北美地质演化与钾盐成矿

齐文[1,2)]

1）中国地质科学院矿产资源研究所，北京，100037；

2）国土资源部盐湖资源与环境重点实验室，北京，100037

内容提要：北美大陆拥有世界上最大的钾盐矿床，北美大陆的钾盐储量占全球已探明钾盐储量的一半数。本文在总结北美大陆地质构造单元划分、地质演化历史的基础上，重点分析了晚古生代地台沉积序列及其与钾盐矿床形成的关系，指出钾盐主要形成于欠补偿的海相地台型盆地，个别形成于海陆交互相的克拉通边缘地堑/裂谷盆地中；钾盐层主要位于海相台地序列的最后一个旋廻（Kaskaskia 序列），以及从台地向前陆盆地转化的过渡阶段（Absaroka 序列），当海相台地转化为前陆盆地之后，就不再有钾盐矿床的形成。北美晚古生代钾盐大规模集中成矿作用，也与该时期北美大陆古赤道位置密切相关。钾盐矿床的形成是构造－盆地－古气候等多种因素耦合的结果，钾盐找矿是有章可循的。

关键词：北美大陆；地质演化；钾盐成矿

可溶性钾盐矿产是重要的工业原料，主要用于生产农业肥料，是农作物必需的氮磷钾三大肥之一。目前全球有 14 个国家生产钾盐：加拿大、美国、巴西、智利、俄罗斯、白俄罗斯、德国、英国、法国、西班牙、乌克兰、以色列、约旦、中国，此外，还有其它 13 个国家拥有钾盐资源：土库曼斯坦、哈萨克斯坦、阿富汗、巴基斯坦、泰国、老挝、埃塞俄比亚、刚果、伊朗、意大利、澳大利亚、墨西哥、秘鲁，但尚未得到开采利用。中国、印度和巴西作为经济快速发展的人口与农业大国，是世界钾盐的主要市场。

世界上钾盐资源的分布很不均匀。我国已知氯化钾资源总量约在 10 亿吨左右（郑绵平等，2006），主要为第四纪盐湖卤水钾资源（青海柴达木盆地盐湖、新疆罗布泊盐湖）。我国历来重视吸收国外钾盐找矿经验，袁见齐先生曾系统总结了国外钾盐矿床成因理论（1980a，1980b），依据察尔汗钾盐湖发现❶，在袁见齐先生的倡导下，我国盐类地质工作者结合中国中、新生代钾盐找矿实践发展了中国特色的陆相成钾理论（袁见齐等，1983；1985；吴必豪等，1986；郑绵平，1986；刘群等，1987；郑绵平等，1989；张彭熹等，1993；杨谦等，1993；袁见齐等，1995；刘成林等，1999）❷，第四纪盐湖钾矿研究成果斐然（张彭熹等，1987；郑绵平等，1989；王弭力等，2001），但古代钾盐矿床找矿没有突破，仅在云南江城勐野井有一个第三纪小型钾石盐矿床（刘群等，1987；曲懿华等，1998）。为借鉴国外钾盐找矿经验，钱自强等（1994）编著了《国外矿床地质丛书－钾盐矿床》对国外钾盐矿床进行了系统介绍，很多学者也分析研究了国外钾盐矿床的成矿条件（朱洪发等，1985；宣之强等，1999；魏东岩，1999，2001；刘成林等，2006；李钟模，2007）。刘群（1995）借鉴西伯利亚涅帕钾盐矿床成矿条件与找矿经验，提出"结合我国情况，应以古生代为重点，如南方的寒武系、华北奥陶系，西北石炭系，其次是中生代四川盆地西部成都坳陷（西靠龙门一大巴台缘褶带）的三叠系，藏东一滇西海陆过渡相的侏罗系都应进行相应的找矿、勘探工作。" 郑绵平等（2006）也指出，"中国中西部的塔里木盆地、滇西－羌塘盆地、上扬子盆地和鄂尔多斯盆地仍具有成钾远景，宜作为今后中国找钾的主攻目标"。

国外钾盐矿床主要产于海相沉积序列，而我国"除三叠系外，对寒武、奥陶、泥盆、石炭及第三纪海相膏盐层位工作不多"。因此，李悦言，谢家荣（1963），袁见齐先生等都先继提出重视我国海相找钾调查。袁见齐先生建议"找钾工作的重点亦应转

注：本文为科技部公益性行业专项（编号 200811001）和国外风险勘查资金项目（编号 2010）资助的成果。

收稿日期：2010-08-23；改回日期：2010-09-20；责任编辑：郝梓国。

作者简介：齐文，男，1966 年生。研究员。主要从事钾盐、盐湖资源与环境研究。电话：010－68999549；Email：qiwenqw@gmail.com；Fax：(010)80115555 转 709706。

向海相层位”,“前期的基础地质研究应尽快先行一步,构造、岩相－古地理、物探等方面应有所加强,以便取得分析成钾条件的可靠资料,为进一步找矿打下基础”(袁见齐,1988)。“以海相为主,海陆相和新老地层并举”[3]。还应指出,四川七普和吴应林等对四川三叠系(吴应林等,1994;林耀庭和陈绍兰,2008)[4,5],刘群等和地矿部第三地质队及新疆地矿局分别对陕北奥陶系和塔里木石炭系、第三系及华北寒武系(刘群等,1994,1997)[6],云南地质八队和郑绵平等对滇东北和四川震旦系和寒武系(郑绵平和李银彩,1978)等也作了相当多海相蒸发岩系成盐找钾的地质调查和前期研究工作。

北美(加拿大、美国)已探明钾盐储量占全球钾盐储量一半(表 1)(Jasinski, S. M. 2009),其钾盐主要产出于古生代(S、D、C、P),特别是泥盆纪 ELK 盆地沉积了世界上最大的钾盐矿床,是海相钾盐矿床的典型代表。近年来我们在加拿大萨斯喀彻温省开展海外钾盐风险勘查,也取得了很好的找矿成果[7]。本文从区域地质演化角度,探讨了北美钾盐矿床形成条件与成矿规律,为走出国门开展国外钾盐风险地质勘查、以及借鉴国外钾矿成矿条件、指导国内钾盐找矿提供参考借鉴。

表 1　全球钾资源储量概况(K_2O,百万吨)

Table 1　World potash reserves and reserve base(K_2O, Mmt)

国家	储量	基础储量
加拿大	4400	11000
俄罗斯	1800	2200
白俄罗斯	750	1000
德国	710	850
巴西	300	600
世界总量	8300	18000

