

盐湖地下卤水的开采技术及其展望

韩积斌¹, 许建新¹, 安朝^{1,2}, 马海州¹, 韩凤清¹

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:我国是农业大国,钾肥的需求量巨大,目前钾肥供应主要来源于柴达木盆地。由于目前的技术限制,钾资源的开发还局限于浅部,无法满足我国钾肥的需求,大部分钾肥还依赖于进口。总结和对比井采技术、渠采技术和 CO₂地质封存与深部卤水联合注采技术(CO₂-EWR)表明,对浅层地下卤水的开采,井采技术和渠采技术适用,但两种技术使采卤泵、采卤管道和输卤渠容易堵塞;并且井采技术投资较大,渠采技术可能导致地下水循环受阻,因而会出现大面积的疏干区。CO₂-EWR 适合开采深部卤水,虽然该技术的一次性投入较大,但该技术一方面将 CO₂存储在深部卤水层中,另一方面将卤水驱替出含水层,是一种新型的碳捕集、利用与封存的技术(CCUS)。随着浅层卤水资源的耗竭,开展深部卤水资源的开采利用势在必行,CO₂-EWR 技术应用会越来越广泛。

关键词:地下卤水;开采技术;CO₂-EWR;进展

中图分类号:TD871.1

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2015)01-0067-06

我国是个盐湖众多的国家之一,盐湖数量多,盐类资源种类齐全,包括盐湖卤水资源、盐类沉积资源、盐湖生物资源和盐湖旅游资源。据考察统计,全国有大大小小的盐湖 1 000 多个,盐湖面积约 5×10^4 km²,主要分布在西藏、青海、新疆和内蒙古四省区^[1]。对盐湖资源的开采以盐类沉积资源和盐湖卤水资源为主,尤其是盐湖卤水资源储量巨大。我国盐湖盐类沉积矿物共有 70 种,主要包括盐湖碳酸盐类矿物 18 种、硫酸盐类矿物 25 种、硼酸盐类矿物 14 种、氯化物盐类矿物 8 种、硝酸盐类矿物 5 种;盐湖卤水中赋含 60 种化学组分,Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻和 CO₃²⁻为主要化学元素,另外还有丰富的重金属元素、放射性元素、稀有元素和碱金属元素^[1],是我国钾、锂、锶、溴、硼及芒硝等盐类资源的重要产地。我国是农业大国,每年需进口数百万吨钾肥用

于农业生产^[2]。目前用于盐湖化工、钾肥生产的原料主要来源于浅层地下卤水和浅部盐类矿物的溶解开采,但仍然无法摆脱进口钾肥的局面。虽然深部地下卤水储量巨大,但由于技术、设备等条件的限制使其无法实际利用。为了摆脱过分依赖国外钾肥资源,巩固我国在国际钾肥市场上的话语权,开采利用深部卤水资源显得尤为重要。

纵观国内外地下卤水的采卤方法,传统方法主要有 3 种:井采技术,渠采技术和井渠结合技术^[2]。随着全球主要温室气体 CO₂在大气中的含量逐渐上升,导致一系列环境和生态问题。因此,减少 CO₂排放成为人类共同关注的热点问题。欧美及日本的经验表明,地质封存可能是处置 CO₂的有效措施之一^[3]。CO₂地质封存是将 CO₂注入到深部地层,通过矿物捕捉、气体捕捉、溶解捕捉等机制把 CO₂长期或永久封存

收稿日期:2014-06-09;修回日期:2014-06-26

基金项目:中国科学院青海盐湖研究所青年引导基金资助项目(Y360351049)

