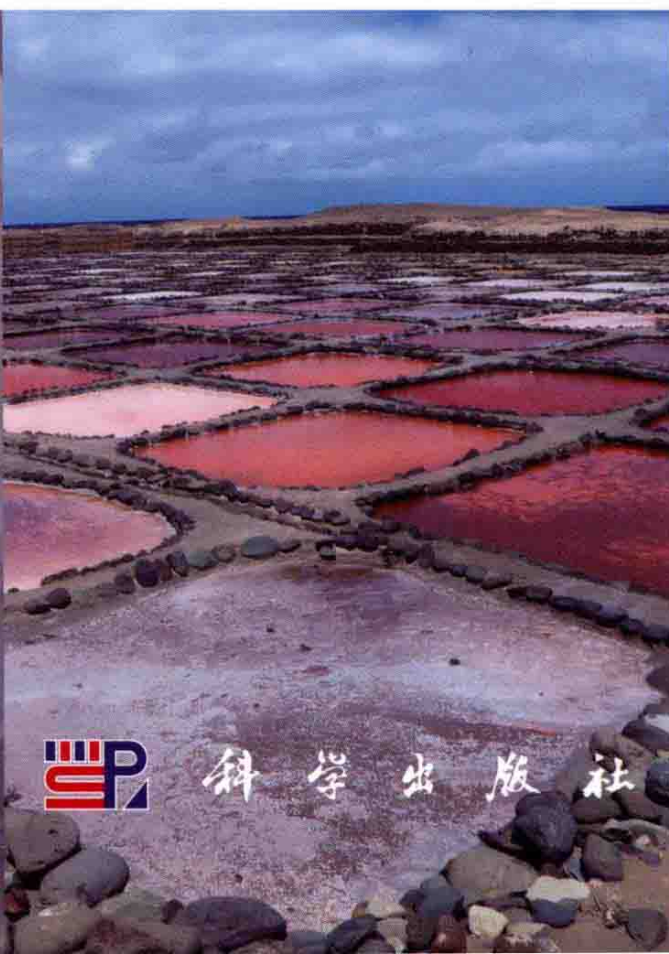




盐湖科学 概论

主 编

郑绵平 邓天龙 阿哈龙·奥伦



科学出版社

盐湖科学概论

主编 郑绵平 邓天龙 阿哈龙·奥伦

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书由国际盐湖学会汇聚了国内外在盐湖科学领域的专家撰写完成，集中反映了国际盐湖与盐业各领域的最新成果和发展趋势。全书共分四个部分：盐湖地质、盐湖化学化工、盐湖生物、盐湖生态与环境。本书内容丰富，资料新颖，对于推动国际盐湖科学和相关学科交叉融合发展、推动盐湖领域国际交流与合作、促进全球盐湖资源和环境的可持续发展，具有一定的学术价值和指导意义。

本书可作为盐湖科学研究的科技人员，地质学、化学、化学工程与技术、生物学、环境科学与工程、生态学等专业领域的教师、研究生、本科生的参考用书。

审图号：GS（2018）3052号

图书在版编目（CIP）数据

盐湖科学概论 / Introduction to Salt Lake Sciences: 英文 / 郑绵平, 邓天龙, (以) 阿哈龙·奥伦 (Aharon Oren) 主编. —北京: 科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-058409-0

I. ①盐… II. ①郑… ②邓… ③阿… III. ①盐湖-英文 IV. ①P941.78

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 173239 号

责任编辑: 孟美岑 陈姣姣 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京图阅盛世

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 267 000

定价: 248.00 元 (全 2 册)

(如有印刷质量问题, 我社负责调换)

序

本书是在天津科技大学于 2017 年 5 月召开的首次“盐湖与盐业国际青年培训班”的论文集，分英文和中文出版。

此次“盐湖与盐业国际青年培训班”由国际盐湖学会委托天津科技大学和中国地质科学院矿产资源研究所主办。天津科技大学化工与材料学院、海洋与环境学院始建于 1953 年，现拥有盐科学与工程博士后科研流动站，化学工程与技术一级学科博士学位授权点，海洋科学、材料科学与工程、环境科学与工程一级学科硕士学位授权点，教育部卤水资源综合利用创新团队，天津市制盐与盐化工创新团队，亚洲唯一的卤虫资源参考中心。在海卤水化工等领域的学科优势与特色显著，获得省部级科技成果奖一等奖及以上成果奖 3 项，为国家制盐与盐化工、卤水化工领域培养了大批高层次人才，享有“盐业黄埔”声誉。中国地质科学院矿产资源研究所始建于 1956 年，是我国唯一一所专门从事矿产资源研究的社会公益类科研机构，利用多学科交叉融合优势，指导和推动了一批找矿重大发现，为保障国家资源安全提供了科技支撑。该所下设的中国地质科学院盐湖资源与环境研究中心是唯一始创于北京的国家级盐湖（盐矿）综合利用单位，也有 60 余年历史。该中心以盐湖学为指导，分设盐类地质矿产、盐类化学化工、盐沉积和古今环境、盐生物与生态环境等团队，在全国设立了 7 个院士工作站和 3 个盐湖长期观测站。为青藏高原盐湖资源的发现和盐产业创建做出了重大贡献，获国家科学技术进步奖一、二等奖等十余个奖项。

传统的地球科学对于盐类研究主要集中于盐湖和古代盐类沉积，对于其他盐类聚集体，如潟湖、港湾、盐沼泽、盐碱地等研究较少，更未涉及其他行星的盐类聚集体。成盐元素约 25 种，由于其作用的广泛性和重要性以及近代科学技术的进步，对于盐类聚集体的研究已冲破单学科领域，不但在盐类、锂、钾等资源综合评价、综合开发、盐湖沉积与全球变化等科技领域日益扩大和深入，而且在生物学、医学、保健和环境生态学等也有了引人入胜的新发现，航天行星科学也开始涉及盐类研究领域，在宏观上已进入全球以至行星研究时期，在微观上已达到分子和基因层次；盐类及盐碱土开发已达到综合利用、整体开发的初始阶段。盐类科学研究已进入多学科交叉，在广度和深度上大为扩展的崭新时代。

在此，我衷心地希望此次“盐湖与盐业国际青年培训班”成为一个良好开端，它将会推进未来国际盐湖研究合作交流向着更快、更好的方向发展。

国际盐湖学会主席 郑绵平
中国工程院院士

前 言

在地球上盐湖广泛分布，盐湖中蕴藏着极其丰富的资源，在民生、工农业和高新产业等领域有着重要的科学意义和应用价值，开展盐湖科学研究和盐湖资源开发意义重大。迄今为止，人们对盐湖的认识还十分有限，盐湖资源的开发也面临技术、经济、环境等多重挑战。如何通过各领域间学科交叉和技术集成，实现对盐湖科学研究和盐湖资源开发的新突破，成为世界盐湖研究人员共同关注的课题。在这种形势下，促进国际盐湖学习的交流会显得很有必要；此次国际高级交流会由国际盐湖学会、天津科技大学和中国地质科学院矿产资源研究所主办，国家自然科学基金委员会、成都云图控股股份有限公司、国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司、益盐堂（应城）健康盐制盐有限公司、天齐锂业股份有限公司、青海中信国安科技发展有限公司和合肥国轩高科动力能源有限公司协办，主题是“青年科学家——盐湖与盐业的未来”，聚集国内、欧美及第三世界国家盐湖专家赴会讲学，旨在放眼国际盐湖科技，培养具有国际视野的国内外盐类青年科技人才，推动盐湖科学领域取得新的进展，同时为世界各地、不同学科的融合提供一个学术交流平台。

