

察尔汗盐湖霍布逊区段资源开采过程中 储卤层系统变化特征研究

韩 光¹⁾, 袁小龙^{2, 3)*}, 韩积斌³⁾, 刘久波¹⁾,
范增林¹⁾, 胡 燕¹⁾, 张西营³⁾

1)青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室, 青海格尔木 816099;

2)河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098;

3)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,
青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海西宁 810008

摘 要: 柴达木盆地察尔汗盐湖赋存量可观的低品位固体钾盐矿, 其主要的开发方式为液化开采。本文对比分析了霍布逊区段盐湖资源大规模开采前(2004 年)和开采后(2011 年和 2019 年)典型钻孔岩芯孔隙度、固体钾矿含量、卤水组分变化特征, 评价了钾盐液化开采效率。结果表明: 由于大规模采卤使得大量高矿化度卤水被带出, 而低矿化度水体补给储卤层孔隙并溶解盐层中盐类矿物, 使得储卤层孔隙率有逐渐增大趋势; 卤水中主要组分 KCl 和 NaCl 浓度均出现降低现象, 而 $MgCl_2$ 则出现增加趋势, 这主要与补水工程及补给水体中兑卤有关。在这期间, 卤水矿中 KCl 品位下降幅度要小于固体矿床 KCl 品位下降幅度, 说明卤水溶解了石盐层中大量固体低品位钾矿, 提升了其 KCl 品位。本次研究对于优化霍布逊区段固体钾盐液化开采方案具有重要的指导意义。

关键词: 低品位固体钾矿; 固液转化; 水溶开采; 察尔汗盐湖; 霍布逊区段; 柴达木盆地

中图分类号: P619.211 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.030201

Comparative Analysis on the Characteristic Changes of the Brine Reservoir System before and after Exploration of the Qarhan Salt Lake (Huobuxun Area)

HAN Guang¹⁾, YUAN Xiao-long^{2, 3)*}, HAN Ji-bin³⁾, LIU Jiu-bo¹⁾,
FAN Zeng-lin¹⁾, HU Yan¹⁾, ZHANG Xi-ying³⁾

1) Key Laboratory of Exploration Research of Salt Lake Resources in Qaidam Basin of Qinghai Province,
Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud, Qinghai 816099;

2) College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098;

3) Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Provincial Key Laboratory of
Geology and Environment of Salt Lakes, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008

Abstract: Qarhan Salt Lake in Qaidam Basin has a considerable amount of low-grade solid potassium salt ore; developed mainly through water-replenishing dissolved liquefaction mining. This paper compares and analyzes the characteristics of typical drilling core porosity, solid potassium ore content, and halogen composition change before (2004) and after (2011 and 2019) large-scale exploitation of salt lake resources in Hobson District, and the efficiency of potassium salt liquefaction mining is evaluated. The results show that a large number of high-mineralized brines are brought out due to large-scale brine mining, while the low mineralization water

本文由青海学者专项(编号: QHS201802)、国家自然科学基金项目(编号: 41807216)、中国科学院重点部署项目(编号: ZDRW-ZS-2020-3)、
青海省应用基础研究计划项目(编号: 2020-ZJ-765)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0805)联合资助。

收稿日期: 2021-10-12; 改回日期: 2022-02-26; 网络首发日期: 2022-03-06。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 韩光, 男, 1983 年生。硕士, 高级工程师。主要从事盐湖及盐类矿床勘查和研究工作。通讯地址: 816099, 青海省柴达木
综合地质矿产勘查院、青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室。E-mail: 114472026@qq.com。

*通讯作者: 袁小龙, 男, 1984 年生。硕士, 助理研究员。通讯地址: 810008, 青海省西宁市城西区新宁路 18 号。E-mail: xiaolongy@isl.ac.cn。

recharge reservoir pores dissolve salt minerals in the salt layer, gradually increasing the porosity of the reservoir. During this period, the KCl grade drop in brine ore was less than the decrease in the KCl grade of solid deposit. This showed that the brine dissolved a large number of solid low-grade potassium ore in the stone salt layer, raising its KCl grade. This paper is of great significance for the optimization of solid potassium salt liquefaction mining scheme in the Qaidam Basin.