作者简介:韩积斌(1985-),男,助理研究员,主要从事盐湖水文地质及水文地球化学方面的研究工作。Email: hanjibinali@163.com。

在封闭地层中,从而减少大气中 CO_2 浓度^[4-5]。适合作为 CO_2 封存的地质场所主要有枯竭的油气田、深部咸水/卤水层和不具有开采价值的煤层。深部卤水层中 CO_2 地质封存的研究始于 20 世纪 90 年代,因其分布广、储量大、安全性好,被认为是最具有发展前景的封存方式^[3,6]。然而单纯的 CO_2 地质封存花费巨大,而且 CO_2 地质封存过程中由于地层压力的累积会导致地层变形、地震、地下水污染、 CO_2 泄露等环境地质问题。因此,如何降低 CO_2 封存中的环境地质问题和高昂的封存费用是目前研究的另一热点问题。我国在《“十二五”国家碳捕集利用与封存科技发展专项规划》中指出^[7],在未来五年内将大力支持 CO_2 封存与联合利用(CCUS)的科学研究。常见的联用方法有 CO_2 地质封存与煤层气开采($\text{CO}_2 - \text{ECBM}$)、 CO_2 地质封存与油气开采($\text{CO}_2 - \text{EOR}$)、 CO_2 地质封存与地热系统($\text{CO}_2 - \text{EGS}$)结合^[8]。近年来 CO_2 地质封存与地下液体或气体资源的联合注采方法逐渐成为解决这些问题的较好方法。

本文针对目前我国盐湖晶间卤水的开采技术,总结、分析优缺点,并着重分析目前最新的采卤技术,即利用 CO_2 地质封存机制驱替深部卤水($\text{CO}_2 - \text{EWR}$)。

1 井采技术

井采技术是通过钻井,利用抽水泵采取地下卤水的技术。井采技术的成功应用使得有效开采深度大大提高,它适用于开采厚层或深部卤水,但由于卤水的易结盐性,极易堵塞采卤泵的滤水管和输卤管道,严重时运行约 1 h 即可全部堵死,且清除结盐非常困难。随着优选泵型、优选材质、改善井身结构和综合采取多种防结盐等措施的运用,井采技术已被广泛用于地下卤水的开采。青海盐湖集团 2001 年在别勒滩盐湖区开展的井采技术,单井深 20 m,采卤设备为 6221 型固定潜水泵,水泵的主要零部件采用耐腐蚀的不锈钢材料,并在泵的第一级叶轮入口处设计了一个淡水孔,由地面淡水管线加入一定量的淡水。该设备投入运行 8 个多月未发现结盐,运行良好,加入的淡水量是采卤量

的 1%。由于盐湖地区淡水资源非常有限,很大程度上限制了该技术^[2]。罗布泊盐湖地下卤水的开采也采用此方式,井深达到 40 ~ 60 m,单井采卤量达到 $1\,500 \sim 2\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[9]。虽然井采技术一定程度上提高了地下卤水的开采深度,但在地下卤水水位逐渐降低的情况下,固定泵的使用对这种采卤方式带来很大的不便。近年来,浮箱式采卤泵的发明,解决了传统固定泵站低效、不安全、不可调、难维护等多项难题,实现采卤泵站能自动随地下卤水水位变化而自由上下浮动,实现了地下卤水生产的连续平稳性和生产能力可调控性。

2 渠采技术

渠采技术是指垂直于地下水流方向布置一排渗流渠,利用导水管连接至集水井抽水。盐湖卤水的渠采技术是依据盐湖晶间卤水分布区域内晶间潜卤水的赋存状态,在赋卤层较厚的地方挖采卤渠,采卤渠的水汇集到输卤渠,通过输卤渠输送到输卤泵站,然后送到盐田进行初步的分离加工^[10]。这种技术适合用于盐湖晶间潜卤水的开采,该技术是目前抽取浅层盐湖卤水的主要方法之一。青海盐湖集团一期技改工程中首次在盐层上成功修建了 14 km 长输卤宽渠,运行情况良好。目前在盐湖卤水开采项目中全部采用渠道输卤,累计大中型输卤渠总长约为 500 km^[9]。通过对采区集卤渠道的长度和深度分别进行开挖试验表明,渠道单向加长,渠道深度不变,采卤量增加较少,与延伸长度不成比例;远离采卤泵站处无法形成较大水位降深,不具采卤能力^[9]。影响渠采技术取水效果的主要因素有:1)渠道淤塞,其对取水效果影响很大。由于渗渠中卤水在自然蒸发条件下更容易结盐,再加上卤水的粘滞性,盐岩逐渐在渗渠内淤积,最终导致渗渠淤塞,影响卤水的输送。但由于该技术经济投资较少,大大提高了其应用性。2)地下水循环受阻,大面积出现疏干区。目前察尔汗盐湖首采区内遍布采卤渠,渠网布设采取短了加长,浅了加深和稀了加密的应急采卤方式,这种方式已经严重破坏了地下潜卤水的含水层系统,阻断了地表水(湖

