

文章编号: 0258-7106(2014)05-0964-13

加拿大萨斯喀彻温省索西(Southey)钾盐矿床特征及成因*

马黎春¹, 马建强², 韩继秋², 刘成林¹, 牛磊², 张琪¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 兖煤加拿大资源有限公司, 萨斯卡通 S7K 1N1)

摘要 加拿大萨斯喀彻温省索西(Southey)钾盐矿床, 主要赋存于中泥盆统的 Elk Point(埃尔克波因特)群上部 Prairie Evaporite(草原蒸发岩)组。钾盐矿层稳定, 似水平状展布, 埋深约 1250~1550 m; 钾盐矿物主要有钾石盐(KCl)和光卤石($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$), 矿石品位高, $w(K_2O)$ 可达 11.17%~21.85%, 是世界少有的高品质钾盐矿床。文章分别从构造位置、古地理条件、物源补给、沉积韵律和成矿过程等多个方面综合分析了索西钾盐矿床的成因。

关键词 地质学; 钾盐沉积; 索西矿区; 萨斯喀彻温; 沉积特征; 矿床成因

中图分类号: P611.4; P619.211

文献标志码: A

Characteristics and genesis of Southey potash deposit, Saskatchewan, Canada

MA LiChun¹, MA JianQiang², HAN JiQiu², LIU ChengLin¹, NIULei² and ZHANG Qi¹

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;

2 Yancoal Canada Resources Co., Ltd., Saskatoon S7K 1N1, Canada)

Abstract

The potash deposit underlying YanCoal's Southey Project Area, Saskatchewan, Canada, belongs to the Middle Devonian Prairie Evaporite Formation, lies 1250~1550 m in depth with a stable quasi-horizontal distribution, and comprises sylvinite and carnallite. The Southey Project constitutes a rare world-class deposit because of its remarkable consistency in grade, lateral continuity and high-quality potash minerals with the K_2O grades varying in the range of 11.17%~21.85%. The indicated resource is 9.64×10^8 t and the inferred potash resource is 37.66×10^8 t within the Southey Project Area at the general prospecting stage. This study conducted a comprehensive genetic analysis of the Southey potash deposit in the aspects of structural situation, material source supply and geographical conditions.

Key words: geology, potash deposit, Southey ore district, Saskatchewan, deposit characteristics, deposit genesis

加拿大是目前世界上钾盐矿藏资源最丰富的国家, 其资源储量和基础储量占世界总量的 53%(杨文光, 2013), 供应了全球 1/3 的钾肥产能(宋国明,

2007)。钾盐矿床主要赋存于萨斯喀彻温省泥盆系的 Elk Point(埃尔克波因特)群 Prairie Evaporite(草原蒸发岩)组(Holter, 1969), 为典型的浅海相蒸发岩

* 本文得到国家重点基础研究发展计划(973)“中国陆块海相成钾规律及预测研究(编号: 2011CB403007)”和兖煤加拿大矿权区钾盐矿床赋存规律、资源评价与开发条件综合研究(编号: E1308)项目共同资助

第一作者简介 马黎春, 女, 1978年生, 副研究员, 主要从事盐湖地球化学及钾盐矿床成矿规律研究。Email: mllichun@cags.ac.cn

收稿日期 2014-07-08; 改回日期 2014-08-15。苏杭编辑。

沉积,还有少部分蕴藏于一些沿海省份及魁北克省的石炭系蒸发盐岩中(Warren, 2006)。

自古生代至侏罗纪,加拿大西部沉积盆地均为稳定的克拉通台地沉积序列,其间包括多套海侵-海退蒸发岩建造。尤其是在中泥盆世时期,盆地边缘的构造运动和克拉通盆地内的差异性升降塑造了盆地独特的多级局限水文环境;并在构造运动、海平面升降、蒸发作用及气候的有效配合、交互作用下形成了Elk Point盆地广泛而巨量的蒸发岩沉积,盐岩体积达 $6 \times 10^4 \text{ km}^3$ (Zharkov, 1988);且在远离入海口的终端盆地——萨斯喀彻温次级盆地内形成了世界上最大的钾盐矿床(Warren, 2010)。而索西(Southey)矿区恰位于萨斯喀彻温次级盆地的中部,其钾盐矿石品位高,矿层稳定,连续性好,是加拿大巨型钾盐矿床的典型代表。中国兖煤加拿大资源有限公司在索西矿区约 100 km^2 范围内普查勘探,已获得预测可控制KCl资源量为9.64亿吨,推断KCl资源量为37.66亿吨(Piché et al., 2013)。该公司目前正在进行详查,预计资源量会进一步提升,后续开发对于有效补充中国钾肥市场供应量、缓解国内钾盐资源紧缺态势具有积极作用。

1 区域地质背景

北美大陆主要有4个一级地质构造单元,其核心为加拿大地盾;外围地台与基底共同构成北美克拉通;总体上形成以地盾-克拉通为中心,环带状分布显生宙造山带和中-新生代大陆边缘的构造格局(Williams et al., 1991; 齐文, 2010)。萨斯喀彻温钾盐矿床位于北美地台北部的加拿大西部地台区,东为加拿大地盾,西南为科迪勒拉造山带(Canadian Cordillera)(Williams et al., 1991)。基底由前寒武纪片麻岩和角闪岩等变质岩系组成;上覆寒武系—第四系沉积层,厚度 $1000 \sim 3000 \text{ m}$,产状平缓,构成加拿大西部沉积盆地,其中显生宙地层大体可分为3段(Halabura, 2005; Halabura et al., 2007): ①上部覆盖层主要由新生界冰碛物、沙砾石和黏土组成。该层从地表向下延伸约 150 m ,局部可达 200 m 厚。②中间层为中生界页岩、粉砂岩和砂岩,含有少量的淡水含水层,从冰川沉积物的底部至位于古生界顶部的中生界/古生界不整合界面。该层底界面埋深约为 500 m ,在南部超过 850 m 。③下部地层为古生界,从中生界/古生界不整合界面延伸至地表以下

2000 m 。其主要由厚层碳酸盐岩和蒸发岩夹层构成,含有少量页岩和砂岩。在该地层中,泥盆系的Elk Point群广泛发育蒸发岩层,其顶部的草原蒸发岩组中富含钾盐矿层(图1)。

