

## SEDEX 矿床

Wayne Goodfellow, John Lydon

加拿大地调局

邮箱: [wgoodfel@nrcan.gc.ca](mailto:wgoodfel@nrcan.gc.ca)

## 定义

### 矿床类型:

沉积喷流 (Sedimentary exhalative, SEDEX) 矿床通常是板状矿体, 其成份主要是 Zn、Pb 和 Ag, 赋存在闪锌矿和方铅矿中。矿体与铁硫化物、基底沉积物呈互层产出, 其沉积在海底, 与热液流体进入大陆裂隙中的还原性沉积盆地所形成的亚海底喷口络合物相联系。

### 矿床亚类型

沉积喷流 (SEDEX) 矿床亚类型包括那些形成在海底附近的 (比如 爱尔兰型 (Irish-type) 矿床) 和布罗肯希尔型 (Broken Hill-type, BHT) 矿床。爱尔兰型沉积

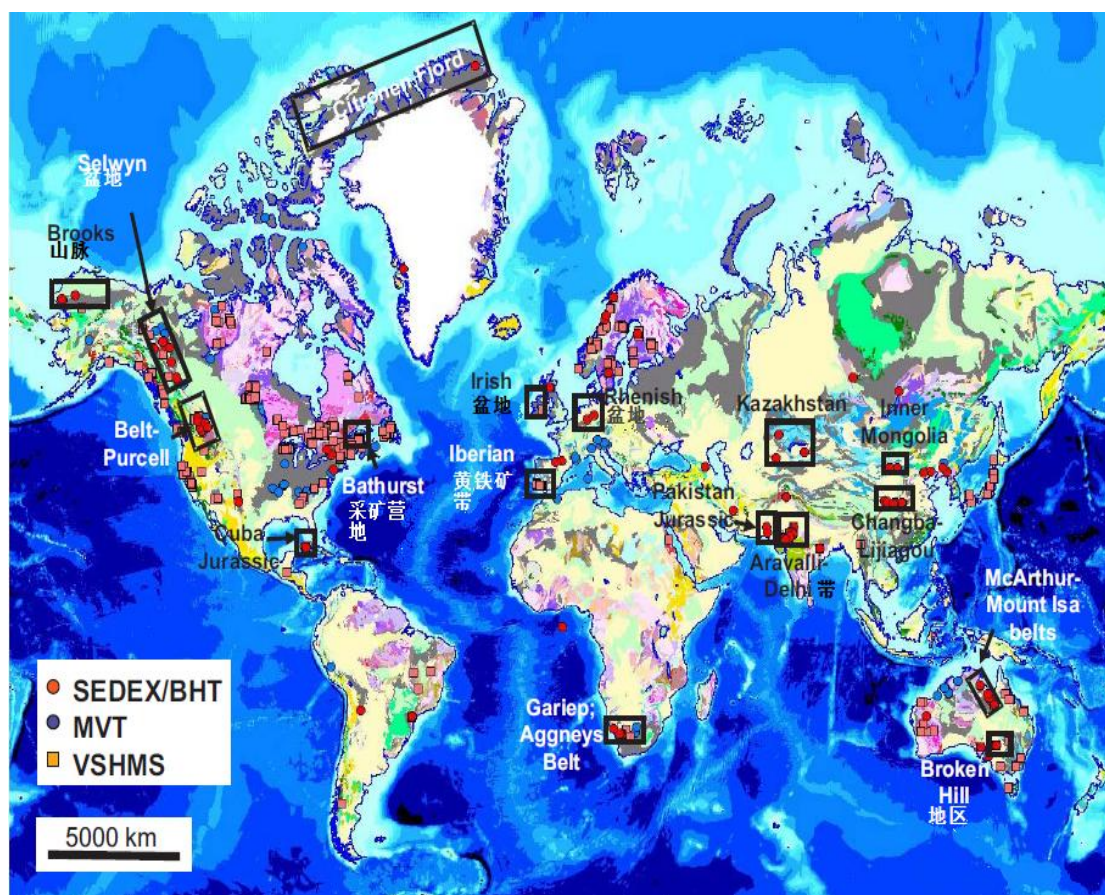


图1 SEDEX, BHT, MVT和VHMS型矿床绘构的简易世界地质图 (世界矿床项目)

Irish型矿床包含在SEDEX型矿床大组中

喷流矿床 (据Hitzman 和 Beaty, 1997) 赋存在碳酸盐岩中, 并且这些矿床, 既可以是个别的也可以是组合的 (区域的——大范围的), 能够表现出海底沉积特征和典型的密西西比河谷型 (Mississippi Valley-type, MVT) 矿床表生地貌特征。爱尔兰型矿床的形成被认为与其他的沉积喷流矿床具有相似的成矿作用过程, 但是因为碳酸盐地块在中酸性矿液中有很高的溶解度, 所以矿体也可以沉积在热液岩溶喀斯特系统中 (比如溶解空隙, 崩塌角砾岩)。布罗肯希尔型 (BHT) 矿床 (据

表1 世界主要SEDEX型矿床的品位和吨位

矿床名称	矿床状态	所在地	纬度	经度	年代	地质资源（最大范围）						
						Cu（%）	Zn（%）	Pb（%）	Ag（g/t）	Au(g/t)	Mt	Zn+Pb（Mt）
Jiashengpan	贮藏	中国	41.0000	109.3187	古元古代		3.80	1.30			500.0	25.50
Broken Hill	开采	澳大利亚	-31.9667	141.4887	古元古代	0.10	11.00	10.00	180.00	0.10	280.0	58.80
Talvivaara	贮藏	芬兰	63.9833	-28.0500	古元古代	0.14	0.53		2.60		221.4	1.17
Menninnie Dam	贮藏	澳大利亚	-32.6500	136.4167	古元古代	1.30	8.00	5.00	100.00		122.3	15.90
Saladipura	过去开采	印度	27.6458	75.5256	古元古代		1.25				115.0	1.44
Sindesar Kalan East	贮藏	印度	25.0000	74.1667	古元古代		2.13	0.51			70.0	1.85
Rampura-Agucha	贮藏	印度	25.8333	74.7333	古元古代		13.60	1.90	45.00		63.7	9.87
Rajpura-Dariba	过去开采	印度	24.9833	74.1250	古元古代	0.15	2.04	2.79	113.88	0.28	55.5	2.68
Cannington	过去开采	澳大利亚	-21.8667	140.9167	古元古代		4.30	10.90	493.00		47.3	7.19
Mokanpura North	贮藏	印度	25.0000	74.1333	古元古代		2.40	0.60			40.0	1.20
Mochia	过去开采	印度	24.3639	73.7222	古元古代		3.79	1.69			26.8	1.47
citronen Fjord	贮藏	丹麦	83.0833	-28.2500	奥陶纪		7.50				25.0	1.88
Tekeli	贮藏	哈萨克斯坦	44.8000	78.9500	新元古代	1.00	6.00	5.00			50.0	5.50
Rosh Ponah	过去开采	纳米比亚	-27.9500	16.7667	新元古代	0.10	7.00	2.00			50.0	4.50
Red Dog	过去开采	美国	68.0667	-162.8000	密西西比纪		15.80	4.30	83.00		142.0	28.54
Navan	当前开采	爱尔兰	53.6167	6.8167	密西西比纪		8.04	2.68			77.8	8.34
Silvermines	过去开采	爱尔兰	52.7833	8.2333	密西西比纪		4.91	1.93	19.71		23.2	1.59
Lik	贮藏	美国	68.1667	-163.2000	密西西比纪		8.80	3.00	34.00		22.7	2.68
Lisheen	开采	爱尔兰	52.7333	7.6833	密西西比纪		11.50	1.90	26.00		22.2	2.97
Big Syncline	贮藏	南非	-29.2000	18.8333	古元古代中期	0.09	2.45	1.01	12.90		101.0	3.49
Broken Hill	开采	南非	-29.2333	18.7833	古元古代中期	0.34	1.77	3.57	48.10		85.0	4.54
Changba-Lijiagou	开采	中国	34.0000	105.5000	中泥盆纪		10.99	1.92			68.1	8.79
Meggen	过去开采	德国	51.1333	8.0833	中泥盆纪	0.17	5.83	0.83			60.0	4.00

矿床名称	矿床状态	所在地	纬度	经度	年代	地质资源（最大范围）						
						Cu（%）	Zn（%）	Pb（%）	Ag（g/t）	Au(g/t)	Mt	Zn+Pb（Mt）
Rammelsberg	过去开采	德国	51.8833	10.4167	中泥盆纪	1.07	18.06	8.59			24.7	6.58
Sullivan	过去开采	加拿大	49.7083	-116.0056	中元古代		5.86	6.08	67.36		162.0	19.33
Gamsberg	贮藏	南非	-29.2500	18.9667	中元古代		7.10	0.55			150.0	11.47
Century	开采	澳大利亚	-18.7458	138.6250	中元古代		10.20	1.50	36.00		118.0	13.81
Dugald River	贮藏	澳大利亚	-20.2500	140.1500	中元古代		13.28	2.09	42.00		42.9	6.59
Balmat	开采	美国	44.2500	-75.4000	中元古代		9.00	0.50			21.0	1.99
Franklin	过去开采	美国	41.1167	-74.5667	中元古代		19.60				20.4	4.00
HYC(McArthur River)	开采	澳大利亚	-16.4333	136.1000	古元古代晚期	0.20	9.20	4.10	41.00		237.0	31.52
Mount Isa	开采	澳大利亚	-20.7333	139.4833	古元古代晚期		6.80	5.90	148.00		124.0	15.75
Hilton	开采	澳大利亚	-20.5667	139.4667	中元古代晚期		9.30	6.50	151.00		49.0	7.74
Hilton North	贮藏	澳大利亚	-20.5300	139.4800	中元古代晚期		12.10	6.40	110.00		23.0	4.26
Cirque	贮藏	加拿大	57.5111	-125.1500	晚泥盆纪		8.00	2.20	47.20		38.5	3.93
Zhairem	贮藏	哈萨克斯坦	48.3333	70.5000	晚泥盆纪	0.50	5.00	2.00			20.0	1.40
Faro	过去开采	加拿大	62.3583	-133.3667	晚寒武纪		5.70	3.40	36.00		57.6	5.24
Grum	过去开采	加拿大	62.2694	-133.2222	晚寒武纪		4.90	3.10	49.00		30.8	2.46
Dy	贮藏	加拿大	62.2333	-133.1417	晚寒武纪	0.12	6.70	5.50	84.00	0.95	21.1	2.57
Howards Pass	贮藏	加拿大	62.4500	-129.1833	早志留纪		5.00	2.00	9.00		476.0	33.32
Aguilar	开采	阿根廷	-23.2000	-65.7000	早奥陶纪	0.05	8.50	6.50	150.00		32.2	4.83
Elura	过去开采	澳大利亚	-31.1667	145.6500	泥盆纪		8.62	5.58	108.98		32.2	4.57

注：地质资源=产量+经济储量+次级经济储量； Mt=百万吨； Zn+Pb Mt=金属锌和铅的Mt



Beeson, 1991; Parr and Plimer, 1993; Walters, 1998)以高变质程度，高基数的金属和硫比率，Fe-Si-Mn氧化物喷流岩组成的三维空间构型，长英铁镁质双峰的火山岩和沉积母岩为特征。

普遍认为，尤其是在矿床的规模方面，无论用什么标准界定喷流沉积矿床，不论是在沉积喷流（SEDEX）矿床和火山块状硫化物（volcanogenic massive sulphide, VMS）矿床之间还是在沉积喷流矿床（SEDEX）和密西西比河谷矿床（MVT）之间都有一连续的特征。这三种类型矿床的差别不仅表现在物理特性，矿床单元的化学和地球化学属性，以及各自的地球化学环境上，也表现在这些类型的形成模型上。SEDEX和MVT矿床认为是形成在由盐溶液流体迁移形成的较厚沉积盆地的地块中，但是，VMS型矿床是产生在海底火山沉积带，它是由热液流体与次火山侵入作用产生的岩浆流体发生对流所形成的。SEDEX和VMS型矿床都是由热液流体喷出到海底形成的，所以矿体和它们立即生成的围岩年限差别很小。相比之下，MVT型矿床形成在地表下面，所以矿体和围岩的年代差别要比SEDEX型矿床的大很多。（据Leach等人，2001）

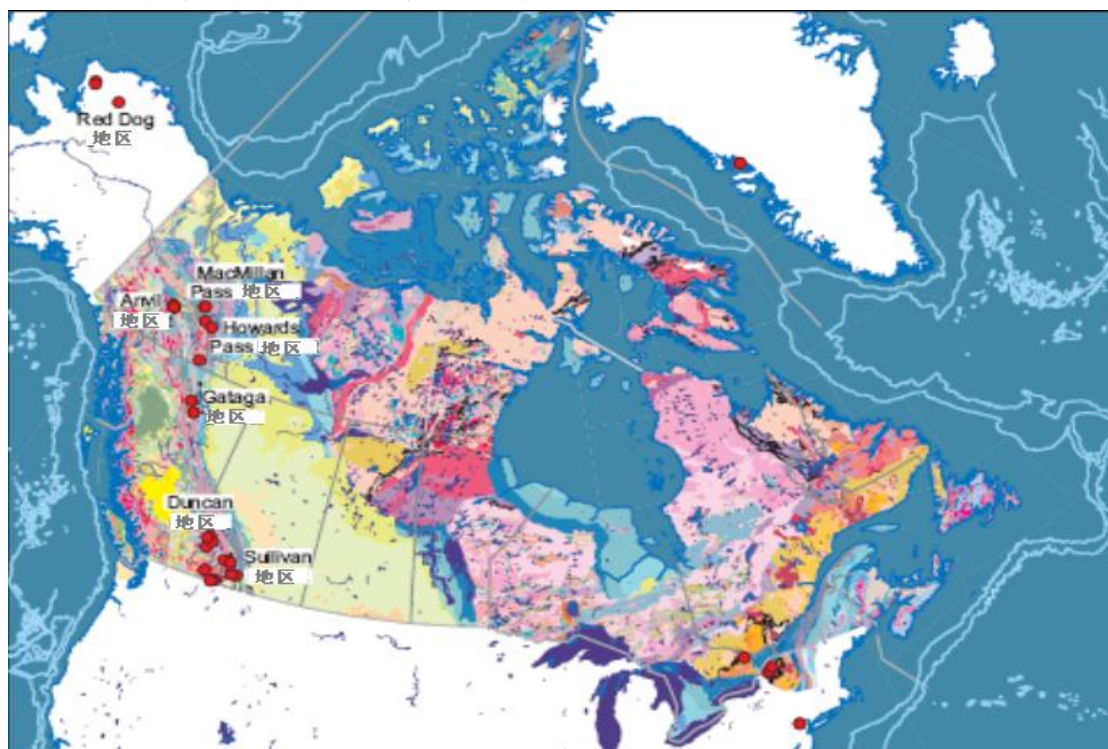


图2 加拿大1: 200万地质图中SEDEX型矿床的分布

### 矿床组合类型

沉积喷流矿床组合包括密西西比河谷型矿床和层状重晶石矿床。MVT型矿床产生在相当于区域浅水相的碳酸盐系列地块中，尤其是在SEDEX型矿床附近的细粒沉积物中。虽然对于SEDEX和MVT型矿床的成因联系仍有争论，但形成时期的重叠和组份的相似说明这两种矿床都是由同样的盆地中含金属流体形成的(据Goodfellow, 1987; Sangster, 1990)。仅有的最大不同在于，SEDEX型矿床是流体喷出在海底形成的，而MVT型矿床是绝大数硫化物沉淀在地表下形成的。这两种矿床类型中还原性硫很可能来源于细菌生成的还原性海水硫酸盐。与SEDEX和BHT型矿床相关的热液沉积物包括锰化物，含钙碳酸盐，含钙磷酸盐和含铁硅酸盐—氧化物—碳酸盐集合体。