水)、地下卤水对察尔汗盐湖区段的补给途径,减少了地下水补给量^[11]。同时大面积出现疏干区,导致大量的固体氯化钾无法溶解采出。据青海省地质环境监测总站2004年与1986年监测数据比较分析,在达布逊盐湖区域内,KCl百分含量大于1%的区域缩小了305 km^[1, 12]。

3 CO₂ - EWR 技术

近年来,在我国 CO₂ 减排任务繁重以及钾肥需求量日益增大的形势下,开展 CO₂ 储存和开发钾肥资源的利用显得尤为重要^[13-15],政府部门应积极展开深部卤水层二氧化碳利用和储存(CO₂ Capture, Utilization and Storage, 简称 CCUS)以及开采深部液体钾盐矿产资源(卤水)等战略举措。由于单纯将 CO₂ 注入深部卤水层时,虽然减轻了 CO₂ 排放压力,但对于传统的 CO₂ 卤水封存项目,大规模的 CO₂ 注入会导致地层压力提升、咸水/卤水取代。压力的增加使得上覆盖层产生破裂或断层重新活动,从而引发 CO₂ 泄露或地震^[16];同时,仅仅开采深部卤水无疑是一项巨大的工程,花费大量财力。

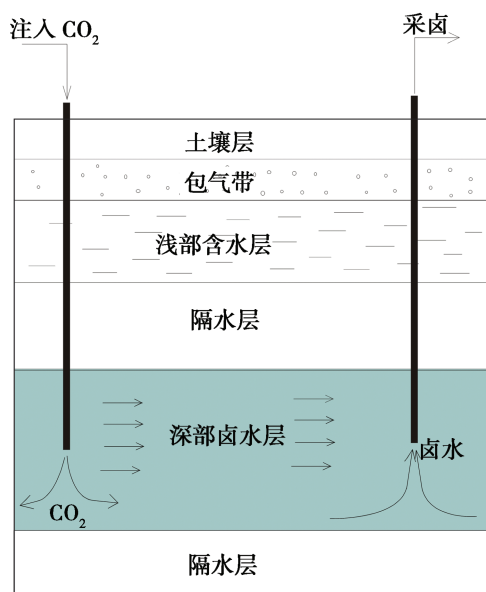


图1 基于 CO₂ - EWR 采卤概念图

Fig. 1 The concept of extraction brine based on the CO₂ - EWR technology

近年来国外学者提出利用 CO₂ 驱替深部水资源(CO₂ - EWR: CO₂ Enhanced Water Recovery)^[16],引起了许多学者极大的兴趣。该技术是指将 CO₂ 注入深部含水层中,驱替地下深部的高附加值液体矿产资源(钾盐、锂盐、溴素等)或深部淡水资源,同时实现 CO₂ 深度减排和长期封存的一种新型 CO₂ 捕捉、利用与封存(CCUS)过程,如图1所示。该技术一方面可通过合理的开采井位控制和采水量控制释放储层压力,达到安全稳定大规模封存 CO₂ 的目的;另一方面采收高矿化度的液体矿产资源,既解决了碳储存的经济压力,也促进了深部液体矿产资源的利用。目前该技术初步应用于驱替深部卤水资源。

国际能源署(IAEA)对全球范围内 CO₂ 地质存储总量的评估值为 $1.25 \times 10^{15} \sim 10.85 \times 10^{15}$ t,其中深部卤水层可储存量约为总量的92%^[17]。显然,今后 CO₂ 地质储存的场所主要集中在深部卤水含水层中。但 CO₂ 注入时的累计压力和封闭场所体积大小是影响卤水层中存储 CO₂ 很重要的制约因素。综合考虑 CO₂ 储存成本及安全性问题,CO₂ - EWR 技术可以有效解决 CO₂ 注入卤水层时在注入井附近的压力累计、注入井附近的盐岩沉淀等问题^[18-19]。CO₂ 在高盐度的卤水中溶解度很小^[20],特别是当 CO₂ 注入时间1~100年内,CO₂ 主要以气体形式或构造圈闭形式储存。因此,CO₂ 注入到卤水层时,导致封闭构造体系中压力增大,CO₂ 会把卤水层孔隙中的重力水、晶间卤水、毛细卤水、甚至结合卤水从孔隙中驱替出来,CO₂ 会占据孔隙位置,从而在封闭体系中储存更多的 CO₂ 气体。对于 CO₂ - EWR 技术,国内外专家做了一定的研究^[21-25],CO₂ 注入与开采深部卤水联用能够减小累计压力,但受到布设井距离和类型的影响(如图2所示)。澳大利亚在建的 Gorgon CCS 项目是 CO₂ - EWR 在全球的首个示范性工程。该项目计划利用8~9口注入井注射天然气处理过程中分离出的 CO₂,4口抽水井管理储层压力,目前项目处于建设期,计划2015年开始运行。澳大利亚西部正在设计的 Collie South West Hub CCUS 项目,也在做抽水