1　北美主要地质单元

北美大陆(包括格陵兰岛)主要有四个一级地质构造单元,构成以地盾-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格局(图 1)(Williams H, 1991; King P B. 1977),钾盐矿床均形成于地台区:

(1)加拿大地盾:大面积出露前寒武纪结晶火成岩和高度变质岩石,构造稳定,构成了北美大陆的核心,从南部的苏必利尔湖(美国东北各州的局部)向北延伸到北极群岛和格陵兰岛,面积达 800 万平方公里。

(2)地台:在加拿大地盾外围,在前寒武纪基底之上覆盖了相对平坦和微倾斜的古生代至中生代、新生代沉积地层。北美中部地台(Interior Platform)构成了北美大陆腹地的大平原,美国西部科罗拉多高原、加拿大地盾内部的哈德逊湾均属于地台区。这些地台、地盾与基底共同构成了北美克拉通。北美钾盐矿床主要形成于地台环境。

(3)显生宙造山带:环绕北美克拉通边缘呈线性分布,厚度巨大、多期活动、变形强烈。东部为阿巴拉契亚造山带(Appalachian)、西部为科罗迪亚造山带(Cordilleran)、北部为埃尔斯米尔造山带(Ellesmere / Innuitian)和加里东造山带(Caledonian)。

(4)中生代和新生代大陆边缘:位于造山带外围,主要为沉积岩,构成现代海岸平原、大陆架、大陆斜坡。

2　北美地质演化概要

现代板块构造理论认为,北美大陆的形成是板块裂解与碰撞的产物。

加拿大地盾是北美大陆最早形成的陆壳,最古老的岩石年龄大于 5.7 亿年,常达 20 亿年至 35 亿年,由一系列太古代板片、元古代岛弧与沉积盆地逐步拼合而成。早古生代(寒武纪、奥陶纪、志留纪),北美板块是独立的大陆(劳伦亚古陆,Laurentia),泥盆纪时劳伦亚陆块与波罗的陆块碰撞,形成欧美超大陆(Euramerica),二叠纪时地球上的主要陆块都碰撞到一起,形成了一个泛大陆(Pangaea),至侏罗纪时泛大陆裂解为劳亚和冈瓦纳两个超大陆。劳伦亚是劳亚古陆的一部分,至白垩纪时劳伦亚是一个独立的大陆,即北美洲。

3　地台沉积序列与成钾建造

加拿大地盾自寒武纪升出海面,以后没有再接受长期连续的海侵影响,主要是相对海平面的整体上升与下降(海侵与海退),以及较小的局部相对升降(盆地与穹隆),从而在地台区形成了自晚寒武纪以来厚度不等的灰岩、碎屑岩、页岩和蒸发岩沉积。靠近地盾的地台区,沉积物厚度薄、沉积间断多;而远离地盾的地台区,沉积物厚度大,沉积较连续,形成了楔形克拉通覆盖充填。根据 Lawrence Sloss (1963),北美古生代地台沉积物可以识别出三个大的区域性不整合,分别是早奥陶纪末、早泥盆纪末和

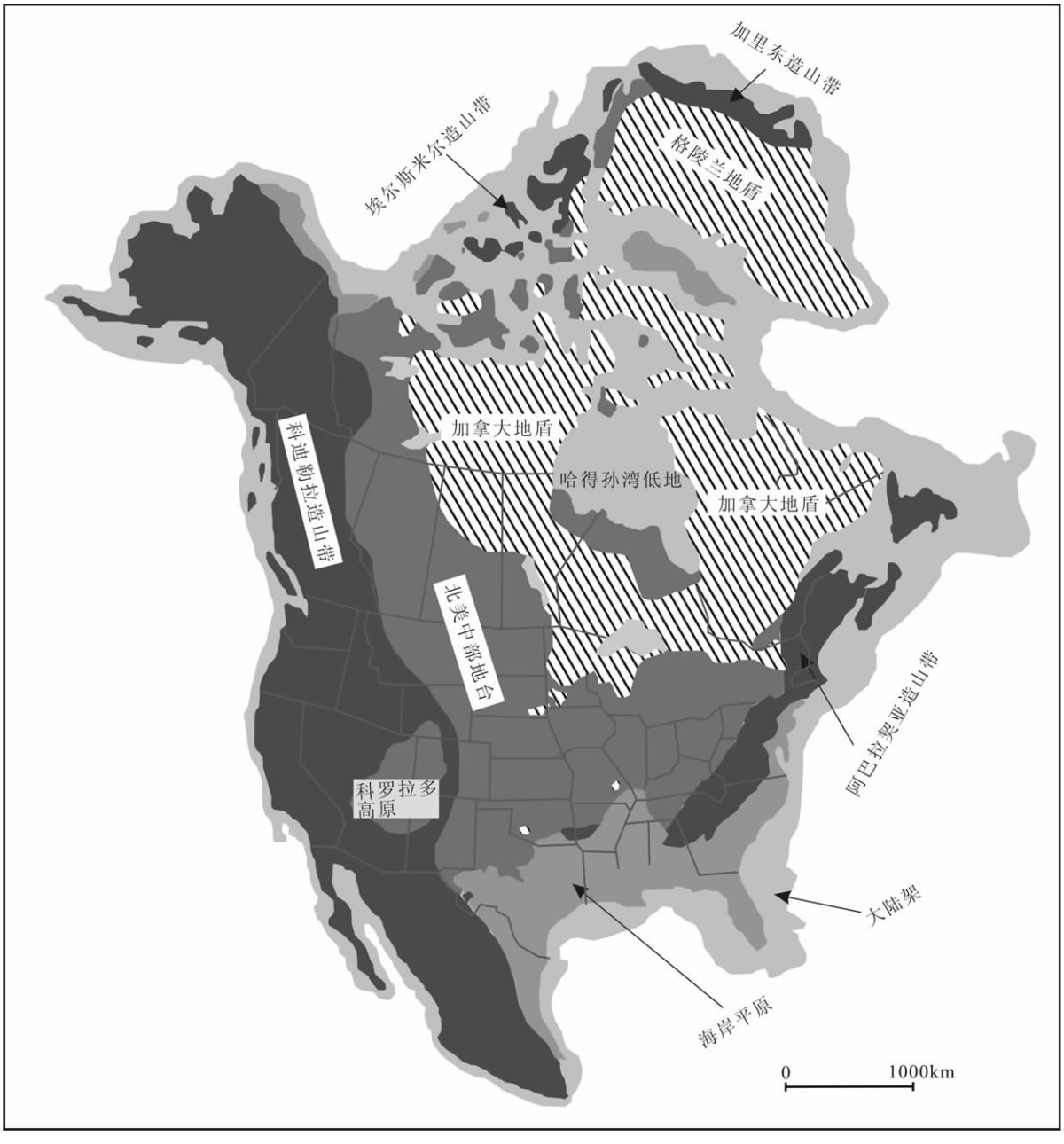

图 1 北美大陆构造单元划分(据 Williams H, 1991)