表2 加拿大SEDEX型矿床的品位和吨位

矿床名称	省/地区	纬度	经度	年代	时间 (Ma)	矿床状态	地质资源 (最大范围)					
							Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Ag (g/t)	Au(g/t)	Mt
Howards Pass	Yukon	62.4500	-129.1833	早志留纪	435	贮藏		5.00	2.00	9.00		76.0000
Sullivan	British Columbia	49.7083	-116.0056	中元古代	1470	过去开采		5.86	6.08	67.38		161.9700
Faro	Yukon	62.3583	-133.3667	晚寒武纪	514	过去开采		5.70	3.40	36.00		57.6000
Cirque	British Columbia	57.5111	-125.1500	晚泥盆纪	367	开采		8.00	2.20	47.20		38.5000
Grum	Yukon	62.2694	-133.2222	晚寒武纪	514	过去开采		4.90	3.10	49.00		30.8000
Dy	Yukon	62.2333	-133.1417	晚寒武纪	514	贮藏	0.12	6.70	5.50	84.00	0.95	21.1000
Tom	Yukon	63.1694	-130.1389	晚泥盆纪	367	贮藏		7.00	4.61	49.10		15.7230
South Cirque	British Columbia	57.5111	-125.1500	晚泥盆纪	367	贮藏		6.90	1.40	32.00		15.5000
Jason	Yukon	63.1472	-130.2611	晚泥盆纪	367	贮藏		7.40	6.50	65.00		10.1000
Jersey	British Columbia	49.0986	-117.2208	早寒武纪	525	过去开采		3.49	1.65	3.08		7.6800
Vangorda	Yukon	62.2528	-133.1833	晚寒武纪	514	过去开采		4.90	3.80	54.00	0.79	7.5000
Mel	Yukon	60.3514	-127.4042	寒武纪	525	贮藏		7.10	2.05			6.7780
Big Ledge	British Columbia	49.5000	-118.1500	新元古代	700	贮藏		4.00				6.5000
H.B.	British Columbia	49.1467	-117.2000	早寒武纪	525	过去开采		4.10	3.30	4.80		6.4500
Reeves-MacDonald	British Columbia	49.0200	-117.3708	早寒武纪	525	过去开采		3.42	0.98	3.40		5.8000
Ruddock Creek	British Columbia	51.2667	-118.9833	晚元古代	650	贮藏		7.50	2.50			5.0000
Walton	Nova Scotia	45.2056	-64.0403	密西西比纪	340	过去开采	0.04	0.11	0.32	27.70		4.8990
Swim	Yukon	62.2125	-133.0267	晚寒武纪	514	贮藏		4.70	3.80	42.00		4.7500
New Calumet	Quebec	45.7003	-76.6775	中元古代	1300	过去开采		5.95	1.66	121.33	0.64	3.6450
Duncan	British Columbia	50.3700	-116.9500	早寒武纪	525	贮藏		3.10	3.30			2.7600
River Jordan	British Columbia	51.1300	-118.4100	晚元古代	650	贮藏		5.60	5.10	35.00		2.6000
Driftpile	British Columbia	58.0500	-125.9500	晚泥盆纪	367	贮藏		11.90	2.00			2.4000
Mineral King	British Columbia	50.3458	-116.4264	新元古代	370	过去开采		4.12	1.76	27.50		2.1000

矿床名称	省/地区	纬度	经度	年代	时间 (Ma)	矿床状态	地质资源 (最大范围)					
							Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Ag (g/t)	Au(g/t)	Mt
Cottonbelt	British Columbia	51.4500	-118.8200	元古代	1700	贮藏		2.00	6.00	50.00		1.0000
Ramsay	Saskatchewan	54.7381	-102.7514	古元古代	1900	贮藏	2.10	1.80		7.90	0.10	0.7390
Leitch	Quebec	46.12722	-75.96167	中元古代	1300	贮藏		8.00				0.0750
North Star	British Columbia	49.6814	-116.0250	中元古代	1470	过去开采		6.12	35.50	673.00		0.0610
Lafontaine	Quebec	46.11806	-75.96167	中元古代	1300	贮藏		12.03				0.0280
Stemwinder	British Columbia	49.6917	-116.0167	中元古代	1470	过去开采		15.60	3.70	76.30		0.0250
Kootenay King	British Columbia	49.7431	-115.6111	中元古代	1468	过去开采		15.60	5.35	66.50		0.0130

表3 加拿大SEDEX型矿床的品位与吨位及其产量

矿床名称	省/地区	纬度	经度	年代	时间 (Ma)	总产量					
						Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Ag (g/t)	Au(g/t)	Mt
Sullivan	British Columbia	49.7083	-116.0056	中元古代	1470		5.8	6.7			116
Faro	Yukon	62.3583	-133.3667	寒武纪	514		5.7	3.4	36		?
Vangorda	Yukon	62.2528	-133.1833	寒武纪	514		4.9	3.8	54	0.79	?
Grum	Yukon	62.2694	-133.2222	寒武纪	514		4.9	3.1	49		?
Jersey	British Columbia	49.0986	-117.2208	早寒武纪	525		3.49	1.65			7.68
H.B.	British Columbia	49.1467	-117.2000	早寒武纪	525		4.1	0.77			6.45
Reeves-MacDonald	British Columbia	49.0200	-117.3708	早寒武纪	525		3.42	0.98			5.8
Mineral King	British Columbia	50.3458	-116.4264	新元古代	370		4.12	1.76			2.1
Kootenay King	British Columbia	49.7431	-115.6111	中元古代	1468		15.6	5.36			0.01

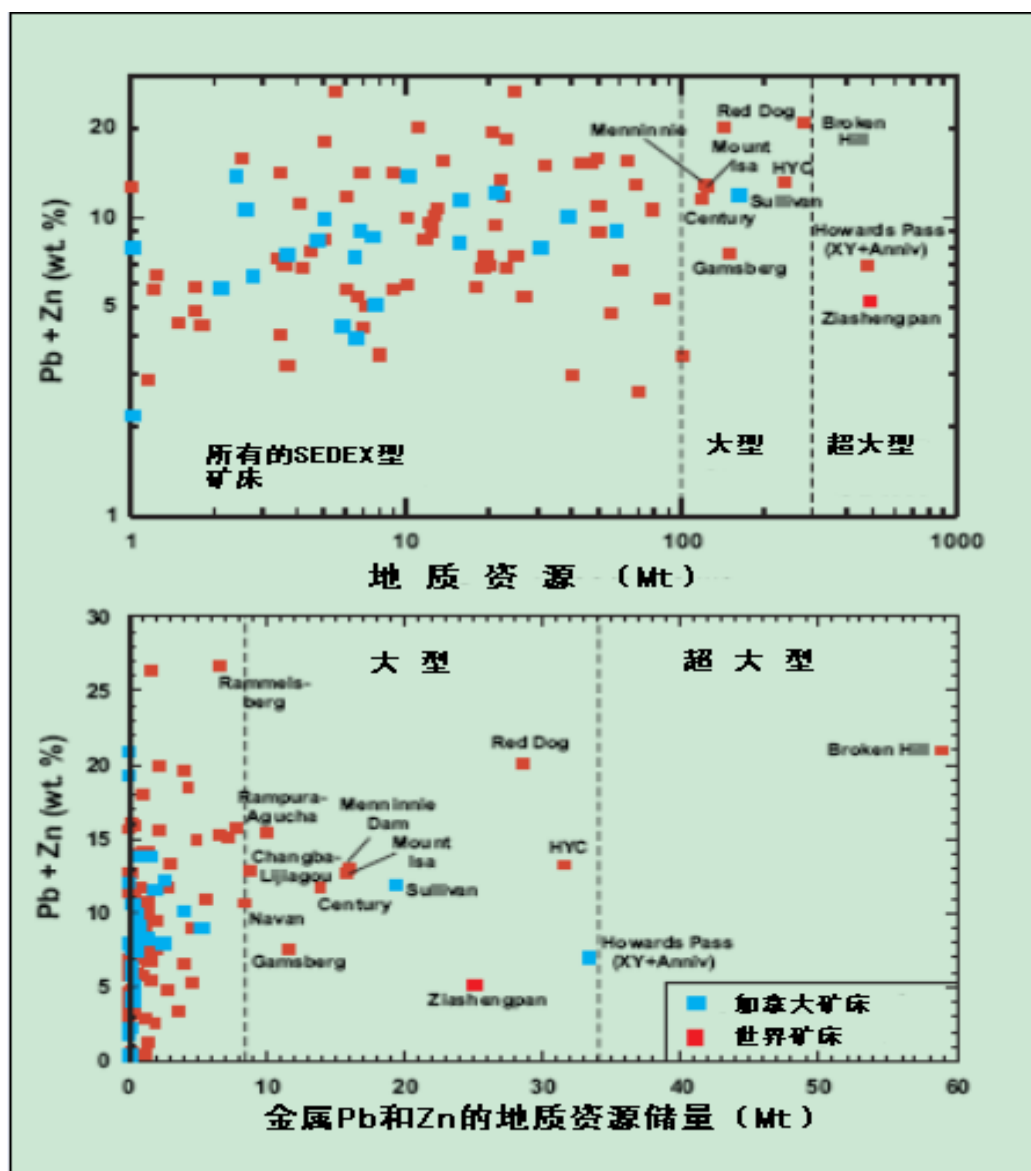


图3 世界范围内SEDEX型矿床（包括Irish和BHT型）的品位与吨位，以及矿体（A）和金属Pb+Zn的（B）地质资源总储量图

## 经济特征

### 概述

SEDEX 型矿床是 Zn 和 Pb 的重要来源,其所占含量分别超过世界储量的 50% 和 60%(Tikkanen, 1986)。然而,相对于储量,世界上来自 SEDEX 型矿床的 Zn 和 Pb 的主要产量所占比例是相当低的。(即,分别为 31%和 25%)

大多数 SEDEX 型矿床的主要矿化作用是发生在层状矿相中。该相的矿石在许多情况下是细粒和共生的,这导致在选矿时的低回收率。虽然细粒沉积硫化物经过变质作用或热液改造后重结晶产生高回收率的粗粒矿物在喷口络合物中是可以观察到的,但这种关于 SEDEX 型矿床的比率,平均来说,相对于 MVT、VMS、BHT 等其他类型矿床中 Zn 和 Pb 仍然是很低的。(Goodfellow 等, 1993)。

加拿大 SEDEX 型矿产的大部分产量均来自卑斯省 (B.C.) 南部的世界级的 Sullivan 型矿床和育空 (Yukon) 地域砧区 (Anvil District) 的 Faro 和 Grum 型矿床。

品位和吨位特点

根据品位与吨位图，世界范围内共有包括 Irish-type 和 Broken Hill-type 在内的 126 种 SEDEX 型矿床(图 1 和附录 1), 其中 45 个地质储量大于 2000 万吨(表 1)。在加拿大，有 31 个已知矿产储量的矿床(附录 2 )，其中有 6 个的储量超过 2000 万吨，包括储量为 1.61 亿吨的 Sullivan 矿床和估计储量为 4.76 亿吨的 Howards Pass 矿床(表 2 和图 2)。加拿大的这 31 个矿床，6 个是已经开采的，最大的 Sullivan 矿床已经开采了 1.16 亿吨，其中 Zn 占 5.8%, Pb 占 6.7% (表 3)，而 Howards Pass 矿床目前还没有开采。加拿大的大多数 S E D E X 型矿床位于 Howards Pass、MacMillan Pass、Anvil 地区，Selwyn 盆地，Gataga 地区，Kechika 海槽，Sullivan 地区，帕塞尔带(Belt-Purcell)以及英属哥伦比亚南部的 Duncan 地区(图 2 )。

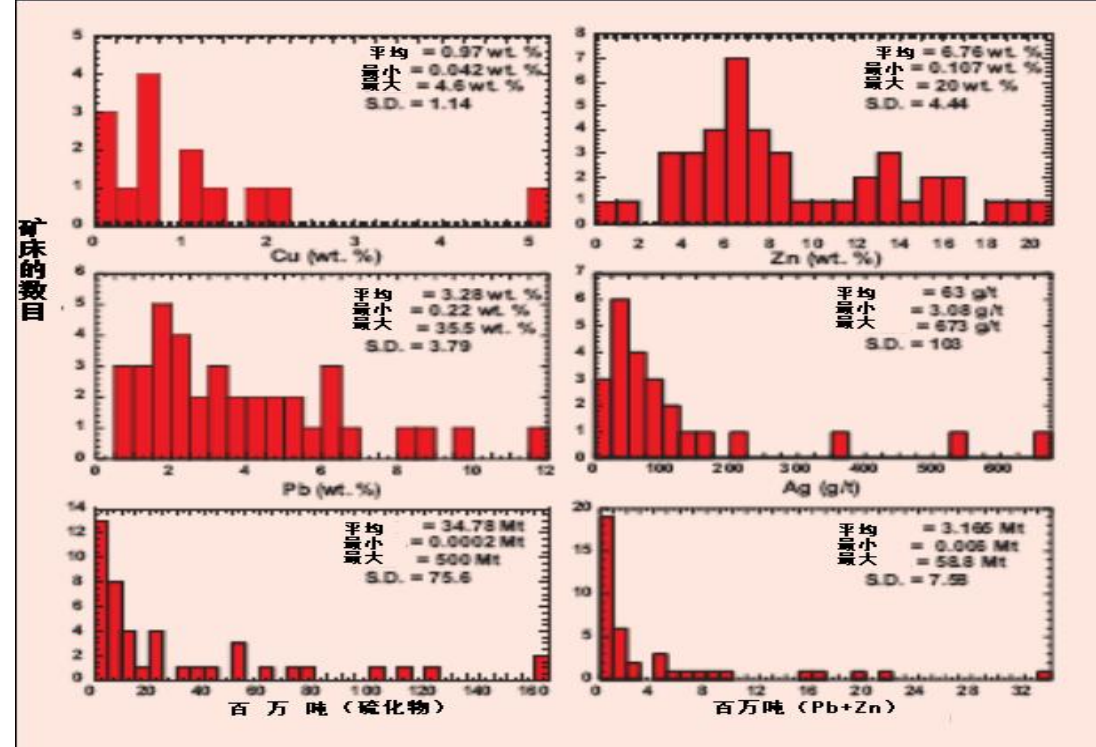


图4 全球SEDEX型矿床的金属品位和吨位柱状图

全球的SEDEX型矿床按经济产量的顺序划分就可发现主要的沉积区域是：Mt. Isa-McArthur盆地（7个矿床的Pb和Zn金属的总产量达1.12亿吨），Curnamona克拉通（craton）地块（一个矿床的Pb和Zn的总产量为7500万吨），Selwyn盆地（17个矿床的Pb和Zn的总产量达5500万吨），Brooks山脉（4个矿床的Pb和Zn的总产量为4000万吨），纳马夸兰（Namaqualand）（3个矿床的Pb和Zn的总产量为3000万吨），拉贾斯坦邦（Rajasthan，印度）（5个矿床的Pb和Zn的总产量为3000万吨），Belt-Purcell盆地（1个矿床的Pb和Zn的总产量为1900万吨），爱尔兰中部地区（Irish Midlands）（5个矿床的Pb和Zn的总产量为1500万吨），Rhenish盆地（2个矿床的Pb和Zn的总产量为1100万吨）（据：Sangster and Hillary, 2000）。

