

# 聚焦变化中的盐湖： 二次科考盐湖专题阶段性研究进展

王建萍<sup>1,2</sup>, 张西营<sup>1,2</sup>, 焦鹏程<sup>3</sup>

- (1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;  
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008;  
3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要:**青藏高原是我国重要的生态屏障,也是重要的盐湖分布区。在青藏高原第一次综合科考时曾对青藏高原盐湖开展过系统调查。二次科考在一次科考的基础上,加强了对一些工作程度不够的极端困难区的补充调查,还重点开展了气候变化及资源开发双重影响下青藏高原盐湖资源与环境的变化趋势;现代盐湖关键元素迁移、富集规律;古钾盐成矿预测;盐湖资源开发的生态环境效应等研究工作。经过近3年的系统工作,专题获得了大量一手科考数据,已取得了一批有显示度的科学成果。研究系统介绍了盐湖专题科考方案的整体思路、研究内容、技术路线、前期获得的亮点成果及下一步工作计划等。

**关键词:**青藏高原;二次科考;盐湖

中图分类号:P619.21<sup>+</sup>1

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2022)02-0001-10

2017年8月,由中国科学院牵头的青藏高原第二次综合科学考察正式启动。来自国内不同行业的顶尖科考队员们将在5~10年中,对冰川、湖泊、水文、气象、土地资源变化等多学科进行综合考察。2017年8月19日,习近平总书记给二次科考专门发来贺信,要求“聚焦水、生态、人类活动,着力解决青藏高原资源环境承载力、灾害风险、绿色发展途径等方面的问题,为守护好世界上最后一方净土、建设美丽的青藏高原作出新贡献,让青藏高原各族群众生活更加幸福安康”。自项目启动以来,刘鹤副总理多次对第二次青藏科考工作提出具体指示。这都说明青藏高原考察研究在国家重大科技布局和社会经济发展中占有重要地位。

第二次青藏科考十大任务中单列了盐湖科考专题。盐湖专题由中国科学院青海盐湖研究所牵头,中国地质科学院矿产资源研究所、中国科学院地质与地球物理研究所和青海省地质矿产勘查开

发局四家单位共同承担。中国是世界上盐湖资源最丰富的国家之一,盐湖资源也是我国具有相对国际优势的矿产资源,其中的钾、锂、硼、铷、铯等资源成分用途极广<sup>[1-2]</sup>。青海、西藏两省区是中国最主要的两大盐湖区,其盐湖面积占到全国盐湖面积64%以上<sup>[3]</sup>。其中,西藏是我国盐湖数量最多的省份,面积2 km<sup>2</sup>以上的盐湖多达275个<sup>[3-5]</sup>。而青海是我国盐湖资源最集中、开发规模最大和开发程度最高的省份,仅柴达木盆地盐类沉积面积就达1.7万 km<sup>2</sup>,卤水近400亿 m<sup>3</sup><sup>[3]</sup>。作为青藏高原上最具特色和优势的矿产资源,盐湖资源对国家及地区经济发展和资源安全的重大战略意义正日渐突显。中国科学院2011年学部咨询评议项目中曾指出,盐湖资源的利用“关乎我国的粮食安全,关乎我国的能源安全,关乎我国的环境安全,关乎青藏地区的民生改善,其独特的地理区位还关乎我国的西部稳定”。2012年10月,李克强总理做出重要批示“要支持盐湖资源

收稿日期:2022-02-20; 修回日期:2022-03-20

**基金项目:**第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0805);青海省科技创新平台项目(2020-ZJ-T03);国家自然科学基金基金项目(U20A2088);中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2020-3)

**作者简介:**王建萍(1971-),女,研究员,主要从事盐湖环境水资源利用等方面研究工作。Email: jianpingwang@isl.ac.cn。

平衡开采和综合利用,延伸产业链,保障钾肥等重要物质供应”。2016 年 8 月习近平总书记在视察青海后做出重要指示:“盐湖是青海最重要的资源,青海资源也是全国资源。要制定正确的资源战略,加强顶层设计,在保护生态环境的前提下搞好开发利用”。2021 年 3 月和 6 月,习总书记两次强调,要加快建设世界级盐湖产业基地,打造国家清洁能源产业高地。可见,盐湖资源的开发已上升为国家战略。盐湖资源供给的数量、质量及其开发过程中的环境及生态安全,直接影响其对我国社会经济发展的保障或支撑能力,具有重要的意义。

作为一个多相共存的复杂水盐体系,由于受自然界多种因素的制约和影响,盐湖在形成演化过程中始终处于动态变化之中。特别是盐湖水体(湖表卤水和晶间卤水),对地理环境和气候因素的影响反映非常敏感<sup>[6-8]</sup>。加之近几十年,随着社会经济的发展和自然环境的变化,盐湖资源储量规模、资源聚集度、资源元素的组合状态、与盐湖产业关联的其他资源的自给程度、矿床赋存条件、交通运输状况、能源和水资源保证程度、对生态环境的影响、可持续发展利用能力等都发生了较大的变化。以青海柴达木盆地为例,随着柴达木盆地盐湖开发规模和强度的不断增加,盐田建设和采卤设施大规模布局,加上一些新的溶采、补采方式的介入<sup>[6-9]</sup>,盐湖资源系统正在发生急剧变化,不仅表现在盐湖补给方式、盐湖面积,盐湖水化学成分和固相盐类沉积的物化特征的不断改变,随之而来的诸如卤水水位迅速下降、地面大范围溶陷沉降、盐尘暴及生态系统退化等问题<sup>[10]</sup>都开始普遍出现。资源市场方面,近年来由于锂价格市场的波动<sup>[11]</sup>、钾肥市场的收缩<sup>[12]</sup>、硼镁市场的制约<sup>[13]</sup>和其加工技术的约束,加之盐湖资源的稀有性、耗竭性和不可再生性,使得盐湖资源可持续性及产业化前景也发生了巨大变化。基于此,全面厘清盐湖变化过程及影响机理,在保障湖区环境及生态安全的前提下,更加绿色、精准、科学合理地保护和开发盐湖资源,将成为下一阶段盐湖资源开发和区域可持续发展的重大问题。