Fig. 1 Tectonic elements of the North American continent(after Williams H, 1991)

早石炭纪 Mississippian 阶末,这三个区域不整合将古生代地台沉积划分出 4 个序列: Sauk, Tippecanoe, Kaskaskia 和 Absaroka 序列(图 3, 图中海平面变化主要参考 Pitman III W., 1978)。而中、新生代地台沉积在早侏罗纪和白垩纪末有两个区域不整合面,形成了 Zuni 和 Tejas 两个沉积序列。每个序列自下而上进一步分为海进与海退序列,以海进序列为主,海退序列记录很少。

(1) Sauk 序列(寒武系至下奥陶统):寒武纪时,陆缘海向大陆不断发展,环绕陆核形成了三个带:内部近岸带,为浅色砂岩、粉砂岩、泥岩夹薄层灰岩;中间带为灰岩、白云岩带;外带靠近地槽边缘,其特征为深色粉砂岩、泥岩、砂岩以及不纯的灰岩、深水燧石等。剖面上多数地区自下而上从砂岩向页岩和灰岩过渡。寒武纪与奥陶纪接触面附近没有沉积间断与岩性变化,仅有化石区别。早奥陶世末海退,结束 Sauk 序列。

(2) Tippecanoe 序列(中奥陶统至下泥盆统):中奥陶世 Tippecanoe 海进形成边缘海,直到泥盆纪末。该套海进序列底部的砂岩成熟度高,厚度不大

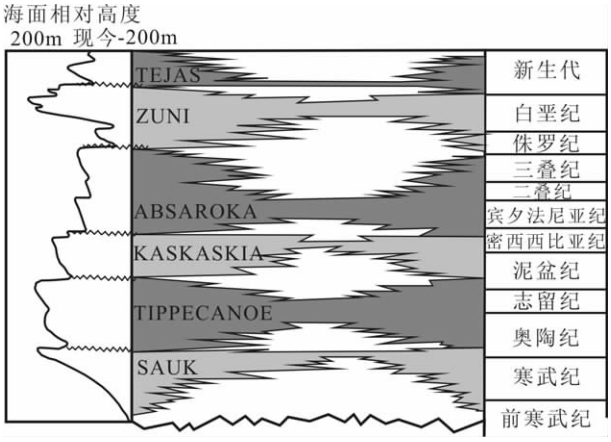

图 2　北美克拉通 6 个沉积序列(据 sloss,1963)

Fig. 2　The six cratonic depositional sequences (after Sloss, 1963)

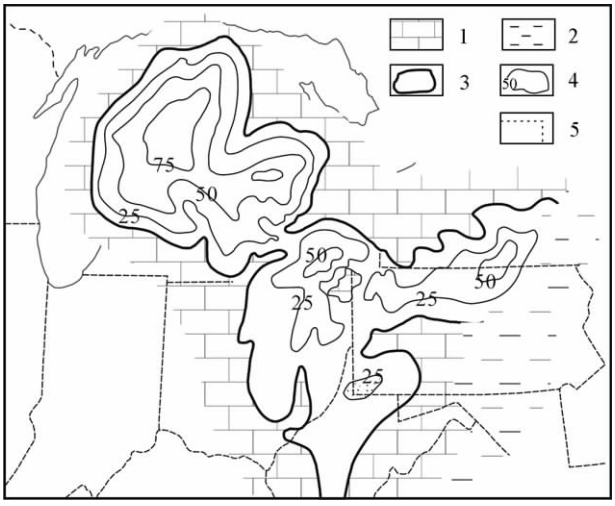

图 3　北美大湖区上志留系蒸发盆地岩相古地理略图(据 Alling H I 和 Brifgs L I,1961)

Fig. 3　Evaporite faces of the Upper Silurian Series in Michigan Basin and the Great Lake area (after Alling H I and Briggs L I. 1961)

1—外围碳酸盐岩沉积区；2—东部碎屑沉积区；3—盐类沉积边界；4—石盐百分含量等值线；5—州界线

1—Carbonate sediments surrounding the evaporites; 2—Clastic sediments on the east; 3—Evaporite boundary; 4—The contours of the percentage of halite in evaporite sequences; 5—state boundaries

但分布面积很广。中、晚奥陶世克拉通东侧受 Appalachian 地槽抬升的影响,沉积物中粘土成分较多,而克拉通西部、北部则以厚度、成分均一的灰岩广泛分布为特征,在加拿大地盾区广泛分布其剥蚀残余。由于边缘海坡度很小,在海岸边缘形成了几百公里宽的浅水低能带,常干涸形成萨布哈(Sabkhas)环境。中古生代开始出现礁灰岩,志留纪灰岩以白云岩为主,浅水、干旱环境特征明显,常见盐类矿物及盐溶角砾。晚志留纪气候更趋炎热干旱,在 Michigan 盆地和 New York 盆地形成了局限海盆,礁灰岩阻隔了盆地与开阔海的充分连通,盆地内沉积大量蒸发岩,Michigan 盆地出现了工业钾盐堆积(图 4, Alling H I 和 Briggs L I,1961)。

(3) Kaskaskia 序列(中泥盆统至密西西比亚系):北美地台 Kaskaskia 海沉积始于早泥盆纪末,底部为石英砂岩,部分地区为砂质灰岩。至中泥盆纪,克拉通东侧处于温暖的浅水碳酸盐台地相,有少量礁灰岩分布,Michigan 盆地再次沉积了更多蒸发岩。下伏志留纪蒸发岩被大量淋滤,导致泥盆纪盖层坍塌,形成盐溶角砾。克拉通西侧北美大平原北部(加拿大西部盆地至美国 Williston 盆地),则形成了巨量蒸发岩堆积,形成了世界上最大的钾盐矿床(Harper C T, 2003)。