辛格 (Singer, 1995) 按矿床中所含的金属含量，把占前10个百分位的定义为大型矿床，把占顶端的一个百分位的定义位超级大矿床。根据这些标准，大型



矿床所赋存的Pb和Zn的金属含量将超过800万吨。如果把这些标准扩展到全球范围，那么大型和超大型的SEDEX型矿床将分别赋存超过1亿吨和3亿吨的矿体。从表1和图3我们可以很明显的得出一下结果：

- 按金属含量吨位和品位分，Broken-Hill型矿床是一个超大型矿床；按地质资源分，Howards Pass和Ziashengpan型矿床是超大型矿床，但由于其较低的金属品位，这两个矿床目前没有经济意义。
- 12个大型和超大型矿床其中有10个是形成在中元古代——古元古代。Red Dog和Howards Pass型矿床是仅有的2个在古生代形成的大型或超大型矿床。
- 9个大型和超大型的矿床是SEDEX型的，2个是BHT型，1个是爱尔兰型（Irish-type）。
- BHT型和Howards Pass型矿床在矿床规模和金属品位方面的特征最为突出。

金属品位变化很大，平均下来，Cu含量占0.97%，Pb占3.28%，Zn占6.76%，Ag含量为63 g/t。平均地质资源中，硫化物的含量为347.8万吨，Pb和Zn的金属含量为316.5万吨（图4）。加拿大大多数SEDEX型矿床的产出均来自Belt-Purcell盆地世界级的Sullivan矿床，英属哥伦比亚（British Columbia）东南部，育空（YuKon）地区Selwyn盆地的Faro, Grum 和Vangorda矿床以及英属哥伦比亚（British Columbia）南部的H.B. and Reeves-MacDonald矿床（表3）。

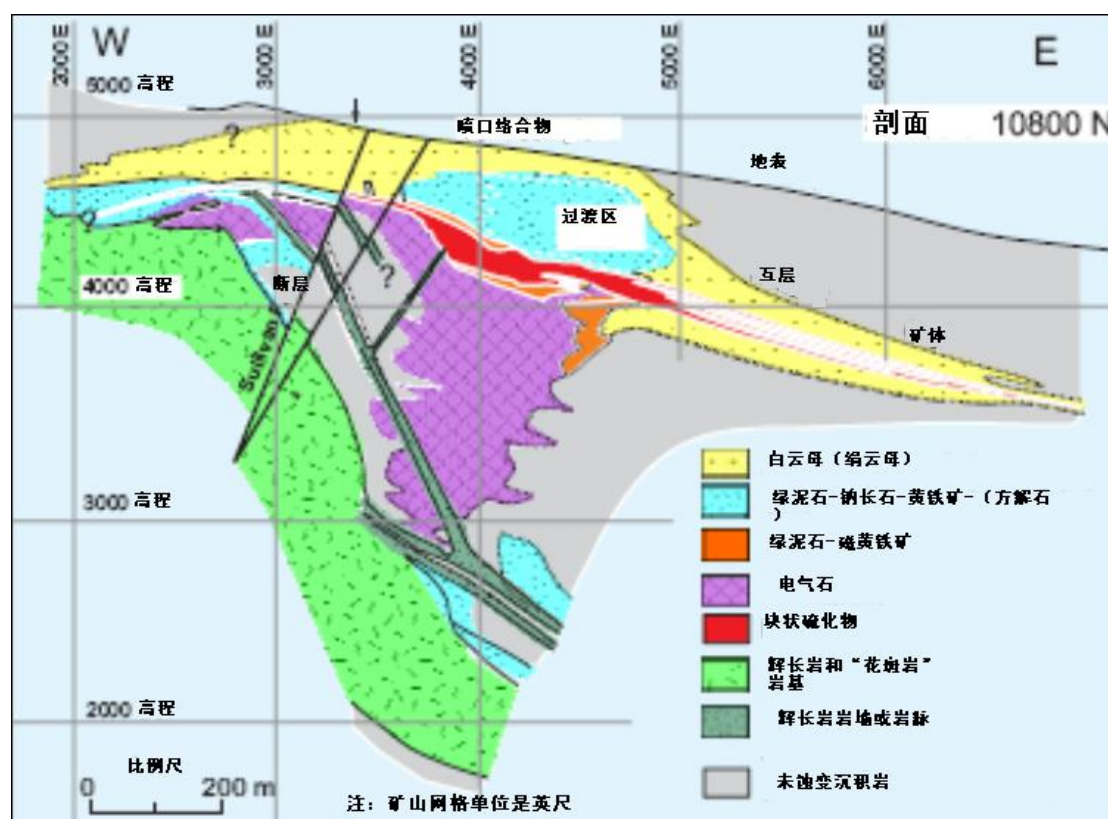


图5 Sullivan矿床的地质剖面（据Lydon等人，2000）

SEDEX型矿床的规模（按金属Pb和Zn的吨位）平均要比VMS型矿床的约高出一个数量级(Goodfellow et al., 1993)。这21个超大型矿床（地质储量大于100万吨），其中有11个是SEDEX型矿床，7个是BHT型，2个是VHMS型，1个是Besshi型矿床。大型的SEDEX型矿床相对于BHT型和VMS型矿床通常也含有较高的Pb-Zn-Cu储量。与VHMS型矿床相比，除了普遍的大规模和高金属品位外，SEDEX

型一般还具有相对较低的铁的硫化物含量，这使它更具有环境角度的吸引力 (Goodfellow, 2004)。

### SEDEX型矿床的地质属性

#### 矿床形态

大部分矿石包含在层状硫化物矿体中，矿体通常有较高的长宽比，即矿床横向宽度和它最大地层厚度的比率。由于大多数SEDEX型矿床的长宽比值在20以上，所以厚度在几十米长度在1千米以上的片状或板状透镜状硫化物矿层代表其最常见的形态 (Large, 1983)。卑斯省 (B. C.) 南部的Sullivan型矿床和育空 (Yukon) 地域MacMillan Pass地区的Tom和Jason矿床呈楔状并有相当高的长宽比。另外，

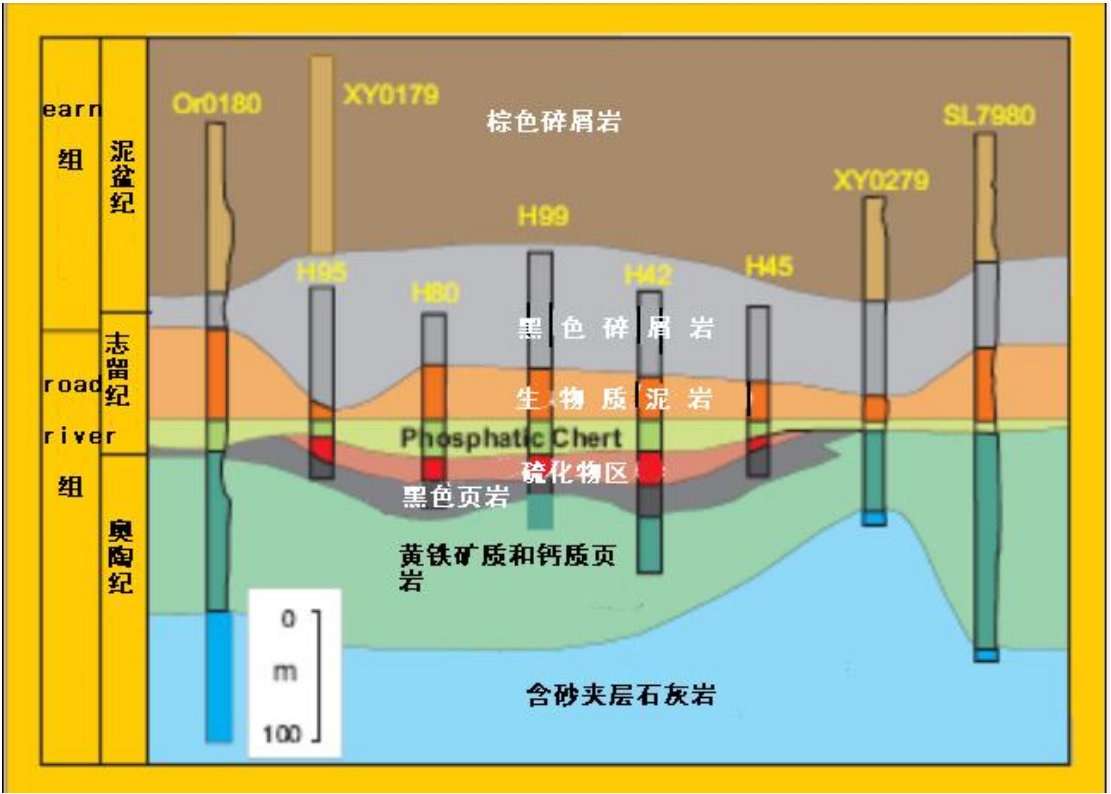


图6 Howards Pass (XY) 矿床的地质剖面 (据Goodfellow, 2004)

Howards Pass地区的Howards Pass矿床和Anniv矿床 (图6) 呈碟状，其锥度横向距离逐渐扩展到几公里。不同于喷口近端的Tom和Jason矿床 (例如，图7a)，Howards Pass矿床 (XY, Anniv 和 OP) 并没有与海底热液喷口有空间上的联系 (例如，图7b)。喷口远端矿床的几何形态是由沉积盆地的形态控制的，在这些盆地中金属热液流体形成类似于亚特兰蒂斯 (Atlantis) II和红海中Discovery deeps的卤水池 (Zierenberg, 1990)。

#### 矿床构造

SEDEX型矿床的内部结构是由其附近的海底硫化物流体排放到喷口所控制的。喷口近端的矿床通常是由有浮力的热液流体形成，而喷口末端的矿床则是由比储集在海底洼地中的海水和卤水密度更大的流体形成，这些海水和卤水可能是远离喷口点的。因此，喷口近端的矿床由于热液流体与覆盖在喷口上的层状硫化物相互反映，具有良好的区带特征 (例如，图7b)。

喷口近端矿床拥有四个明显不同的相为特征：(1) 层状硫化物 (2) 喷口络

合物(3) 细脉硫化物带(4) 远端热液沉积物。流体上涌中心附近以细脉带为特征，层状硫化物以充填，有脉纹为特征，并被高温矿物组合所交代，生成络合物(Goodfellow等, 1993)。远端热液沉积物很可能表示的是地幔柱沉降，其被底流或者由硫化物丘重新改造过程中产生的硫化物碎片所驱散。有良好区带特征的喷口络合物的矿床实例有：Sullivan, Tom, Jason 和Rammelsberg矿床。

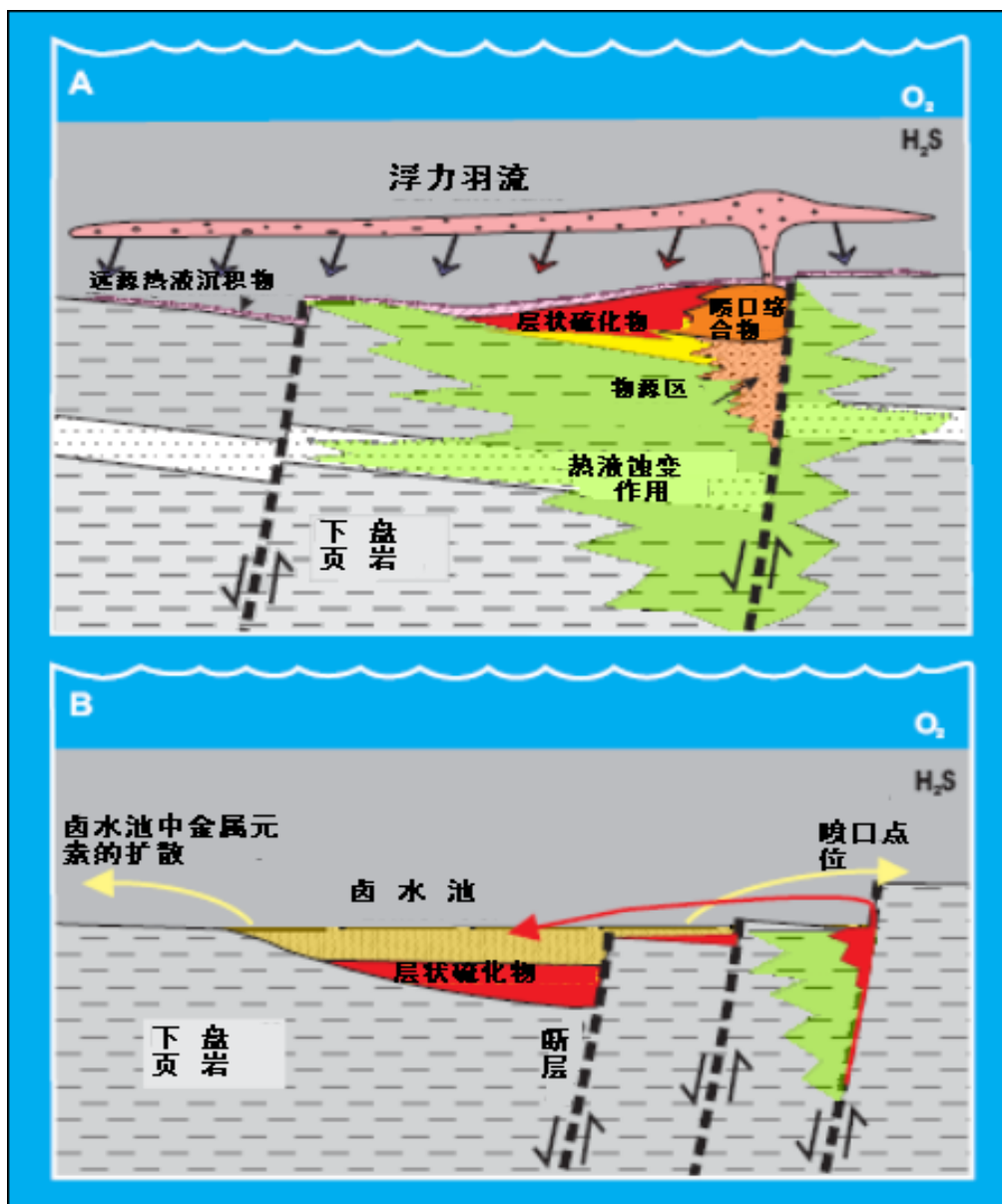


图7 SEDEX型矿床的形成模式 A: 由浮力热液羽流形成的近喷口矿床(例如, Sullivan B. C. 矿床; Tom和Jason矿床; 德国的Rammelsberg矿床) B: 由底部上涌卤水形成的远喷口矿床(例如, Yukon地区的Howards Pass和Anvil矿床; 澳大利亚的HYC矿床)

然而，喷口远端的矿床一般具有较差的区带特征，良好的层状特征，遵循盆地的形态(如图7b)。没有证据表明区带划分过程中伴随着充填作用，成纹作用，以及喷口近端矿床所拥有的高温矿物组合置换层状硫化物的置换作用。

### 结构和矿物

层状相的喷口远端和近端矿床的成分都是硫化物以及其他的热液产物，像碳



酸盐，燧石，重晶石，磷灰石，无水碎屑以及化学和生物沉积岩。尽管在一些矿床中，如Sullivan 和Mt. Isa, 磁黄铁矿占主导地位，但大多数矿床中占主要地位的硫化物矿物是黄铁矿（如Howards Pass矿床，图8a）。虽然黄铜矿在一些矿床中是一种重要的经济矿物，但整体来说主要的经济矿物是闪锌矿和方铅矿（如Rammelsberg矿床，据Hannak，1981）。铁的硫化物与贱金属硫化物的比值从不