的考虑^[24]。Davidson 等^[22]针对美国部分地区人口剧增、工农业发展、地下水资源过度开采的现状,提出在 CO₂地质封存的同时开发利用深部淡水资源解决水资源危机。有关研究还利用模拟方法计算出,CO₂可以驱替的水占总孔隙体积的 85.88%^[26]。

由此看来,CO₂-EWR 技术具有巨大的潜力。CO₂-EWR 技术一方面可以缓解全球气

候变暖的进程,降低储层压力,使 CO₂达到安全稳定大规模储存;另一方面开采深部卤水或深部淡水资源,40]有望解决水资源短缺问题。尽管表面上看,该技术的成本较单纯的 CCS 偏高,但其带来的直接和间接经济效益不可估量。根据 Buscheck 等人的研究成果^[27],开采出的卤水要比单纯的深部抽取卤水的成本要低很多。

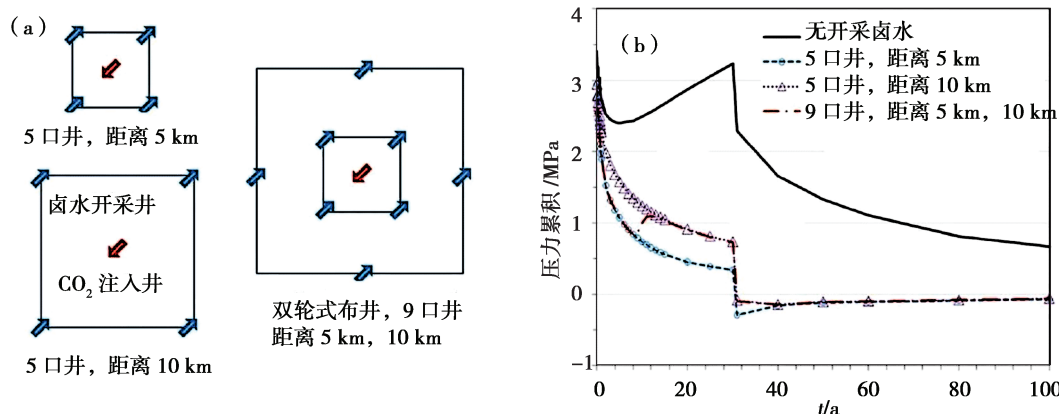


图 2 (a) CO₂注入和采卤井布置方式

(b) 对比无采卤和采卤时压力抬升随 CO₂注入时间的变化情况^[21]

Fig. 2 (a) The methods of injection CO₂ and arrangement of extraction brine well

(b) Pressure buildup with the change of CO₂ injection time between extraction brine and non extraction

4 结论与建议

4.1 结论

通过对上述 3 种开采地下卤水的方法叙述和对比表明,井采技术适合开采深部卤水,但采卤泵受到地下卤水水位的变化较大,管道易结盐,钻井投资较大。渠采技术适合开采浅层卤水,主要缺点是受自然蒸发的影响,渠道容易淤塞;开挖渠道使地下水循环途径受阻,可能出现大面积的疏干区。CO₂-EWR 技术适合开采深部卤水,该技术一方面将大气中的 CO₂通过高压注入到深部卤水层中,代替了卤水层孔隙的位置而被封存,将卤水驱替出含水层;该方法很好地解决了 CO₂封存过程中盖层压力累计的