泥盆纪时北美地台下降,海平面上升,当时太平洋海岸的位置正位于目前的阿尔伯塔省和不列颠哥伦比亚省的边界附近,而Elk Point盆地的古地理位置大约是南纬 $0^\circ \sim 15^\circ$ (Warren, 2010)。海水从阿尔伯塔(Alberta)西北方向进入Elk Point盆地,首先进入西北部盆地;到中泥盆世时,整个北美海侵面积扩大,从西北向东南发展,进入东南部的萨斯喀彻温盆地(在美国境内称为威利斯顿盆地)。整个盆地呈狭长状,长约 1600 km ,宽 $320 \sim 700 \text{ km}$,面积约 $60 \times 10^4 \text{ km}^2$,沿北西向延伸,分别由西北部盆地、阿尔伯塔中部盆地和东南部的萨斯喀彻温3个次级盆地组成,其间分别被皮斯河背斜(Peace River)和米道湖丘(Meadow Lake)所分割(图2)。Elk Point盆地的北面及西面以一系列构造隆起为其边界,由于后期持续的侵蚀作用,该盆地真正的东部边界仍不清楚(Mossop et al., 1994)。

2 Elk Point盆地钾盐矿床特征

泥盆纪的Elk Point盆地总体为强烈蒸发的局限海相地台环境,经历了多个海侵-海退旋回,形成了多套蒸发岩沉积建造,盐岩主要赋存于Elk Point群的4个盐岩沉积旋回中,总体可分为2个主要成盐期,早期是断陷、断拗期,沉积了Lotsberg(Lower and Upper Lotsberg Salt)和Cold Lake(Cold Lake Salt)2个成盐旋回,晚期为拗陷沉积期,沉积了Prairie Evaporite(Whitkow and Leofnard Salt)和Drawson Bay(Hubbard Evaporite)2个成盐旋回,但在萨斯喀彻温地区只钻遇到Prairie Evaporite组和部分Hubbard Evaporite组中的2套蒸发岩层(Grobe, 2000),最新厘定的构造剖面图见图3。

其中,Prairie蒸发岩层分布范围最广,面积可达 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$,厚度可达 200 m ,含有4个钾盐层,并向东南方向延伸至美国境内的北达科他州和蒙大拿州(图2)。整个矿区构造相对简单,矿层沉积稳定。但部分区域,矿层底部的温尼伯戈西斯地层(Winnipegosis),在局部发育有不规则的礁灰岩,它们有时穿入上覆蒸发岩层,破坏了钾盐矿层的连续性。

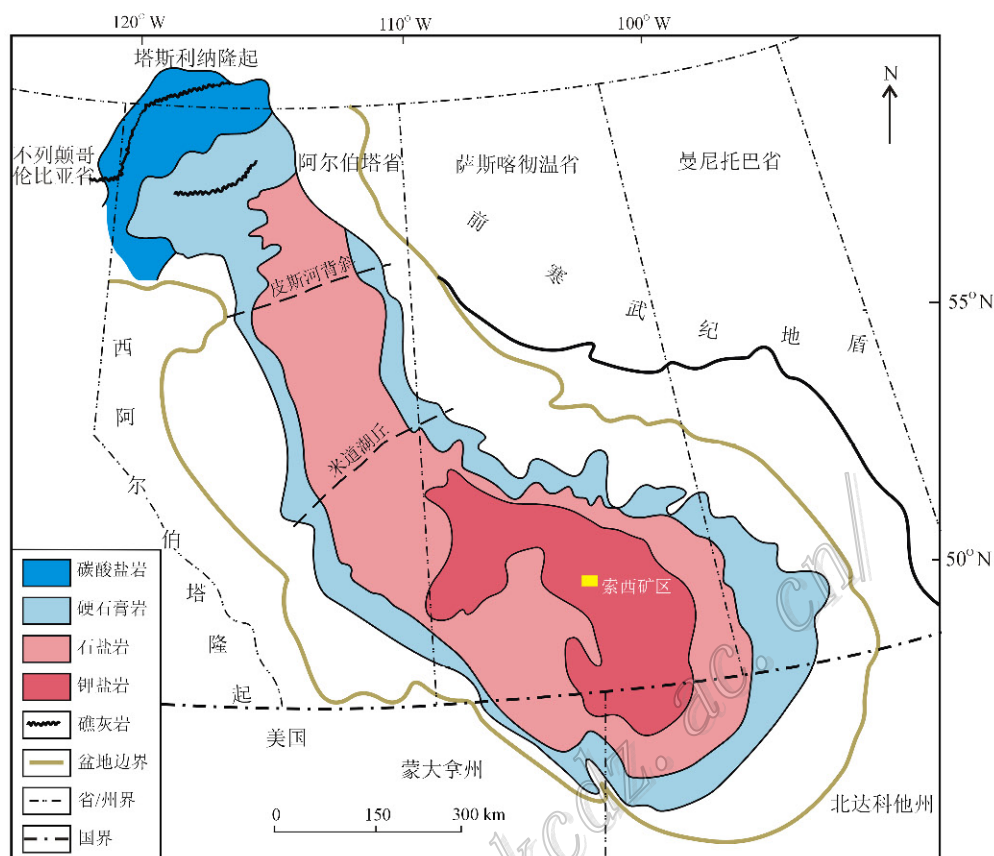


图 2 Elk Point 盆地蒸发岩相沉积分布图(据 Garrett, 1996 改编)

Fig. 2 Distribution of evaporites sedimentation in the Elk Point Basin (modified after Garrett, 1996)

钾盐矿层则主要分布于 Prairie 蒸发岩层顶部 60~70 m 处,在萨斯喀彻温大平原埋深 400~2750 m,自下而上分为 Esterhazy、White Bear、Belle Plaine 和 Patience Lake 4 个钾盐矿段。White Bear 矿层较薄,厚度 1~10 m,且钾石盐品位较低,不作为主要开采层。位于底部的 Esterhazy 钾盐矿层分布面积最小,集中分布于钾盐矿区的东南部,矿层厚度 1~15 m,平均厚度 9 m,最大厚度可达 26 m。中部的 Belle Plaine 钾盐矿层,向盆地西部及西北方向拓展,面积扩大,厚度变化于 3~12 m,平均厚度 7 m,最大厚度 23 m,出现在萨斯卡通东北部;位于顶部的 Patience Lake 钾盐矿层,继续向西拓展,分布面积最大,沉积厚度介于 3~18 m,平均厚度 11 m,最大厚度 31 m,位于萨斯卡通的西部(Yang et al., 2009),3 个沉积旋回的钾盐沉积面积自下而上依次增大,指示 3 次规模巨大的海侵事件,影响范围向上扩大,海侵之后是强烈的蒸发作用,沉积了巨厚的钾盐矿床。萨省主要钾盐矿段分布面积、沉积厚度见图 4。