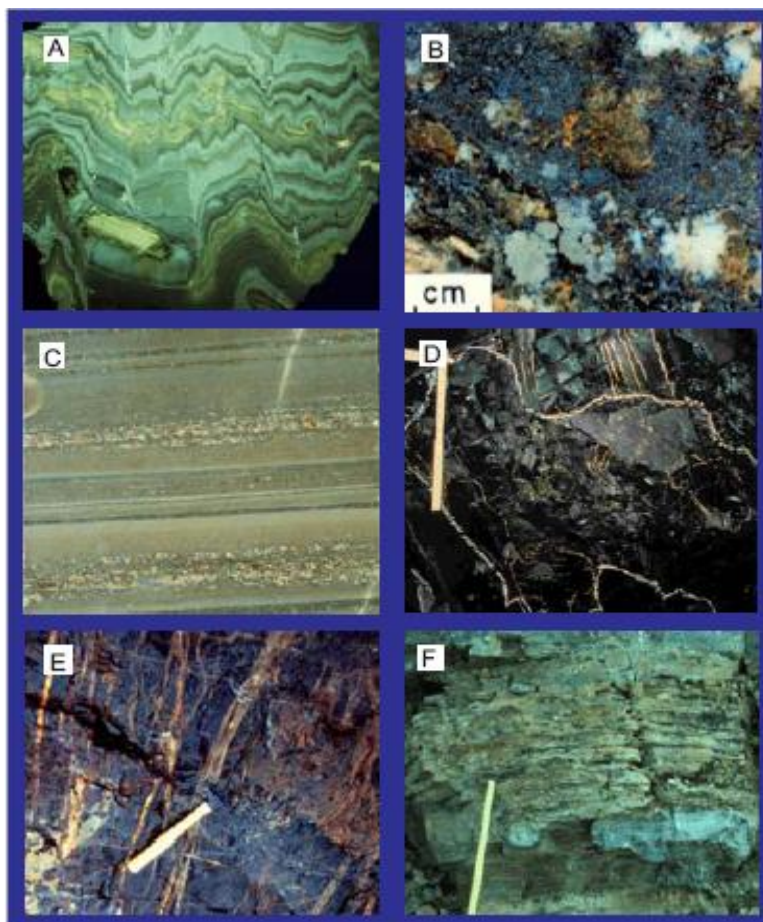


图8 SEDEX型和重晶石矿床照片 A. 层状相：闪锌矿、方铅矿层中夹有黄铁矿、热液碳酸盐岩、含碳燧石层，Howards Pass (XY) 矿床，Yukon和NWT地区；B. 远源热液沉积物：含分散闪锌矿的磁黄铁矿和黄铁矿矿层夹有细粒浊流沉积岩，Concentrator Hill和Sullivan矿床，卑斯（B.C.）省；C. 喷口络合物：黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和含铁碳酸盐岩交代形成的层状硫化物相，Tom矿床，Yukon地区Selwyn盆地；D. 喷口络合物：电气石化角砾岩中充填着磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿，Sullivan矿床，卑斯（B.C.）省；E. 硫化物细脉带：黑色硅酸化页岩被一组闪锌矿网脉所切割，Red Dog矿床，阿拉斯加；F. 成层良好的低品位重晶石矿床，Gataga地区，卑斯省（B.C.）东南部

足1: 1（如Red Dog矿床，据Moore等人，1986）到超过5: 1（如Sullivan矿床，据Hamilton等人，1982）。无硫化物热液组分的相对比例同样也是可变的。目前被发现的大量的重晶石（即占热水产物的25%以上），有25%产自元古宙的SEDEX型矿床，75%产自显生宙（据Goodfellow等人，1993）。二氧化硅，通常以燧石的形式普遍存在于层状矿体中，部分也是由热水溶液产生的。

层状矿体的外缘，被称之为远端相，通常是由无经济价值的层状热水产物组成。由于随着距热水中心距离变远，贱金属硫化物的相对比例降低了（如Sullivan

地区，图8c）。**远端相**包含有薄片状的黄铁矿，磁黄铁矿，锰，铁，钙质碳酸盐，铁氧化物，重晶石以及磷酸盐。层状矿体相和远端沉积相之间的联系在于在大多数情况下矿床等级和经济价值是界定了的。

对照层状矿体相出露的正常层理，**喷口络合物**的种类是多种多样的，一般是由大量的区带，置换区，不规则纹理组成，此外或许还有硫化物，碳酸盐，硅酸盐（主要是石英）的碎屑。（如图8b, Tom 型喷口集合体）。矿物组合主要含有黄铁矿，磁黄铁矿，方铅矿，闪锌矿，含铁碳酸盐，白云石，石英，电气石等矿物，以及少量白云母，绿泥石，黄铜矿，毒砂，硫盐矿物。矿床中的喷口络合物一直有详细的记录（例如，汤姆，詹森，沙利文），层状的喷口络合物和附近的热液沉积相之间是一种不协调的置换关系。喷口络合物中最主要的作用过程是上涌热液流体与热水溶液及周围沉积物之间的作用过程，它导致高温喷口矿物组合置换了温度较低的沉积矿物（Goodfellow等人，1993，以及一些参考资料）。

**喷口络合物**的基本物源区由一不整合区所构成，该不整合区由硫化物，碳酸盐，石英脉以及横切沉积序列地盘的浸染作用和交代作用所形成（如图8d, Sullivan矿床；图8e, Red Dog 矿床）。多数矿床的物源区看起来是来源于同沉积断层带，断层崖角砾岩，泥石流，和与SEDEX型矿床相联系的突变相，这表明断层在硫化物形成之前，之中，或是之后都是活跃的（如Jason和HYC矿床，Large等人，1998；Turner，1990）。

## 围岩

大多数的SEDEX型矿床是由海洋盆地，**还原相**，细粒沉积岩所包围，并且**细粒沉积岩主要由碳质燧石和页岩组成**。这些沉积岩一般代表的是远海和半远海沉积。一些矿床（如，Sullivan矿床），周围的低能量沉积物与全流域的浊流粉砂岩，砂岩以及在扩张构造运动中抬升地块脱落下来的部分粗粒碎屑沉积物成互层产出。对于爱尔兰型（Irish-Type）矿床，围岩以石灰岩和白云岩为主。对于布罗肯希尔型（BHT）矿床，围岩以双峰式的火山碎屑沉积序列为主，该序列通常是由变质相到角闪岩-麻粒岩相，例如位于澳大利亚布罗肯希尔（Broken-Hill）地区的矿床。

## SEDEX型矿床的化学属性

### 矿石成分

SEDEX型矿床中主要有经济价值的矿石组分是Zn，Pb和Ag，他们主要赋存在**层状矿相的闪锌矿和方铅矿中**。在靠近喷口集合体的**分带区**和横向层状矿相的过渡带，Zn和Pb的品级通常是最高的（据汤姆和沙利文，古德费勒和罗德，1990；里顿等人，2000）。基本金属元素和成矿伴生元素（如Hg，As，Sb）含量的增长，是由于来自**喷口络合物**的这些元素的淋滤和他们后来再次沉淀在喷口络合物附近的层状矿相中造成的。一些矿床，例如德国的拉莫斯贝格（Rammelsberg）和澳大利亚的伊萨山（Mount Isa），铜是一种重要的经济资源，并集中在已经解释为喷出相的地方（据Goodfellow等人，1993）。包括Sullivan矿床中的Sn（据Hauser 和 Hutchinson），Anvil矿床（据Jennings 和Jilson, 1986）和Sullivan矿床（据Conly等人，2000）中的Au等其它成矿元素也是重要的经济资源，即使SEDEX型矿床中的Au含量通常比较低（据Emsbo，2000）。

除成矿元素之外，SEDEX型矿床还包含有大量的成矿伴生元素，一般为Fe，Mn，P，Ba，Ca，Mg，Cd，As，Sb，Se，Sn，Ga，Bi，Co，Ni，Tl（据Goodfellow，1984；Goodfellow等人，1983；Goodfellow和Rhodes，1990）。



## 构造、矿物学和化学分带

许多SEDEX型矿床的一个最典型特征是处于热液流体中心的矿物和元素的排泄所造成的热液构造的辐射状分带。远离流体排放中心的横向分带现象主要是由喷口络合物的分带控制的，并通常伴随着层状矿体厚度的减少以及个别热液矿物数量或厚度的减少（据Goodfellow等人，2003）。

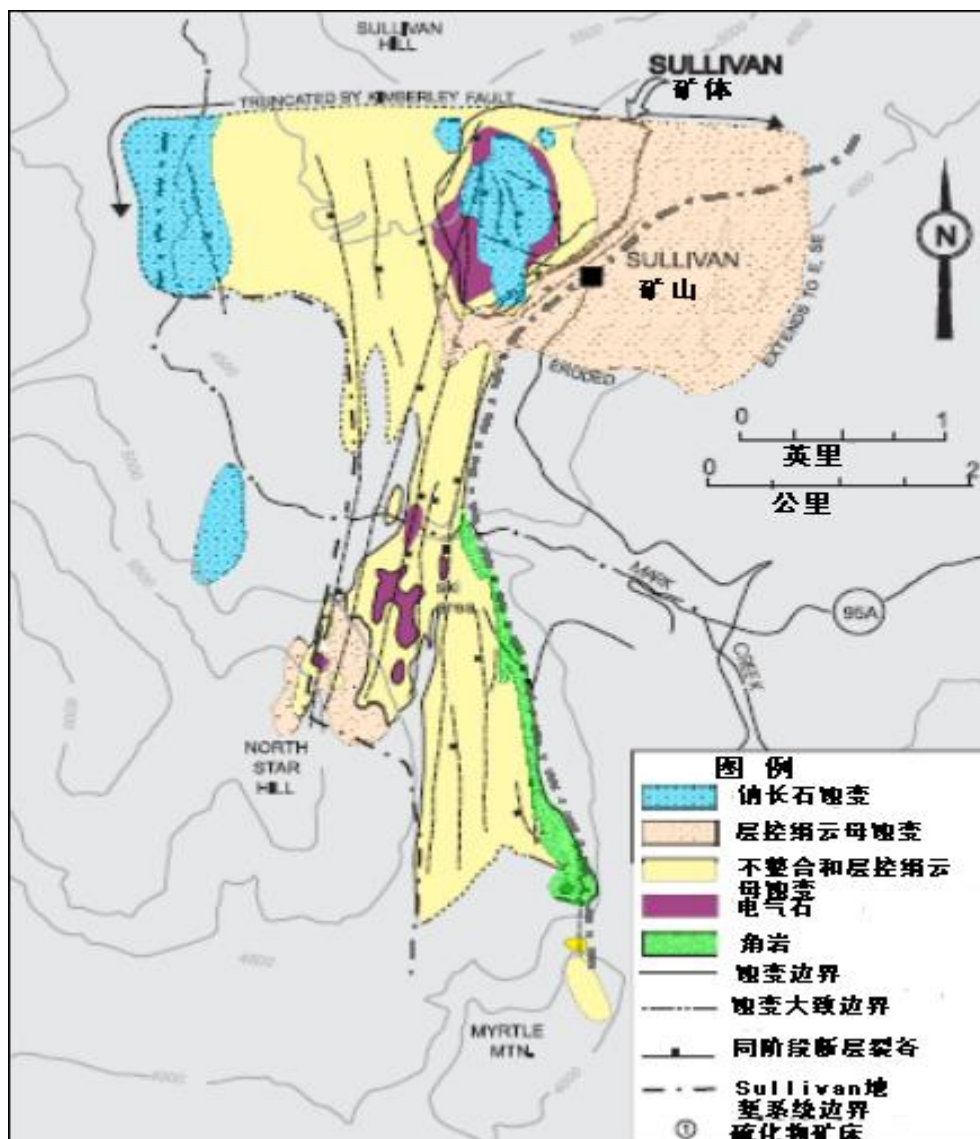


图9 Sullivan地堑系统中主要蚀变相的分布图（据Turner等人，2000）

Zn: Pb比值随远离喷口络合物而增大是SEDEX型矿床一个很明显并始终如一的特征，而且已被Tom型（据Goodfellow和Rhodes，1990），Jason型（据Turner，1990），Cirque型（据Jefferson等人，1983），Sullivan型（据Hamilton等人，1982），和Red Dog型（据Moore等人，1986）矿床所证实。其他化学分带型，包括远离喷口络合物Pb/Ag, Cu/Zn+Pb, Fe/Zn, Ba/Zn, SiO<sub>2</sub>/Zn比值的增大也是SEDEX型矿床的特征（据Sullivan, Tom, 和Goodfellow, 2004; Hamilton等人，1982）。

Tom型矿床是具有高度分带特征矿的一个很好的例子。覆盖在流体排泄通道上的层状相矿石沉积物是含有角砾岩，脉纹，并且容易被硅石，低铁碳酸盐和硫化物所交代。地表下的交代作用过程产生了一个明显的从喷口络合物核心到远端

边缘的构造、矿物学和化学分带（据Goodfellow和Rhodes，1990）。在喷口络合物的边缘部分，细粒低温阶段的层状矿相（即，油脂光泽、贫铁的闪锌矿，方铅矿，草莓状黄铁矿，重晶石，燧石）被粗粒高温的矿物组合（即，粗晶质、富铁黑色闪锌矿，和富Hg粉红色闪锌矿，方铅矿，菱铁矿，石英，磁黄铁矿，黄铁矿，毒砂，黝铜矿）所置换。这些矿物学上的变化被喷口络合物里面和周围的Zn，Pb，Cu，Hg，Cd，As，Sb，Ba，Fe，Mn，Ca，CO<sub>2</sub>所形成的有规律的分带所反映，另外，朝热液流体排泄中心方向，Pb/Zn+Pb比值增大也反应了这一变化（据Goodfellow和Rhodes，1990）。在喷口络合物的核心附近，沉积的重晶石已完全被低铁的碳酸盐矿物所置换。

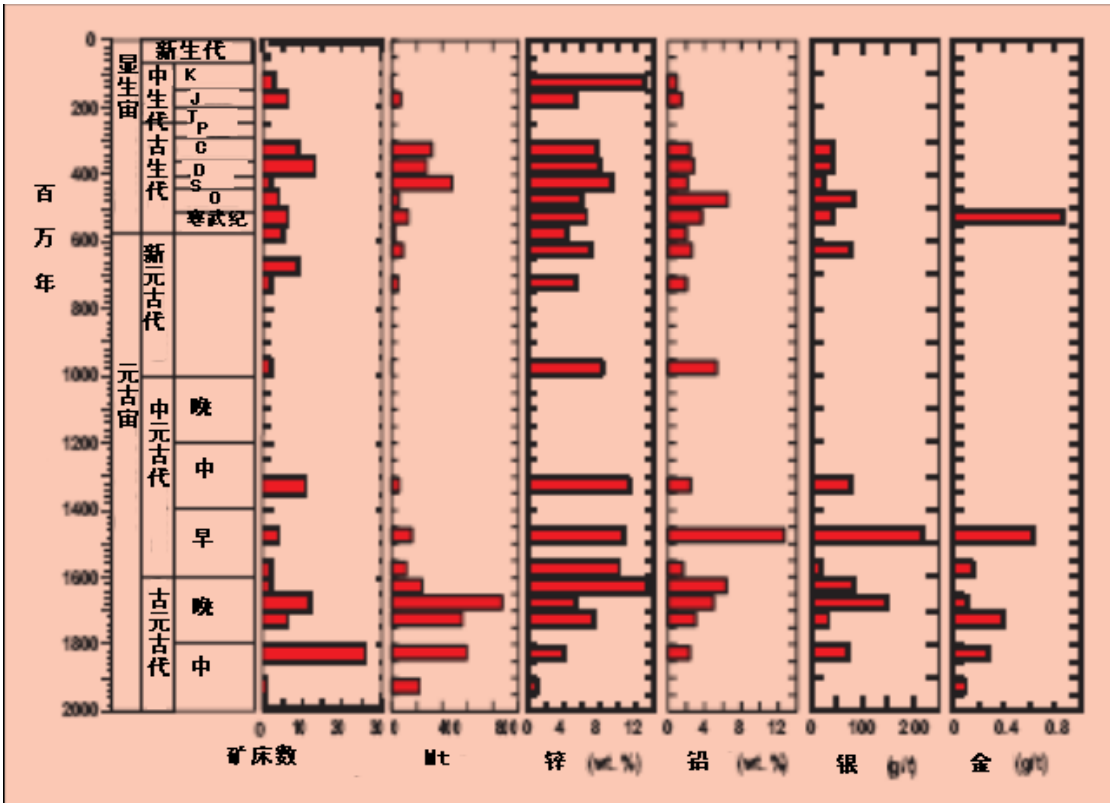


图10 世界范围内SEDEX型矿床金属品位和吨位随年代变化图

### 构造、矿物学和化学上的蚀变

虽然许多SEDEX型矿床与一个基础的热液物源区紧密联系，但是热液蚀变并没有被具体的证实并反应在大多数矿床上。SEDEX型矿床已经被记载的蚀变矿物包括有石英，白云石，绿泥石，含铁白云石，菱铁矿，电气石以及硫化物。蚀变区的硫化物含量通常很低，但是黄铁矿，磁黄铁矿，闪锌矿，方铅矿，黄铜矿，黝铜矿，毒砂在某些情况下含量是比较高的。