Kaskaskia 海侵初始阶段,在盆地西北部形成局限海盆,沉积了部分蒸发岩(图 4a)。随后海侵进一步发展到整个加拿大西部沉积盆地(图 4b),形成了更大面积的灰岩、蒸发岩堆积。随后,蒸发岩沉积中止,灰岩、生物礁大量发育,每个礁体直径一般不足 1km,通常生长于浅水、低能环境。中泥盆世末,位于 Tathlina Arch 的生物礁生长成 Presqu'ile 壁障滩(图 4b),近于连续,阻隔了盆地与外海的连通,限制了海水补给,盆地内基底不均匀抬升导致的地形变化形成了自西北向东南逐级浓缩的多级盆地系,盆地内海水持续蒸发浓缩,从美国 Williston 盆地向北进入加拿大萨斯卡彻温南部和 Alberta 东北部,形成了厚达 300m 的"大草原组"蒸发岩,初期为石膏、石盐,在上部 30～70m 堆积了世界上最大的钾盐矿床,钾盐资源量达 500 亿吨以上(Fuzesy A, 1982; Holter M. E, 1969)。晚泥盆世海侵有所发展(图 4c),加拿大西部沉积盆地蒸发岩/白云岩表现为萨布哈环境沉积,沉积中心向南迁移,进入美国 Williston 盆地。

泥盆纪末经历了一次海退,在泥盆系-下石炭统(密西西比亚系)界面处形成了一层标志性的、厚度不足 10 m 但分布广泛的高铀沥青质页岩。颗粒骨骼灰岩是密西西比亚系沉积物典型特征,密西西比亚系末的砂岩代表了 Kaskaskia 序列的海退旋迴。

早石炭纪时,加拿大东部沿海地区(新不伦什维克)因一系列板块碰撞作用和阿巴拉契亚造山运动,在元古代基底之上,形成了一系列复杂的北东向延

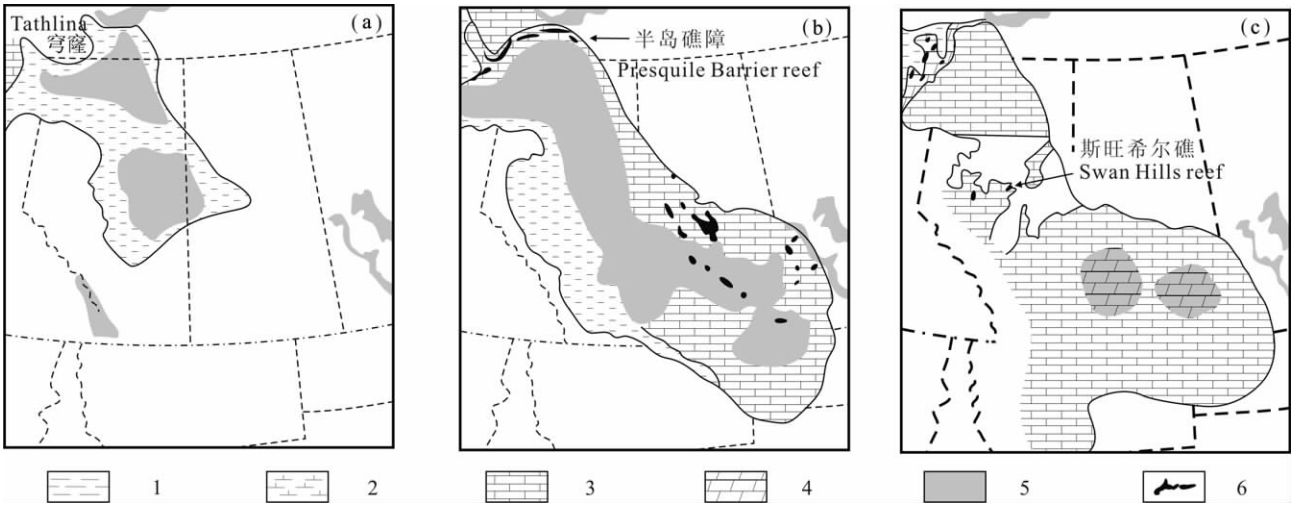

图 4 北美西部克拉通盆地泥盆纪岩相古地理与蒸发盐分布(据 Stearn C W et al, 1979)

Fig. 4 Facies map of the Devonian rocks of the craton basin in western North America (after Stearn C W et al,1979)

(a)—中泥盆统下 Elk Point 群;(b)—中泥盆统上 Elk Point 群;(c)—中-上泥盆统 Beaverhill Lake 组;1—页岩,细碎屑岩;2—钙质页岩;3—灰岩;4—白云岩;5—蒸发盐岩;6—礁

(a)—Middle Devonian, Lower Elk Point Group; (b)—Middle Devonian, Upper Elk Point Group; (c)—Middle to Late Devonian, Beaverhill Lake Formation; 1—shale, fine clastics; 2—calcareous shale; 3—limestone; 4—dolomite; 5—evaporites; 6—reefs