各钾盐矿段之间的层状石盐岩夹层,仍保留有

明显的原生沉积特征,含有丰富的人字形石盐晶体,并表现出典型的浅水-暂时性盐湖沉积特征(Brodylo et al., 1987)。且部分人字形晶体被一些透明的不规则石盐晶体所截取,或石盐晶体填充于人字形晶粒之间,这是早期的同沉积阶段形成的(Warren, 2010)。与之相反,钾盐矿层中的石盐晶体却缺乏有效的原生沉积特征。早期的研究者根据草原蒸发岩组钾盐矿段中石盐矿物溴含量低的特征,推测钾盐矿层很可能遭受过高盐度流体的溶解,造成重结晶作用,而在这一过程中,形成了次生的钾石盐矿物(Schwerdtner, 1964; Wardlaw, 1968)。矿区内陆续发现的大范围的溶蚀塌陷区、镜下观察到的蒸发岩矿物的溶蚀特征(Gendzwil, 1978)、巨型晶粒的交叉、连晶及过渡生长(McIntosh et al., 1968)、同位素年龄和古地磁研究等(Koehler et al., 1997),都为钾盐次生成因及后期成岩改造提供了有效证据。而 Warren(2000)等对钾盐矿层中次生的豆荚状透明石盐矿物所进行的测年结果表明,其最早可能形成于埋藏初期,而最晚可能形成于上新世—更新世,甚至

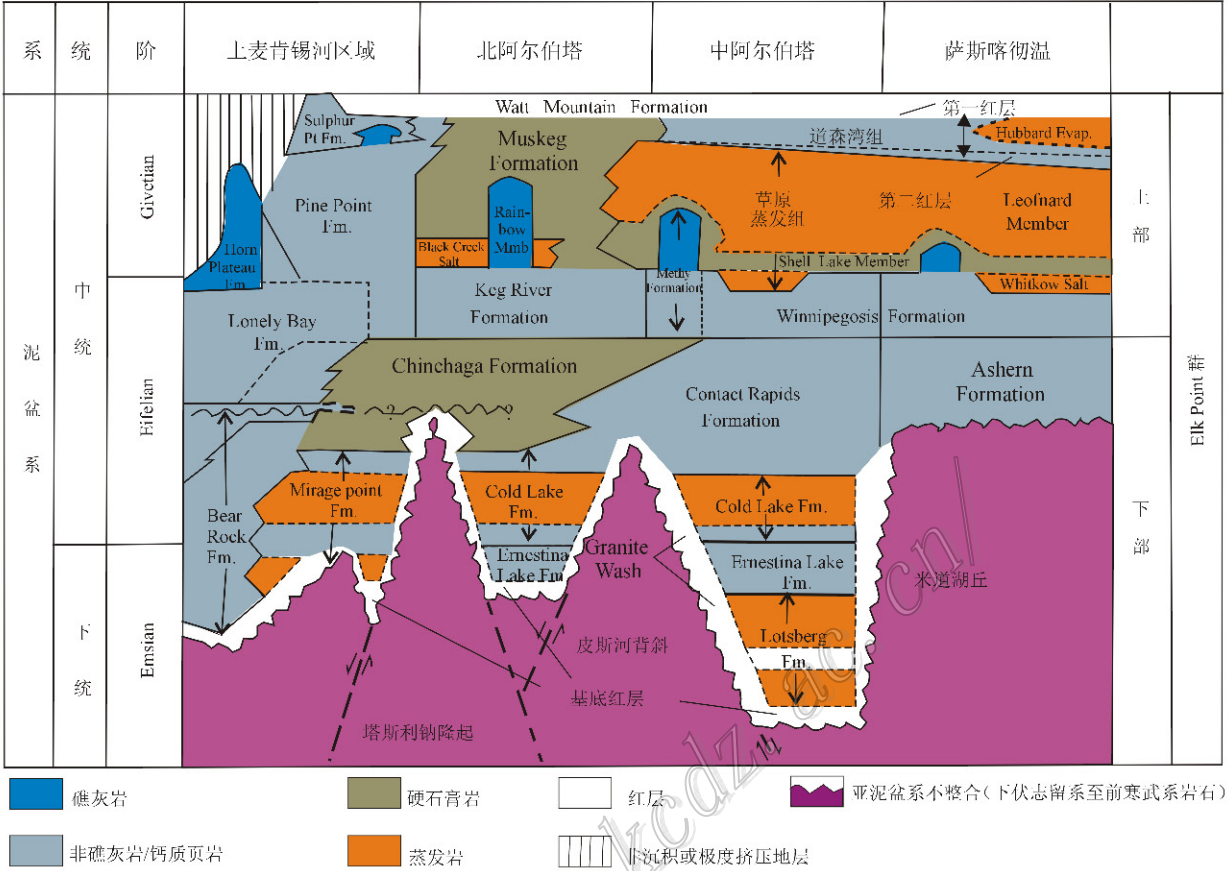


图 3 泥盆系 Elk Point 群岩相和构造剖面图(引自 Grobe,2000)

Fig. 3 Table of formations of the Devonian Elk Point Group (modified after Grobe, 2000)

是现代,钾石盐矿物的改造、变质和再迁移过程似乎仍在继续(Warren,2000)。作者认为,在这一过程中很可能还包括有大量光卤石的分解和钾石盐矿物的再次结晶。

3 索西钾盐矿床特征

3.1 钾盐矿床基本特征

索西矿区属于 Elk Point 盆地钾盐成矿区的组成部分,位于萨省索西镇的正北方向,拉斯特山湖以东 40 km,里贾纳以北 60 km,包括 KP377 和 KP392 两个区块(勘探许可区块编号),总面积约 781.04 km²(图 5)。

目前索西钾盐矿区已实施 7 个钻孔,所钻遇的钾盐矿层厚度及品位见表 1。各矿层盐类矿物主要由层状石盐(NaCl)、钾石盐(KCl)、光卤石(KCl·Mg-Cl₂·6H₂O)、少量硬石膏(CaSO₄)和白云石(MgCa-CO₃)组成。

3.2 钾盐沉积韵律

根据放射性测井曲线自然伽马、补偿中子和补偿密度曲线,结合岩相、岩矿鉴定和地球化学分析结果,综合确定了索西矿区钾盐矿层界面,并选取具有代表性的钻孔柱状图(图 6),该钻孔代表了整个矿区钾盐矿层界面特征,展示了草原蒸发岩组岩性、钾盐矿石品位、颗粒大小、光卤石及水不溶物纵向分布特征。