作为盐湖最多的国家之一,我国在 20 世纪 50~70 年代,以中国科学院青海盐湖研究所老一辈科学家为主体的团队就开展了大规模的盐湖考

察,为我国盐湖科学多学科的发展和开发利用奠定了基础<sup>[14]</sup>。但限于当时的技术和交通状况,耗时较长,调查与研究不够深入,没有形成对整个中国盐湖资源的全面系统认识。虽然其后也开展过一些局部的地区性调查<sup>[15-17]</sup>,但由于经费支持力度小,时间跨度大,没有统一的调查规范和要求,获得的数据也缺乏统一性和规范性。

由于距第一次青藏高原科考中盐湖调查工作已过去四十多年,原有的数据已难以准确反映我国盐湖的变化现状,且已有盐湖数据的完整性差、共享率低,在很大程度上制约和影响了盐湖系统科学的发展。部分区域盐湖(如可可西里、西昆仑、藏北等地区)由于可进入性极差,尚未开展系统工作。此外,受技术等条件所限,除少数研究和开发程度较深的盐湖外,青藏高原过去大范围的盐湖资源调查还主要聚焦于湖盆本身和湖表水的调查<sup>[15-18]</sup>,缺少从补给流域、地下—地表水盐循环及盐湖区环境生态等多尺度的调查视角;也缺少对气候及人类活动双重因素影响下湖区水文生态过程及水盐动态过程的系统监测与研究。正是由于缺乏近几十年来盐湖资源系统的变化数据,导致关于盐湖成盐机理和变化机制方面的研究还不够深入,尤其是对气候变化及人类开发利用双重影响下的现代盐湖的演化规律及影响机制还没有清晰的认识;对盐湖资源开发活动产生的一系列生态环境效应的关注也才刚刚起步。因此,亟待针对青藏高原盐湖开展新一轮的系统、全面和深入的科学考察。

## 1 目标及主要内容

本次盐湖专题科考的总目标是:全面开展青藏高原盐湖资源变化及其影响机制的调查研究,在准确把握我国盐湖资源类型、沉积特征、时空分布、成盐自然环境、资源禀赋及开发利用等数据的基础上,查明青藏地区盐湖资源的最新变化状况;通过柴达木盆地古近纪和羌塘盆地中生代盆地构造背景、岩相古地理、古气候、古卤水演化等成盐成钾条件研究,揭示不同构造背景下含盐盆地的形成演化与成盐成钾作用的关联性,为青藏高原古钾盐资源远景评价提供基础资料;聚焦重点盐湖,掌握典型盐湖资源

的物源及运移和富集过程,建立盐湖战略资源元素“源—汇”概念模型;分析盐湖资源开发活动产生的生态环境效应,揭示盐湖资源系统在气候变化及人为双重作用下的变化规律,探索盐湖区绿色可持续发展途径。为深入理解青藏高原区域性构造演化、气候环境变化的资源效应等重大科学问题提供基础数据和资料;为服务国家资源开发战略、合理高效开发盐湖资源、

保护干旱脆弱区生态环境和推动青藏地区社会经济可持续发展提供决策依据。

根据项目目标,盐湖专题下设 5 个子专题:1) 极端困难区重点盐湖资源补充调查;2) 青藏高原古盐湖成钾远景评价;3) 盐湖“源—汇”过程及资源变化控制机制;4) 盐湖资源集群开发的生态环境效应;5) 盐湖资源环境科学数据库建设(见图 1)。具体包括以下几个方面的内容:

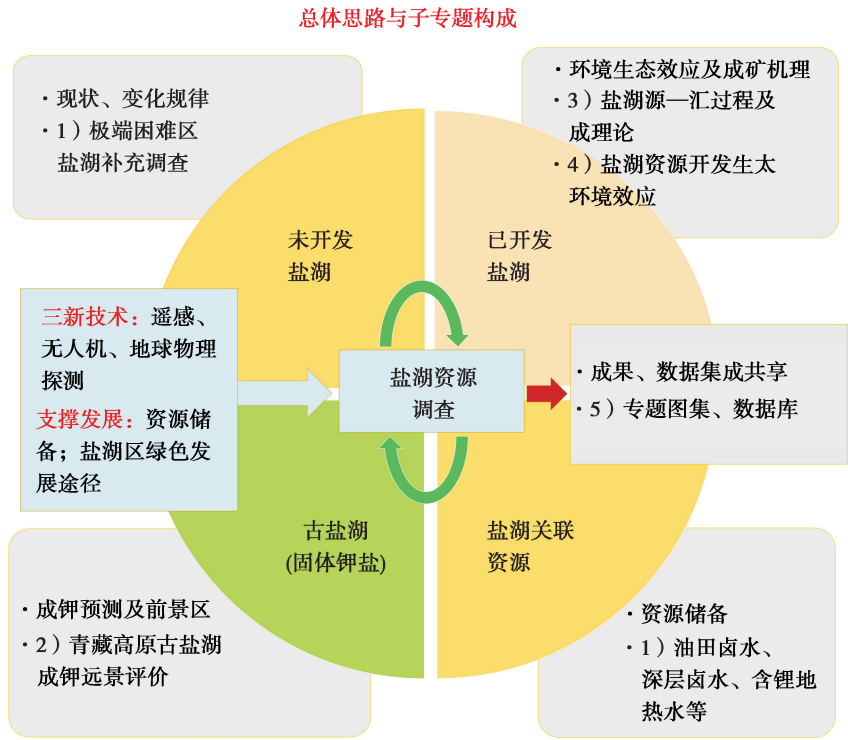


图 1 青藏高原二次科考子专题构成图

Fig. 1 The framework of sub-project of the second scientific expedition for Qinghai-Tibet Plateau