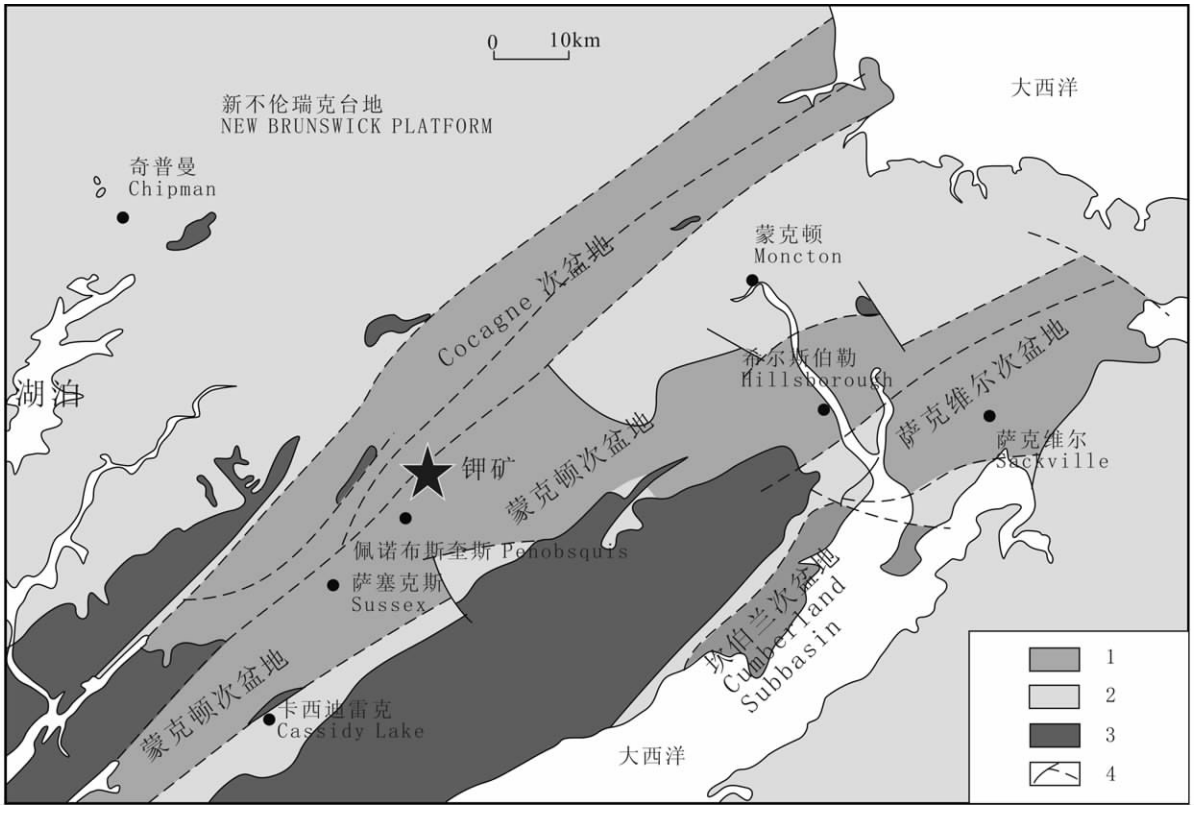

图 5 加拿大东部新不伦瑞克 Maritimes 盆地石炭纪地堑成钾盆地(据 Webb T C, 2009)

Fig. 5 The Carboniferous graben structure of the Maritimes Basin in New Brunswick, Eastern Canada(after Webb T C,2009)

1—石炭纪深盆地;2—石炭纪浅盆地;3—出露结晶基底;4—断层

1—Carboniferous deep basins; 2—carboniferous shallow basins; 3—exposed crystalline uplifts; 4—faults

伸的地堑－地垒构造和山间盆地系（Maritimes Basin），盆地受多期活动的断层控制，盆地内沉积了巨厚的冲洪积－湖积。链状地堑在东北端与海洋相通，各次盆地形成半封闭环境，海水长期补给，从而在 Moncton 等多个次盆地的下石炭统 Windsor 群形成了蒸发岩/钾盐堆积，并在后期构造运动中形成了盐底辟、盐脊、盐墙等复杂变形构造（Peter C，2006；Webb T C，2009）。

（4）Absaroka 序列（宾夕法尼亚系至三叠系）：下石炭统（密西西比亚系）与上石炭统（宾夕法尼亚系）之间有一个区域性不整合面，不整合面之上的 Absaroka 序列与早、中古生代以碳酸盐岩和蒸发岩为主的地台序列有很大差异，由于地台周边全面抬升，导致碎屑沉积从各个方向进入盆地。这是台地环境向前陆盆地环境转变的过渡阶段。宾夕法尼亚系沉积体系早期主要分布于台地边缘，中期扩展到全部南部地台，沉积了广泛分布的页岩标志层和煤层。整套序列以海陆交互相为特征，包含很多小的高能和低能浅水韵律，组成了浅化巨旋回。在东部阿巴拉契亚构造带以陆相为主，沿地台西侧主要为海相大陆架环境，沉积了较薄的钙质砂岩、钙质泥岩、灰岩和少量蒸发岩。在克拉通西南角（克拉通中轴隆起的南端，现今科罗拉多高原四州：犹它、亚里桑那、科罗拉多、新墨西哥，称为四州角），受西部科迪勒拉地槽和南部 Ouachita 地槽共同影响，晚古生代出现强烈的差异升降，形成共轭盆地，宾夕法尼亚系和二叠系红色长石砂岩最大沉积厚度达 7500m。早宾夕法尼亚纪，Absaroka 海侵进入四州角地区，超覆于中密西西比灰岩顶部不整合面之上。在宾夕法尼亚纪中晚期，Paradox 盆地西部边缘发育了一系列生物礁壁障滩，并发展成碎屑滩和泻湖，盆地与开阔海的联系受到局限，在盆地中央沉积了石膏、硬石膏、石盐等蒸发岩，蒸发岩外围相变为生物碎屑灰岩。蒸发岩沉积在 Missouri 期结束，其时沿东部断裂的隆起区强烈上升，大量碎屑充填了盆地，结束了盆地海侵的历史，盐类堆积受同沉积和后期构造运动影响，产生塑性流变和重定位（Wengerd，1954）。

至中二叠世，Absaroka 海向地台西南退缩，仅在美国西德克萨斯州和新墨西哥州的南部形成残留海盆地系，沿克拉通地台往北（肯萨斯州和奥克拉荷马州）以陆相为主、局部泻湖相蒸发岩堆积。二叠纪残留海盆被两个台地分隔为三个次盆地，其中 Delaware 盆地形成了工业钾盐堆积（Frenzel，1988）。

（5）Zuni 序列和 Tejas 序列：Zuni 序列的时间自中侏罗世至古新世，早期主要局限于北美西部的科迪勒拉，至晚侏罗世和白垩纪“海道”超覆至克拉通内部和大西洋边缘盆地。Zuni 序列进一步分为三个海侵－海退次旋回。底部旋回以源自克拉通内的硅质碎屑为主，自晚侏罗世开始，西部造山带成为碎屑主要来源，并在造山带附近堆积了很厚的碎屑岩，往东过渡为页岩和台地碳酸盐岩。古新世基本为碎屑岩。

Tejas 序列是最新的沉积层序，由晚古新世至全新世地层组成。分布范围小，由冲洪积、湖积和更新世冰水堆积组成，构成地表松散堆积层（刘里斌等译，2000）。

4　北美钾盐矿床成矿规律

如前所述，北美成钾盆地主要有志留纪 Michigan 盆地、泥盆纪 Elk Point 盆地、石炭纪 Maritimes 盆地、Paradox 盆地和二叠纪 Delaware 盆地。北美大陆晚古生代钾盐矿床的大规模集中成矿作用，是该时期特定的大地构造背景、沉积盆地演化、古气候条件等多种有利成钾条件耦合的结果。主要表现在：

（1）成盐盆地主要为海相地台盆地，分布于北美克拉通上有显生宙沉积覆盖的地盾区。大陆边缘盆地虽然有较厚沉积，但都没有形成钾盐矿床。

蒸发岩盆地形成于地台上相对稳定的构造环境，如地台靠近地盾一侧，或大型穹隆边缘。盆地处于欠补偿状态，沉积厚度小，以碳酸盐岩为主，少量碎屑岩、蒸发岩。而地台区的构造相对活动地带，则处于补偿－过补偿状态，沉积厚度明显增大，碎屑成分相对较多，不利于蒸发岩的形成。