整个矿区钾盐矿层近水平展布,未发生明显变形,在 Patience Lake(裴逊思湖段)、Belle Plaine(贝尔平原段)、Esterhazy(埃思特哈特)和 3 个层位均有钾盐分布,矿石品位较高,累计厚度大。3 个主要钾盐矿段分别指示 3 次大的蒸发岩沉积旋回,钾盐矿物因溶解度大,最后析出,通常沉积于蒸发旋回的顶部。而每一钾盐矿段又包含数量不等的黏土或石盐夹层,指示其沉积期间并非持续干旱,而是遭受过多次淡化,因此形成多个次级的沉积旋回;但整个矿区,黏土夹层都有极好的稳定性及连续性,甚至可追溯几万米。该矿区除黏土夹层外,整个矿区的水不溶物含量均很低,钾盐矿石质量较高,钾石盐矿物

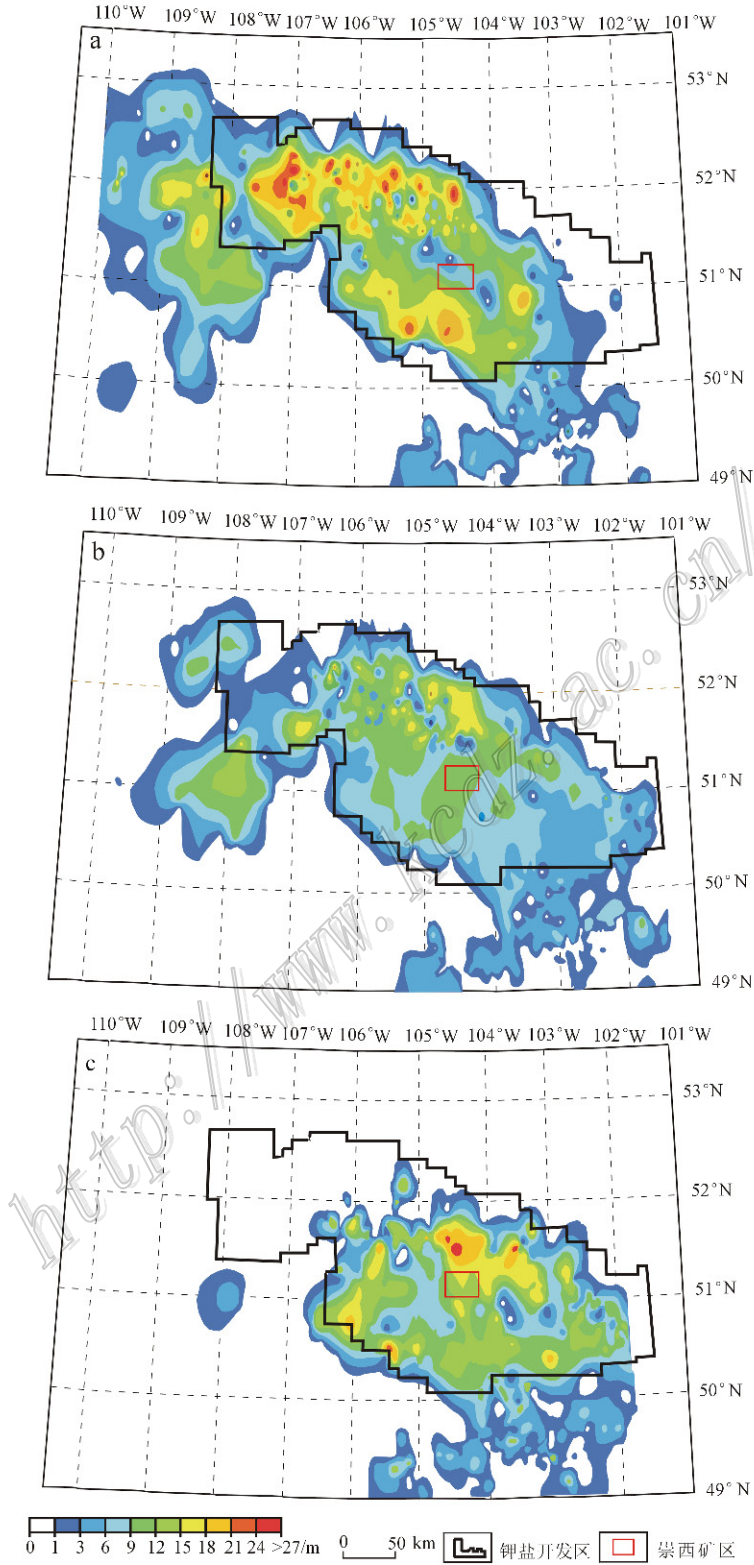


图 4 萨斯喀彻温省主要钾盐矿层厚度分布图(引自 Yang et al., 2009)
a. 裴逊思湖段; b. 贝尔平原段; c. 埃斯特哈段

Fig. 4 Potash member distribution within Saskatchewan (modified after Yang et al., 2009)
a. Patience Lake Member; b. Belle Plaine Member; c. Esterhazy Member

表 1 索西钾盐矿区矿层沉积厚度及品位
Table 1 Thickness and grade of potash-bearing members within the Southey Project Area

钻孔编号	裴逊思潮段			贝尔平原段			埃思特哈段		
	平均厚度 /m	平均 $w(K_2O)/\%$	平均 $w(水不溶物)/\%$	平均厚度 /m	平均 $w(K_2O)/\%$	平均 $w(水不溶物)/\%$	平均厚度 /m	平均 $w(K_2O)/\%$	平均 $w(水不溶物)/\%$
YCR1	8.57	19.36	8.42	8.19	18.95	3.65	8.48	16.36	2.27
YCR2	5.79	21.85	7.45	7.84	19.37	3.04	8.45	14.91	2.98
YCR3	9.96	18.47	9.12	7.42	21.4	3.72	8.72	14.27	2.31
YCR5	6.12	19.99	6.27	8.19	19.66	3.16	8.08	19.95	2.56
YCR7	5.95	18.39	8.19	8.24	18.33	3.02	7.59	11.17	2.31
YCR8	5.61	16.18	6.73	14.03	13.1	2.04	8.39	11.99	1.54
YCR9	6.98	15.51	5.03	8.29	18.81	2.88	9.81	19.24	3.01