1) 青藏高原极端困难区盐湖资源补充调查与盐湖资源潜力评价

课题包含两部分内容,第一部分主要对青藏高原可可西里、西昆仑等可进入性差、工作程度低、目前缺少基础资料的盐湖开展查缺补漏,聚焦这些盐湖的“资源”和“生态”属性的把握。开展盐湖地质特征、地理特征、水生生物调查,包括湖盆基本构造情况、主要地理要素特征、生物的种群、数量及其分布情况等;开展湖区水文地质和水文地球化学调查,包括湖泊的补径排、不同水体的水文联系、补给水体及湖泊的水化学特征、盐类及碎屑沉积物的特征等。在上述调查的基础上,结合搜集到的数据资料,了解青藏高原极端困难区

盐湖资源的规模并开展盐湖资源潜力评价,重点对 Li、K、B、Rb、Cs 等具有区域特色和战略意义的资源元素进行评价。

第二部分工作主要对柴达木盆地深部油田卤水、深层卤水及西藏地热水资源等盐湖关联性资源进行调查。柴达木盆地深部油田卤水资源丰富,但区域分异程度大,科考计划根据已有资料对柴西地区南翼山、油墩子、大风山背斜构造富 K、B、Li、Sr、Br 等开展构造、地形和地层的系统调查和数据集成分析;对柴达木盆地东北缘相对富集 K、Sr 的油田水资源开展调查取样和分析;根据已有钻孔对柴达木盆地现代盐湖盆地深层卤水开展实地调查和分析;对西藏地热水进行调查和取样,



包括构造、地层、水化学等。通过数据集成分析,掌握这些盐湖关联资源的禀赋特征并进行资源潜力评价。

## 2) 青藏高原古盐湖成钾远景评价

根据以往工作基础,划定了两块最有成钾前景的地区作为本次科考的重点区域,分别开展柴达木盆地古近纪古盐湖钾资源和羌塘盆地中生代古盐湖钾资源的调查与评价。

柴达木盆地新生代具有潜在的成钾远景。计划在充分搜集和吸收消化油气钻井资料及其他深钻资料的基础上,在盆地范围内开展地质构造、沉积特征、地层分布等调查和取样分析工作,对各类深部钻孔的测井等地球物理探测成果进行再解译,分析成盐期的构造格局和演化过程,重建成盐期古地理环境,评价盆地的封闭特征和钾盐成矿条件。

羌塘盆地是我国重要的中生代成盐盆地,也具有良好的成钾前景。在前人工作的基础上,选定川滇藏交界的羌塘盆地东部为重点研究区,开展构造环境、沉积地层情况野外考察,选取构造变形小和地层关系清晰的地区测制剖面,对出露地表的膏盐、碳酸盐及盐泉进行系统取样并开展矿物学和地球化学分析;搜集该地区地球物理勘探资料并进行解译,分析盐岩的保存条件。通过上述工作,结合前人资料解译,获取成盐的构造与环境变化信息,据此明确蒸发岩盆地岩相分布规律,确定蒸发浓缩中心,预测成钾远景区。

## 3) 青藏高原北部盐湖重要资源元素分布调查及源—汇富集机理

青藏高原盐湖中赋存大量 K、Li、B 等重要资源元素。选择柴达木盆地及周缘山脉为重点研究区域,以“盆山耦合”为研究思路主线,开展母岩区岩石组成、矿物组成、岩石地球化学和风化程度调查并取样分析,开展补给盐湖的地表径流、地下径流、冷泉、热泉、深部流体等各水体的分布特征和水化学特征调查并取样分析,开展典型尾间盐湖区不同沉积相带沉积物的矿物学、沉积学特征调查并取样分析。通过野外科学调查和室内样品分析及模拟实验等工作,查明尾间盐湖现代沉积物空间分布特征及盐类资源赋存状态,阐明水—岩—盐系统的资源关联性和资源元素迁移的“源—汇”地球化学过程,揭示盐湖的资源承载

力,建立利用水化学方法寻找矿源区(硬岩锂矿)的方法体系。

## 4) 青藏高原柴达木盆地重点盐湖资源开发及其对生态环境的影响

青藏高原已开发盐湖主要分布在柴达木盆地,如察尔汗、东台、西台、昆特依和尕斯库勒等,这些盐湖已开发了十几年甚至几十年,开发程度相对较高;西藏仅有少数盐湖得到初步开发,规模也较小。以柴达木盆地主要开发盐湖为重点调查对象,兼顾西藏个别盐湖,系统开展全方位的水、土、气生态环境调查。开展不同开发盐湖产品和生产工艺调查,确定主要的产污环节和污染源;开展盐湖区(包括生产和生活区)水环境调查和取样分析,包括盐湖湖表卤水、地下卤水、盐湖区地表和地下径流、生活用水、生产用水和废液排放等;开展盐湖区土壤环境调查,包括土壤理化性质、植被覆盖和退化情况、土地盐渍化等;开展盐湖企业废气排放情况调查,包括生产排气和生活排气,此外还包括盐湖毗邻区农作物焚烧等情况;开展盐湖区地表环境地质调查,重点为补水导致的溶蚀塌陷、溶坑、地面沉降、自然景观改变和地层结构破坏等。通过上述调查和分析,结合盐湖开发情况和历史资料数据,重点剖析人为因素(开发活动)对盐湖区生态环境的影响,对青藏高原盐湖资源开发的环境生态影响及资源环境承载力作出评价。