问题。

4.2 建议

CO₂-EWR 技术无疑是一种促进我国资源开发和环境保护的“双赢”选择。CO₂-EWR 技术是一种符合中国国情、具有创新概念的 CCUS 技术;CO₂-EWR 技术符合循环经济的思想,具有深远的研究意义,但它的推广应用需要以下几方面更深入的研究。

1) 地球化学过程。由于 CO₂需要高压注入到深部卤水层中,应从卤水中元素含量、卤水的物理化学性质、盐岩的微观结构、孔隙度大小等方面深入研究水—盐—CO₂相互作用的过程。

2) 室内实验。理论和模型预测需要通过室内实验的进一步测试和验证。目前,国内针对 CO₂-EWR 的室内实验研究较少,且处于探

索阶段,需要进一步的完善。

3)积极开展现场试验。在室内实验的基础上进一步验证理论和模型实验。国外已经开展了相关工作,并进行生产运行。在国内利用CO₂驱替卤水的尚无先例,目前国内CCUS项目主要集中在利用CO₂驱替石油和页岩气方面的工作。

总之,CO₂-EWR技术的推广应用,需要地质学、环境科学、地下水文学、地质工程和钻井工程等多学科、多领域之间联合深入的研究。

参考文献:

- [1] 郑喜玉,张明刚,徐昶,等. 中国盐湖志[M]. 北京:科学出版社,2002: 163-164.
- [2] 江梅. 盐湖卤水输送设备的防结盐及防腐蚀[J]. 化工矿物与加工,2006,(7): 32-33.
- [3] Bachu S. Sequestration of CO₂ in geological media: Criteria and approach for site selection in response to climate change [J]. Energy Conservation Management, 2000, 41(9): 953-970.
- [4] Soong Y, Goodman A L, McCarthy-Jones JR, Baltrus J P. Experimental and simulation studies on mineral trapping of CO₂ with brine [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(11-12): 1845-1859.
- [5] 李海燕,彭仕宓,许朝阳,等. CO₂在深部咸水层中的埋存机制研究进展[J]. 科技导报,2013, 31(2): 72-79.
- [6] 江怀友,沈平平,罗金玲,等. 世界二氧化碳埋存技术现状与展望[J]. 中国能源, 2010, 32(6): 28-32.
- [7] 中华人民共和国科学技术部. 科技部关于印发“十二五”国家碳捕集利用与封存科技发展专项规划的通知[EB/OL] http://www.most.gov.cn/tztg/201303/t20130311_100051.htm
- [8] Thomas R E, Thomas A B, Michael C. Active CO₂ reservoir management for sustainable geothermal energy extraction and reduced leakage [J]. Greenhouse Gases Science and Technology, 2013, 65(3): 50-65.
- [9] 童阳春,周源. 现代盐湖卤水矿床开采新技术[J]. 金属矿山,2009(S1): 316-319.
- [10] 李海龙. 对盐湖地下晶间卤水的渠道法集卤采卤过程的数学模拟[J]. 高校应用数学学报,1994, 4(3): 237-242.
- [11] 刘丽峰,安勇. 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.
- [12] 李辉. 青海西台吉乃尔盐湖钾锂硼矿开采的环境影响分析及卤水开采方案优化[D]. 西安:长安大学.
- [13] 孙爱文,张卫峰,杜芬,等. 中国钾资源及钾肥发展战略[J]. 现代化工,2009,29(9): 10-14.
- [14] 成建梅,赵静,张可霓,等. 深部咸水层CO₂注入下压力抬升与流体迁移的大尺度模拟研究:以松辽盆地为例[J]. 地质科技情报,2012,31(5): 163-170.
- [15] 李琦,魏亚妮,刘桂臻. 中国沉积盆地深部CO₂地质封存联合咸水开采容量评估[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 93-96.
- [16] Li Q, Wei Y N, Liu G Z, et al. Feasibility of the combination of CO₂ geological storage and saline water development in sedimentary basins of China [J]. Energy Procedia, 2013, 37(7): 4511-4517.
- [17] 俞宏伟,李实,陈兴隆. 盐层二氧化碳封存主控因素数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,2012, 12(28): 7314-7317.
- [18] Benjamin C, Karl W B, Michael A C, et al. Initial evaluation of advantageous synergies associated with simultaneous brine production and CO₂ geological sequestration [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 8(3): 90-100.
- [19] 李义连,房琦,柯怡兵,等. 高盐度卤水对CO₂地质封存的影响:以江汉盆地潜江凹陷为例[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2012, 37(2): 283-288.
- [20] Duan Z, Sun R. An improved model for calculating CO₂ solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2 000 bar [J]. Chemical Geology, 2003, 193(3-4): 253-271.
- [21] Buscheck T A, Sun Y W, Chen M J, et al. Active CO₂ reservoir management for carbon storage: Analysis of operational strategies to relieve pressure buildup and improve injectivity [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 6(6): 230-245.
- [22] Davidson C L, Dooley J J, Dahowski R T. Assessing the Impacts of Future Demand for Saline Groundwater on Commercial Deployment of CCS in the United States [J]. Greenhouse Gas Control Technologies, 2009, 1(1): 1949-1956.
- [23] Kobos P H, Cappelle M A, Krumhansl J L, et al. Combining power plant water needs and carbon dioxide storage using saline formations: Implications for carbon dioxide and water management policies [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(5): 899-910.
- [24] Aines R D, Wolery T J, Bourcier W L, et al. Fresh water generation from aquifer-pressured carbon storage: feasibility of treating saline formation water [J]. Energy Procedia, 2011, 4(2): 2269-2276.
- [25] Bergmo P S, Grimstad A A, Lindeberg E. Simultaneous CO₂ injection and water production to optimize aquifer storage capacity [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(4): 555-564.
- [26] 马瑾,胥蕊娜,罗庶,等. 超临界压力CO₂在深部咸水层

