

由于砂金颗粒小而比重大,其受力面积相对要小。因此,采用砂砾石的起动流速公式,估计还会偏小。

>10mm粗砾石的运动速度实测资料不多。根据长江水利办公室对川江砾石的研究表明^①,砾石愈扁平,综合系数 η 愈大,愈难起动。当流速超过起动速度后,砾石开始以滚动、滑动或跳跃方式前进。砾石的起动方式具有一定的概率特性,即在某一瞬间,一部分砾石起动,而另一部分砾石静止;在另一瞬间,又有一部分砾石起动。因此,全部砾石的平均运动速度很慢。据川江观测结果,丰水期一般平均运动速度为2.8~12.6 m/天;在枯水期则很少运动。

根据砾石运动和静止的规律,可以推测砂金颗粒运动和保存的规律。

1. 大多数砂金只能在丰水期呈推移式(包括滚动、滑动、跳跃)运动,速度很慢。
2. 在枯水期,当水流只能推动粗一细砂时,水流可以推动的金粒直径<0.1mm,对砂金矿床的形成作用不大。
3. 砂金上部有细砂、特别是有砂质粘土层覆盖时,砂金可保存很好。这是由于粘性细粒泥砂很难起动,形成了一个保护层。

砂金矿体长度和品位变化

1. 富集作用 有物理富集和化学富集两种。化学富集作用对砂金成矿的影响现在还不清楚,只能在公式前边加一个化学富集系数 C 来表示。这里只计算物理富集作用。下面讨论高度为 dh ,长度为 dx ,河宽为 W 的一条砂金。当河流速度大于起动速度 U_c 时,设河流中金粒移动速度为 V 。若上下游速度不一致,则有 dv 的差别。一般河流上游陡、下游缓,相应的金粒运动速度上游快、下游慢。所以砂金运动速度的变化 dv 是负值。作用时间 dt 以后,小条砂金品位从 Z 变到 $Z+dZ$ (图1)。 dt 以前,小条内的金量为 ZW

$dx dh$;经过 dt 时间以后,小条内的金量应减少 $ZW dt dv/dx$,这时的金量应为 $(Z+dZ)W dx dh$ 。根据金量不灭的原理,可得下列微分方程:

$$(Z+dZ)W dx dh = ZW dx dh - ZW dt \cdot dv \cdot dh \quad (6)$$

$$\text{化简得: } dZ \cdot dx = -Z dt dv$$

$$\text{故 } dZ/Z = -(dv/dx) dt \quad (7)$$

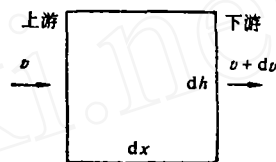


图1 小条砂金的运动

设丰水期前砂金品位为 Z_0 ,丰水期后砂金品位为 Z ,丰水期时间为 T ,则(7)式两边积分可得:

$$\int_{Z_0}^Z dZ/Z = - \int_0^T (dv/dx) \cdot dt$$

$$Z = Z_0 \exp \left[- \int_0^T (dv/dx) \cdot dt \right] \quad (8)$$

为简化起见,如果 dv/dx 只和位置 x 有关,和时间 t 无关,可写成 v'_x 。当然,实际情况要复杂得多。(8)式积分后为:

$$Z = Z_0 e^{-v'_x T} \quad (9)$$

由于河流中一般 dv/dx 是负值,即下游流速变缓,砂金颗粒运动速度 v 也变小。在这样的条件下,(9)式指数部分是一个正值。这就说明在丰水期水流向下逐渐变缓的条件下,砂金品位逐渐变富。

如果原来的砂金长度为 L_0 ,一次丰水期以后砂金的长度为 L ,则

$$ZL = Z_0 L_0 \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式得:

$$L = L_0 e^{v'_x T} \quad (11)$$

这说明,砂金经过河水的作用,长度逐

渐缩短,品位逐渐提高。特别是河流由窄变宽、由直变曲时,流速会发生很大变化,砂金运动速度变化 $-v_x'$ 也增大。在这种部位,将有利于形成砂金矿床。

按照河流侧向沉积的理论^②,一次丰水期的时间 T 只能影响砂金矿床宽度中很小的一部分,因此,影响整个砂金品位的将是整个河床沉积时期丰水期的平均时间 $\bar{T}$ 。当河床继续向下切割时,砂金将在另一个地点沉积下来,再次富集。多次的富集作用,将形成目前的砂金矿床。(9)式的指数部分将

变为: $\sum_{i=0}^n -v_{xi}' T_i$ 。

2. 颗粒的分选作用 砂金矿床的长度也会伸长,这是由于金粒大小不同,大粒移动慢、小粒移动快引起的。可以设想,在砂金矿床的头部,大粒砂金最先止动,然后是中粒,最后是细粒。这样就形成了一个金品位逐渐降低的头部。同理,在砂金矿床的尾部,金品位会逐渐升高。