## 5) 青藏高原盐湖科考数据库构建

在野外科考调查和室内分析及多源数据集成的基础上,构建青藏高原盐湖科学大数据库,具体内容包括:盐湖科学数据库系统功能分析与总体设计,盐湖数据现状分析、数据分类及数据共享机制设计,建立专门针对盐湖资源系统的数据及数据库标准规范,跨域异构多源数据整合,数据质量的控制与更新机制等。完成青藏高原盐湖基本信息数据集、青藏高原盐湖空间分布数据集、青海盐田空间分布数据集、青藏高原盐湖多媒体数据集、中国盐湖卤水化学数据集、中国盐湖卤水相化学数据集、中国盐湖晶间卤水水文地质数据集等数据集。完成《青藏高原盐湖资源环境变化报告》及《青藏高原盐湖资源基础数据调查》报告等。通过盐湖科学数据库功能的深度开发,对青藏高原盐湖数据进行科学有效管理。



## 2 思路与方案

1)以地球系统科学思维为指导,确定科考整体思路

以国家重大需求为导向,针对凝练出的重要科学问题,梳理整体科考思路。根据经费情况和关键科学问题,确定不同专题的科考区域和内容:极端困难区盐湖考察主要针对可可西里、西昆仑等地区的典型盐湖,科考内容包括湖区地质地理概况、基础水文及水化学特征、盐湖沉积特征、水生生物等;古盐湖钾盐调查考察区主要聚焦柴达木盆地和羌塘盆地东部,内容包括基础地质调查、目标层位(盐层或膏盐层)剖面测制和取样、盐泉考察取样等;盐湖资源元素富集机制调查主要以青藏高原北部的昆仑山和祁连山南缘为研究区,以“山(物源区)”为主,兼顾“盆(尾间盐湖)”和中间过程,主要内容包括母岩区物质组分、资源元素在迁移过程中地球化学行为等;盐湖资源开发的生态环境效应主要工作区为柴达木盆地,开展重点开发盐湖的水环境、大气环境、土壤环境及环境地质等方面的调查研究工作;各类科考数据最终通过盐湖科学数据库进行汇总、开展数据分析与科学管理。上述工作以科考为重心,紧紧围绕盐湖的资源属性和生态环境属性来开展各项工作,通过系统科学的思维方法把各个研究方向(子专题)凝聚成一个有机整体。

2)系统解译前人资料,制订详细科考计划

根据整体科考思路,结合不同专题所聚焦的科学问题和研究方向的特点,系统收集和整理调查区已有的盐湖相关基础数据资料,包括区域地质调查资料,物化探、地质勘探、遥感影像资料、长观气象和水文资料等。根据资料整理和分析结果,设计和制定野外工作计划。详细工作计划还考虑到以下几点:在充分考虑项目(任务)整体科考路线制订的基础上,对于工作区域和考察路线有重叠的研究方向(子专题),进行适当归并并组织内部联合科考,避免重复工作,节省人力物力;针对要出年度亮点成果的子专题,在当年人员配置和经费分配方面给予适当倾斜;对各子专题进行阶段性总结汇报,及时纠偏和查缺补漏,同时各

项工作开展对标,弥补不足,提升科考质量。

3)实施野外调查工作,开展样品系统采集

调查极端困难区盐湖及其周缘自然地理、生态环境、水文地质、构造和岩性特征,利用相关仪器设备获取野外气象、水文、水体理化参数、浅层卤水基本的水文地质参数。重点在羌塘盆地和柴达木盆地开展野外地质调查,以含膏盐的中/新生代连续剖面为重点考察对象,同时对区内出露的膏盐、沉积型菱镁矿、盐湖及盐泉等进行全面调查取样;根据不同资源富集特征,选择不同流域进行母岩和沉积物、丰水期和枯水期的水体样品采集,并现场利用便携式仪器测定其物理化学参数。在富锂的洪—那流域及尾间盐湖、富硼的塔塔棱河—柴旦湖流域采集母岩与河道沉积物、泉河湖等各类水体样品。以柴达木盆地主要开发盐湖为重点调查对象,开展这些盐湖的资源储量、产能和产量、矿权设置等基本信息的搜集和整理工作,实地调查企业实际生产情况。对柴达木盆地盐湖生产过程以及盐湖开发影响区的盐尘暴灾害、环境地质灾害、地层结构破坏、地形地貌、植被破坏与退化以及土地盐渍化情况进行调查和取样。

4)开展室内样品分析,集成解译数据资料

根据实际需要搜集高光谱遥感影像资料和高分辨率遥感影像资料,解译和提取盐湖的具体形态、面积、水域、阶地的具体分布和变化等信息;对野外采集的样品进行矿物组成、常量元素、微量元素、同位素、水生生物等全面系统的分析。开展盐湖区地质地理、构造、水文地质、水文地球化学、盐湖卤水水化学特征等方面的室内研究工作。

以贯穿柴达木盆地和羌塘盆地的地球物理勘测数据为基础,通过精细解译获取各盆地的基底起伏、断裂构造展布及盆地样式等信息;结合物探和遥感资料,重建盆地构造格架、盆地分隔演化与改造变形史,预测古盐湖浓缩中心。解析各目的层位的成盐成钾条件与资源远景,构建各成盐盆地的成盐成钾理论模型,圈定成钾远景区。

结合气象、区域地质、水文、自然地理等基础数据,分析盐湖的自然演化规律及其与气候变化、区域地质背景、补给流域变化等之间关系,探讨不同控制因子条件下,盐湖资源系统变化的响应过