本书由国际盐湖科学各领域专家撰写，涉及地质、生物、生态、化学、化工等多学科，体现了盐湖科学领域的活跃性和广宽性，展现了不同的学术思想和创新理念。全书涉及盐湖地质、盐湖化学化工、盐湖生物、盐湖生态与环境 4 个领域，介绍国内外相关领域的基本研究方法和研究成果，使读者可以及时了解盐湖科技的进展。

国际高级交流会期间，来自不同国家的专家和青年学者针对各主题面临的挑战进行了热烈的研讨，并对国际盐湖科学研究提出了希望和建议：①大力开展盐类地质、矿产资源综合调查研究和综合开发；②开发新技术手段，大力研究和开发盐湖中独特而且丰富的生物资源在农业、工业、医药、环境、食品及材料等领域的应用；③大力开展盐区生态保护与产业污染防控体系研究；④以盐类矿产资源的合理、高效、环保综合利用及工程化、产业化为目标，推进盐类资源和盐境的可持续发展。

本书由郑绵平、邓天龙和 Aharon Oren 统稿，国内外专家分章编著。胡佳音、王士强、郭亚飞、余晓平、孔维刚、张思思、李珑、林勇杰等参与本书国外论文的翻译和校对工作。本书的出版还得到了天津科技大学、中国地质科学院矿产资源研究所的大力支持，在此一并表示感谢！

由于编著者水平有限，书中难免存在缺点和纰漏，我们诚挚地希望专家、学者、同行和读者批评指正。

郑绵平 邓天龙 Aharon Oren

2017 年 5 月

目 录

序
前言

第一部分 盐湖地质

盐湖资源与盐湖卤水地球化学	3
盐湖沉积与古气候、古环境研究	16
盐湖资源综合调查	27
盐岩锶同位素特征及物质来源分析	41

第二部分 盐湖化学化工

盐湖化工分离过程中的固溶体现象、相平衡及模拟	51
水盐溶液性质研究的实验方法及模型建立	61
中国盐湖化学资源开发利用	71
蒸发工艺技术	82
盐湖元素在发光材料和合成化学中的应用	88
工业结晶	101

第三部分 盐湖生物

高盐环境微生物学	113
嗜盐微生物生理学与生物化学	123
盐湖卤虫资源及其在水产养殖中的应用	133

第四部分 盐湖生态与环境

半对流盐湖生态学	143
盐湖及其周围环境的管理	148
青藏高原盐湖生物资源	155
多极化栖息地——咸水湖	164
盐湖生态系统的结构、功能和动力学特性	171



第一部分 盐湖地质

郑绵平 尹宏伟



盐湖资源与盐湖卤水地球化学

郑绵平^{1, 2}

1. 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 北京 100037;

2. 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

摘要: 全球第四纪盐湖主要分布于近代第四纪早期干旱和半干旱气候带, 大致可将全球盐湖分布区划分为二带和二区, 将全球盐湖概分为凉冷型(盐湖区冬季气温低于 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)和温暖型(冬季气温为 $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)两大类型。盐湖是一种综合性的宝贵的自然资源, 人类已从盐湖中大量开采盐类资源, 综合利用取得长足进步。钾盐湖已成为现代钾盐资源的重要来源, 锂盐湖已成为世界锂资源的重要来源。盐湖卤水按照化学成分可分成三种主要化学类型: 碳酸盐型、硫酸盐型和氯化物型。笔者以青藏高原为例, 揭示了青藏高原盐湖水化学类型由南往北、由碳酸盐到氯化物型分布规律及其相应成盐成矿专属性。

1 全球盐湖分布概况

地球上的第四纪盐湖主要分布于近代第四纪早期干旱和半干旱气候带, 大致可将全球盐湖分布区划分为二带和二区^[1, 2]: I. 北半球盐湖带; II. 南半球盐湖带; III. 赤道-非洲盐湖区; IV. 南极盐湖区。北半球盐湖带(I): 大致分布于北纬 $5^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 主要集中于北纬 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。此带概分为: I_1 . 北非盐湖亚带; I_2 . 欧亚盐湖亚带; I_3 . 北美盐湖亚带。南半球盐湖带(II): 大致分布于南纬 $5^{\circ}\sim 35^{\circ}$, 多数分布于南纬 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$, 此带概分为: II_1 . 南非盐湖亚带; II_2 . 澳大利亚盐湖亚带; II_3 . 南美盐湖亚带。赤道-非洲盐湖区(III): 大致位于南纬 $5^{\circ}\sim$ 北纬 5° 和东经 $28^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。南极盐湖区(IV): 大致分布于南极北部, 在南纬 $71^{\circ}\sim 73^{\circ}$ (图1)。

地球表面的纬度和高度基本上控制一个地区的年均温度, 按照联合国教育、科学及文化组织^[3]所编现代世界干旱区分布图, 笔者将分布于全球干旱-半干旱区的盐湖概分为凉冷型(冬季气温低于 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)和温暖型(冬季气温为 $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)两大类型, 前者主要分布于北纬 $30^{\circ}\sim 55^{\circ}$, 局部分布于南极和海拔 3000 m 以上的南美部分高原, 有大量芒硝、苏打及不稳定石盐沉积为其代表; 后者主要分布于北纬 30° (局部 35°)以南至赤道和南纬 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 包括南非盐湖亚带(II_1)、赤道-非洲盐湖区(III)和澳大利亚盐湖亚带(II_2)及海拔较低的局部低洼区, 如智利近海滨区和中国吐鲁番洼地盐湖中, 其典型盐类矿物如各种硝酸盐、无水芒硝等^[1, 4]。