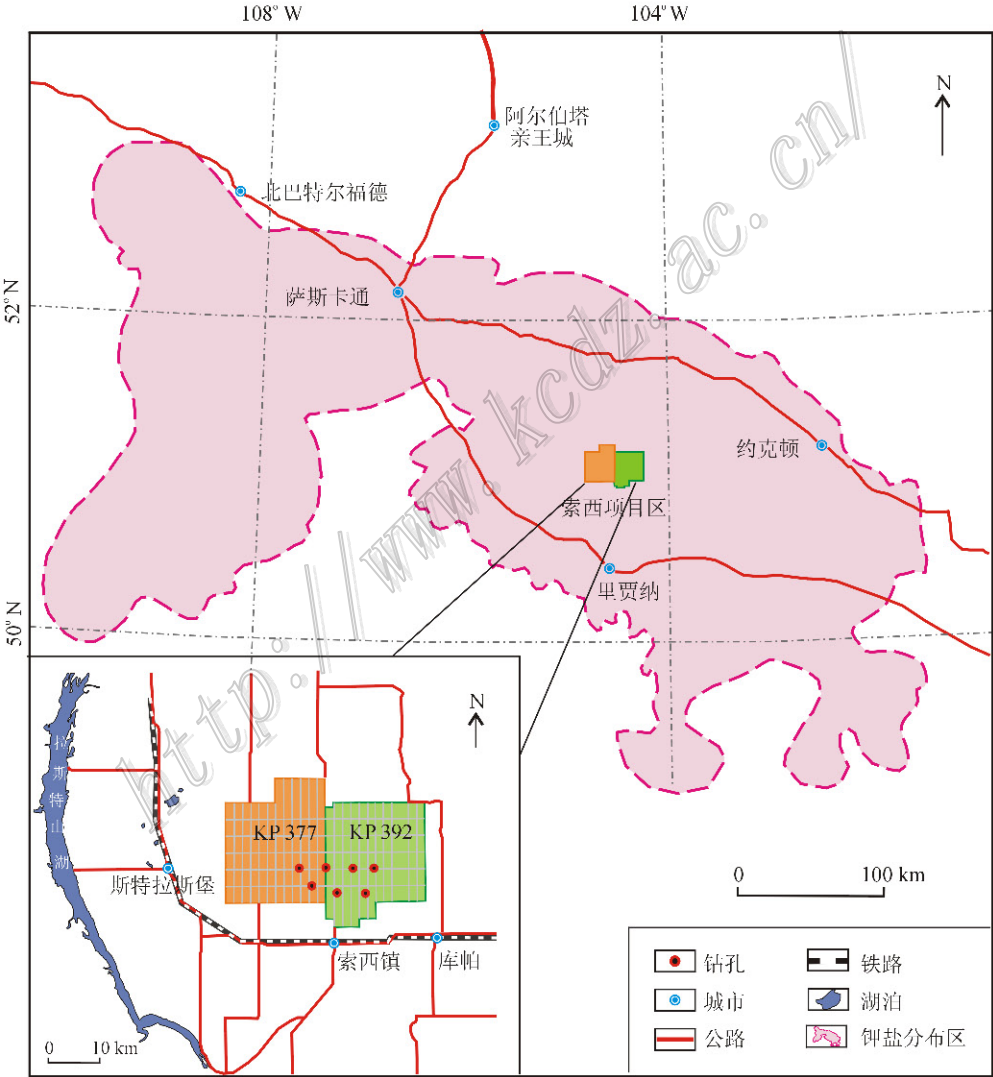


图 5 索西矿权区及钻孔位置
Fig. 5 The location of Southey Project Area and drill holes

颗粒从上至下有逐渐增大的趋势，光卤石则主要出现在 1290 m 以下，并在艾斯特哈组(Esterhazy)占有相当份额(图 6)。有多项研究显示，下部钾盐矿层受次生改造的程度要大于上部(Schwerdtner, 1964; Wardlaw, 1968; McIntosh et al., 1968)。3 个矿段的基本特征如下：

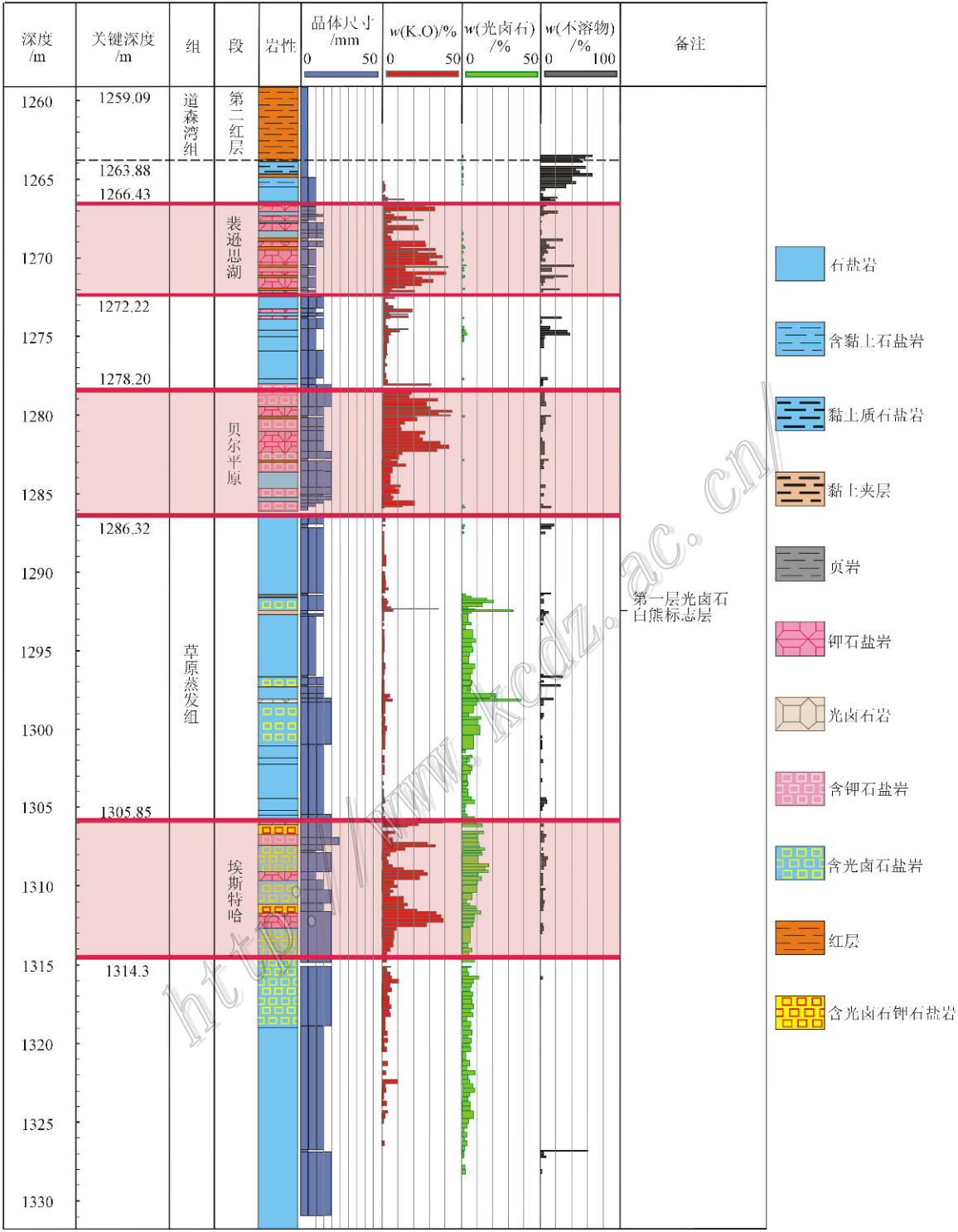


图 6 索西矿区钾盐沉积柱状图 (据 Piché 等, 2013 修编)