程,分类评估青藏高原盐湖战略资源潜力及开发条件。以柴达木盆地察尔汗盐湖区等人口聚居区和绿洲地带为重点,开展生态环境调查和分析,研究盐湖开发对区域生态环境的影响。

5) 总结、形成各类图件、数据集和科学报告

分别总结上述研究成果,形成专题数据集、图件等;聚焦科学问题,围绕国家战略需求,进行各类数据和资料的综合集成和成果凝练,形成各类科考专题报告及咨询报告。

6) 建立共享数据库并实现数据汇交

构建专门针对青藏二次科考盐湖科学数据的数据共享、数据、元数据和数据库建设的规范,基于系统功能设计系统支撑层、数据层、平台层等整体架构。从数据下载、数据服务、建立知识库、提

供数据发表及科研协同等方面入手,实现相关的数据共享和数据服务。

3 阶段性研究进展

2019—2021 年,盐湖专题科考队先后组织野外考察 30 余次(图 2),系统考察了可可西里、阿尔金地区、青藏高原北缘西昆仑等地区 50 多个盐湖的面积变化,地球化学指标,资源变化盐湖资源环境承载力,富锂盐湖综合考察等科考情况,采集盐湖区水样 700 件、岩石样 70 件、钻孔岩芯 200 m(5 个盐湖区)、卤水样品 500 件,土壤样 1 500 件,剖面 50 条,完成数据汇交 13 项科考数据集汇交。

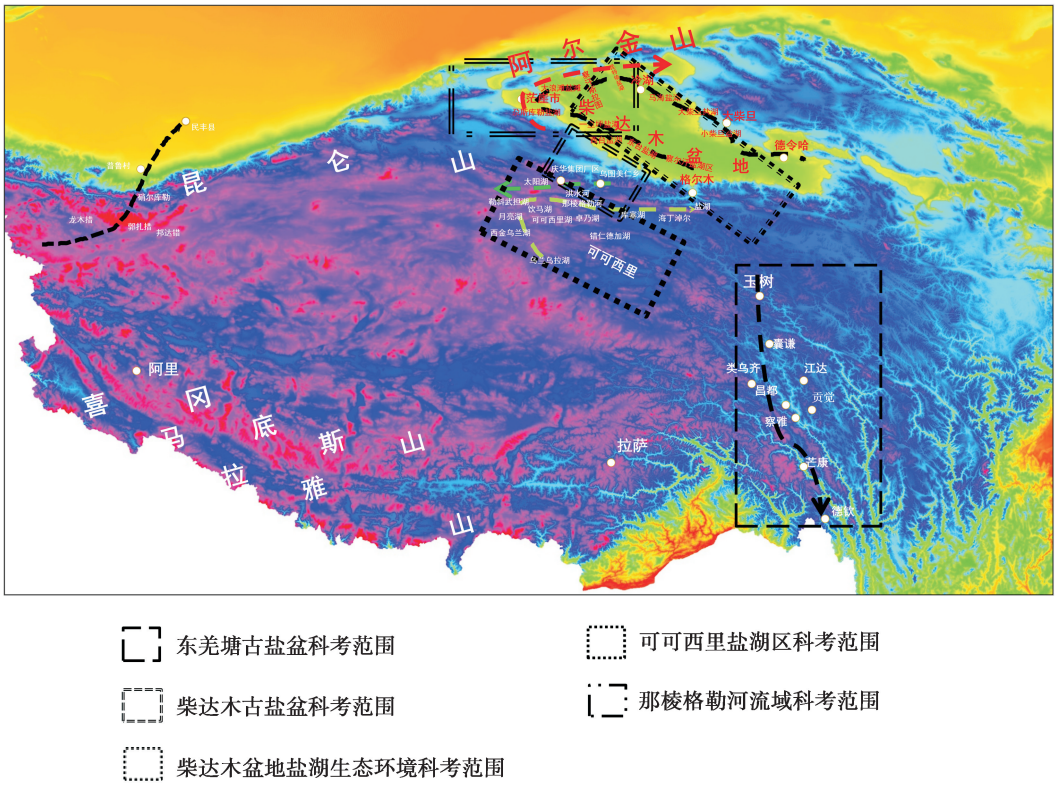


图 2 青藏高原二次科考综合考察盐湖考察研究区

Fig. 2 The overview of the study area of the second Tibetan Plateau scientific expedition

经过 3 年的科学考察与研究,盐湖专题取得阶段性进展,其中开展的极端困难区盐湖资源本底调查、嗜盐微生物固碳效应及锂镁资源成矿模式等方面获得了一系列成果,促进了对气候变化背景下青藏高原盐湖资源系统的变化规律认识,为探索盐湖资源可持续发展途径提供了科学依据。

3.1 首次揭示高原盐湖区嗜盐微生物种群系统的固碳潜力

通过首次对青藏高原盐湖微生物群落特征、固碳潜力及其环境因子驱动机制研究,发现盐湖中广泛分布广古菌门、变形菌门、放线菌门、拟杆

菌门及疣微菌门(图 3),其中盐湖微生物丰度、物种多样性、分布均匀性受盐分、养分及温度等多种环境因子共同驱动,碳酸根离子( $\text{CO}_3^{2-}$ )、总溶解性固体物质(TDS, Total Dissolved Solids)、钠离子( $\text{Na}^+$ )、硫酸根离子( $\text{SO}_4^{2-}$ )、硼离子( $\text{B}^{3+}$ )、钾离子( $\text{K}^+$ )、氯离子( $\text{Cl}^-$ )和盐度是影响盐湖细菌群落组成的重要理化因子,填补了盐湖极端环境微生物基础研究空白。同时,研究得出青藏高原湖泊二

氧化碳通量平均值为  $1\,132\,\mu\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{min})$ ,二氧化碳( $\text{CO}_2$ )总排放量平均值为  $3.20\times10^{10}\,\text{g/a}$ ,微生物固碳速率为  $18.3\sim2186.3\,\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,固碳总量为  $88.93\sim186.87\,\text{TgC}$ ( $1\text{Tg}=1\times10^{12}\,\text{g}$ ),盐湖微生物固碳远高于  $\text{CO}_2$ 总排放量,开展青藏高原盐湖微生物固碳效应研究,对下一步开展嗜盐微生物种群对气候变化的响应、高原湖泊碳汇等研究将发挥重要的作用。