图2是长春黄金研究所为陕西月河砂金矿SJ02样品所做的粒度分布曲线^③。现将颗粒按对数坐标绘图,显示出颗粒大致服从对数正态分布。所困难的是该分析结果 >1 mm的只笼统地划为一组,没有给出上限。这样曲线就不太完整。

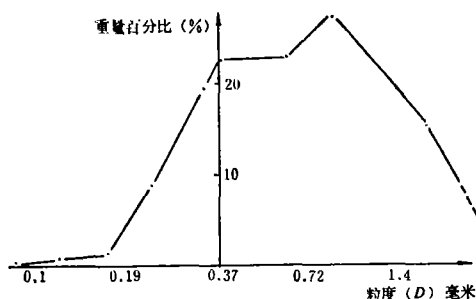


图2 陕西月河砂金矿的粒度分布曲线

设砂金颗粒粒度分布密度函数是 $\varphi(D)$,即按重量百分比的颗粒分布曲线,因此,

$$\int_0^{\infty} \varphi(D) \cdot dD = 1 \quad (12)$$

$$\text{也可近似地写为: } \int_{0.1 \text{ mm}}^{2.5 \text{ mm}} \varphi(D) \cdot d(D) = 1$$

如果最大颗粒为 D_M ,则砂金头部起始点的止动流速 U_{SM} 为:

$$U_{SM} = 0.8 U_{CM} = 0.8 \eta \sqrt{\frac{r_{Au} - r}{r}} \cdot g \cdot D_M^{1/3} \cdot h^{1/6} \quad (13)$$

某种粒级 D 的止动流速 U_S 要比 U_{SM} 小,可以写为

$$U_S = U_{SM} - U = 0.8 \eta \sqrt{\frac{r_{Au} - r}{r}} \cdot g \cdot D^{1/3} \cdot h^{1/6} \quad (14)$$

上式止动流速的差值 U 就决定了某一粒级 D 离开砂金矿头部起始点的距离 x 。

$$\text{设 } U = kx$$

则(14)式可以写为:

$$\left[\frac{U_{SM} - kx}{0.8 \eta \sqrt{\frac{r_{Au} - r}{r}} \cdot g \cdot h^{1/6}} \right]^3 = D \quad (15)$$

从(15)式可以看出,颗粒越细,即 D 越小,离开砂金矿头部起始点的距离 x 越大。

砂金矿头部曲线可以写为:

$$\begin{aligned} Z &= C Z_0^{-v_x' T} \theta(D) \\ &= C Z_0^{-v_x' T} \int_0^D \varphi(D) dD \quad (D \text{ 从 } D_M \text{ 变化到 } 0) \end{aligned} \quad (16)$$

砂金尾部曲线是:

$$\begin{aligned} Z &= C Z_0^{-v_x' T} [1 - \theta(D)] \\ &= C Z_0^{-v_x' T} \int_D^{D_M} \varphi(D) \cdot dD \quad (D \text{ 从 } D_M \text{ 变化到 } 0) \end{aligned} \quad (17)$$

这两条曲线类似,但尾部曲线要用起动

②许靖华:《沉积学讲座》,1980年。

③张德常:陕西月河砂金矿控矿条件及富集规律研究,1986年。

流速 U_c ，而头部曲线则用止动流速 $U_s \approx 0.8 U_c$ 。这样尾部金品位上升要比头部下降得快。由于头尾部的出现，砂金长度从 L 加长为 $L + x_M$ 。这里 x_M 是指砂金矿床头部的最大位移。

由于分选作用的加入，砂金品位变化大体可分为两种情况（图3）。第一种情况是 $L > x_M$ ，砂金品位变化如图3a，中间有一段平坦的区域。第二种情况是 $x_M < L$ ，砂金品位变化由三段曲线组成（图3b）。

砂金尾部（上游）曲线是：

$$Z = C Z_0^{-\nu \frac{x}{L}} \int_D^{D+N} \varphi(D) \cdot d(D) \quad (D \text{ 从 } D_N \text{ 变化到 } 0) \quad (18)$$

砂金中部的曲线是：

$$Z = C Z_0^{-\nu \frac{x}{L}} \int_D^{D+N} \varphi(D) \cdot d(D) \quad (D \text{ 从 } 0 \text{ 变化到 } D_M - D_N) \quad (19)$$

砂金头部的曲线是：

$$Z = C Z_0^{-\nu \frac{x}{L}} \int_{D_M - D_N}^D \varphi(D) \cdot d(D) \quad (D \text{ 从 } D_M \text{ 变化到 } D_M - D_N) \quad (20)$$