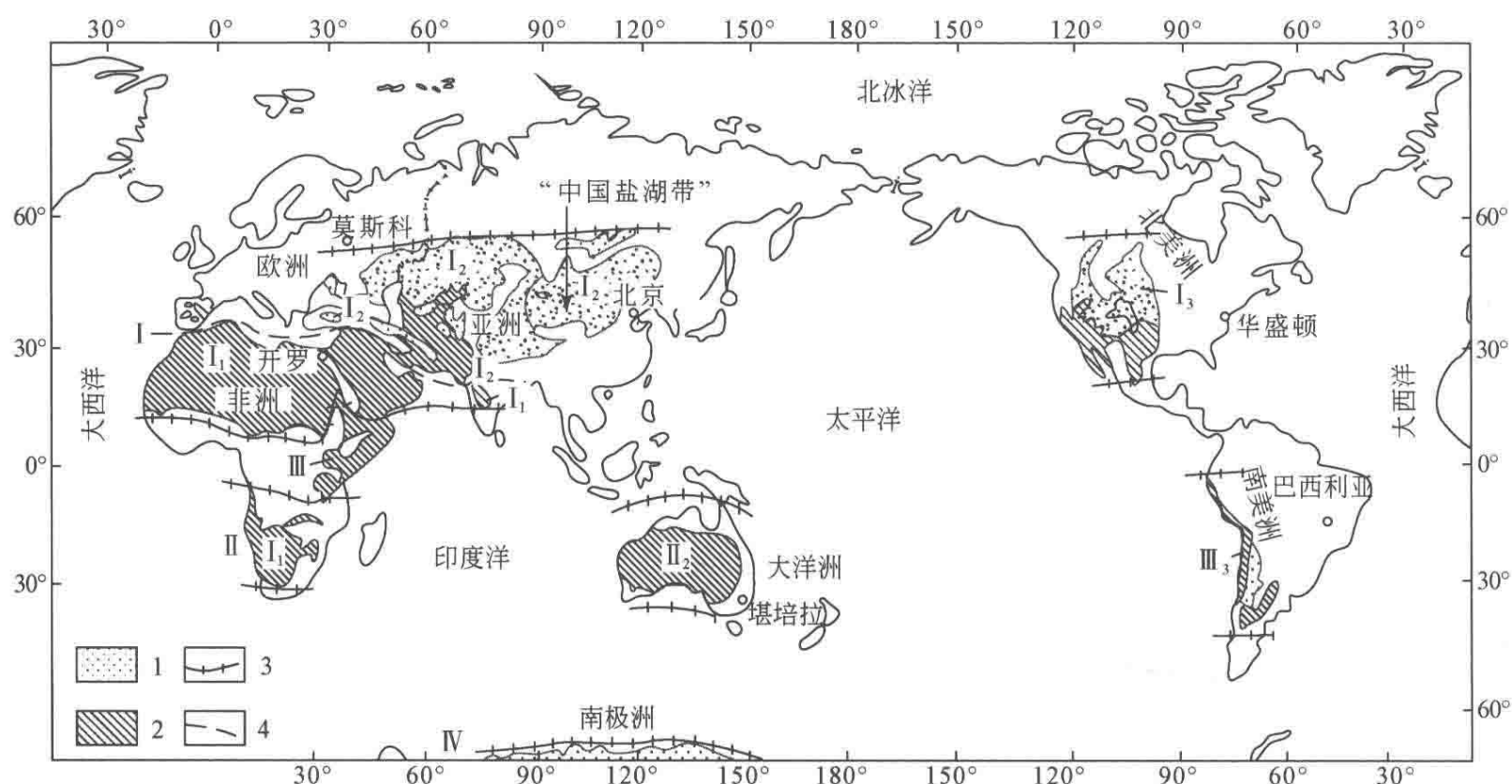


图1 全球现代盐湖分带略图

1-干旱-半干旱带凉冷型盐湖区；2-干旱-半干旱带温暖型盐湖区；3-盐湖带（区）界线；4-盐湖亚带界线

2 盐湖资源

盐湖是一种综合性的宝贵的自然资源，人类对盐湖资源的普查、勘探、开发，促使盐湖的研究领域不断深入和扩展，综合评价和综合利用实验研究取得重大进展。盐湖中沉积的盐类矿物约 200 种。目前，人类已经从盐湖中大量开采石盐、碱、芒硝和钾、锂、镁、硼、溴、硝石、石膏和医用淤泥等基本化工、农业、轻工、冶金、建筑和医疗等重要原料。盐湖中还赋存着具有工业意义的铷、铯、钨、锶、铀以及氯化钙、沸石等资源。盐湖中还发育有大量具有重要经济价值与科学意义的嗜盐藻、盐卤虫、螺旋藻、轮虫和盐微生物等特异生物资源以及耐旱、耐盐碱基因资源，它们为人类获取蛋白质、天然食用色素、能源、多种工业-科学材料和环境净化材料，为变盐湖和盐碱地为“良田”开拓了良好的前景。同时盐湖又是重要的旅游资源和医疗淤泥资源。盐湖卤水的储热特点，已开始用于“太阳能盐水池”发电。盐湖也是自然环境信息和天然实验室，还是“碳沉积池”（carbon sinks）、“自然生物反应器”（nature bioreactors）。盐湖沉积占世界陆表面积相当大，有大量碳酸盐沉积，能在一定程度上延迟与人类有关的温室效应。

2.1 盐湖卤水评价和利用取得重大进展

盐湖常为固液态共存矿产。从已知世界盐湖矿产资源分析，虽然普通盐类——石盐、碱、芒硝、硼酸盐、硝石、石膏、水菱镁矿以及沸石、锂蒙脱石等大部分或全部为固态矿，但有工业意义的钾、镁、锂、硼、溴、碘、钨、铯、铷、铀、锶、氯化钙，却以液态矿为主，同时也含有大量普通石盐、硫酸钠和硫酸镁，如在中国吉兰泰石盐湖和产盐历史悠久的运城（硫酸钠、镁盐湖）也建成了综合研发的盐化工联合企业^[5]。目前对其综合调查评价和综合利用研究已取得了重大进展和明显的经济效益^[6~8]。全球锂资源主要赋存于盐湖卤水