Key words: ultra-low-grade solid potassium ore; solid-liquid conversion; water solution mining; Qarhan Salt Lake; Huobuxun area; Qaidam Basin

察尔汗盐湖是我国超大型钾盐矿床之一,盐湖钾矿以液态晶间卤水和低品位固体钾盐两种形态存在,固体钾盐占 27.31%(王石军, 2005)。近年来,随着盐湖资源高强度开采,我国盐湖钾盐资源量骤减,低品位固体钾盐资源已成为填补盐湖资源缺口的重要组成部分(郑绵平和侯献华, 2017)。然而,由于柴达木盆地固体钾矿品位低、分布不连续、呈薄层与浸染状零星分布而难以直接开采(袁见齐等, 1985; 龙鹏宇等, 2022)。当前,低品位固体钾矿液化开采被证实是一种有效的开采方法(王兴富等, 2017),国内学者在察尔汗盐湖固体钾盐液化开采方面开展了相关研究(李文鹏, 1991; 刘喜业等, 2014; 焦鹏程和刘成林, 2020; 李瑞琴等, 2021; 常政等, 2022)。孙大鹏和吕亚萍(1995)利用察尔汗盐湖外围低浓度晶间卤水进行溶解光卤石实验结果显示:随着光卤石的溶解和大量石盐结晶析出,导致盐层中有效孔隙度减小,从而影响晶间卤水在孔隙中的流动。王文祥等(2010)对盐湖低品位固体钾矿液化开采方面通过多种手段做了相关研究,分析了驱动溶液固体钾矿过程中水动力与水化学条件变化特征。袁小龙等(2018)通过对昆特依盐湖浅部储卤层的渗透特性及赋存卤水水化学分析研究,揭示了储卤层结构特征制约卤水化学性质的规律。现代盐湖低品位固体钾矿液化开采本质上是易溶盐层(孔隙介质)和高浓度多组分卤水系统中水动力对流扩散-化学平衡-多尺度孔隙结构演化相互耦合的物理化学过程。受到矿物分布、化学反应的非均一性、温度、流速等多因素的影响,多孔地质储层介质中发生矿物溶解、流体化学性质改变、储层孔隙性及渗透性等水文特性的时空演化等一系列复杂的物理化学过程(Molins et al., 2012; Noiriel et al., 2016; Pereira Nunes et al., 2016; Hommel et al., 2018)。

目前,在盐湖固体钾盐液化开采过程中,储卤层系统变化特征的研究还缺少系统性研究。本文选取察尔汗盐湖霍布逊区段盐湖为研究对象,以该研究区内钾盐液化开采为研究背景,通过开展典型钻孔岩芯孔隙度、固体钾矿含量、卤水组分变化特征对比研究,探讨了研究区盐湖大规模开采前后低品位固体钾盐固液转化规律及其成因,为今后固体钾矿高效开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

察尔汗盐湖位于柴达木盆地的中东部,东西长约 168 km,南北宽 20~40 km,面积 5856 km²(蔡克勤和高建华, 1994; 郭新华等, 2006)。自东而西由霍布逊、察尔汗、达布逊、别勒滩四个连续的区段组成(图 1)。察尔汗蒸发盐地层主要为全新统,沉积物以盐类为主,碎屑沉积次之。依据岩性和成因类型可分为风积、化学沉积、冲洪积、湖积等四种沉积类型(图 2)。

霍布逊西段与察尔汗区段相接,东部逐渐变薄乃至尖灭,南段延伸至 Q_h 冲湖积平原前沿,向北延展至哑叭尔构造东延隐伏尾部南翼盆地边缘。沉积中心偏于区段西部,主要由白色石盐、粉砂石盐、含粉砂的石盐、石盐粉砂组成,多呈中粗粒自形-半自形单晶集合体,固结松散,厚度一般 11.01~20.27 m,最大厚度 29.60 m,最小厚度 4.46 m,平均为 14.73 m,厚度变化系数为 28.99%,总体呈中央厚,边缘逐渐变薄的“半球状”(杨谦, 1992; 蔡克勤和高建华, 1994)。

霍布逊区段固体钾矿中 KCl 含量在 0.05%~0.27%之间,平均含量为 0.14%,含钾地质体分布面积 737.98 km²,平均厚度 11.80 m,经初步估算,固体 KCl 资源量约为 2.02×10^7 t(王有德等, 2003)。这部分储量可观的固体钾盐资源通过液化开采的方式将其转化为卤水进行开采。