另一种成钾盆地为地堑环境（或裂谷盆地），这种成钾盆地在北美仅有加拿大东部 Maritimes 盆地一例。和海相地台型盆地相反，这类成钾盆地位于克拉通边缘沉积区，地堑内部较周边的沉积厚度大，为海陆交互相，以粗碎屑为主。与现代非洲埃塞俄比亚靠近红海的达纳基尔（Danakil）地堑成钾条件类似。

（2）成钾盆地都有长期沉降、沉积历史，经历了多个海进－海退旋回。蒸发岩沉积都形成于晚古生代的几个海相沉积序列中（Tippecanoe，Kaskaskia 和 Absaroka 序列），包括：① Tippecanoe 序列，志留纪末在美国 Michigan 盆地形成了局限海盆和工业钾盐堆积；② Kaskaskia 序列，泥盆纪早中期在 Elk

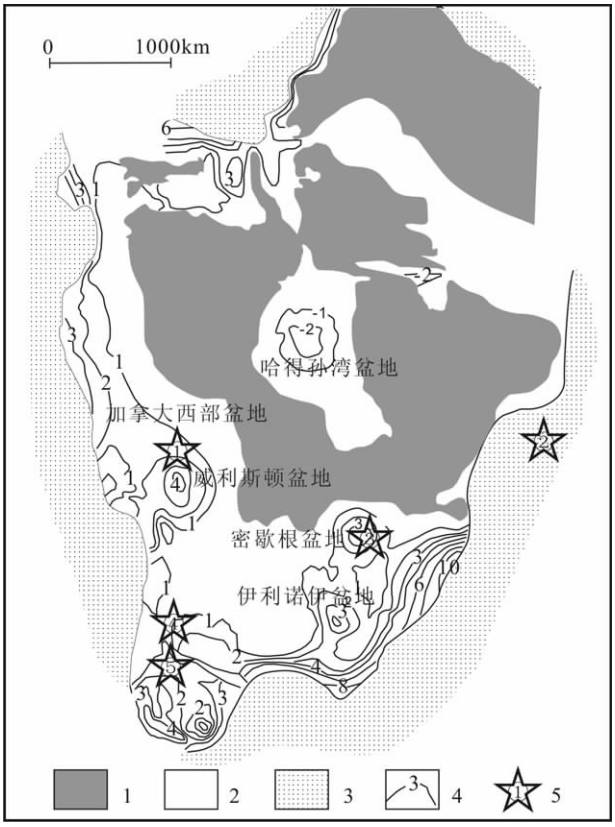

图 6 北美显生宙克拉通沉积(据 Mill A D,2008)

Fig. 6 Phanerozoic sediments of the North America craton(after Mill A D,2008)

1—克拉通地盾；2—克拉通地台；3—克拉通边缘盆地；4—显生宙地层厚度等值线(km)；5—成盐盆地：(①—泥盆纪 Elk Point-Williston 盆地；②—早石炭世 Maritimes 盆地；③—志留纪-泥盆纪 Michigan 盆地；④—晚石炭世 Paradox 盆地；⑤—二叠纪 Delaware 盆地)

1—Cratonic shield; 2—cratonic platform; 3—cratonic margin basins; 4—contours of Phanerozoic stratal thickness in kilometres; 5—evaporite basins: (①—Devonian Elk Point-Williston Basin; ②—Early Carboniferous Maritimes Basin; ③—Silurian-Devonian Michigan Basin; ④—Late Carboniferous Paradox Basin; ⑤—Permian-Delaware Basin

Point 盆地和 Williston 盆地沉积了“大草原组蒸发岩(Prairie Evaporite Fm.)”，堆积形成了世界上最大的钾盐矿床。石炭纪早期在加拿大东海岸 Maritimes 盆地沉积了 Windsor Group 蒸发岩/钾盐；③ Absaroka 序列，上石炭统在美国犹它州 Paradox 盆地形成了 Hermosa 组 Paradox 段蒸发岩，二叠纪时在美国新墨西哥州 Delaware 盆地形成了 Salado 组蒸发岩。

钾盐矿床的大规模集中成矿作用主要发生于海相台地序列的最后一个旋回(Kaskaskia 序列)，以及从台地向前陆盆地转化的过渡阶段(Absaroka 序列)。蒸发岩形成于主海退或次级海退旋回中，部分盆地有多个成盐韵律。当盆地性质从海相台地转化为前陆盆地性质时，就不再有钾盐矿床的形成。

(3) 古纬度古气候条件：根据古地磁研究，北美大陆在显生宙从南半球向北半球漂移，并伴随有逆时针的左旋运动(图 8)。寒武纪时赤道位于北美大陆北端，志留—泥盆纪赤道位于北美大陆北部，至晚古生代末的二叠纪，赤道位于美国南部，侏罗纪时赤道位置已经离开北美，进入南美。显然，北美晚古生代成钾盆地都位于古赤道附近。志留纪-泥盆纪钾盐成矿带(Elk Point 盆地和 Williston 盆地)位于美-加边境附近，到石炭纪—二叠纪，随着古赤道位置的南移，钾盐成矿带(Maritimes 盆地，Paradox 盆地和 Delaware 盆地)也同步向南迁移到美国南部。

(4) 钾盐的形成需要相对封闭的盆地条件，要有长期的海水补给和持续的蒸发浓缩环境。北美成钾盆地的封闭条件主要表现为：在海侵或海退过程中，形成了伸入地台内部的狭长海道或多级盆地，各次级盆地之间流通不畅、逐级浓缩成钾。形成阻隔的主要有两类地质体：一为生物礁壁障，二为局部构造隆起。

志留纪和泥盆纪的成盐成钾盆地以浅水和萨布哈台地环境为主，以欠补偿沉积为特征。石炭纪和二叠纪，地台沉积序列向前陆盆地序列过渡，盆地差异升降大，碎屑补给丰富，以过补偿为特征。