表 1 国外主要盐湖的开发利用概况

阶段	西尔兹湖 (Searles Lake, 美国)	大盐湖 (Great Salt Lake, 美国)	死海 (Dead Sea)	阿塔卡玛盐湖 (Salar de Atacama, 智利)
发现勘查年代	1863 年发现溴矿, 1870 年有人用软泥生产硼砂, 1873 年 J.W.Searles 等发现盐壳含硼砂约 8%	1776 年探险者发现	1911 年 Moshe Novomeysky 初期。1929 年他获开采权	1969 年智利地质所大范围勘测
单项生产至大规模化生产年代	1874 年获准建厂生产硼砂 10 t。 1875 年太平洋硼砂公司购买该硼砂厂。 1908 年成立加州天然碱公司, 生产碱粉 50 t。 1915 年生产粗钾 (KCl) 1800 t/a。 1919 年生产硼砂 40~50 t、KCl 2000 t。 1936 年合并为钾碱化学公司, 生产多种化工产品: 硼砂 150 t、KCl 5000 t。 1908 年生产 Na_2CO_3 50 t。 1938 年生产 KCl、硼砂、纯碱、硫酸钠, 生产量为 45 万 t。 1951~1953 年生产纯碱 6 万 t、硼砂 3 万 t、Li_2CO_3 750 t、磷酸 1200 t。 1963 年生产钾 (盐) ($\text{KCl}+\text{K}_2\text{SO}_4$) 29 万 t、硼砂 5 万 t、$\text{Na}_2\text{SO}_4$ 18 万 t、苏打 9 万 t 等。 20 世纪 80 年代初生产 Na_2CO_3 140 万 t、$\text{KCl}+\text{K}_2\text{SO}_4$ 30 万 t、硼砂和硼酸 20 万 t、Na_2SO_4 50 万 t、食盐 50 万 t 及少量锂、磷酸、溴等产品	1874 年小规模采食盐。 1850 年建食盐厂。 1870 年建盐田, 人工走水。 1888 年用离心泵抽湖水灌盐田。 1923 年用拖拉机于盐田收盐。 1932 年开始少量钾肥生产。 1963~1969 年中试和实验盐田研究。 1967 年 GSLMC 建立钾盐盐田和加工厂。 1970 年 12 月 GSLMC 建成钾盐厂, 生产 K_2SO_4 17.5 万 t/a, 副产 MgCl_2。 1972 年运转生产金属镁 (Mg)。 1979 年建成新的食盐加工厂, 生产 NaCl 10 万 t/a。 1980 年生产 3.8 万 t/a 金属 Mg (AMAX 镁公司)。 1985 年特大洪水, 停产。 1988 年恢复生产。 20 世纪 90 年代总产量为 K_2SO_4 20 万 t、$\text{MgCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 10 万 t、KNO_3 25 万 t/a、NaCl 145 万 t、Na_2SO_4 15 万 t、Mg 4 万 t	1930 年巴勒斯坦钾公司成立, 在死海南端建钾、溴厂。 1936 年生产 KCl 4 万 t、溴 1000 万 t。 1945 年生产 KCl 97000 t、溴 1000 t。 1947~1948 年工厂受战争全毁。 1950 年小规模生产 KCl (约旦 APC)。 1955 年恢复钾盐生产 (以色列)。 1960~1961 年产钾盐 125000 t (以色列)。 1963 年产 KCl 20 万 t (以色列)。 1968 年产 NaCl 75 万 t (以色列)。 1969 年产 KCl 40 万 t (以色列)。 1972 年产 KCl 110 万 t、Br 8000~10000 t (以色列)。 1980 年产 KCl 100 万 t。 1984 年产 KCl 200 万 t。 1987 年产 KCl 40 万 t、Br 5.6 万 t、溴化物 4.8 万 t、MgO、盐酸、硝酸钾、磷酸钠。 1989 年产 KCl 225 万 t。 1996 年产 KCl 250 万 t。 1997 年产 KCl 280 万 t、片状水氯镁石 10 万 t; 发展卤水漂浮浴、疗泥、化妆品、旅游业及盐梯度太阳池发电	1971 年智利国营开发署对卤水矿作评价并修路。 1975~1979 年, 在盐加工者公司技术协助下, 智利开发公司作详细开发研究。 1982 年, 美国 Amax 和智利 Molymet 公司设计。 1984 年, 开始试产 Li_2CO_3。 1985 年产 Li_2CO_3 6400 t。 1986~1990 年建成年产硝酸钾 20 万 t、KCl 50 万 t、K_2SO_4 2 万 t、硼酸 2 万 t、Li_2CO_3 11800 t。 1995 年 Minsal 公司 Li_2CO_3 18000 t、KCl 30 万 t 及碘 8000 t (SoquiMich 公司) 投产。 1997 年 12 月~1998 年先后达产; 其中 K_2SO_4 达 45 万 t/a
21 世纪初以来大联产规模 (年产量)	碳酸钠约 150 万 t、硫酸钠约 70 万 t、硼砂约 25 万 t、氧化钠约 60 万 t、硫酸钾约 10 万 t	钾盐 6 万~7 万 t (Utah.B.Ltd) ⁽¹⁾ +13.5 万 t (S.W.)+硫酸钾 45 万 t (GSL)、石盐 150 万 t、氧化镁 40 万 t (GSL)、金属镁 4 万~4.5 万 t ^(2, 3)	钾盐 (KCl) 180 万 t (约旦 APC)+300 万 t (以色列 DSW) ⁽³⁾ 、Br 约 15 万 t、硝酸钾约 100 万 t、氯化镁 100 万 t 左右。近期: 2015 年 (以色列) KCl 190 万 t (约旦) 190 万 t; 溴: 以色列 11.6 万 t, 约旦 10 万 t; 金属镁: 以色列 19 万 t。2016 年, KCl 以色列 206 万 t, 约旦 222 万 t	碳酸锂 4 万~4.5 万 t、 K_2O 40 万 t (SQM)+12 万 t (Cosayach)+20 万 t (PCS Yumbes) ⁽⁴⁾ 。近期: 2015 年, 碳酸锂 (CLE) 55860 t, K_2O 120 万 t, 碘 2 万 t。2016 年碳酸锂 (CLE) 63840 t, K_2O 120 万 t, 碘 21000 t ^[13-14] 。还产硼酸、 Na_2SO_4 及锂盐等衍生物

资料来源: (1) Michael Khadari, 2006; (2) Standard NET, July 10, 2005, Great Salt Lake say jobs will be created; (3) Tifac, 2006, Recovery of Potassium Fertiliser Salt from Bittern: P2; (4) Kevin stone, 2002, Potash.Natural Resources Canada