与SEDEX型矿床有关的热液蚀变一般是广泛分布的，可以延伸几百米到矿石沉积层序之前和之后，并在矿床横向上延伸到几公里。例如，Sullivan矿床的绢云母蚀变在矿体下面延伸超过200米，顺Kimberly断层东西走向延伸了约4公里，并沿沙利文（Sullivan）-北星（North Star）通道延伸了大约6公里（图9，据Turner等人，2000）。兰致（Large）等人（2000年）已经绘制了Pb，Zn，和Tl的大范围分布图，其从麦克阿瑟河（McArthur River）矿床沿着巴尼河形成（Barney Creek Formation）的硫化铁质的黑色页岩相向西横向延伸了至少15

公里，并在矿化区向上向下各延伸了几百米。

断层上盘沉积层序的热液蚀变没有被多数SEDEX型矿床所证实。虽然热液沉积物的后期成矿很清楚的表明在SEDEX型矿床形成以后热液流体仍然在大量喷出，但热液蚀变明显的缺失说明在多数情况下，这是如此细微而难以观测。证明后期热液蚀变的最好例子是叠加在Sullivan矿床上的浊流沉积岩的钠长石-绿泥石蚀变

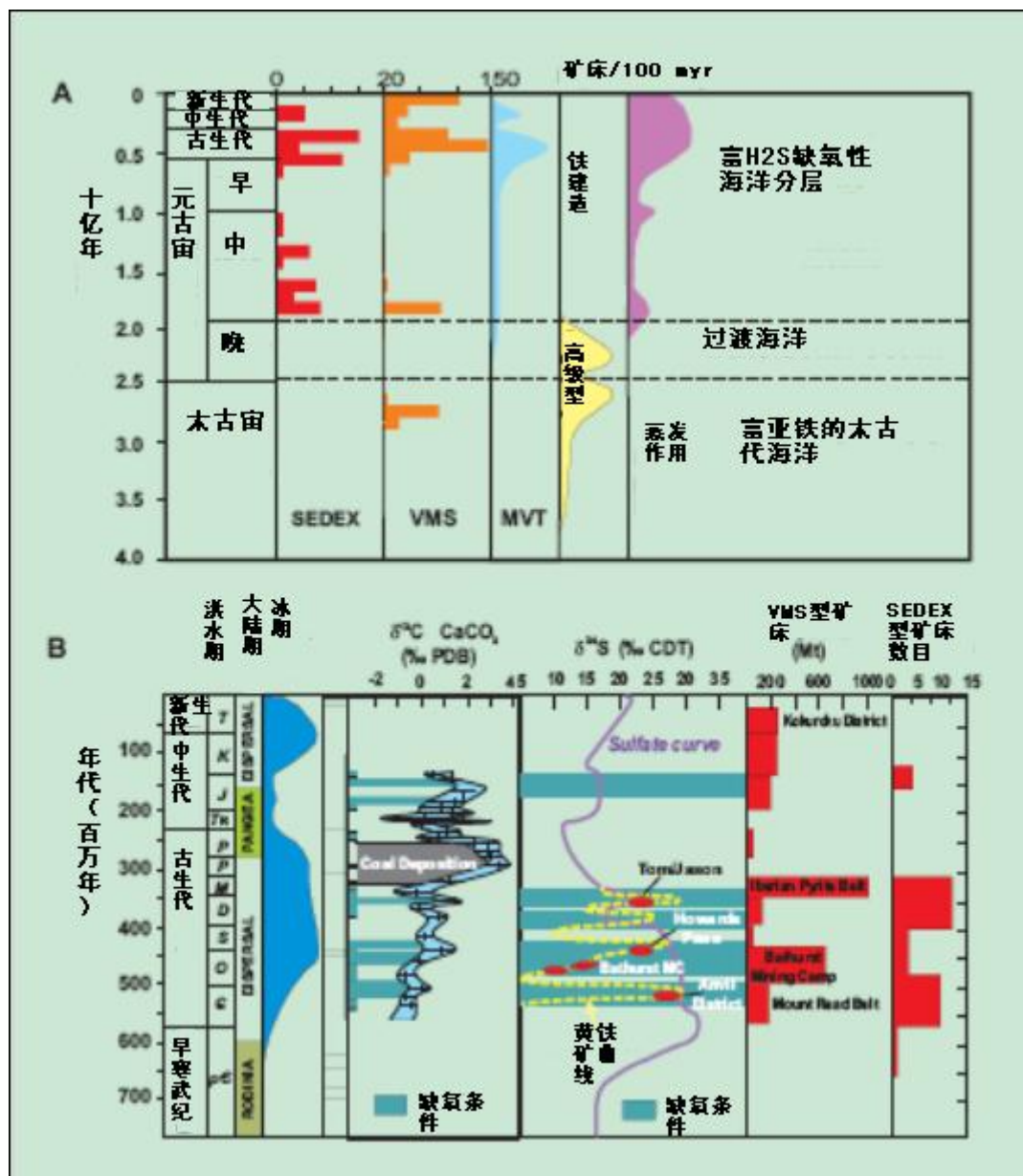


图11 A. SEDEX、MVT、VMS型矿床的时代分布，铁建造期、蒸发期和富H<sub>2</sub>S缺氧期(据Goodfellow, 2004) B. 元古宙晚期和显生宙构造(大陆增长与消失)(据Fischer, 1984)与冰川(据Baker, 1997)事件，大陆水灾(据Vail等人, 1997)，蒸发作用的硫同位素曲线(据Claypool等人, 1980)，碳酸盐岩(据Arthur和Sageman, 1994)和黄铁矿(据Goodfellow, 1997)。也展示了全球(据Arthur和Sageman, 1994)和Selwyn盆地(据Goodfellow, 1997)缺氧期，与火山岩相关的块状硫化物(据Mosier等人, 1983)和SEDEX型矿床(据Goodfellow等人, 1993)的时空分布。BMC = Bathurst Mining Camp.



(据Hamilton等人, 1982; Turner等人, 2000)。喷口络合物和物源区的后期钠长石化作用, 有力证明了后期成矿热液流体与成矿流体利用的是一样的通道。

与VMS型矿床相比, 基本的SEDEX型矿床的物源通道和相关的蚀变作用是相对比较细微的, 这也导致了与玻璃质火山岩相比, 硫化物含量较低, 活性的硅质碎屑沉积物也较少, 并且由于低渗透性的半远洋软泥包围着多数矿床, 这也限制了海水的补给。此外, 热液组合的诊断仍然是很模糊的, 例如, 后期变质作用中的黏土矿物是很难观察到的。物源区热液蚀变和矿化作用的性质与范围在很大程度上取决于下盘沉积物的矿物学性质和物理性质, 热液流体的温度和化学组分, 以及流体静压力或水深。

### 远端和后期成矿热液沉积物

形成SEDEX型矿床的热液系统通常是长期存在的并高度集中在离散的喷口点。而且, 热液活存在形成硫化物以后一般仍在继续, 形成后期的热液成矿沉积物以及产生延伸数百米到地层上盘序列的蚀变作用。大多数的SEDEX型矿床, 层状硫化物和基本沉积岩质之间的基础联系是很明显的, 然而, 顶部的硫化物区品级是一个叠覆序列, 由低温热液沉积物或蚀变矿物组成。

热液产物延伸几百米到后期成矿序列, 并提供了一个重要的矿产勘查目标:

- (1) 薄片状, 分散的黄铁矿和重晶石(如Tom, Jason, Rammelsberg, Meggen矿床);
- (2) 锰铁碳酸盐(如, Meggen, Silivermines, McArthur River (HYC) 矿床);
- (3) 磷酸盐质和黄铁矿质的燧石(如, Horwards, Anniv矿床);
- (4) 富金属薄片状黄铁矿(如, HYC, Mt. Isa, Tom, Jason矿床);
- (5) 钠长石-绿泥石-黄铁矿蚀变(如, Sullivan型矿床)。

许多SEDEX型矿床也被热液沉积物所包围, 这些沉积物从硫化物区延伸到几公里远。在含有重晶石的矿床(如Meggen和Tom矿床), 这些远端沉积物通常由成互层的重晶石, 燧石, 碳酸盐和围岩组成。在其他矿床, 这种相则由铁的硫化物或者燧石与围岩所成的互层所表示(如Sullivan矿床, 据Hamilton等人, 1982)。育空(Yukon)地区的Horwards Pass矿床, 矿带远端边缘由薄片状的磷酸盐质燧石和黄铁矿质页岩组成(据Goodfellow, 2004)。已经认识到一个富锰的圈带环绕着几个SEDEX型矿床, 包括Tom型(据Large, 1981)和Meggen型矿床(据Gwosdz和 Krebs, 1977)。大范围的岩石地球化学圈也被Lady Loretta 矿床(据Large和 McGoldrick, 1998)以及McArthur River (HYC) 矿床(据Large 等人, 2000)证实存在。

## 大陆和全球规模地质状况

### 构造环境

SEDEX型, Irish型和BHT型矿床产生在克拉通地块之内以及巨大的克拉通沉积盆地之中(据Large, 1980)。构造环境是可变的, 包括由地幔柱产生的克拉通地块内部裂缝(如, Belt-Purcell盆地, 据Anderson和 Goodfellow, 2000), 裂谷边缘的活化(如Howards Pass矿床, 据 Goodfellow等人, 1986), 以及远声场后弧裂谷(如MacMillan, Pass-Gataga, Mount, Isa-McArthur 地区; 据Betts等人, 2003; Nelson 等人, 2002)。虽然对于BHT型矿床还有相当多的争论, 但我们的解释是: 在一沉积盆地序列中, BH (Broken Hill) 矿床与同时代的双峰火成岩组合, 说明这种矿床类型类似于在沉积后弧大陆裂谷中产生的较少变形和变质的火山-沉积物-块状硫化物 (volcanic-sediment-hosted

massive sulphide, (VSHMS)) 矿床类型 (例如: 巴瑟斯特采矿营地, 芬雷森湖, 伊比利亚黄铁矿带, 湖库若库区 (Bathurst Mining Camp, Finlayson Lake, Iberian Pyrite Belt, Hokuroku districts))。

所有在构造运动期间形成的矿床, 通常由断层活化, 盆地内部碎屑沉积表现出来, 在许多情况下, 岩浆作用由火山作用或岩床侵位作用表现出来。许多矿床形成在还原性的海洋盆地中, 这些盆地形成在盆地形成历史的凹陷阶段, 毗邻深穿透, 一般为走向滑动断层。这些构造削减了区域碳酸盐岩或者页岩封盖, 并开发利用储存在同裂谷阶段高渗透性碎屑沉积岩中的含金属热液流体 (据Betts等人, 2003; Goodfellow等人, 1993; Large, 1980; Lydon, 1995; Nelson等人, 2002)。

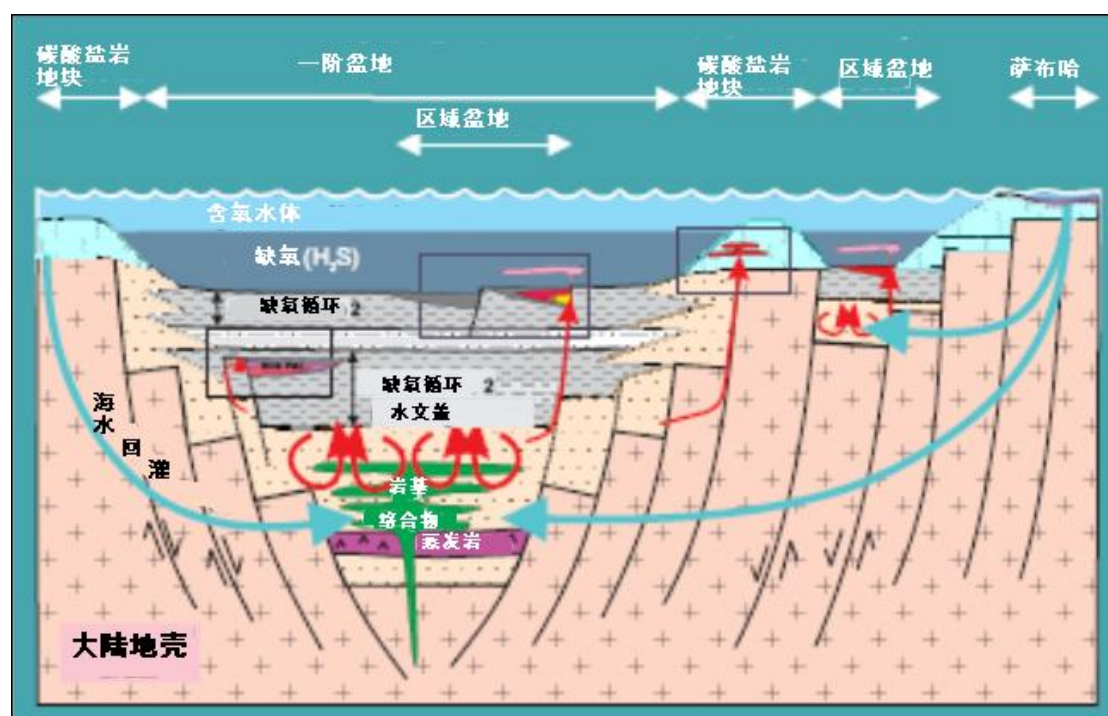


图12 SEDEX型矿床的沉积盆地构造

### 长期变化和硫循环

SEDEX型矿床, Irish矿床和BHT型矿床形成在从古元古代 (大约20亿年前) 到白垩纪的几个离散的时代中 (图10)。每5千万年SEDEX型矿床数量和规模最大的分别在元古代和中元古代。由于巨大规模的Sullivan矿床影响, 铅和锌含量在中元古代早期最高, 虽然金元素的数据库很有限, 但其品级在古元古代和中元古代早期的矿床中显得比较高 (见表1和附录1)。