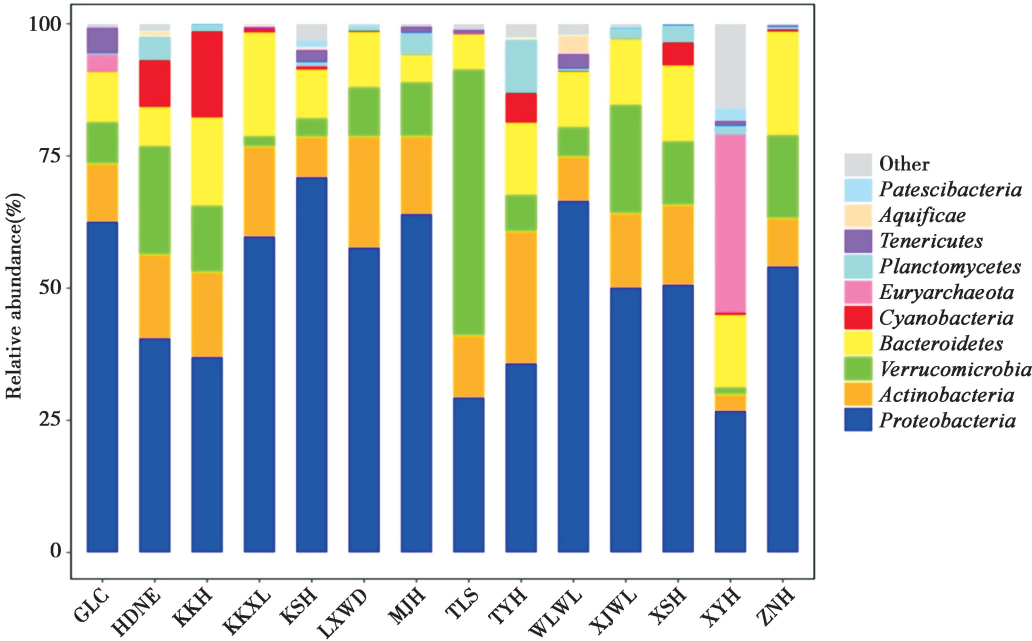


图 3 盐湖丰度最高的微生物分布图

Fig. 3 Map of the highest abundance of microorganisms in salt lakes

3. 2 建立柴达木盆地镁锂资源富集模型并实现盐湖“异源同汇”成矿理论创新

青藏高原是世界最大的盐湖锂资源集中分布区之一,富锂盐湖卤水镁锂比值普遍较高。通过在柴达木盆地那棱格勒河流域及富锂尾间盐湖,系统开展高镁比锂型( $\text{Mg}/\text{Li}$ )卤水的形成机制研究,发现水体中镁和锂具有不同物源,镁主要与流域围岩风化淋滤有关,而锂主要来自地层深部高温热液活动,摸清典型盐湖资源的物源及运移和富集过程,建立盐湖战略资源元素“源—汇”概念模型(图 4);同时,对区域内镁来源和富集过程进行了追踪,发现高  $\text{Mg}/\text{Li}$  卤水形成主要与补给源有关,厘定镁锂在迁移富集过程中具有相似的地

球化学行为,镁锂在卤水中的异常富集与河流季节性补给过程也有关,该发现将有助于深入认识盐湖锂资源富集成矿机制,也为盐湖资源高效开发利用提供理论支撑。

3. 3 研究构建盐湖资源变化趋势及资源环境承载力评价体系

在气候暖湿化变化趋势下,与第一次青藏科考相比,柴达木盆地洪涝灾害风险对盐湖区影响持续增大,总溶解性固体物质(TDS)、氯离子( $\text{Cl}^-$ )、锂离子( $\text{Li}^+$ )、钾离子( $\text{K}^+$ )、硼离子( $\text{B}^{3+}$ )浓度显著降低,总体趋势表现为卤水矿层变薄、降落漏斗范围扩大等特征,特别是钾盐资源储量逐年减少,有些服务年限甚至不足10年,资源型钾



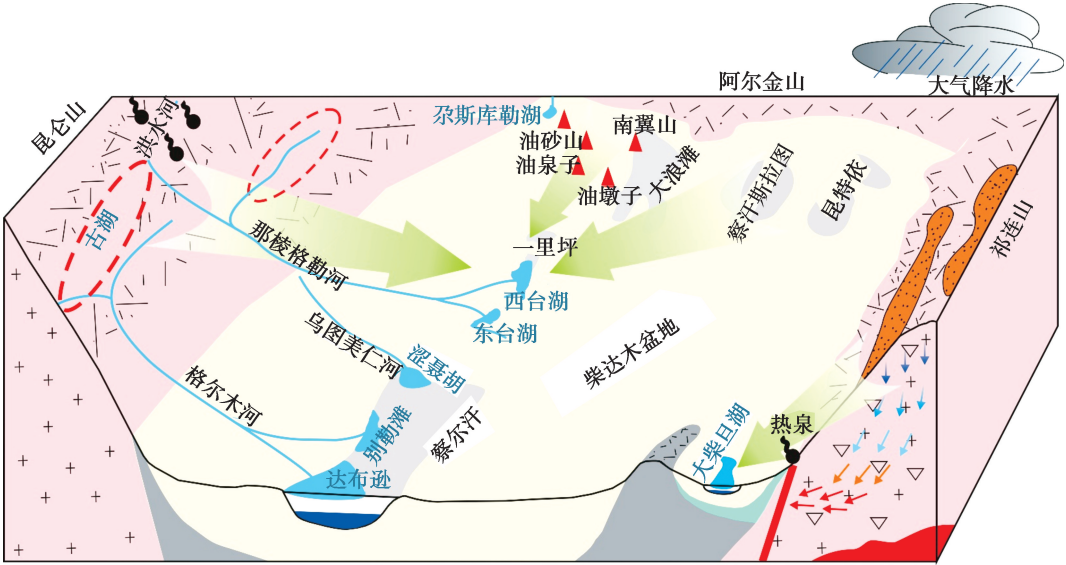


图 4 镁锂“异源同汇”成矿模式示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 4 The pattern map of different source and similar migration & convergence of  $Mg^{2+}$  and  $Li^{+}$  elements in the salt lakes in the Qaidam Basin<sup>[19]</sup>