表 2 中国主要盐湖的开发利用概况

阶段	山西运城解池 ⁽¹⁾	内蒙古兰太盐湖 ⁽²⁾	察尔汗盐湖 ^{(3)~(6)}
发现/勘查年代	采食盐史可追溯至距今 4600 年左右,据记载直至 1949 年食盐总产量约 260 万 t	乾隆元年(1736 年)开始少量食盐生产	1956 年郑绵平等到察尔汗调查,发现卤水含 KCl 1%~2%;次年郑绵平参加盐湖队,在柳大纲队长的领导下,发现光卤石,并估算卤水 KCl 储量 1.4 亿 t ⁽²⁾
20 世纪 40~90 年代,中小规模生产年代	1949 年前,主要生产 NaCl 及少量元明粉。 1949 年~20 世纪 70 年代,生产元明粉(无水硫酸钠)、硫化钠、石盐。 80 年代,开始生产 BaSO ₄ 、洗衣粉、MgSO ₄ 。食盐生产至 1986 年全部停产。 90 年代总计生产元明粉 35 万 t、硫化碱 8 万 t、硫代硫酸钠 0.4 万 t、硫酸镁 1.5 万 t(一水和七水,下同)、硫脲 1 万 t、洗衣粉 3 万 t	20 世纪 40 年代当地开采原生盐,最高产量 6000 t。 1949~1965 年,手工生产原生盐和再生盐,年产量几万吨至十几万吨。 1965~1975 年机械化 I 期扩建,实际生产石盐 30 万~40 万 t/a(年生产能力 75 万 t)。 80 年代机械化 II 期扩建,生产石盐 40 万~50 万 t/a。 1990 年技术改造(I 期)实际生产 NaCl 70 多万吨(生产能力为 90 万 t),增加精制盐、加碘盐和盐藻加工 β-胡萝卜素 500 kg。 1995 年技改工程(II 期)竣工,生产 NaCl 100 万 t、纯碱厂 20 万 t、金属钠 500 t	1958 年,盐湖队曹光汉、陈敬清帮助当地建立察尔汗钾肥厂,用水解生产 KCl 数十吨。 20 世纪 60 年代,用浮选法生产 KCl 8.16 万 t,随后下滑只有每年数千吨。 70 年代,生产 KCl 达万吨级。 80 年代,钾肥厂一期工程年产 KCl 20 万 t 建设,实际生产 KCl 约 10 万 t/a。 90 年代,有 30 多家企业老卤 MgCl ₂ 排放失控,规模较小,产品单一,质量差(KCl 为 60%~85%),90 年代初受到“洋钾”冲击,产品积压;1996 年下半年,开始 40 万 t KCl 扩张规模工程;1997 年研究成功冷冻结晶工艺。历年 KCl 产量为:1990 年 10.04 万 t;1993 年 13.5 万 t;1995 年 20 万 t;1996 年 19 万 t;1997 年 23 万 t;1998 年 31 万 t;1999 年 41 万 t ⁽¹⁾ 。还生产少量 NaCl 及 MgCl ₂ ·6H ₂ O
21 世纪初期中大规模生产年代	2000 年,生产元明粉 55.7 万 t、硫化碱 6.43 万 t、硫代硫酸钠 0.48 万 t、硫酸镁 2.41 万 t、硫化氢钠 0.33 万 t、硫脲 0.03 万 t、硫酸钾 15 万 t、洗衣粉 18 万 t。 2002 年开始,发展盐湖旅游业,“中国死海”卤水漂浮和黑泥面膜及化妆品和浴盐。 2005 年,生产洗衣粉 20 万 t、元明粉 39.5 万 t、硫化碱 7.75 万 t、BaCl ₂ 1.31 万 t、BaSO ₄ 3.8 万 t、K ₂ SO ₄ 15 万 t、Mg(OH) ₂ 4400 t、硫代硫酸钠 3500 t、MgSO ₄ 3.51 万 t。 目前,已形成无机盐和日用化工系列 10 大类产品;包括元明粉、硫化钠、硫酸铵和硫酸镁为主的产品,总生产规模达 250 万 t,成为中国普通硫酸钠镁型盐湖综合利用程度最高的联合盐湖企业 ⁽⁷⁾	2000 年,除 NaCl、纯碱、金属钠生产外,增加盐藻粉 20 t,β-胡萝卜素胶囊(准字号)、卤虫 150 t/a、染料 5000 t。 2005 年,生产 NaCl 120 万 t、纯碱 30 万 t、金属钠 5 万 t。 2008 年以来,中盐吉兰泰盐化集团通过 I-II 期建设,年产 NaCl 约 150 万 t,主要用于生产 NaOH(40 万 t/a)、Na ₂ CO ₃ (30 万 t/a)、氯酸钠(5 万 t/a)、PVC(40 万 t/a)、金属钠(约 5 万 t/a)等,还生产盐藻和 β-胡萝卜素等,成为集盐、盐化工、盐湖生物养殖和制卤为一体的联合企业。目前,成为中国普遍石盐湖类型综合开发规模最大的企业 ⁽⁸⁾	2002 年,钾肥一期工程(青海盐湖集团)达标,当年生产 KCl 48 万 t;昆仑矿业生产 KCl(粗钾)20 万 t。 2001 年,生产 KCl 50 万 t(盐湖集团)。 2004 年,生产 KCl 达 100 万 t(盐湖集团)、50 万 t(昆仑矿业)。盐湖集团筹划产品多元化和深加工开发。 2005 年,生产 KCl 150 万 t(盐湖集团)、60 万 t(昆仑矿业)。 2016 年,察尔汗氯化钾产量 660 万 t(其中盐湖集团 500 万 t,藏格公司 160 万 t);盐湖集团综合利用产品:金属镁(10 万 t/a)、纯碱(100 万 t/a)、氯化钙(10 万 t/a)、碳酸锂(1 万 t/a)等,已成为中国钾镁盐湖钾镁规模最大、综合利用程度较高的联合化工企业 ⁽⁹⁾

资料来源:(1)南风集团杜新生资料(2006 年 7 月);(2)据兰太集团总工白福易电话;(3)郑绵平,1957 年 6 月,青海省柴达木盆地硼砂、钾矿调查报告,化工部地质矿山局;(4)郑绵平等,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、地质部矿物原料研究所;(5)青海省国土资源厅,2001 年 9 月,青海钾盐资源开发利用水平调查研究报告;(6)青海省国土资源厅,2002 年 6 月,青海省矿产资源总体规划盐湖研究报告;(7)山西焦煤运城盐化集团有限责任公司介绍(2017 年);(8)中盐吉兰泰盐化集团有限公司介绍(2017 年);(9)百度百科——青海盐湖工业集团股份有限公司介绍(2017 年)

和硬岩中，但大体上盐湖卤水资源量较硬岩高。美国、智利、玻利维亚、中国、以色列、约旦等国，都开展了含锂、钾、硼盐湖卤水的勘探和综合利用研究。

2.2 含钾盐湖成为世界钾盐资源的重要来源

随着盐湖科技的发展，自 20 世纪 70 年代以来，第四纪钾盐湖已成为世界钾盐资源的重要来源，在一些国家成为重要的钾盐来源（约旦、以色列、中国、美国等），且兼有综合提取其他盐类矿产和位于浅部较易开采等有利条件^[1]，因而取得明显经济效益（表 1，表 2）^[6~12]，据初步估计，目前全球盐湖卤水型钾盐年开采量约 2200 万 t。

2.3 锂盐湖已成为 21 世纪新能源的明星

21 世纪初以来，由于节能减排的环保需求，锂在电动汽车和储能材料中大幅度应用。2016 年，世界锂及其衍生物产量折合碳酸锂当量（CLE）约 19 万 t^[13, 14]，其中约有 70% 来自盐湖卤水。2016 年初以来，世界锂及其衍生产品价格猛涨（图 2）。