Fig. 6 Generalized stratigraphic column of potash sedimentation within the Southey Project Area (modified after Piché et al., 2013)

(1) 裴逊思湖段(Patience Lake) 度 5.6~9.9 m, 品位较高, $w(K_2O)$ 介于 15.51%~21.85%。典型的裴逊斯湖钾石盐矿床由细粒-同晶裴逊斯湖段顶界面埋深平均为 1258 m, 矿层厚

质-等粒径钾盐、石盐和黏土混合物构成。黏土等水不溶物含量 5.03%~8.42%,表现为孔隙内浸染状充填物或为独立的细脉。在矿区的西南部钻遇 100%光卤石薄层,除去光卤石分布的区域,矿层品位相对稳定, $w(K_2O)$ 变化只有 2%~3%。整个矿层自西北向东南减薄, K_2O 品位略有降低,光卤石含量增加。

(2) 贝尔平原段(Belle Plaine)

贝尔平原段顶界面埋深平均为 1270 m,在充煤实施的 7 个钻孔中,贝尔平原段平均总厚度约为 8 m,相对稳定,但在有光卤石出现的区域,厚度超过 14 m。从局部来看,从上层裴逊思潮段到下层贝尔平原段钾石盐矿物粒度逐渐增大,而黏土矿物含量逐渐减小,黏土矿物赋存在晶间或裂隙中,呈薄层状,也有呈纹层状似黏土层产出,整个研究区也有相同趋势。和裴逊思潮段相似,贝尔平原段钾盐层被一富含黏土的低品位石盐岩层分成上、下 2 层,平均厚度分别为 5.84 m 和 1.51 m。将其分开的贫钾夹层厚度平均为 1.53 m。贝尔平原段 $w(K_2O)$ 平均为 13.1%~21.4%,该段向东南逐渐增厚, K_2O 品位逐渐降低,而向西北逐渐减薄, K_2O 品位逐渐升高。

贝尔平原段下部的 White Bear 段由黏土层、低品位钾石盐层及石盐岩层组成,该矿段钾石盐品位较低,且盐层薄,主要作为地层标志层,开采不甚理想。

(3) 埃斯特哈段(Esterhazy)

埃斯特哈段位于钾盐矿层最下部,在研究区实施的 7 个钻孔中都有钻遇。在索西矿区,埃斯特哈段钾矿夹层主要由相对洁净、中-粗粒钾石盐和石盐及部分赋存于孔隙间的光卤石组成,其钾矿晶体粒度是所有萨省钾矿层中最大的,同时黏土含量最低。与裴逊思潮段及贝尔平原段比较,在本矿区,埃斯特哈段厚度、钾矿化和品位连续性都较差,因此整体上 K_2O 平均含量较低,且 K_2O 品位异质性较强,矿层 $w(K_2O)$ 变化于 11.17%~19.95%,变化幅度可达 8%;在实施的 7 个钻孔中有 4 个钻孔 K_2O 品位低于 15%; $w(K_2O)$ 平均为 15.31%,不溶物平均含量约为 2.97%。5 个钻孔光卤石含量大于 6%,平均为 8%~10%。各钻孔中光卤石含量不同,大量光卤石沉积集中在矿区西南部,表明该区域整个钾盐矿层内都有光卤石沉积。埃斯特哈段向东北增厚, K_2O 品位呈逐渐升高趋势。

4 矿床成因分析

钾盐矿床属于典型的化学蒸发岩沉积矿床,其形成必须具备封闭的成钾盆地、高浓度的富钾卤水和持续的蒸发条件。通过对研究区钾盐成矿条件综合分析,剖析其矿床成因,主要从以下几个方面进行讨论。

4.1 构造环境

4.1.1 局限海相地台环境

泥盆纪 Winnipegosis 期(约 380 Ma)(Baadsgaard, 1987),Elk Point 大盆地北部生物礁大量生长,近于连续形成大的礁灰岩堤(图 2),限制了该盆地与广海的沟通和海水循环,为封闭水文环境的形成创造了条件,有利于海水的蒸发浓缩;海水流入受限,但非完全隔绝,这样能在很长的地质年代中,始终维持蒸发量超过海水补给量的蒸发环境,让成矿物质源源不断地输送到蒸发岩盆地,十分有利于成盐矿化。

4.1.2 多级盆地的形成

中泥盆世,Elk Point 大盆地内的差异性升降运动所形成的局部构造隆起,形成了伸入地台内部的狭长海道和多级盆地,巧妙地塑造了多级阻隔的局限水文环境。由于各级盆地之间流通不畅,在钾盐富集成矿过程中,形成典型的多级储集-迁移模式,将成矿物质(氯化钾等)逐级搬运至终端盆地,最后在萨斯喀彻温次级盆地富集成矿,形成了世界上最大的钾盐矿区。而索西矿床就位于萨斯喀彻温次级盆地的中部,是十分有利的成矿位置。

4.1.3 钾盐成矿后期构造稳定,保存条件好

该区显生宙地层呈近水平展布;褶皱、断裂构造及岩浆活动不发育。索西矿区除局部出现盐下礁灰岩隆起及小的盐溶塌陷外,总体上钾盐矿层保存完好,没有受到强烈的后期改造和破坏,可见,区域构造的稳定保障了该钾盐矿床免受破坏。

4.2 古地理条件

中泥盆世,Elk Point 盆地位于南纬 0~15°,气候干热,十分有利于海水蒸发。此外该盆地不仅面积广阔,盆底地形平缓,且海水较浅。据 Kendall (1975)计算,在 Elk Point 大盆地北部礁灰岩堤发育起来之前,萨斯喀彻温次级盆地海水只有几十米深,而当盆地与外海水文循环受限后,强烈的蒸发作用导致海平面迅速下降,成为巨型蒸发岩及钾盐矿床