5 结论

(1) 钾盐矿床的形成受特定地质条件的制约，是构造-盆地-古气候等多种因素耦合作用的结果，因此钾盐矿床的找矿也是有章可循的。

(2) 北美钾盐地质勘查工作程度较高，但仍然有一定找矿潜力。如泥盆纪萨斯喀彻温—威利斯顿钾盐成矿带已经有 9 个开采中的钾矿，但该成钾带为稳定地台盆地类型，成盐成钾盆地面积广，有多个次级成钾旋回和多次沉积中心迁移现象，因此至今仍然有大范围的有利成钾区域还没有开展勘查，这也是近年该区钾盐勘查新一轮高潮的原因。早石炭世新不伦瑞克滨海盆地成钾区的构造相对复杂，已经在 Moncton 次盆地发现钾矿，但周边仍然有不少盐构造物探异常，值得进一步勘查。

(3) 我国目前新一轮海相钾盐找矿工作，不仅需要依据矿化异常线索部署钻探工作，更需要加强基础地质研究，深入分析大地构造、盆地演化、古地理与古气候条件等，提升理论认识，准确圈定找钾靶区。

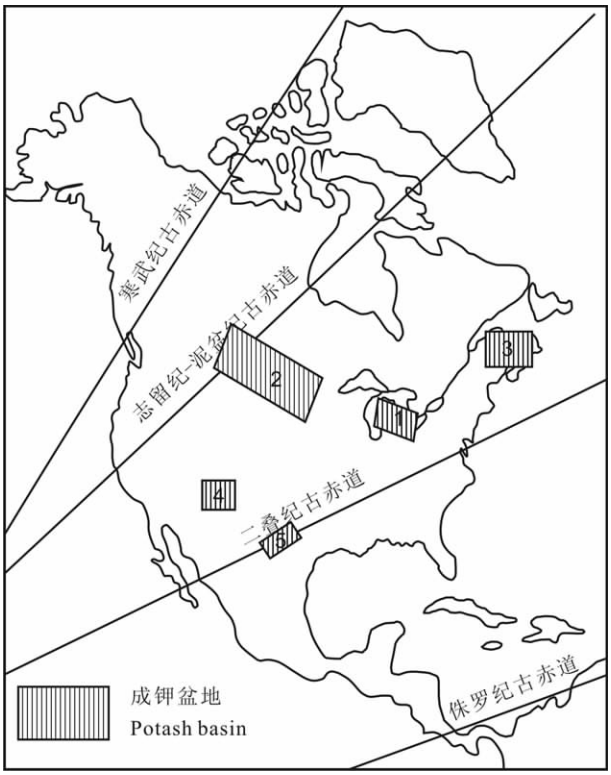

图 7　北美古赤道位置变化(改自 Stearn C W,1979)

Fig. 7　The position of paleoequator of North America(modified form Stearn CW,1979)

1—志留纪密歇根盆地;2—泥盆纪萨斯喀彻温-威利斯顿盆地;3—早石炭世滨海盆地;4—晚石炭世 Paradox 盆地;5—二叠纪 Delaware 盆地

1—Silurian-Devonian Michigan basin; 2—Devonian Elk Point-Williston basin; 3—Early Carboniferous Maritimes basin; 4—Late Carboniferous Paradox Basin; 5—Permian-Delaware basin

致谢:本文写作过程中,李权衡同学协助查找资料和清绘图件;中川国际矿业控股有限公司为本人开展北美钾盐研究提供了诸多条件,郑绵平院士对本稿提出了有益的建议和修改,在此表示衷心感谢!

注　释

❶ 郑绵平,1958,柴达木盐湖科学调查报告,中国科学院柴达木盐湖科学调查队。

❷ 地质科学院地矿所五室郑绵平,王明彦,刘文高,1975,我国东部白垩——老第三纪红色盆地成钾远景初步分析(内部资料)。

❸ 地质科学院地矿所五室钾盐组郑绵平,1975,关于我国钾盐找矿方向的探讨,钾盐地质学习班资料选编(四川省地质局第七普查大队编)。

❹ 地矿部第二地质大队,1984,四川盆地早、中三叠世成盐条件及找钾方向研究(内部报告)。

❺ 成都地质矿产所吴应林等,1985,上扬子盆地早、中三叠世岩相古地理与蒸发岩模式(内部报告)。

❻ 杜之岳,俞骥谷,陈继洲等,1989,中国含油气区成钾条件调查报告(内部资料)。

❼ 齐文,刘群贵,石永安等,2009,加拿大萨斯喀彻温省 KP488 区块钾盐矿勘查报告,中国地质科学院矿产资源研究所、中川国际矿业控股有限公司,内部资料,经全国储量中心组织评审并备案。2008 年郑绵平,齐文考察了加拿大萨斯喀彻温省钾盐,指导中川公司在萨省的钾盐地质工作。2009 年进一步开展勘查,获得优质氯化钾资源量数亿吨。

参　考　文　献

李钟模. 2007. 世界钾盐找矿实践对我国找钾的启示. 化工矿物与加工. 34(2):37～38.

林耀庭,陈绍兰. 2008. 论四川盆地下、中三叠统蒸发岩的生成模式、成盐机理及找钾展望. 盐湖研究,16(3):1～10.

刘成林,王弭力,焦鹏程,陈永志. 2006. 世界主要古代钾盐找矿实践与中国找钾对策. 化工矿产地质. 28(1):1～8.

刘成林,王弭力. 1999. 罗布泊第四纪沉积环境演化与成钾作用. 地球学报,20(增刊):264～270.

刘里斌等译,Morris W. Leighton 主编. 2000. AAPG 论文集 51,内克拉通盆地. 北京:石油工业出版社.

刘群,陈郁华,李银彩等. 1987. 中国中、新生代陆源碎屑-化学岩型盐类沉积. 北京:北京科学技术出版社,1～154.

刘群,陈郁华,李银彩等. 1987. 中国中新生代陆源碎屑-化学岩型盐类沉积. 北京:北京科学技术出版社.

刘群,杜之岳,陈郁华等. 1997. 陕北奥陶系和塔里木石炭系钾盐找矿远景. 北京:原子能出版社,1～237.

刘群,马丽芳等. 1994. 华北早寒武世岩相古地理与膏盐沉积. 北京:地质出版社.

刘群. 1995. 西伯利亚涅帕钾盐矿床地质、发现经过及其对我国找钾工作的启示. 地球学报. 16(1):45～54.

钱自强,曲一华,刘群编著. 1994. 国外矿床地质丛书 钾盐矿床,北京:地质出版社.

曲懿华,蔡克勤,等. 1998. 兰坪-思茅盆地钾盐成矿规律及预测. 北京:地质出版社.

王弭力,刘成林,焦鹏程,韩蔚田,宋松山,陈永志,杨智琛,樊卫东,李廷琪等. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源. 北京:地质出版社.

魏东岩. 1999. 试论钾盐矿床的成矿条件,化工矿产地质,21(1):4～6.