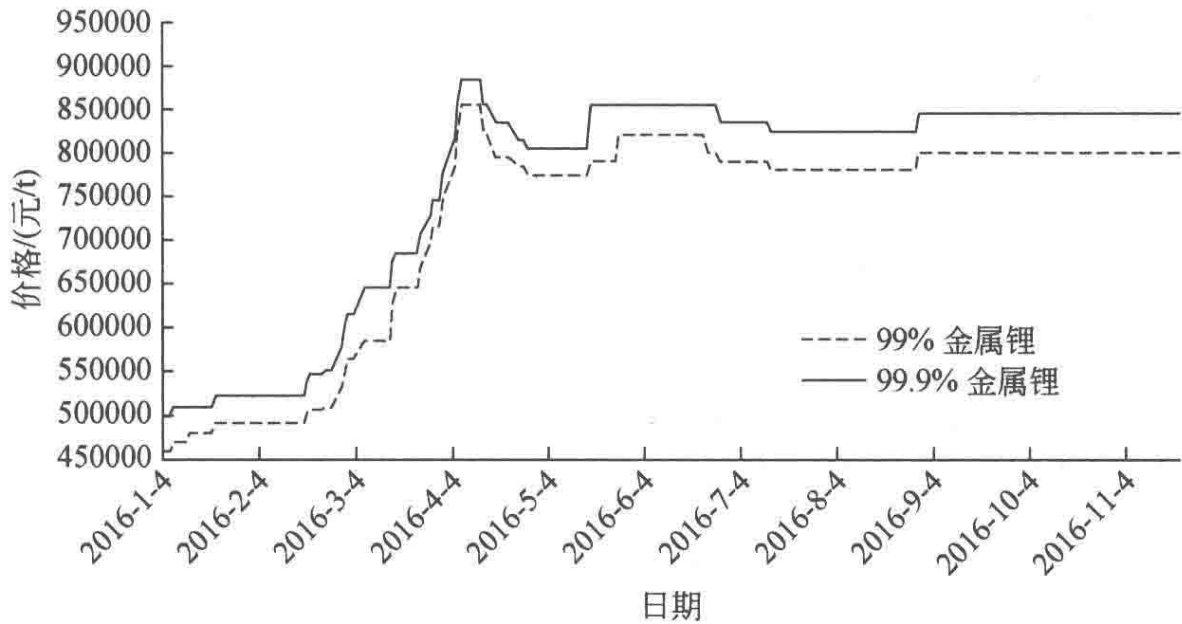


图 2 2016 年金属锂价格走势

目前，全球已成功开发的锂盐湖阿塔卡玛湖、霍伯雷-穆列托（Hombre Muerto）、银峯湖、扎布耶湖均属于低镁锂卤水或极低镁锂卤水，各国已成功研制针对不同盐湖卤水类型的提取锂盐方法。已知盐湖卤水有提锂技术方法主要有沉积法、膜法、离子交换吸附法、金属氧化物吸附法、冠醚吸附法、溶剂萃取法、煅烧法、兑卤法等。以上方法主要针对富锂卤水的水化学类型特点，但不仅限于这些工艺方法。

3 盐湖的卤水化学类型

盐湖卤水按照化学成分也可分成三种主要化学类型：碳酸盐型、硫酸盐型和氯化物型^[15, 16]。这些类型取决于主要阴离子 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 与主要阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 Na^+ 的相互组合，以及所形成的化合物的溶解度。湖水属于哪一种类型取决于这个湖中物理化学作用的特点和平衡体系，当我们研究湖中所发生的物理化学作用时，根据这种平衡体系可以了解和预测这些作用的方向。

（1）碳酸盐型决定性的平衡体系是： $\text{Na}^+(\text{K}^+)/\text{CO}_3^{2-}(\text{HCO}_3^-)$ ； SO_4^{2-} ， Cl^- ； H_2O 。个别阳

离子 Li^+ 还占重要地位，如西藏扎布耶湖，碳酸钠类型具有表 3 所示的主要盐类成分。

表 3 碳酸盐类型成分

Na_2CO_3	NaHCO_3	Na_2SO_4	NaCl
Li_2CO_3	—	—	—
MgCO_3	—	—	—
CaCO_3	—	—	—

有代表性的变质系数是： $K_1 = \frac{\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3}{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ ，式中 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 和 Na_2SO_4 表示湖水中每一种盐的百分含量。

碳酸盐型按照总碱度 (K_c) 的差异，据青藏高原碳酸盐型盐湖统计 K_c 还可再细分为 3 个亚型：强度、中度和弱度^[1]（表 4）。

表 4 碳酸盐型三种亚型划分

类型	亚型	$K = [\text{Na}_2(\text{K})\text{CO}_3 + \text{Na}(\text{K})\text{HCO}_3] / \text{Na}_2\text{SO}_4$	$K_c = [\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3] / \sum \text{盐}$	自析的矿物组合
碳酸盐型	强度	≥ 1	$> 29\%$	重碳酸钠石、天然碱、水碱、泡碱、芒硝、无水芒硝、碳钠石、硼砂、三方硼砂、石盐呈分散状分布
	中度	≥ 1	$8\% \sim 29\%$	氯碳酸钠石、芒硝、泡碱、水碱、重碳酸钠石、天然碱、杂芒硝、硼砂、三方硼砂、石盐呈中厚层产出
	弱度	≤ 1	$0.1\% \sim 8\%$	石盐、芒硝、单斜钠钙石、氯碳酸钠镁石、无水芒硝、钠硼解石、石盐呈中厚层产出

(2) 对于硫酸盐类型来说，其决定性平衡体系是 Na^+ , (K^+), Mg^{2+} , (Ca^{2+})/ SO_4^{2-} , Cl^- ; H_2O 。

硫酸盐类型有两个亚类：硫酸钠亚类和硫酸镁（氯化镁）亚类。按 HCO_3^- (CO_3^{2-}) 的相对数量（与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 比较），每一个亚类又可分为两组。将盐湖水分成两组仅对研究碳酸盐平衡和稳定固相的结晶作用才具有意义，稳定固相是由变质作用形成的溶解度比较低的矿物，属于这些矿物的有 CaCO_3 、 MgCO_3 、 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 等。

硫酸钠亚类具有以下盐类成分： Na_2SO_4 、 NaCl 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 、 MgSO_4 、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 CaSO_4 。有代表性的变质系数是： $K_2^1 = \frac{\text{Na}_2\text{SO}_4}{\text{MgSO}_4}$ ，式中 Na_2SO_4 和 MgSO_4 表示湖水中这些盐类的百分含量。

硫酸镁（氯化镁）亚类具有以下盐类成分： NaCl 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 、 MgSO_4 、 MgCl_2 、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 CaSO_4 。库尔纳科夫的代表性变质系数是： $K_{\text{MK}} = \frac{\text{MgSO}_4}{\text{MgCl}_2}$ ，式中 MgSO_4 和 MgCl_2 表示湖水中这些盐的百分含量。

对于氯化物类型来说，其决定性平衡体系是： Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ / Cl^- ; H_2O 。氯化物类型具有以下盐类成分： NaCl 、 MgCl_2 、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 CaSO_4 、 CaCl_2 。有代表性的变质系

数是： $K_3 = \frac{\text{MgCl}_2}{\text{CaCl}_2}$ ，式中 MgCl_2 和 CaCl_2 表示湖水中这些盐的百分含量。