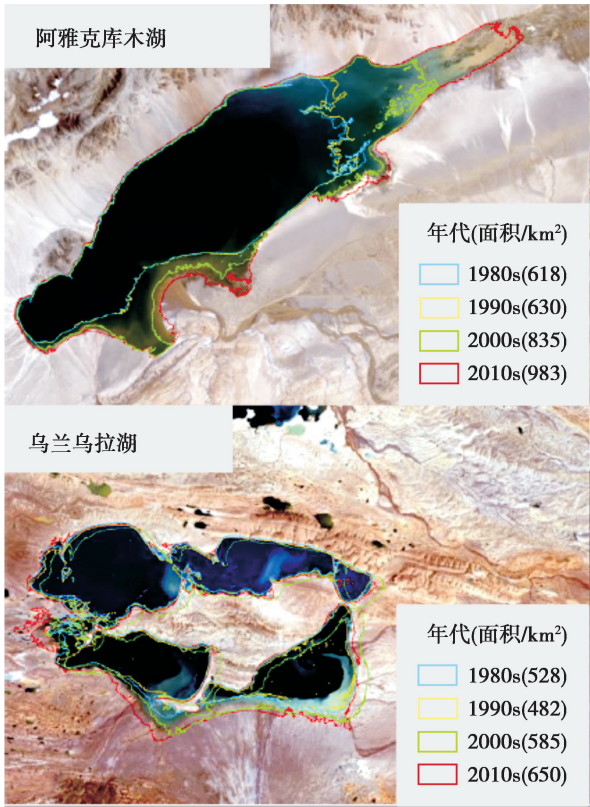


图 5 不同年份盐湖区水循环及生态环境变化

Fig. 5 The variety of hydrologic cycle and ecological environment of salt lake areas in different years

区生态环境现状、资源开发效应的科学考察,建立了符合盐湖资源系统特点和区域特点的评价指标体系,构建储卤层卤水动态变化与开采规模、开采模式及水资源等环境约束因子之间的关系与承载力变化模型,系统开展了盐湖资源开发模式下的生态环境影响、资源环境承载力评价,提出了开展盐湖固液转化效率提升、三低矿开发及深部卤水探测利用等关键技术研发,科学规划资源开发规模和可持续发展路径,为我国钾肥生产和粮食安全提供科技支撑和保障。

3. 4 研究发现盐尘暴产生与人类活动的交互作用及影响机理

柴达木盆地是青藏高原高含盐量沙尘气溶胶(盐尘暴)的频发地区之一<sup>[20]</sup>。通过对柴达木盆地大气环境监测发现,盐湖本身及资源开发等人类活动对盐尘中的硼离子( $B^{3+}$ )、锂离子( $Li^{+}$ )、硝酸根离子( $NO_3^{-}$ )等具有重要贡献,其中受物源、风动力条件和地形地貌等因素共同影响,“盐”和“尘”的含量呈现非同步变化的现象,揭示了含盐物质来源和沉降过程的复杂性;通过沉积通量估算表明,每年沉降到察尔汗盐湖区的盐类物质近 3 万 t,其中钾 700 t 以上,表明含盐降尘很可能是盐湖资源聚集成矿的一个重要物质来源。综合分

肥产能大规模扩张开发已不可持续。通过对盐湖

析认为,盐湖区含盐降尘具有显著的资源—生态—环境效应,而人类活动对盐尘的形成机制具有重要影响,这些研究结果和发现为生态环境保护前提下的盐湖资源开发提供了重要科学依据。

### 3.5 建成国内最大的盐湖专题科学数据共享平台

通过收集长时间序列盐湖资源信息及跨域异构多源数据整合,建立了数字化、标准化、规范化的盐湖资源环境科学数据库,初步建成集数据存贮、信息查询及空间处理功能于一体的青藏高原盐湖资源基础数据信息平台,填补了盐湖资源系统数据及标准规范空白。目前,盐湖资源数据库包含8个基本类别数据,容量达到约700 GB。后续将通过实地监测与遥感监测等手段相结合,打造盐湖区“空—天—地”一体化监测和预警系统。

### 3.6 开展西藏富锂盐湖铷铯资源系统调查

2021年,二次科考盐湖专题科考队历时近2个月,行程超过了1.2万km,采集水样及沉积物样200多件,对西藏50多个富锂盐湖进行了铷、铯资源的系统考察。考察发现,西藏是我国富铷、铯盐湖的主要分布区。由于盐湖铷铯与锂属于伴生矿,其地球化学行为相似,富锂的盐湖往往也都含有铷铯<sup>[21]</sup>。扎布耶茶卡是西藏最为富铷的盐湖,其南部湖区 $\text{Rb}_2\text{O}$ 的含量可达56 mg/L,已达到卤水铷资源开发利用标准( $\text{Rb}_2\text{O}$ 含量 $\geq 50$  mg/L)。扎仓茶卡 $\text{Rb}_2\text{O}$ 含量接近20 mg/L;孔孔茶卡、玛尔果茶卡、拉果错等少数几个盐湖中的 $\text{Rb}_2\text{O}$ 含量则超过或接近10 mg/L。聂耳错(24 mg/L)、扎布耶茶卡(南湖)(23 mg/L)、热帮错(22 mg/L)、扎西茶卡(21 mg/L)等几个盐湖铯的含量也已达到了开发利用标准。研究发现,虽然盐湖中的铷铯含量总体偏低,但总量十分巨大。且卤水提铷铯不存在矿石法所伴随的大量酸碱的使用和固体废弃物的产生<sup>[20]</sup>,随着盐湖分离提取技术的不断进步,盐湖有可能成为我国未来铷、铯资源的重要来源之一。