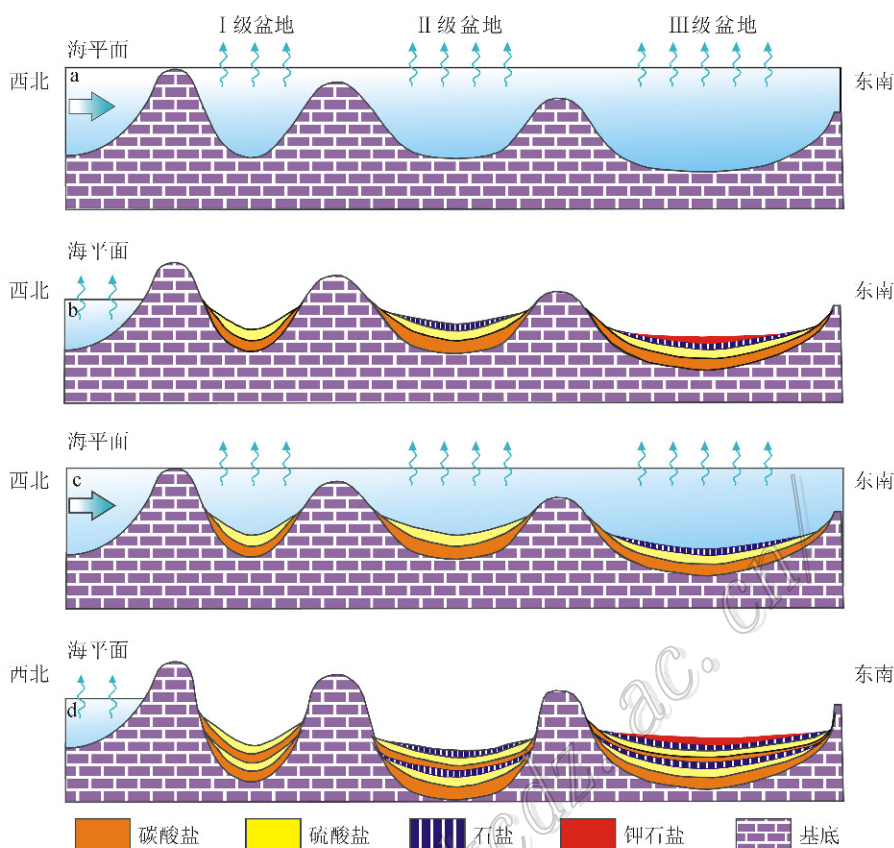


图 7 萨斯喀彻温省钾盐沉积成矿过程模式图

Fig. 7 Generalized metallogenetic model of potash setimentation in Saskatchewan

沉积的理想场所,而索西矿区位于最后蒸发浓缩的中心部位,十分有利于富集成矿。

4.3 物源补给丰富

形成一个超大规模的蒸发岩矿床,需要蒸发掉巨大的海水体积;100 m 高的海水柱只能产生 1.5 m 厚的蒸发岩层,而要形成 350 m 厚的盐岩矿床,至少需要蒸发掉超过 20 km 高的海水柱,因此单次海水入侵很难形成巨厚的盐类矿床。尤其是对于索西矿区位于广阔而浅的 Elk Point 蒸发岩盆地,需要在相当长的地质时代里,有持续的海水供应,才有可能沉积如此巨厚的蒸发岩矿床。因此,长时间的海水补给及多次的海侵-海退旋回,有效保障了持续的物质补给。

4.4 钾盐成矿模式

根据 Elk Point 盆地的基底构造(图 3)及沉积特征,提出了草原蒸发岩组(Prairie formation)钾盐的沉积模式(图 7)。

早泥盆世时期,北美克拉通边缘抬升及北部塔斯利纳隆起和西阿尔伯塔隆起,造就了 Elk Point 盆

地局限的水文环境;盆地基底发生差异升降运动,将盆地分隔成 3 个主要的次级盆地。自此,Elk Point 盆地开始蒸发沉积演化历史。

图 7a: 海平面升高,海水由西北方向进入 Elk Point 大盆地,最早进入西北部盆地(I 级盆地),随着海侵面积的不断加大,海水开始向东南挺进,依次进入阿尔伯塔中部盆地(II 级盆地)和萨斯喀彻温次级盆地(III 级盆地)。

图 7b: 海平面下降,Elk Point 盆地与外海隔绝,进入蒸发沉积阶段,依次形成碳酸盐(方解石)、硫酸盐(石膏)和石盐,到钾石盐析出阶段时,卤水浓度很大,卤水体积已浓缩至原水体的 1%~1.5%,部分富钾卤水以残余卤水方式渗入到石盐颗粒间,成为晶间卤水。继续蒸发,则会导致钾盐矿物析出。但钾盐通常沉积于远离入海口的盆地终端,而离入海口近的次级凹地因常常受到淡水补给,频繁遭到淡化,因此很难达到钾石盐饱和析出阶段。

图 7c: 海平面再次上升,淡的海水再次进入 I、II 级盆地,首先与残余的卤水混合形成具有一定浓

度的卤水,同时选择性的溶解易溶性矿物,这一富集过程可能经历多次反复旋回,逐渐使卤水变成富钾、钠的高浓度卤水,最后进入终端萨斯喀彻温盆地。而整个 Elk Point 盆地呈狭长状,全长 1600 km,在卤水的长距离搬运过程中,较不易溶的一些盐类矿物会先后在迁移途中逐级沉淀,给易溶的钾镁盐矿物在终端盆地沉积创造了条件。

图 7d: 海平面再次下降,Elk Point 盆地与外海再次隔绝,在干燥、高温气候条件下,进入新一轮的蒸发成盐成钾期,在成矿过程中,远离入海口的萨斯喀彻温盆地,因很少受到淡水的干扰,又富含高浓度的富钾卤水,十分有利于蒸发成矿。其中钾盐矿物(主要为钾石盐和光卤石)因其溶解度大,通常最后析出,主要分布于蒸发岩沉积序列的中上部 and 顶部,在平面上则分布在盆地的沉积中心,这与多项钻探工程的验证结果相一致,钾盐矿床总是位于萨斯喀彻温次级盆地的草原蒸发岩组上部;而离入海口近的 I、II 级盆地,在成矿位置上较为不利,易遭受淡化,不具备形成巨型钾盐矿床的条件,迄今为止,在这两个盆地也未发现有工业价值的钾盐矿层。同时,伴随沉积过程,负荷重力逐渐加强,沉积盆地也将发生不同程度的沉降,为后期巨厚蒸发岩的堆积提供了有效场所(空间)。据前人研究成果,Elk Point 盆地的 3 个次级盆地的沉降速率存在一定的差异,其中阿尔伯特中部盆地的沉降幅度最大,沉积了 4 层盐岩,而其余 2 个盆地的沉降幅度较小,且沉降时间较晚(Grobe, 2000)。