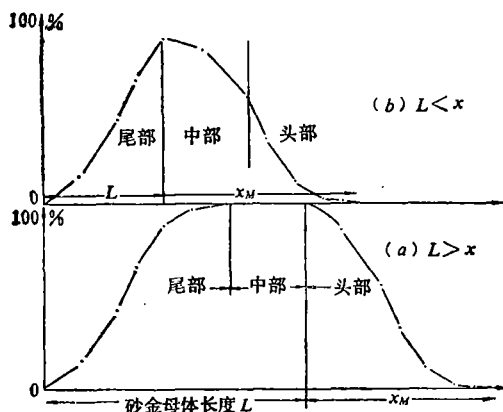


图3 砂金理想剖面金量变化曲线示意图

上式中有一个参数 D_N 需要说明。 D_N 是某一定值的颗粒，这种颗粒的砂金正好位移了 L 距离，而 D_N 以下颗粒砂金的位移都大

于 L 。根据这样的分析，可以按颗粒分布曲线以（18）—（20）式积分求得品位变化。图3b是一个不对称的曲线，上升较快，下降较慢，而全部曲线都不会达到100%。这就说明了由于颗粒分选作用使得砂金体加长和品位下降的原因。

3. 贫化作用 当无金矿化河流汇集时，砂金品位下降。贫化程度取决于金矿化区汇水面积 S_0 和无金矿化区汇水面积 S_n ，贫化后的品位 Z 为：

$$Z = Z_0 [S_0 / (S_0 + S_n)] \quad (21)$$

由此可见：

（1）砂金同时受富集作用、颗粒分选作用和贫化作用之影响。砂金在河流作用下，既有富集，又可贫化。要形成矿床必须富集大于贫化。因此，即使有了矿质来源，仍需有利的河流条件，才能成矿。

（2）在一个矿体中各个部位所取砂金粒度分布数据不会一致。只有 $L > x_M$ 的矿体，在其中部取样才能获得完整的分布；而当 $x_M > L$ 时，在任何部位都不能取得完整的分布。因此，必须采用多个部位组合样来研究砂金颗粒度的分布。

（3）上述计算中忽略了河流侧向侵蚀的作用。河流中的砂金不仅从上游移到下游，当然这是主要的运移，而且还存在河流剖面方向上的横向和垂向位移。为了消除这种横向和垂向位移的影响，上述计算的金品位都可以用横剖面上单位长度的金量来代替，即每米河流中的金量，单位是g/m。这里定义为剖面金量，用 P 来表示。以上介绍的就是砂金矿床形成规律的线性理论。

砂金矿床的变化特点

为了表示一个砂金矿床的变化特点，除了已论述过的3个参数①，即母体品位几何平均值 $\exp(\xi)$ 、母体品位的对数方差 σ 和偏

① 杨尔煦：黄金矿床的参数，1986年。

斜校正 α 以外, 通过上述的讨论又增加了剖面金量最大的极值 P_M 、砂金原始长度 L 和砂金延长长度 x_M 等参数。

取自黑龙江省内倭勒根河两条支流中的实测剖面金量曲线见图 4。这两条支流都很直, 属于四级水系。

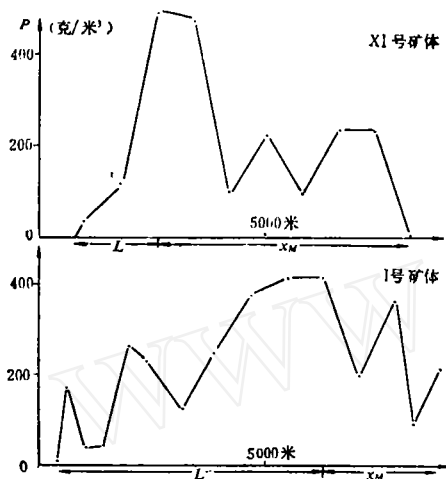


图 4 剖面金量的实测曲线

这两条曲线都存在着一个最大的极值和若干个较小的极值, 其形态与理论曲线相差较大。详细研究还可看出其他特征。I 号矿体曲线上升缓慢, 并有两个点形成一个平缓的最大极值区, 类似于 $L > x_M$ 的理论曲线。Ⅱ号矿体曲线上升很快, 下降则较缓慢, 类似于 $L < x_M$ 的理论曲线。至于几个较小极值的出现, 都是由于两侧支沟补给引起的, 是叠加的异常。