大多数SEDEX型矿床与地球历史中海水由于较低缺氧和富 $H_2S$ 水体而分层的周期相一致 (图11a)。例如, 在古生代的赛尔温 (Selwyn) 盆地, 在沉积黄铁矿, 缺氧的薄片状碳酸盐页岩和燧石中 $\delta^{34}S$ 长期增长的趋势与晚寒武纪, 早志留纪, 晚泥盆纪的三个形成SEDEX型矿床的主要事件之间有紧密联系 (图11b)。在赛尔温 (Selwyn) 盆地, 由于底部海水减少而产生的大洋分层期与古生代的全球性黑色页岩沉积周期相一致 (据Arthur和Sageman, 1994), 这表明赛尔温 (Selwyn) 盆地缺氧事件反应了全球的地质过程。黄铁矿中 $\delta^{34}S$ 值的长期变化是由于在完全或局部缺氧条件下硫同位素的瑞利分馏导致的, 并在硫化物沉积导致海洋硫酸盐



中 $\delta^{34}\text{S}$ 值增长的同时，伴随着沉积物中 $\delta^{32}\text{S}$ 值的增加。

从以含铁为主的太古宙的大洋到还原性的以硫为主分了层的元古宙和显生宙大洋的过渡，遵从氧化物和铁元素在含铁建造中沉淀的优先级。这种大洋化学成分发生重大变化的同时伴随着硫酸盐的形成，这是硫酸盐还原细菌和富 $\text{H}_2\text{S}$ 缺氧水体的形成所必不可少的。太古代和古元古代早期SEDEX型矿床的缺失，也许是由于在富活性 $\text{H}_2\text{S}$ 的缺氧海洋中高含量的还原Fe的限制作用所控制的。在这些条件下，金属减少，贫硫的盐溶液流体喷出到水体中并很可能消散，这是由于还原性硫的缺失而使它们沉淀所导致的（据Goodfellow等人，1993）。

### 盆地构造

有利于SEDEX型矿床形成的理想盆地构造是：一个大陆裂谷拥有至少2-5公里的粗粒具渗透性的碎屑和相关的火山岩或火山碎屑岩，形成裂谷阶段上覆盆地页

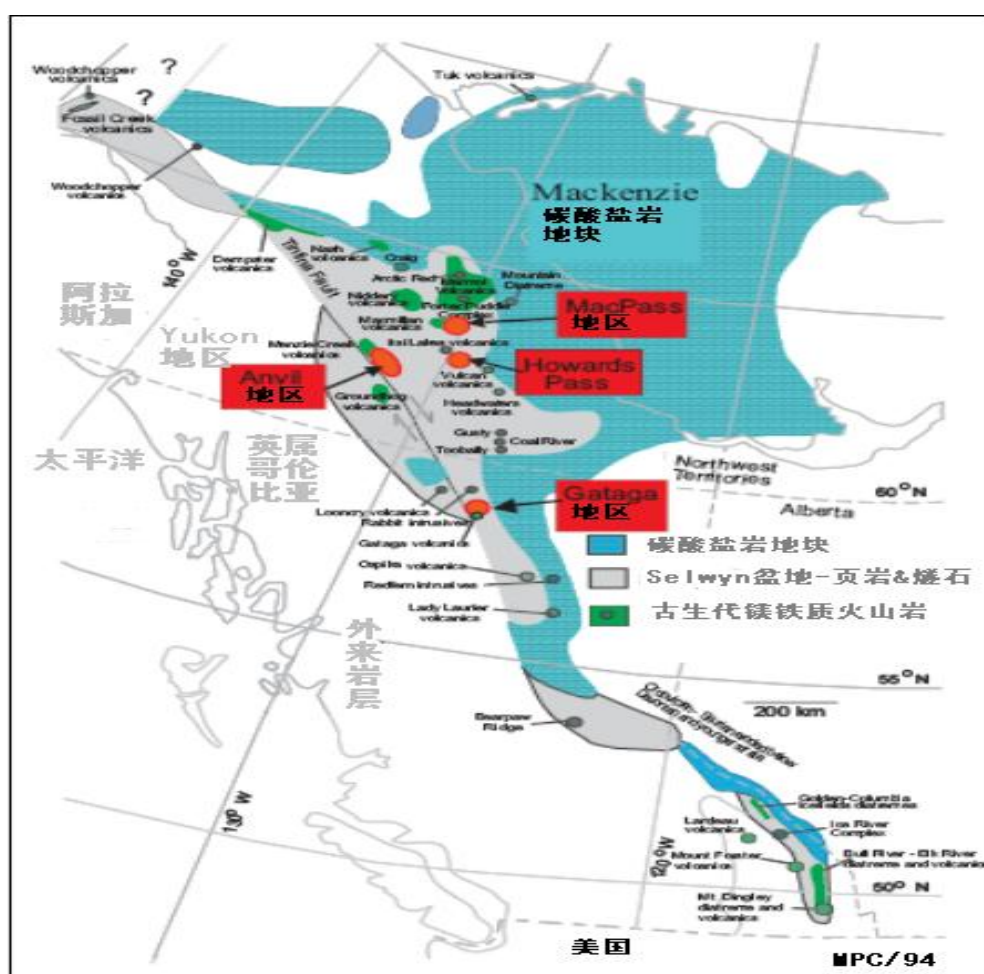


图13 Yukon和British Columbia地区Selwyn盆地中SEDEX型矿床的古相分布

岩或碳酸盐岩组成的不透水帽或封盖（据Goodfellow 等人，1993；Large, 1986；Lydon, 1983）。Pb和Zn来源于同时期裂谷阶段的火山岩和碎屑岩（据Lydon等人，2000）。金属最终的赋存地是拥有在水环境中无限提供 $\text{H}_2\text{S}$ 的还原性次级盆地（图12）。虽然一个与岩浆作用的联系不能表示所有的矿床，但铁镁质火山岩和岩床在空间和时间上与许多SEDEX型矿床相联系（例如塞尔温盆地（Selwyn Basin）和珀赛尔带（Belt-Purcell），并且双峰火山岩与多数BHT型矿床相联系（据Broken Hill, Parr和Plimer, 1993）。

在加拿大生成SEDEX型矿床最好理解的两个大陆盆地是古生代塞尔温盆地（Selwyn Basin）和中元古代的珀赛尔带（Belt-Purcell）盆地。塞尔温盆地从阿拉斯加州边界延伸到美国南部边界（图13，据Goodfellow等人），珀赛尔带盆地从英属哥伦比亚东南部延伸到美国蒙大拿州和爱达荷州。新不伦瑞克（New Brunswick）北部的巴瑟斯特采矿营地（Bathurst Mining Camp）（据Goodfellow和McCutcheon, 2003）和育空（Yukon）地区的芬雷森区（Finlayson）是BHT型矿床最明显的两个例子（据Piercey等人，2001）。

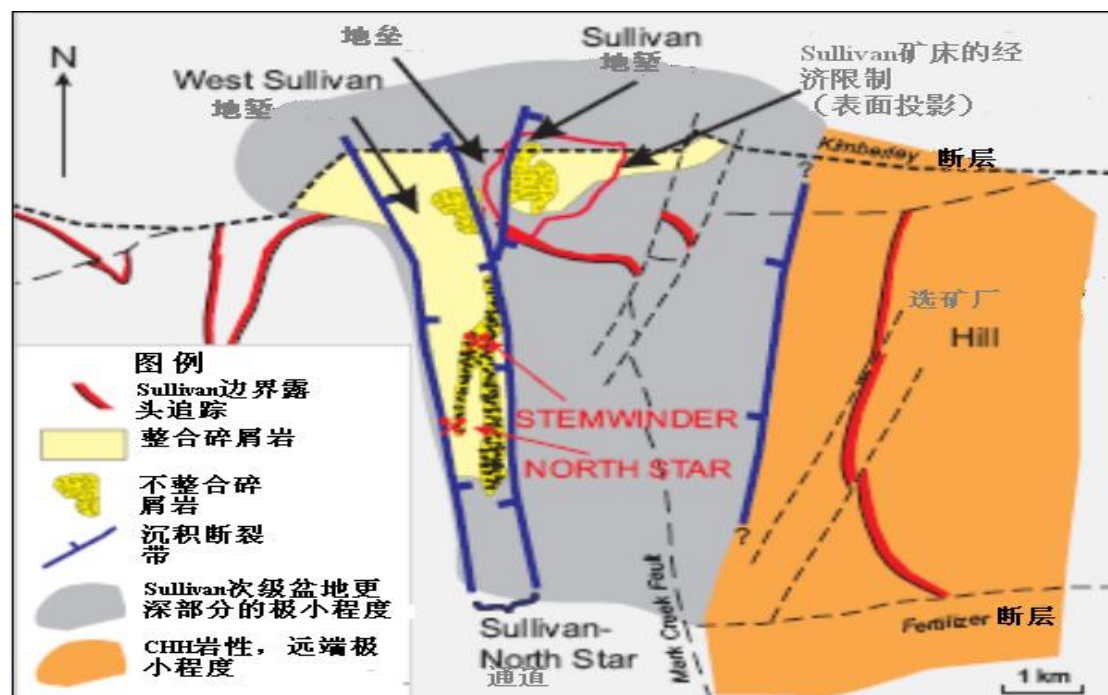


图15 展示Sullivan和West Sullivan地堑或三阶盆地、盆地边缘断层中SEDEX型矿床的地表图（据Lydon等人，2000a）

## 分布规模（加拿大）

关于分布规模，SEDEX型矿床一般在由二阶的盆地邻区延伸构造（例如，图15，Sullivan矿床）将细粒沉积物盆地相从碳酸盐地块序列中分离出来所产生的几个热液事件过程中形成。一些矿床与火山岩和侵入岩在时空上相联系。大多数矿床位于包含有黑色页岩和角岩，盆地碳酸盐岩和内碎屑沉积岩的海洋沉积盆地内。

## 矿床规模

SEDEX型、Irish型和BHT型矿床一般位于区域三阶沉积盆地内。喷口络合物矿床的形成一般与活动断层有关，活动断层限定了区域盆地的边界，然而喷口远端矿床则形成在海底的深海洼地中（图7b），交错底层断层被普遍认为是控制着喷口和相关矿体的分布位置，它充当着金属热液从热液反应区运送到海底的通道。其它影响喷口分布位置的因素是突出的基岩，在哪里柔软沉积物的厚度最小，热液反应区的水文状况被热构造、基岩几何形态以及物源区位置所部分控制。就**喷口远端矿床**来说，最主要的控制因素不是矿床附近的喷口，而是流体密度和当地的海底水深。

## 加拿大金属成矿区的分布

赋存SEDEX型矿床的主要金属成矿区是（图2）：

- 密西西比沃尔顿区（Mississippian Walton District），石炭纪盆地，新斯科省（Nova Scotia）
- 晚泥盆纪麦克米伦通区（MacMillan Pass District），塞尔温盆地和育空（Yukon）地区东北部
- 晚泥盆纪噶他噶（Gataga）地区，克奇卡（Kechika）海槽，英属哥伦比亚（Columbia）东北部
- 早志留纪霍华德通地区（Howards Pass），塞尔温盆地，英属哥伦比亚（Columbia）东北部
- 晚寒武纪按恩威尔（Anvil）地区，塞尔温盆地，英属哥伦比亚（Columbia）东北部
- 晚寒武纪邓肯（Duncan）地区，英属哥伦比亚（Columbia）南部
- 中元古代沙利文（Sullivan）地区，珀赛尔带（Belt-Purcell）盆地，英属哥伦比亚（Columbia）东南部
- 新元古代舒斯瓦普（Shuswap）地区，英属哥伦比亚（Columbia）南部
- 中元古代玛尼哇克-格雷斯场（Maniwaki-Gracefield）地区，魁北克地区格林威尔省（Grenville Province）

塞尔温盆地占据着北美西部古生代地槽——从阿拉斯加（Alaska）到美国西北部——并被细分成5个空间上不同的采矿地区，代表着三个成矿时期。这5个区是：（1）晚寒武纪按恩威尔（Anvil）地区（2）晚寒武纪邓肯（Duncan）地区（3）早志留纪霍华德通地区（Howards Pass）（4）晚泥盆纪麦克米伦通区（MacMillan Pass District）（5）晚泥盆纪噶他噶（Gataga）地区。中元古代的珀赛尔带（Belt-Purcell）是一个克拉通内部盆地，它从英属哥伦比亚（Columbia）东南部延伸到蒙大纳州和爱达荷州（据Price和Sears，2000），并形成了沙利文（Sullivan）成矿区（据Höy等人，2000）。其他的SEDEX型成矿区，包括位于英属哥伦比亚（Columbia）南部高变质的新元古代舒斯瓦普（Shuswap）成矿区 and 位于魁北克地区格林威尔省（Grenville Province）的中元古代玛尼哇克-格雷斯场（Maniwaki-Gracefield）成矿区。在阿巴拉契亚（Appalachian）造山带，新斯科省（Nova Scotia）的石炭纪沃尔顿（Waldon）成矿区拥有曾经开采过的沃尔顿矿床。

## 形成和勘探模式

### 常规模式

SEDEX型矿床很可能是氧化形成的，因此贫 $H_2S$ 流体形成在高压热液储存场所中，其中的同裂谷阶段碎屑沉积物被细粒海洋沉积物或碳酸盐岩所封闭（据Cooke等人，2000；Goodfellow，1987）。在后裂谷阶段或者盆地形成时的下凹阶段，就Selwyn盆地来说，是长期活动的并持续了超过2亿年时间，锌和铅可能从位于矿物和热液储集场所内均质对流流体中的铁氧化物覆盖物中淋滤出来。SEDEX流体的温度，盐度，金属含量以及氧化还原条件的巨大变化是由许多因素控制的，包括局部热液体制，热液储集地沉积物的氧化还原状况，和有没有蒸发作用。对于来自现代沉积盆地的流体，温度高达305 °C的索尔顿湖卤水，其盐度通常很高，S（还原性）元素总量与金属总量的比值是很低的（据McKibben等

人，1988）。

一个矿化作用片段是由一个构造运动引起的，该构造运动使主要的裂谷断层重新活跃起来，并迅速形成沉降地堑或者二阶和三阶盆地半地堑。重新活跃的裂谷断层破坏了凹陷相沉积物盖层的连续性，导致富含金属的盐溶液流体（携带铁，锌，铅的氯化物复合物，和可变价的硫酸根离子）沿断层喷出到盆地地表。对于多数SEDEX型矿床，金属硫化物与上覆水体中的 $H_2S$ 反应而在海底或海底以上沉淀（据Goodfellow，1987）。当冷海水沿喷出裂谷向下进入到盆地内，产生自然对流，驱使流体不断的从热液储集地排泄出来（据Yang等人，2004）。海水与海底盐溶液流体相混合，并渗入到连续裂谷顶部的含水碎屑中，导致金属更进一步的从含水沉积物和火山岩中淋滤出来。

由于形成SEDEX矿床的大多数流体可能贫还原性的硫，所以对这种矿床类型一个至关重要的必需条件是在其沉积的地方要有足够的还原性硫提供（据Cooke等人，1998；Goodfellow，1987）。至于形成在海底具有良好互层的矿床，最有可能的硫来源是生物产生的 $H_2S$ ，其通常富集在缺氧的水体中（据Goodfellow，2000）。两大主要因素控制着重晶石的存在与缺失，它们是：（1）成矿流体中硫酸盐的活性，它限制了钡的溶解度（2）水体中硫酸盐的活性，它控制着重晶石组分的沉淀。在高度缺氧的盆地中，所有硫酸盐被还原成硫化物，由于低硫酸盐含量，热液流体携带的钡将在水体中丢失。