5 结 论

(1) 加拿大萨斯喀彻温省索西矿区钾盐资源量丰富,主要赋存于中泥盆统 Elk Point 群上部 Prairie Evaporite 组,含矿段主要包含 Esterhazy、Belle Plaine 和 Patience Lake 3 套钾盐层;该区普查阶段通过实施 7 个钻孔,获得 KCl 控制资源量为 9.64 亿吨,推断资源量(KCl)为 37.66 亿吨。

(2) 索西矿区矿层稳定,似水平状展布,埋深 1250~1550 m;钾矿石品位高, K_2O 含量 11.17%~21.85%;主要盐类矿物包括石盐($NaCl$)、钾石盐(KCl)、光卤石($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$)和少量硬石膏($CaSO_4$)及白云石($MgCaCO_3$)。

(3) 钾盐矿段之间的层状石盐岩夹层,为典型的浅水-暂时性盐湖沉积环境,并保留有明显的原生

沉积特征;而钾盐矿层因普遍受到后期成岩作用的改造,表现为明显的次生沉积特征,这种钾石盐矿物的改造、变质和再迁移过程今天仍在继续,因此对这一成岩过程开展系统研究,对于后期勘探和开发有着重要的实际意义。

(4) 综合分析了 Elk Point 盆地及索西矿区的钾盐矿床成因,在构造位置上,索西矿床位于盆地最有利的局限海相地台环境内;盆地规模大,湖盆浅,有利于卤水的快速蒸发;多次海侵-海退旋回,保障了长期持续的物质补给;多级盆地形成的多级储集-迁移模式,有利于成矿物质向终端盆地搬运、富集成矿;钾盐成矿后,区域构造稳定,没有受到强烈的后期改造和破坏,保存条件好。

志 谢 感谢中国地质科学院矿产资源研究所吴必豪研究员、原地矿部曲懿华教授在本文写作过程中给予的关怀、指导和建议。

参考文献/References

- 齐 文. 2010. 北美地质演化与钾盐成矿[J]. 地质学报, 84(11): 1576-1584.
- 杨文光. 2013. 加拿大萨斯喀彻温省钾盐矿藏地质[J]. 中国井矿盐, 44(4): 23-31.
- 宋国明. 2007. 加拿大钾盐是世界钾肥工业的关键[J]. 国土资源情报, 11: 22-23.
- Beadsgaard H. 1987. Rb-Sr and K-Ca isotope systematics in minerals from potassium horizons in the prairie evaporite formation, Saskatchewan, Canada[J]. Chemical Geology (Isotope Geoscience Section), 66: 1-15.
- Brodylo L A and Spencer R J. 1987. Depositional environment of the middle devonian telegraph salts, Alberta, Canada[J]. Bulletin Canadian Petroleum Geology, 35: 186-196.
- Garrett D E. 1996. Potash deposits, proceeding, properties and uses [M]. London: Chapman & Hall. 1-744.
- Gendzwill D J. 1978. Winnipegosis mounds and prairie evaporite formation of Saskatchewan—seismic study [J]. Bulletin American Association Petroleum Geologists, 62: 73-86.
- Grobe M. 2000. Distribution and thickness of salt within the devonian Elk Point group, western Canada sedimentary basin: Earth Sciences Report 2000-02[R]. Alberta: Alberta Research Council. 1-12.
- Halabura S G. 2005. Technical report for subsurface mineral permit KP 286, Jansen Area[R]. Saskatoon, Saskatchewan: North Rim Ex-

- ploration. 12.
- Halabura S P and Hardy M P. 2007. An overview of the geology of solution mining of potash in Saskatchewan[R]. Halifax, Nova Scotia: Solution Mining Research Institute. 13.
- Holter M. 1969. The middle devonian prairie evaporite of Saskatchewan: Saskatchewan department of mineral resources report 123[R]. Saskatoon: Department of Mineral Resources Geological Sciences Branch Industrial Minerals Division. 1-133.
- Kendall A C. 1975. The middle devonian winnipegosis and lower prairie evaporite formations of the commercial potash areas[R]. Saskatoon: Saskatchewan Geological Survey. 61-65.
- Koehler G, Kyser T K, Enkin R and Irving E. 1997. Paleomagnetic and isotopic evidence for the diagenesis and alteration of evaporites in the paleozoic Elk Point basin, Saskatchewan, Canada[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 34:1619-1629.
- MacIntosh R A and Wardlaw N C. 1968. Barren halite bodies in the sylvinite mining zone at Esterhazy, Saskatchewan[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 5: 1221-1238.
- Mossop G and I Shetsen. 1994. Geological atlas of the western Canada sedimentary basin [R]. Alberta: Canadian Society of Petroleum Geologists and Alberta Research Council. 504p.
- Piché L and Mackintosh D. 2013. Yancoal Canada Resources Co., LTD-2013 potash resource assessment for KP377&KP392 Southey, Saskatchewan, Canada[R]. Saskatoon: North Rim Exploration Ltd. 43p.
- Schwerdtner W M. 1964. Genesis of potash rocks in middle devonian prairie evaporite formation of Saskatchewan[J]. Bulletin American Association Petroleum Geologists, 48: 1108-1115.
- Wardlaw N C. 1968. Carnallite-sylvite relationships in the middle devonian prairie evaporite formation, Saskatchewan[J]. Geological Society America Bulletin, 79: 1273-1294.
- Warren J K. 2000. Geological controls on the quality of potash[A]. In: Geertmann R M ed. 8th world salt symposium[C], Amsterdam: Elsevier. 173-180.
- Warren J K. 2006. Evaporites, sediments, resources and hydrocarbons [M]. Germany: Springer. 1-1052.
- Warren J K. 2010. Evaporites through times: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits[J]. Earth-Science Reviews, 98:217-268.
- Williams H, Hoffman P, Lewry J, Monger J and Rivers T. 1991. Anatomy of North America: Thematic geologic portrayals of the continent [J]. Tectonophysics, 187(1-3):117-134.
- Yang C, Jensen G and Beranyi J. 2009. The stratigraphic framework of the potash-rich members of the middle devonian upper Prairie Evaporite Formation, Saskatchewan[R]. Saskatoon: Ministry of Energy and Resources, Saskatchewan Geological Survey. 28p.
- Zharkov M A. 1988. Devonian evaporite basins[A]. In: McMillan N J, Embry A F and Glass D J, eds. Devonian of the world: Proceedings of the second international symposium on the devonian system: Volume II, Sedimentation[C]. Canada: Canadian Society of Petroleum Geologists. 14:415-427.