在表 5 中引述了由一种类型到另一种类型变质系数值的变化；此处 n 表示大于零而小于无限大的值（ $0 < n < \infty$ ）。

表 5 由一种类型到另一种类型变质系数数值的变化

变质系数	碳酸盐型	硫酸盐型		氯化物型
		硫酸钠	硫酸镁	
K_1	n	∞	—	—
K'_2	0	n	∞	—
K_{MK}	—	0	n	∞
K_3	—	—	0	n

注： $K_1 = \frac{\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3}{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ ； $K'_2 = \frac{\text{Na}_2\text{SO}_4}{\text{MgSO}_4}$ ； $K_{\text{MK}} = \frac{\text{MgSO}_4}{\text{MgCl}_2}$ ； $K_3 = \frac{\text{MgCl}_2}{\text{CaCl}_2}$

天然水属于某一个主要化学类型，不仅可以用盐的分析表现形式表示，而且可以用当量离子形式表示。在这种情况下利用下列系数很方便：

$$K'_{n_1} = \frac{E''_{\text{CO}_3} + E'_{\text{HCO}_3}}{E''_{\text{Ca}} + E''_{\text{Mg}}}$$

$$K'_{n_2} = \frac{E''_{\text{CO}_3} + E'_{\text{HCO}_3} + E''_{\text{SO}_4}}{E''_{\text{Ca}} + E''_{\text{Mg}}}$$

$$K'_{n_3} = \frac{E''_{\text{SO}_4}}{E''_{\text{Ca}}}$$

$$K'_{n_4} = \frac{E''_{\text{CO}_3} + E'_{\text{HCO}_3}}{E''_{\text{Ca}}}$$

式中， E''_{CO_3} 为 CO_3'' 离子的当量含量；而 E''_{Ca} 为 Ca'' 离子的当量含量，利用这些系数可以确定该天然水属于哪一个类型。

前 3 个系数（ $K_{n_1} \sim K_{n_3}$ ）可以用来确定属于哪一个主要类型和亚类；根据 $K_1 \sim K_{\text{III}}$ 也可综合划分硫酸盐亚类。

现将以上三种水化学类型划分到表 6。

表 6 湖水水化学类型划分

特征系数		$K_c/\%$	K_{n_1}	K_{n_2}	K_{n_3}	K_{n_4}	K_I	K_{II}^1	K_{II}^2	K_{III}
碳酸盐型	强度	>29	>> 1	>> 1	>> 1	>> 1	≥ 1	∞	—	—
	中度	8~29	>> 1	>> 1	>> 1	>> 1	≥ 1	∞	—	—
	弱度	0.1~8	> 1	> 1	> 1	>> 1	≤ 1	∞	—	—

续表

特征系数		$K_c/\%$	K_{n_1}	K_{n_2}	K_{n_3}	K_{n_4}	K_I	K_{II}^1	K_{II}^2	K_{III}
硫酸盐型	硫酸钠	0~0.1	≤ 1	≥ 1	$\gg 1$	$>/< 1$	0	n	∞	—
	硫酸镁	—	$\ll 1$	≤ 1	$\gg 1$	$>/< 1$	—	0	n	∞
氯化物型		—	$\ll 1$	$\ll 1$	≤ 1	< 1	—	—	0	n

注： $K_c = \frac{\text{NaHCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3}{\text{总盐量}} \times 100\%$ （用盐的质量百分数或 mg/L 计算）； $K_{n_1} = \frac{\text{CO}_3 + \text{HCO}_3}{\text{Ca} + \text{Mg}}$ ， $K_{n_2} = \frac{\text{CO}_3 + \text{HCO}_3 + \text{SO}_4}{\text{Ca} + \text{Mg}}$ ，
 $K_{n_3} = \frac{\text{SO}_4}{\text{Ca}}$ ， $K_{n_4} = \frac{\text{CO}_3 + \text{HCO}_3}{\text{Ca}}$ （以上用离子当量数计算）； $K_I = \frac{\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3}{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ ， $K_{II}^1 = \frac{\text{Na}_2\text{SO}_4}{\text{MgSO}_4}$ ， $K_{II}^2 = \frac{\text{MgSO}_4}{\text{MgCl}_2}$ ，
 $K_{III} = \frac{\text{MgCl}_2}{\text{CaCl}_2}$

以上盐湖水化学分类在俄罗斯和中国采用较为普遍，但在欧美则采用其他分类，如 Eugster H. P. 等采用的命名方案，如图 3 所示^[17]。

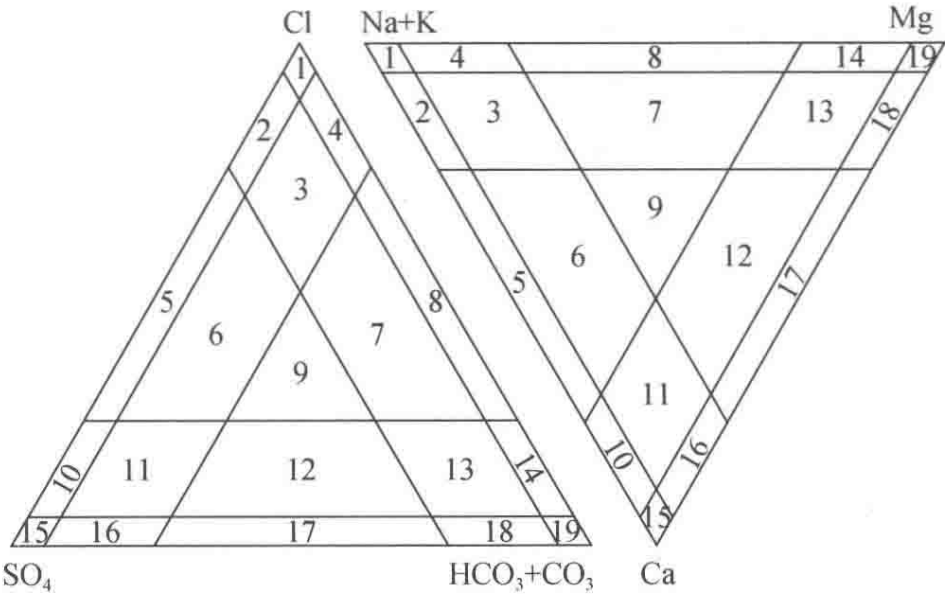


图 3 主要阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 和主要阳离子 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的卤水分类方案
成分用 mol% 表示，采用下列表示符号：
阴离子域：1-Cl，2-Cl-(SO₄)，3-Cl-(SO₄)-(CO₃)，4-Cl-(CO₃)，5-Cl-SO₄，6-Cl-SO₄-(CO₃)，7-Cl-CO₃-(SO₄)，8-Cl-CO₃，9-Cl-SO₄-CO₃，10-SO₄-Cl，
11-SO₄-(CO₃)-(Cl)，12-SO₄-CO₃-Cl，13-CO₂-(SO₄)-(Cl)，14-CO₃-(Cl)，15-SO₄，16-SO₄-(CO₃)，17-SO₄-CO₃，18-CO₃-(SO₄)，19-CO₃
阳离子域：1-Na，2-Na-(Ca)，3-Na-(Ca)-(Mg)，4-Na-(Mg)，5-Na-Ca，6-Na-Ca-(Mg)，7-Na-Mg-(Ca)，8-Na-Mg，9-Na-Ca-Mg，10-Ca-(Na)，
11-Ca-(Mg)-(Na)，12-Ca-Mg-(Na)，13-Mg-(Ca)-(Na)，14-Mg-(Na)，15-Ca，16-Ca-(Mg)，17-Ca-Mg，18-Mg-(Ca)，19-Mg