### 形成及勘查模式的新发展

下面，将形成及勘查模式的主要发展简单的罗列并讨论：

- 沉积盆地的构造环境形成了SEDEX型矿床，特别是远场后弧延伸环境和地幔柱产生的克拉通内部裂谷更为典型。
- 物质丰富的沉积盆地的构造，尤其是当它与同裂谷碎屑沉积作用相联系时，热液储集场所的发展和随后开始的有关沉降作用已经被几个盆地实例具体证实是有助于岩石圈冷却的。
- SEDEX型矿床（后20亿年）的时间分布与太古代海洋的氧化作用有关，硫酸盐的生成与还原性的硫酸盐细菌有关，元古宙和显生宙海洋偶尔分层的形成与缺氧水体有关，含金属流体与周围富 $H_2S$ 的还原性水体混合时使硫化物沉积下来，并形成了SEDEX型矿床。
- SEDEX型矿床不同方面详细的论述如下：
  - 局部的三阶盆地的地质情况和沉积情况生成的矿床
  - 成矿区的地质形态和结构
  - 热液沉积物的矿物和化学组分以及勘探载体的发展
  - 绘制SEDEX型矿床周围的热液蚀变图
- 新的热化学模式表明SEDEX型矿床是由富 $f_{O_2}$ 的盆地金属流体形成的，这证实了SEDEX型矿床是由贫硫且富 $f_{O_2}$ 的盆地流体形成的早期模式（据Cooke等人，2000）。
- 认为在Selwyn盆地中的SEDEX型矿床与Mackenzie碳酸盐地块中的MVT型矿床在成因上又联系（据Goodfellow，1987）。

## 加拿大SEDEX矿床的核心找矿特征

### 大陆规模

在大陆或全流域规模，指示很可能存在SEDEX型矿床和BHT型铅锌矿床的特征有：



- 时间：根据硫循环为距今20亿年
- 构造环境：克拉通内部沉积和陆缘裂谷
- 沉积盆地结构：同裂谷碎屑序列上覆后裂谷非渗透性的海洋盆地沉积物；含盐卤水对周围碳酸盐岩地块的补给或许是盆地热液流体中的金属化合物中氯化物的重要来源
- 缺氧事件：间冰期的温暖大洋环境表示全球发生的缺氧沉积作用（如非生物作用的含碳页岩，层状黄铁矿，底栖动物的缺失）和蒸发作用
- 岩浆事件：同期或后期裂谷阶段的碱性铁镁质火山岩，以及拉斑玄武岩岩床和岩脉
- 在碳酸盐岩附件同时代的MVT型矿床
- 地球化学异常流：沉积物样和水样是异常的，其成矿元素和成矿相关元素占据盆地中的一大块区域。一个实例是在Selwyn盆地中大范围锌异常延伸了100多公里（如，图14，Selwyn盆地）

### 区域和矿床规模

在区域规模上，评估存在SEDEX型矿床和BHT型铅锌矿床的特征是：

- 在沉积大陆裂谷内的二阶和三阶盆地
- 区域构造作用：沉积相和厚度变化，断层崖角砾岩，局部不整合，主断层消失以及断层交错，可以作为扩张断层恢复活动性的证据
- 岩浆的中心（如火山和岩床集合体）
- 化学还原性海底环境：某一区域演化过程中的缺氧循环

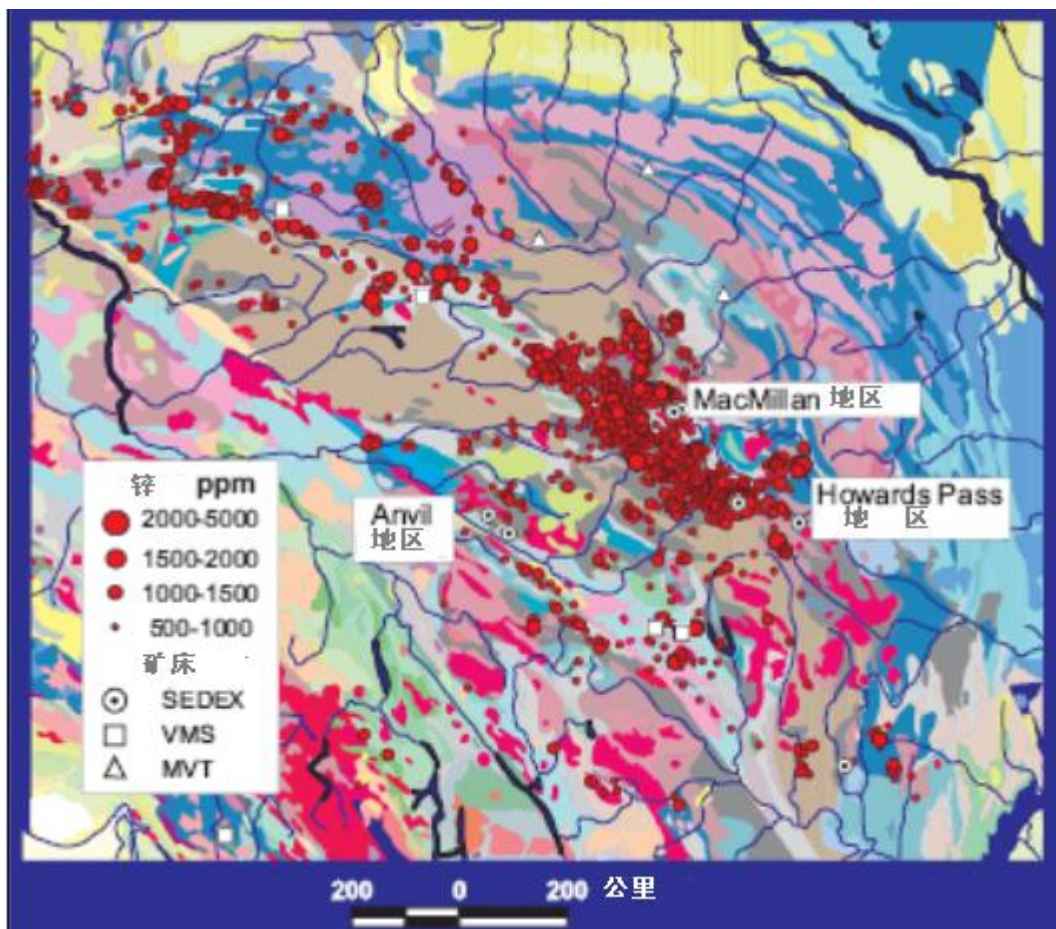


图14 Yukon地区Selwyn盆地水系沉积物的锌高度异常值（<1000ppm）按比例循环图



- 古气候：热液反应带的蒸发岩或地块附近的盐分补给流体，提供了形成基本金属化合物的氯化物来源
- 远端热液沉积物：如，黄铁矿，重晶石，磷灰石，Mn-Fe-Ca-Mg碳酸盐岩
- 热液蚀变：早期和晚期的石英，白云母，绿泥石，铁白云母，菱铁矿，与扩散作用相关的电气石蚀变，以及成矿元素和相关元素组成的硫化物脉
- 地球化学异常的页岩：富基本金属元素和相关成矿元素（如：As, Sb, Cd, Mn, P, Ba, Hg, Tl）
- 地球化学异常现象：沉积物样和水样中成矿元素以及相关成矿元素的局部异常

## 学术空缺部分

主要的学术空缺部分总结如下：

1. 为了了解成矿过程中矿床形成原因和其它地质事件之间的联系而直接用放射性测年法来测定成矿事件的时间，但只有极少数矿床可以用放射性测年。这可以通过直接测定不同矿床组分来完成，如碳酸盐岩，硫化物的Nd/Sm值，碳酸盐岩中的Rb/Sr值，磷钇矿中的U/Pb值；显生宙岩石中的微体古生物个体；或者通过U/Pb值测定夹层中的火山灰层年龄来确定矿层的年龄
2. 对一个盆地形成SEDEX型矿床的有利条件的预测方法在不断发展，这包含着对无产物盆地演化和有产物盆地演化的比较研究。重要的信息将被总结出来：
  - 沉积物堆积速率（需要放射性测年来确定）
  - 在成岩作用和深埋变质作用过程中，矿物和岩石地球化学变化的演化途径。这需要详细的底层学，沉积学，岩石地球化学，成岩阶段的放射性测年和深埋的矿物变质作用来绘构盆地的横断面
  - 盆地内空隙流体的演化途径（将依赖于黏合物和成岩矿物中流体包含物的研究），将强调关键时期或在空隙流体变成含金属流体时的环境条件。
  - 构造历史和盆地内的岩浆事件
  - 古气候和盆地内水体的演化历史。这需要通过对盆地、岩性系统观察资料和沉积指示物研究获得不同的地球化学和同位素（如S, C）描述。
3. 在一个沉积盆地中，有关SEDEX型矿床最有利的地层间隔和空间位置的预判准则是不断发展的。这需要对一个沉积盆地中关于控制含金属水体演化的所有主要过程都有一个基本的了解，这也需要有关现代沉积盆地水文情况和盆地流体大部分迁移的控制因素的专业知识。这个工作可以用编绘（特别是石油工业形成的数据），流体流动的数学模型，利用限制的岩石性质参数，以及有针对性的研究重点盆地中保存很好并出露的关键组分来完成。
4. SEDEX型矿床中矿物沉积的优化模式。对于一个SEDEX型矿床沉积和储藏所需的成矿环境条件仍然有很大争论，还不确定SEDEX型矿床是否需要一个卤水储集池或者能否形成一个硫化物堆，以及是否是地表下细粒沉积物的主要置换作用。这些以及其它关于SEDEX型矿床形成的不确定问题需要对原始SEDEX型矿床实例进行细致的研究和测量，例如那些在特提斯带（Tethyan Belt）和古巴的矿床。
5. 对于SEDEX型矿床时间分布上海洋演化限制条件的确定。根据经验资料发现，没有年代老于20亿年的SEDEX型矿床，提出来的海洋化学演化模式，当它与还原性的生物硫相联系时需要在贯穿地质时间的盆地中验证。这个问题对于加

拿大特别有研究意义，由于其广阔的早元古代盆地，特别是加拿大北部，如拉布拉多（Labrador）地区的拉布拉多海槽（Labrador Trough）；努纳武特地区（Nunavut）西部的Foxy-Rinkian盆地；西北地区（NWT）北部的Wopmay造山带；西北地区（NWT）的Athapuscow拗拉槽；西北地区（NWT）巴瑟斯特湾-维多利亚岛（Bathurst Inlet-Victoria Island）的Kilohigok盆地。这个问题的解决需要对构造的理解，也需要对从太古代末期克拉通化阶段到元古代晚期超大陆形成阶段的沉积盆地海洋化学和水文环境的演化有个理解。

## 加拿大的高级成矿远景区

应用以上对于产出盆地识别的准则，就会发现加拿大主要的沉积盆地对应着各自潜在的SEDEX型矿床，Irish型矿床和BHT型硫化物矿床。须注意，矿床可信度是随着地质科学资料的质量和广泛性，以及最小工业开采品位而变化的。

### 赋存SEDEX型矿床的盆地

下述含有SEDEX型矿床和VSHMS型矿床的盆地，是在现有地区和新地区有很高勘探远景发现新矿床的。

- 塞尔温（Selwyn）盆地，育空（Yukon）地区，西北地区（NWT）以及英属哥伦比亚（British Columbia）（寒武纪到晚泥盆纪）。Selwyn盆地大体上是一个由还原性盆地相沉积物组成的古生代陆缘裂谷，沿北美原始的大陆边缘从阿拉斯加延伸，穿过了Yukon地区和英属哥伦比亚（British Columbia）。虽然许多SEDEX型矿床被探明位于Yukon地区和英属哥伦比亚（British Columbia），但被认为很可能含有SEDEX型矿床的是Selwyn盆地，它的延伸是加拿大山系的全长。
- 珀赛尔带（Belt-Purcell）盆地，位于英属哥伦比亚（British Columbia）东南部和美国西北部（中元古代）。这个大陆裂谷拥有世界级的沙利文（Sullivan）矿床在内的一些SEDEX型矿床。
- 芬雷森湖地区（Finlayson Lake district），位于Yukon地区（泥盆纪中-晚期）。这个后弧大陆裂谷拥有几个主要的矿床。
- 巴瑟斯特采矿营地（Bathurst Mining Camp），位于新不伦瑞克（New Brunswick）北部（奥陶纪中期）。这个后弧大陆裂谷拥有储量超过100万吨的矿床20多个，并且还有包括世界级的12号Brunswick矿床在内的几个过去和现在都开采的矿床。

### 高成矿远景的沉积盆地

下述盆地没有包含SEDEX型矿床，但显示出所有或大部分重要的产矿属性。

- 博登盆地（Borden Basin），位于努纳武特地区（Nunavut）（元古代中期）
- 富兰克林盆地（Franklinian Basin），位于努纳武特地区（Nunavut）北部（古生代）
- 瓦纳克（Wernecke）超群，位于Yukon中央地区（中元古代）

### 中等成矿远景的沉积盆地

下述盆地没有包含SEDEX型矿床，也显示出所大部分重要的产矿属性，但在至少缺失某一基本属性。理查德森海槽（Richardson Trough）没有上覆的同裂谷碎屑序列，因此没有显示出典型的包含有SEDEX型矿床的沉积盆地结构。以下所有列出来的剩余沉积盆地都比最老的SEDEX型矿床年代还老，也许缺乏细菌成因的，对由贫H<sub>2</sub>S热液喷出到周围水体中的基本金属元素沉淀起关键作用的硫化

物。

- 理查德森海槽 (Richardson Trough), 位于Yukon和NWT北部 (古生代)
- 拉布拉多海槽 (Labrador Trough), 位于拉布拉多地区 (Labrador) (元古代早期)
- 福克斯-瑞克盆地 (Foxe-Rinkian Basin), 位于努纳武特地区 (Nunavut) 北部 (元古代早期)
- 沃普美造山带 (Wopmay Orogen), 位于NWT北部 (元古代早期)
- 阿萨普斯 (Athapuscow) 拗拉槽, 位于NWT (元古代早期)
- 克尔奥勾克 (Kilohigok) 盆地, 位于西北地区 (NWT) 巴瑟斯特湾-维多利亚岛 (Bathurst Inlet-Victoria Island) (元古代早期)

## 致谢

这篇综述大部分基于对SEDEX型矿床的早先认识和来自气固色谱法 (GSC) 研究课题对Selwyn盆地, Yukon地区, Sullivan勘探地区, 以及英属哥伦比亚南部地区中SEDEX型矿床研究所取得的成果。该文除了集中于一个地区的SEDEX型矿床和沉积盆地研究还试图从全球角度来考虑SEDEX型矿床的成矿远景。我们在此感谢苏珊娜·帕拉迪斯 (Suzanne Paradis) 对底稿的审查以及提出的宝贵建议, 也感谢英格丽·柯斯葛 (Ingrid Kjarsgaard) 对底稿的校对和编辑, 以及对加拿大和全球SEDEX型矿床数据的整理。

## 参考文献

- [1] Anderson, H.E., and Goodfellow, W.D., 2000, Geochemistry and isotope chemistry of the Moyie sills: implications for the early tectonic setting of the Mesoproterozoic Purcell basin, in Lydon, J.W., Höy, T., Slack, J.F., and Knapp, M., eds., The Geological Environment of the Sullivan Deposit, British Columbia, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 1, p. 302-321.
- [2] Arthur, M., and Sageman, B.B., 1994, Marine shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 22, p. 499-551.
- [3] Baker, V.R., 1997, Megafloods and glaciation, in Martini, I.P., ed., Late glacial and postglacial environmental changes; Quaternary, Carboniferous-Permian, and Proterozoic: New York, NY, United States, Oxford University Press, p. 98-108.
- [4] Beeson, R., 1991, Broken Hill-type lead-zinc deposits - an overview of their occurrence and geological setting: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, v. B99, p. 163-175.
- [5] Betts, P.G., Giles, D., and Lister, G.S., 2003, Tectonic environment of shale-hosted massive sulfide Pb-Zn-Ag deposits of Proterozoic northeastern Australia: Economic Geology, v. 98, p. 557-576.
- [6] Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, H., and Zak, I., 1980, The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation: Chemical Geology, v. 28, p. 3-4.
- [7] Conly, A.G., Goodfellow, W.D., Taylor, R.P., and Lydon, J. W., 2000, Geology, geochemistry, and sulphur isotope geochemistry of the hanging wall sulphide zones and their related hydrothermal alteration, Sullivan Zn-Pb-Ag deposit, in Lydon, J.W., Höy, T., Slack, J.F., and Knapp, M., eds., The Geological Environment of the Sullivan Pb-Zn-Ag Deposit, British

Columbia, Mineral Deposits Division of the Geological Association of Canada, Special Publication 1, p. 541-573.