## 4 展 望

二次科考盐湖专题已圆满完成第一阶段任

务。2022年6月二次科考将迎来第一阶段评估。从2022年下半年开始,盐湖专题除继续按原计划推进外,还将重点加强二次科考第一阶段的成果转化工作。主要围绕基于盐湖资源绿色开发应用为导向的多源数据集成、融合与同化等,开展盐湖资源环境承载力变化模型、矿区可采资源量精准评价、盐湖区水资源时空优化配置、气候变暖背景下盐湖变化影响及危害预警模型构建等方面的支撑服务工作。推动盐湖科学数据库和大数据中心建设以及盐湖高质量发展标准及示范基地建设等,更好地将科考成果应用于推动地方社会经济的绿色可持续发展。

**致谢:**感谢青海省青藏科考服务和成果转化中心马本元主任、魏瑜杰副主任、巩志娟老师对科考工作的大力支持!

### 参考文献:

- [1] 马培华. 中国盐湖资源的开发利用与科技问题[J]. 地球科学进展, 2000, (4):365-375.
- [2] 杨邵修. 青藏高原盐湖的形成与分布[J]. 湖泊科学, 1989, 1(1):28-36.
- [3] 郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 等. 中国盐湖志[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [4] 饶娇萍, 贾沁贤, 刘喜方, 等. 西藏得不日错—拉果错湖链形态、水文与水化学特性[J]. 地球学报, 2019, 40(5):737-746.
- [5] 袁瑞强, 程芳琴. 我国盐湖资源综合利用的探讨[J]. 盐湖研究, 2008, (1):67-72.
- [6] 王建萍, 凌智永, 陈亮, 等. 中国盐湖资源与环境地理信息系统设计与实现[J]. 青海科技, 2019, 26(1):17-24.
- [7] 王长命. 北魏以降河东盐池时空演变研究[D]. 上海:复旦大学, 2011.
- [8] 陈辉, 隆浩. 柴达木盆地盐湖区水资源利用与生态需水研究[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2009, (4):58-61.
- [9] 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 等. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望[J]. 地质学报, 2016, 90(9):2123-2166.
- [10] 刘丽峰, 安勇, 阮菊华, 等. 察尔汗盐湖开发及环境地质问题综述[J]. 青海国土经略, 2008(6):44-45.
- [11] 余娜. 动力电池矿战[J]. 能源, 2017, (12):14-18.
- [12] 熊增华, 王石军. 中国钾资源开发利用技术及产业发展综述[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6):1-7.
- [13] 严军, 黄小良. 青海省盐湖钾、镁、锂盐资源开发利用探讨[J]. 盐湖研究, 2002, (4):63-69.
- [14] 郑喜玉, 唐渊, 徐昶, 等. 西藏盐湖[M]. 北京:科学出版

社,1988.

[ 15 ] 唐渊,于升松,刘青. 西藏盐湖水化学特征的初步研究 [J]. 盐湖科技资料,1981,(Z1):20-32.

[ 16 ] 张明刚. 新疆盐湖卤水水化学特征研究[J]. 盐湖研究,1993,(1):17-32.

[ 17 ] 柳大纲,陈敬清,张长美. 柴达木盆地盐湖类型和水化学特征[J]. 盐湖研究,1996,(Z1):9-19.

[ 18 ] 韩凤清. 青藏高原盐湖 Li 地球化学[J]. 盐湖研究,2001,(1):55-61.

[ 19 ] 姜盼武. 柴达木盆地中北缘水—岩硼含量分布特征及富硼流体的物源分析[D]. 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所),2020.

[ 20 ] 耿望,张西营,郭晓宁,等. 柴达木盆地大气降尘可溶盐物源探讨及其资源与环境影响[J]. 地质学报,2021,95(7):2082-2098.

[ 21 ] 闫明,钟辉,张艳. 卤水中分离提取铷、铯的研究进展[J]. 盐湖研究,2006,(3):67-72.

Focusing on the Changing Salt Lake: The overall Design and Implementation of the Salt Lake Project

WANG Jian-ping<sup>1,2</sup>,ZHANG Xi-ying<sup>1,2</sup>, JIAO Peng-cheng<sup>3</sup>

- (( 1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;
2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining, 810008, China;
3. Institute of Mineral Resources,Chinese Academy of Geological Sciences,Beijing, 100037, China)

**Abstract:**The Qinghai-Tibet Plateau is known as a significant ecological barrier of China as well as an important salt lake distribution area. A systematical investigation about salt lake had been carried on during the first comprehensive scientific expedition to the Qinghai-Tibet Plateau 50 years ago. Based on previous works, the second comprehensive scientific expedition mainly focus on the supplementary investigation of the salt lakes located in some extremely remote areas, the dynamic of salt lake under the impact of climate change as well as the human intervention, the migration and enrichment rule of key strategic elements from salt lake, the metallogenic prediction of the ancient potash deposit, and the eco-environmental effect of resource utility, and so on. Through 3-year efforts, a large amount first-hand data and several encouraging outputs have been achieved. For better understanding of the whole picture, this paper introduced the framework of the project design, the research contents, the technical route ,the highlight ,and the plan for the second-stage investigation.

**Key words:** Qinghai-Tibet Plateau; The second expedition; Salt Lake