- 中运移规律研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(11): 1971 – 1975.
- [27] Buscheck T A, Sun Y W, Hao Y, *et al.* Combining brine extraction, desalination, and residual-brine reinjection with CO₂ storage in saline formations: Implications for pressure management, capacity, and risk mitigation [J]. Energy Procedia, 2011, 4(2): 4283 – 4290.

Research Advance of the Salt Lake Underground Brine Extraction Technology

HAN Ji-bin¹, XU Jian-xin¹, AN Zhao², MA Hai-zhou¹, HAN Feng-qing¹

(1. Qinghai institute of salt lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: As an agricultural country, China demands for enormous potash, and the potash supply mainly comes from Qaidam basin at present. Due to the technical limitations, the development of potash resources are limited in the shallow, unable to meet the demand in our country, most of the potash depends on the import. In this paper, we had summarized and compared the three methods of Well-extraction technology, Canal-extraction technology and CO₂ enhanced water recovery (CO₂ – EWR). It is show that, for the shallow brine extraction, both Well-extraction and Canal-extraction technology are applicable, but there are have disadvantages. First, the two technologies lead the brine extraction pump, brine pipeline and lose halide canal to blocking; Second, Well-extraction technology needs great investment, Canal-extraction technology may result in water circulation frustration that will bring a large area of drainage. CO₂ – EWR technology is suitable for deep brine extraction, although it is larger investment at first of the technology. On the one hand, the technology stores the CO₂ in deep brine formations, on the other hand, it displaces the deep brine from the aquifer. It is a new type of carbon capture, utilization and storage technology (CCUS). With the shallow brine is runout, to carried out deep brine resources extraction is important. Therefore, the CO₂ – EWR technology applications will be more and more widely.

Key words: Underground brine; Extraction technology; CO₂ – EWR; Research advance

《盐湖研究》合订本征订启事

《盐湖研究》是原国家科委批准的学术类自然科学期刊,由中国科学院青海盐湖研究所主办,科学出版社出版,1993 年创刊并在国内外公开发行。《盐湖研究》自公开发行以来,深受广大读者的厚爱,为了便于我刊读者和文献情报服务单位系统收藏,编辑部藏有 94 – 95 年、96 – 97 年、98 – 99 年、2000 年、2001 – 2002 年、2003 年、2004 – 2005 年、2006 – 2007 年、2008 – 2009 年、2010 – 2011 年、2012 – 2013 年合订本,每年册仅收取工本费 90 元。数量有限,欲购者请与《盐湖研究》编辑部联系,电话:0971 – 6301683