[8]Cooke, D.R., Bull, S.W., Large, R.R., and McGoldrick, P.J., 2000, The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (Sedex) deposits: *Economic Geology*, v.95, p. 1-18.

[9]Cooke, D.R., Bull, S.W., Large, R.R., and McGoldrick, P.J., 1998, Oxidised (sulfate-bearing) brines; their importance for the formation of Australian Proterozoic Pb-Zn (SEDEX) deposits. *Geoscience for the new Millennium: Abstracts - Geological Society of Australia*, v. 49, p. 91.

[10] Emsbo, P., 2000, Gold in sedex deposits, in Hagemann, S.G., and Brown, P.E., eds., *Gold in 2000: Reviews in Economic Geology* v. 13, p. 427-437.

[11]Fischer, A.G., 1984, Biological innovations and the sedimentary record, in Holland, H.D., and Trendall, A.F., eds., *Patterns of change in Earth evolution*: Springer-Verlag, Berlin, Federal Republic of Germany, p. 145-157.

[12]Goodfellow, W.D., 1984, Geochemistry of rocks hosting the Howards Pass (XY) strata-bound Zn-Pb deposit, Selwyn Basin, Yukon Territory, Canada, *Proceeding of the Sixth Quadrennial IAGOD Symposium*: E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, Germany, p. 91-112.

[13]Goodfellow, W.D., 1987, Anoxic stratified oceans as a source of sulphur in sediment-hosted stratiform Zn-Pb deposits (Selwyn Basin, Yukon, Canada): *Chemical Geology*, v. 65, p. 359-382.

[14]Goodfellow, W.D., 2000, Anoxic conditions in the Aldridge Basin during formation of the Sullivan Zn-Pb deposit: implications for the genesis of massive sulphides and distal hydrothermal sediments, in Lydon, J.W., Höy, T., Slack, J.F., and Knapp, M., eds., *The Geological Environment of the Sullivan Deposit*, British Columbia, Mineral Deposits Division of the Geological Association of Canada, Special Publication 1, p. 218-250.

[15]Goodfellow, W.D., 2004, Geology, genesis and exploration of SEDEX deposits, with emphasis on the Selwyn Basin, Canada, in Deb, M., and Goodfellow, W.D., eds., *Sediment-hosted Lead-Zinc Sulphide Deposits: Attributes and Models of Some Major Deposits of India, Australia and Canada*: Narosa Publishing House, Delhi, India, p. 24-99.

[16]Goodfellow, W.D., Jonasson, I.R., and Morganti, J.M., 1983, Zonation of chalcophile elements about the Howard's Pass (XY) Zn-Pb deposit, Selwyn Basin, Yukon, in Parslow, G.R., ed., *Geochemical exploration 1982: Journal of Geochemical Exploration*, v. 19, p. 503-542.

[17]Goodfellow, W.D., and Jonasson, I.R. 1986, Environment of formation of the Howards Pass (XY) Zn-Pb deposit, Selwyn Basin, Yukon, in Morin, J.A., ed., *Mineral deposits of Northern Cordillera*: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume 37, p. 19-50.

[18]Goodfellow, W.D., and McCutcheon, S.R., 2003, Geological and genetic attributes of volcanic-associated massive sulfide deposits of the Bathurst Mining Camp, northern New Brunswick - a synthesis, in Goodfellow, W.D., McCutcheon, S.R., and Peter, J.M., eds., *Massive Sulfide Deposits of the Bathurst Mining Camp, New Brunswick, and Northern Maine*, *Economic Geology Monograph* 11, p. 245-301.

[19]Goodfellow, W.D., and Rhodes, D., 1990, Geological setting, geochemistry and origin of the Tom stratiform Zn-Pb-Ag-barite deposits, in Abbott, J.G., and Turner, R.J.W., eds., *Mineral Deposits of the Northern Canadian Cordillera: Field Trip 14 Guidebook: International Association on the Genesis of Ore Deposits, Eighth Symposium*, Ottawa, p. 177-244.

[20]Goodfellow, W.D., Lydon, J.W., and Turner, R.W., 1993, Geology and genesis of stratiform



sediment-hosted (SEDEX) Zn-Pb-Ag sulphide deposits, in Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., and Duke, J.M., eds., Mineral Deposit Modeling, Geological Association of Canada, Special Paper 40, p. 201-251.

[21] Goodfellow, W.D., Cecile, M.P., and Leybourne, M.I., 1995, Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of lower Paleozoic alkalic and potassic volcanic rocks, northern Canadian Cordilleran Miogeocline: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 32, p. 1236-1254.

[22] Gwosdz, W., and Krebs, W., 1977, Manganese halo surrounding Meggen ore deposit, Germany: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, v. B86, p. 73-77.

[23] Hamilton, J.M., Bishop, D.T., Morris, H.C., and Owens, O.E., 1982, Geology of the Sullivan orebody, Kimberley, B.C., Canada, in Hutchinson, R.W., Spence, C.D., and Franklin, J.M., eds., Precambrian Sulphide Deposits, Special Paper 25, Geological Association of Canada, p. 597-665.

[24] Hannak, W.W., 1981, Genesis of the Rammelsberg ore deposit near Goslar/Upper Hartz, Federal Republic of Germany, in Wolfe, K.H., ed., Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposits, 9: Elsevier, Amsterdam, p. 551-642.

[25] Hauser, R.L., and Hutchinson, R.W., 1983, Tin in the Sullivan Deposit, Kimberley, B.C.: Geological Association of Canada; Mineralogical Association of Canada; Canadian Geophysical Union; joint annual meeting: Program with Abstracts, v. 8, p. A31.

[26] Hitzman, M.W., and Beaty, D.W., 1997, The Irish Zn-Pb-(Ba) orefield, in Sangster, D.F., ed., Carbonate-hosted lead-zinc deposits: Society of Economic Geologists, Special Publication 4, p. 112-143.

[27] Høy, T., Anderson, D., Turner, R.J.W., and Leitch, C.H.B., 2000, Tectonic, magmatic and metallogenic evolution of the early synrift phase of the Purcell basin, southeastern British Columbia, in Lydon, J.W., Høy, T., Knapp, M., and Slack, J.F., eds., The Geological Environment of the Sullivan deposit, British Columbia, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 1, p. 32-60.

[28] Jefferson, C.W., Kilby, D.B., Pigage, L.C., and Roberts, W.J., 1983. The Cirque Barite-Zinc-Lead Deposits, Northeastern British Columbia, 4, in Sangster, D.F., ed., Short Course in Sediment-hosted stratiform lead-zinc deposits; Victoria, Canada: Mineralogical Association of Canada. 9, p. 121-140.

[29] Jenkins, C.L., and Lydon, J.W., 2002, A mineral deposit data base structure and a data base of VMS and Sedex deposits: Geological Survey of Canada, Open File 4165.

[30] Jennings, D.S., and Jilson, G.A., 1986, Geology and sulphide deposits of the Anvil Range, Yukon, in Morin, J.A., ed., Mineral Deposits of Northern Cordillera, Canadian Institute Mining and Metallurgy, Special Volume 37, p. 339-361.

[31] Large, D.E., 1980, Geological parameters associated with sediment-hosted, submarine exhalative Pb-Zn deposits: an empirical model for mineral exploration: Geologisches Jahrbuch D40, p. 59-129.

[32] Large, D.E., 1981, Geochemistry of sedimentary rocks in the vicinity of the Tom Pb-Zn-Ag deposit, Yukon Territory, Canada: Transactions 8<sup>th</sup> International Geochemical Exploration Symposium, 1981, p. 203-217.

[33] Large, D.E., 1983, Sediment-hosted massive sulphide lead-zinc deposits: an empirical model, in Sangster, D.F., ed., Sediment-hosted Stratiform Lead-zinc Deposits, Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook 8, p. 1-29.

[34] Large, D.E., 1986, The paleotectonic setting of Rammelsberg and Meggen, Germany - A

- basin analysis study, in Turner, R. J.W., and Einaudi, M.T., eds., *The Genesis of Stratiform Sediment-hosted Lead and Zinc Deposits: Conference proceedings*, 20, Stanford University Publications, Geological Sciences, p. 109-112.
- [35] Large, R.R., and McGoldrick, P.J., 1998, Lithogeochemical halos and geochemical vectors to stratiform sediment hosted Zn-Pb-Ag deposits; Part 1, Lady Loretta Deposit, Queensland: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 63, p. 37-56.
- [36] Large, R.R., Bull, S.W., Cooke, D.R., McGoldrick, P.J., and Williams, P.J., 1998, A genetic model for the H.Y.C. Deposit, Australia; based on regional sedimentology, geochemistry, and sulfide-sediment relationships. in *Metallogeny of the McArthur River-Mount Isa-Cloncurry minerals province: Economic Geology*, v. 93, p. 1345-1368.
- [37] Large, R.R., Bull, S.W., and McGoldrick, P.J., 2000, Lithogeochemical halos and geochemical vectors to stratiform sediment hosted Zn-Pb-Ag deposits; Part 2, HYC Deposit, McArthur River, Northern Territory: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 68, p. 105-126.
- [38] Leach, D.L., Bradley, D., Lewchuk, M.T., Symons, D.T.A., de Marsily, G., and Brannon, J., 2001, Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time; implications from recent age-dating research: *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 711-740.
- [39] Lydon, J.W., 1983, Chemical parameters controlling the origin and deposition of sediment-hosted stratiform lead-zinc deposits, in Sangster, D.F., ed., *Short Course in Sediment-hosted Stratiform Lead-zinc Deposits*, Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook v. 8, p. 175-250.
- [40] Lydon, J.W., 1995, Sedimentary exhalative sulphides (Sedex), in Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., and Thorpe, R.I., eds., *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*, 8, Geological Survey of Canada, p. 130-152.
- [41] Lydon, J.W., Paakki, J.J., Anderson, H.E., and Reardon, N.C., 2000a, An overview of the geology and geochemistry of the Sullivan Deposit, in Lydon, J.W., Höy, T., Slack, J.F., and Knapp, M.E., eds., *The geological environment of the Sullivan Deposit, British Columbia: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 1*, p. 505-522.
- [42] Lydon, J.W., Walker, R., and Anderson, E.H., 2000b, Lithogeochemistry of the Aldridge Formation and the chemical effects of burial diagenesis, in *The geological environment of the Sullivan Deposit, British Columbia*, in Lydon, J.W., Höy, T., Slack, J.F., and Knapp, M. E., eds., Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 1, p. 137-179.
- [43] McKibben, M.A., Eldridge, C.S., and Williams, A.E., 1988, Sulfur and base metal transport in the Salton Sea Geothermal System, in Tucker, R., ed., *New Horizons*, 12: Geothermal Resources Council, Davis, CA, United States, Transactions, p. 121-125.
- [44] Moore, D.W., Young, L.E., Modene, J.S., and Plahuta, J.T., 1986, Geological setting and genesis of the Red Dog zinc-lead-silver deposit, Western Brooks Range, Alaska: *Economic Geology*, v. 81, p. 1696-1727.
- [45] Mosier, D.L., Singer, D.A., and Salem, B.B., 1983, Geologic and gradetonnage information on volcanic-hosted copper-zinc-lead massive sulphide deposits: USGS Open File Report, 83-89, 77p.
- [46] Nelson, J., Paradis, S., Christensen, J., and Gabites, J., 2002, Canadian Cordilleran mississippi valley-type deposits; a case for Devonian-Mississippi back-arc hydrothermal origin: *Economic Geology*, v. 97, p. 1013-1036.
- [47] Parr, J.M., and Plimer, I.R., 1993, Models for Broken Hill-type lead-zinc-silver deposits, in

- Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., and Duke, J.M., eds., Mineral deposit modeling: Geological Association of Canada, Special Paper 40, p. 253-288.
- [48]Piercey, S.J., Paradis, S., Murphy, D.C., and Mortensen, J.K., 2001, Geochemistry and paleotectonic setting of felsic volcanic rocks in the Finlayson Lake volcanic-hosted massive sulfide district, Yukon, Canada: *Economic Geology*, v. 96, p. 1877-1905.
- [49]Price, R.A., and Sears, J.W., 2000, A preliminary palinspastic map of the Mesoproterozoic Belt-Purcell Supergroup, Canada and USA; implications for the tectonic setting and structural evolution of the Purcell Anticlinorium and the Sullivan Deposit, in Lydon, J.W., Höy, T., Slack, J.F., and Knapp, M.E., eds., *The geological environment of the Sullivan Deposit, British Columbia: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 1*, p. 61-81.
- [50]Sangster, D.F., 1990, Mississippi Valley-type and sedex lead-zinc deposits: a comparative examination: *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, B99, p. 21-42.
- [51]Sangster, D.F., and Hillary, E.M., 2000, SEDEX lead-zinc deposits – proposed sub-types and their characteristics: *Exploration and Mining Geology*, v. 7, p. 341-357.
- [52]Singer, D.A., 1995, World class base and precious metal deposits – a quantitative analysis: *Economic Geology*, v. 90, p. 88-104.
- [53]Tikkanen, G.D., 1986, World resources and supply of lead and zinc, in Bush, W.R., ed., *Economics of Internationally Traded Minerals: Society of Mining Engineers, Inc.*, p. 242-250.
- [54]Turner, R.J.W., 1990, Jason stratiform Zn-Pb-barite deposit, Selwyn Basin, Canada (NTS 105-O-1): Geological setting, hydrothermal facies and genesis, in Abbott, J.G., and Turner, R.J.W., eds., *Mineral Deposits of the Northern Canadian Cordillera: International Association on the Genesis of Ore Deposits, Field Trip 14: Guidebook*, p. . Turner, R.J.W., Leitch, C.H.B., and Ross, K.V., 2000, District-scale alteration associated with the Sullivan Deposit, British Columbia, Canada, in Lydon, J.W., Höy, T., Slack, J.F., and Knapp, M.E., eds., *The geological environment of the Sullivan Deposit, British Columbia: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 1*, p. 408-439.
- [56]Vail, P.R., Mitchum, R.M., Jr., and Thompson, S., III, 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level; Part 4, Global cycles of relative changes of sea level, in Payton, C.E., ed., *Seismic stratigraphy; applications to hydrocarbon exploration: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26*, p. 83-97.
- [57]Walters, S.G., 1998, Broken hill-type deposits: *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, p. 229-237.
- [58]Yang, J., Large, R.R., and Bull, W., 2004, Factors controlling free thermal convection in faults in sedimentary basins: implications for the formation of zinc-lead mineral deposits: *Geofluids*, v. 4, p. 237-247.
- [59]Zierenberg, R.A., 1990, Deposition of metalliferous sediment beneath a brine pool in the Atlantis II deep, Red Sea, in McMurray, G.R., ed., *Gorda Ridge: A Seafloor Spreading Center in the United States Exclusive Economic Zone: Springer-Verlag, New York*, p. 131-142.