魏东岩. 2001. 美国新墨西哥州钾盐矿床及其开发,化工矿产地质,23(1):31～38.

吴必豪,段振豪,关玉华,连卫. 1986. 柴达木盆地察尔汗盐湖钾镁盐的沉积. 地质学报,5:286～296.

吴应林,张集庆,许效松等. 1994. 中国南方三叠纪岩相古地理与成矿作用. 北京:地质出版社.

谢家荣. 1963. 中国找钾问题. 见:袁见齐,谢家荣,叶连俊主编. 矿床学论文集,钾磷矿床研究. 北京:科学出版社,18～24.

宣之强,王连第. 1999. 中国钾盐 50 年, 化工矿产地质,21(3):181～187.

杨谦,吴必豪,王绳祖,蔡克勤,钱作华等. 1993. 察尔汗盐湖钾盐矿床地质. 北京:地质出版社,1～231.

袁见齐,霍承禹,蔡克勤. 1985. 干盐湖阶段的沉积特征兼论钾盐矿层的形成. 地球科学,10(4):1～9.

袁见齐,霍承禹,蔡克勤. 1983. 高山深盆的成盐环境-一种新的成盐模式的剖析. 地质论评. 29(2):159～165.

袁见齐,杨谦,孙大鹏,霍承禹,蔡克勤,王文达,刘训健. 1995. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件. 北京:地质出版社,1～216.

袁见齐. 1980a. 钾盐矿床成矿理论研究的若干问题. 地质论评. 26(1):56～59.

袁见齐. 1980b. 盐类矿床成因理论的新发展并论中国钾盐找矿问题. 化工矿产地质. (1):1～5.

袁见齐. 1988. 袁见齐教授给秦仲达部长的信. 化工矿产地质. 1996. 18(4).

张彭熹,张保珍,温格斯坦 T K,斯潘塞 R J. 1993. 古代异常钾盐蒸发岩的成因——以柴达木盆地察尔汗盐湖钾盐的形成为例. 北京:科学出版社,1～128.

张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖. 北京:科学出版社.

郑绵平, 向军,魏新俊,郑元等. 1989. 青藏高源盐湖. 北京:科学技术出版社.

郑绵平,李银彩. 1978. 上扬子区震旦-寒武系找钾可能性探讨. 地质科技,1:39～52.

郑绵平,齐文,张永生. 2006. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析. 地质通报. 25(11):1239～1246.

郑绵平. 1986. 中国地质科学院矿产地质研究所重要科技成果简介:柴达木盐湖科学调查报告(1958). 中国地质科学院矿产地质研究所所刊,2:17～18.

朱洪发,刘翠章. 1985. 从世界大型钾盐矿床形成的控制条件评述我国几个重要含盐系找钾前景. 矿物岩石. 5(3):51～59.

Alling H I, Briggs L I. 1961. Stratigraphy of Upper Silurian Cayugan evaporates. American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 45:515～547.

Fuzesy Anne. 1982. Potash in Saskatchewan. Saskatchewan Energy and Mines Report,181.

Harper C T. 2003. Geology, and Mineral and Petroleum Resources of Saskatchewan, Released by Saskatchewan Industry and Reources, Saskatchewan Geological Survey, Miscellaneous Report,2003-7. Printed by Western Litho Ltd.

Holter M E. 1969. The middle Devonian Prairie Evaporite of Saskatchewan. Saskatchewan Department of Mineral Resources Report,123.

Jasinski S M. 2009. Potash. Mineral Commodity Summaries, United Stated Geological Survey. http://minerals. usgs. gov/minerals/pubs/commodity/potash/ mcs-2009-potas. pdf.

King P B. 1977. The Evolution of North America. Revised ed. Princeton Univ Pr,216.

Mill A D. 2008. The Sedimentary Basins of the United States and Canada. Elsevier,591.

Peter St C. 2006. Geological relationship between the Cocagne Subbasin and Indian Mountain Deformed Zone, Maritimes Basin, New Brunswick, Canada. Geological Investigations in New Brunswick for 2005. Edited by G L Martin. New Brunswick Department of Natural Resources; Minerals, Policy and Planning Division. Mineral Resource Report,2006-3,103～183.

Pitman III W C. 1978. Relationship between eustasy and stratigraphic sequences of passive margins. Geological Society of American Bulletin,89:1389～1403.

Sloss LL. 1963. Sequences in the cratonic interior of North America. Geological Society of America Bulletin. 74:93～113.

Stearn C W, Carroll R L, Clark T H. 1979. Geological Evolution of North America. 3rd ed. Wiley, John & Sons, Incorporated; 566.

Webb T C. 2009. New Brunswick Potash: a Review of Developments and Potential Exploration Alternatives. New Brunswick Department of Natural Resources; Minerals, Policy and Planning Division. Information Circular,2008-4, 21.

Wengerd S A, Strickland J W. 1954. Pennsylvanian stratigraphy of the Paradox salt basin, Four Corners region, Colorado and Utah. American Association of Petroleum Geology Bulletin,38: 2157～2199.

Frenzel H N, Bloomer R R, Cline R B, Cys J M, Galley J E, Gibson W R, Hills J M, King W E. 1988. The permian basin region, in Sloss L L ed., Sedimentary cover-North American Craton: U. S., Geological Society of America, Geology of North America,D-2, 261～306.

Williams H, Hoffman P, Lewry J, Monger J, Rivers T. 1991 Anatomy of North America: thematic geologic portrayals of the continent. Tectonophysics,187(1-3):117～134.

The Evolution of North America and the Formation of Potash Deposits

QI wen[1,2)]

1) *Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Science. Beijing*, 100037;

2)*Open Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, CAGS. Beijing*, 100037

Abstract

North America possesses the biggest single potash deposits and half of the potash reserves in the world. Here we briefly summarize the major tectonic elements and geological evolution of North America, then reviewed the cratonic platform sequences in detail. By relating the potash deposits with the geological settings, we know that potash best developed in under-compensated intracratonic platform basins, and could also developed in graben or rifted marginal cratonic basins. Potash occurred in the last marine platform sequences (Kaskaskia), and the Absaroka sequences represented transition from marine facies to terrestrial facies. As to foreland basins, no potash found there yet. The extensive deposition of potash salts in North America in Paleozoic Era was associated closely with the position of paleoequator. Potash deposition was controlled by the combination of tectonic, depositional and climatic conditions, so the prospect of potash should follow these clues.

Key words: North America; Geological Evolution; Potash Deposits