这里的例子专门选择了笔直的河流, 实际上许多河流是弯曲的。由于弯曲会改变流速, 形成更多的较小的极值, 从而使砂金矿剖面金量曲线更复杂。

从上述理论分析, 可推论砂金矿床的母体储量(金量) A_P , 并由下式求出:

$$A_P \approx P_M \cdot L \quad (22)$$

现在仍用这两个矿床作一下计算(表 1)。按 (22) 式求出的砂金矿床母体储量 A_P , 与实际勘探求出的母体储量 A 相仿。

由于 L 不易准确求得(常偏小), 所以用 $P_M \cdot L$ 求出的砂金母体储量也偏小; 但在数量级上是相仿的, 这也间接证实了上述理论分析是正确的。

砂金矿床剖面金量的最大极值 P_M , 实际上就是砂金矿体理论曲线中的第一项:

$$P_M = P_0 \exp \left[- \int_0^T \frac{dv}{dx} dt \right] \quad (23)$$

这个数字代表了砂金矿体的富集程度, 是砂金矿床的重要参数。

砂金矿源区的矿化强度

砂金矿床的来源已有很多学者研究过, 认为多数来自金矿化地层。很多大的砂金矿床并没有找到原生金矿。这个结论并不否认有少数砂金矿床直接来源于原生金矿。如黑龙江团结沟斑岩金矿床下游就有砂金矿床^⑤。因此, 需要有一种方法来求出矿源区的矿化强度。

砂金矿区所求的矿石量 V_i , 都是在给定边界品位 Z_i 的情况下求出的。为了求出母体矿石量 V , 可以用下列公式:

$$V = V_i / \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{w_i}^{\infty} \exp \left(-\frac{1}{2} w^2 \right) dw \right] \quad (24)$$

然后求出母体金属量 A :

$$A = V \left[\exp \left(\frac{1}{2} \sigma^2 + \xi \right) - a \right] \quad (25)$$

设砂金矿区上部的汇水面积为 S , 则该面积内的矿化强度为 $Q = A/S$ 。当然, 这个数字比实际的矿化强度要小, 因为有部分砂金冲到下游去了。

下面讨论四川涪江从上游到下游的 4 个砂金矿床。计算的涪江流域矿化强度见表 2。每个计算点均值该点以上所有母体金量

⑤ 吕英杰: 黑龙江省流水成因砂金矿的成矿机理, 1986年7月。

表 1

参 数	$\exp(\xi)$ (g/m ³)	σ	a (g/m ³)	P_M (g/m)	L (m)	x_M (m)	$P_M \cdot L$ (t)	A (t)
I 号矿体	0.04	1.5	0.005	420	5800	2400	2.44	2.83
II 号矿体	0.055	1.4	0.005	500	1800	5600	0.90	1.35

表 2

河流	矿 区	A, t	S, km^2	$Q, kg/km^2$
上游	水晶	2.95	2580	1.14
	古城	13.86	4650	2.98
	响岩	17.34	5980	2.90
下游	彭明	24.26	6300	3.85

表 4

河流名称	$Q, kg/cm^2$	$Q_i, kg/km^2$
四川涪江	3.85	2.76
黑龙江内倭勒根河	36.5	26.2
江西昌江支流		61.0

表 3

矿体	A, t	S, km^2	$Q, kg/km^2$
I 号	2.83	60.8	46.6
II、III 号	1.35	69.9	19.3
X、XI 号	0.91	20.6	44.2
III	1.78	36.8	48.3
合计	6.87	188.1	$A/S, 36.5$

的总和。由表 2 可见, Q 的 4 个数据都很小, 说明这里矿化强度变化不大, 可以推论金矿主要来源于含矿地层。

另一个例子是黑龙江省内倭勒根河, 其上游有 4 条支流。每条支流都有金矿, 矿源区实际上是联成一片的。分别求出 4 条支流的矿化强度 (表 3), 大多是 $46 kg/cm^2$, 说

明矿化很均匀。对比这两个区矿化强度相差达 16 倍之多。

如果砂金矿床的参数没有求出, 以上的计算可以改用砂金矿床的勘探储量 A_i , 所求得的是视矿化强度 $Q_i = A_i / S$ 。它比 Q 值要小一点。表 4 是几条河流计算的 Q 和 Q_i 值。江西昌江支流的 Q_i 值最大, 其上游已发现原生金矿体。

这里提出的矿源区矿化强度 Q 或 Q_i , 这两个参数是值得重视的。目的在于通过砂金矿的大量勘探资料, 借以探讨原生金矿存在的可能性。这个课题, 对正在大量寻找黄金矿床的我国是有现实意义的。

On the Regularity of the Formation of Placer Gold Deposits

Yang Erxu

A gold grain and a gravel with a size thirty times greater than that of the gold grain follow a same law of motion in a stream. For the accumulation, sorting and dilution of gold grains the stream plays a positive role. During disintegration of primary gold deposits, as a result of the enrichment action of the stream on gold grains greater than its dilution action, alluvial gold placers will be formed. Through a calculation of the parameters of these two processes, two curves for computing the gold content of a placer (or the content of a unit length in a cross section) are obtained.