4 青藏高原盐湖水化学分带性与矿物组合

4.1 水化学分带性概述

据上述分类法，重新修编青藏高原盐湖水化学图^[18]（图 4），从而取得了清晰的规律性认识：本区盐湖水化学类型分布可分东西两部分，划分四带一区：东部呈一区块，西部具有南北分带；由南往北，为藏南低矿化度碳酸盐型亚带（I₁）、羌南高矿化度碳酸盐型亚

帶 (I₂)、羌北硫酸鈉亞型帶 (II)、昆侖-可可西里硫酸鎂亞型帶 (III) 和庫木庫里-柴達木氯化物型-硫酸鹽型帶 (IV) 及硫酸鈉亞型外泄亞區 (V)。

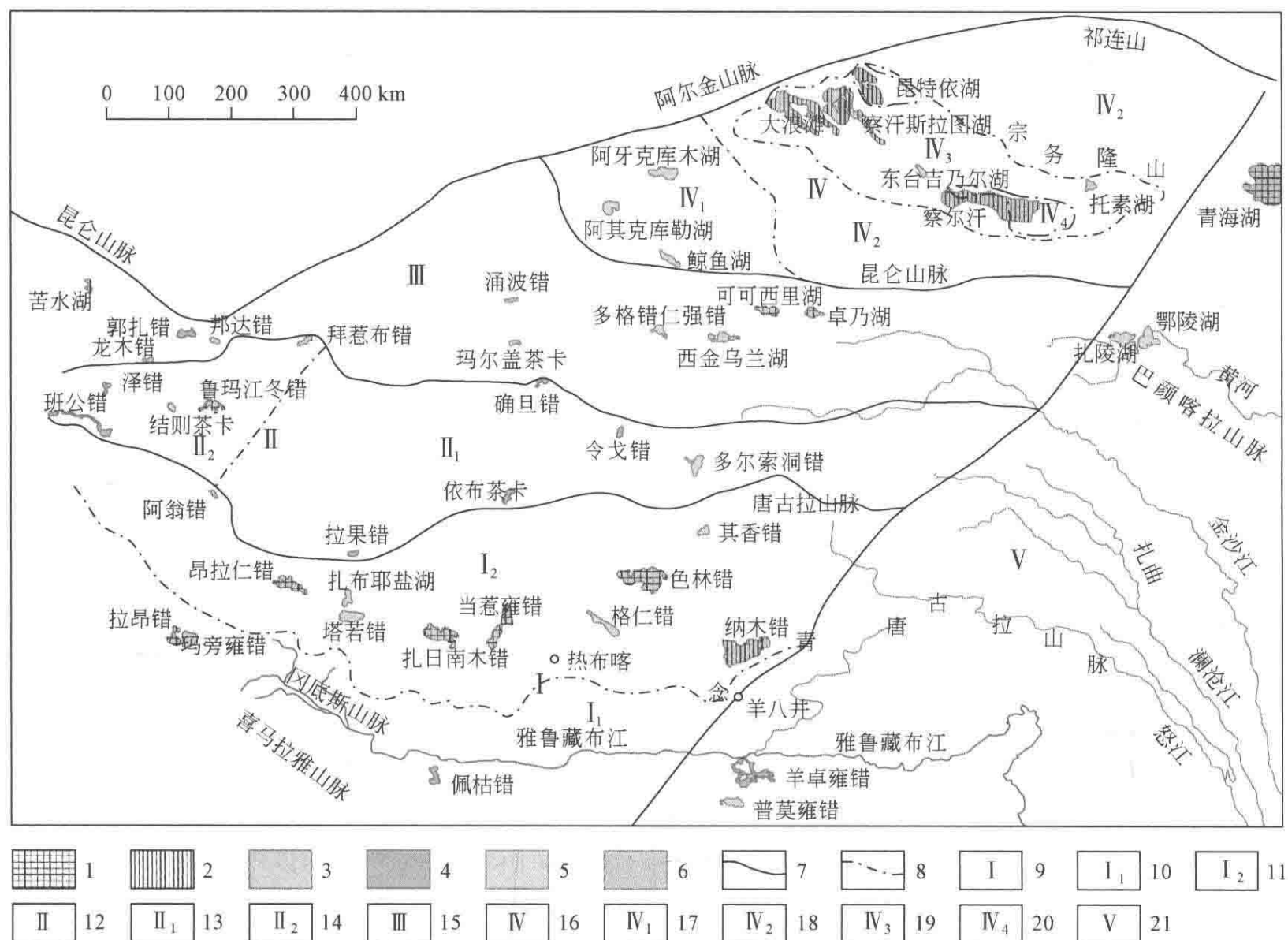


图4 青藏高原盐湖水化学分带图

1-咸水湖；2-干盐湖；3-碳酸盐型；4-硫酸钠亚型；5-硫酸镁亚型；6-氯化物型；7-水化学类型分界线；8-亚带分界线；9-碳酸盐型带；10-低矿化度亚带；11-高矿化度亚带；12-硫酸钠亚型带；13-硫酸钠亚型亚带；14-硫酸钠-碳酸盐亚型亚带；15-硫酸镁亚型带；16-氯化物-硫酸盐型带；17-库木库里硫酸镁亚型亚带；18-硫酸钠亚型亚带；19-硫酸镁亚型亚带；20-氯化物型亚带；21-硫酸钠亚型外泄区

4.2 水化学分带特征

I 带: 以碳酸盐型为主, 以冈底斯山—念青唐古拉山为界, 再分两个亚带, 南亚带以广义盐湖 [$w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) \geq 0.30\%$]、淡水湖为主, 个别小型湖泊为盐湖 [$w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) > 3.5\%$], 北亚带以广义盐湖和狭义盐湖为主^[4] (表 7)。

南亚带以相对高含硼为特征,可以公珠错为例,其水化学类型属弱度碳酸盐型,矿化度为 5.4 g/L,上述盐湖相应的代表性成矿组合为硼砂(三方硼砂)和硼砂-扎布耶石(Li_2CO_3)组合及碱金属碳酸盐-芒硝组合(表 8)。

II 带: 为硫酸钠亚型带, 分布在碳酸盐带 (I 带) 之北, 呈东西向延伸 (图 4); 以硫酸钠亚型盐湖为主 (I₁), 有小部分硫酸镁亚型和碳酸盐型盐湖分布 (II₁)。