2 研究方法

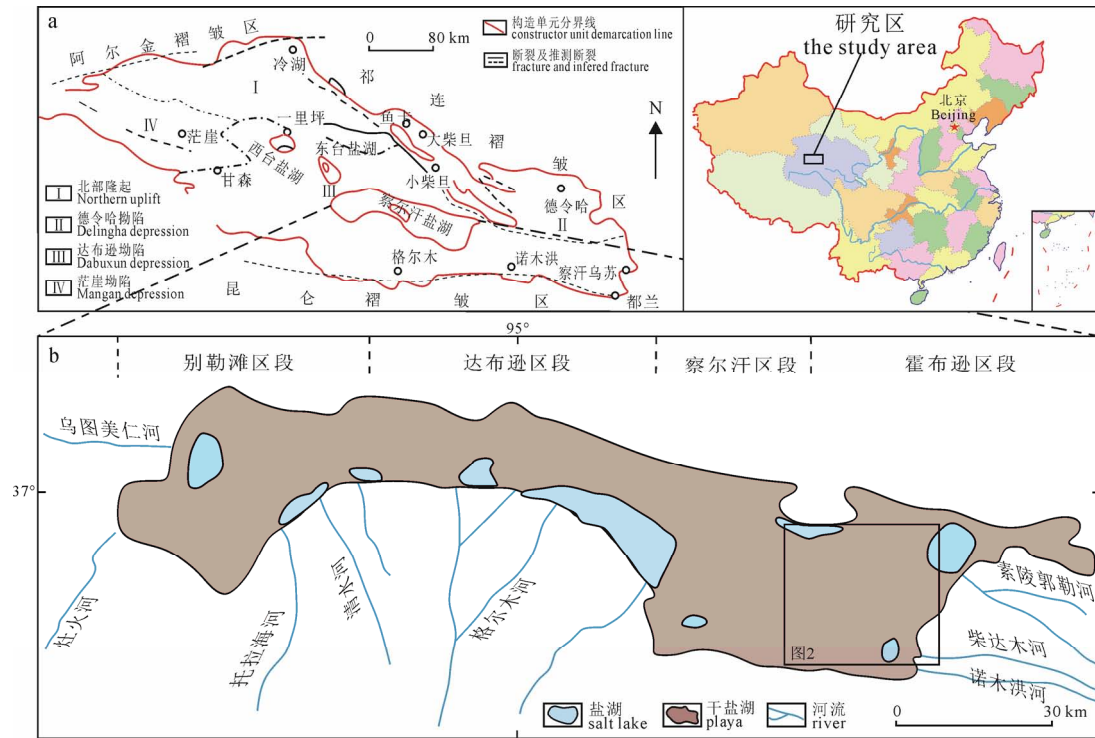
2.1 样品采集方法

本次工作选取研究区大规模开采前后典型钻孔岩芯及卤水样品作为研究对象,开展了化学分析和孔隙度测试工作。

固体样品采集方法为:在钻孔中用劈心法按分层顺序连续取样,每个样品取样长度为 0.3~0.5 m,取样重量不少于 500 g。人工补水液化开采固体钾盐前(2004年)的勘探工作中,我们系统采集了 8 个钻孔(ZK24802、ZK28002、ZK28004、ZK36002、ZK36006、ZK39203、ZK39205、ZK39207)(图 3)共计 210 件岩芯样品。人工补水液化开采固体钾盐后(2019年),在其中的 5 个钻孔(ZK28004、ZK28002、ZK36002、

ZK24802、ZK39203)附近 0.5 m 距离进行二次钻探并系统采集岩芯样品进行分析测试(部分钻孔进行了加深), 共采集固体岩芯样品 197 件, 本次研究工作利用其中同深度、同层位的 145 件样品进行了对比分析, 评价人工补水液化开采固体钾的转化效果。在钻

孔抽水实验过程中, 每隔 4 小时采集一次卤水样品, 样品体积 500 mL。卤水样品采集后, 用聚乙烯塑料采样瓶密封后尽快送至实验室进行水化学分析。本文对岩芯样品开展了孔隙度测试, 采集孔隙度样品过程中, 按不同含水层不同岩性以 2 m 为间距



a—柴达木盆地构造图; b—察尔汗盐湖及研究区位置。

a—structural map of Qaidam Basin; b—the study area in Qarhan Salt Lake.

图 1 察尔汗盐湖霍布逊区段地理位置

Fig. 1 The geographical location of the study area in Qarhan Salt Lake

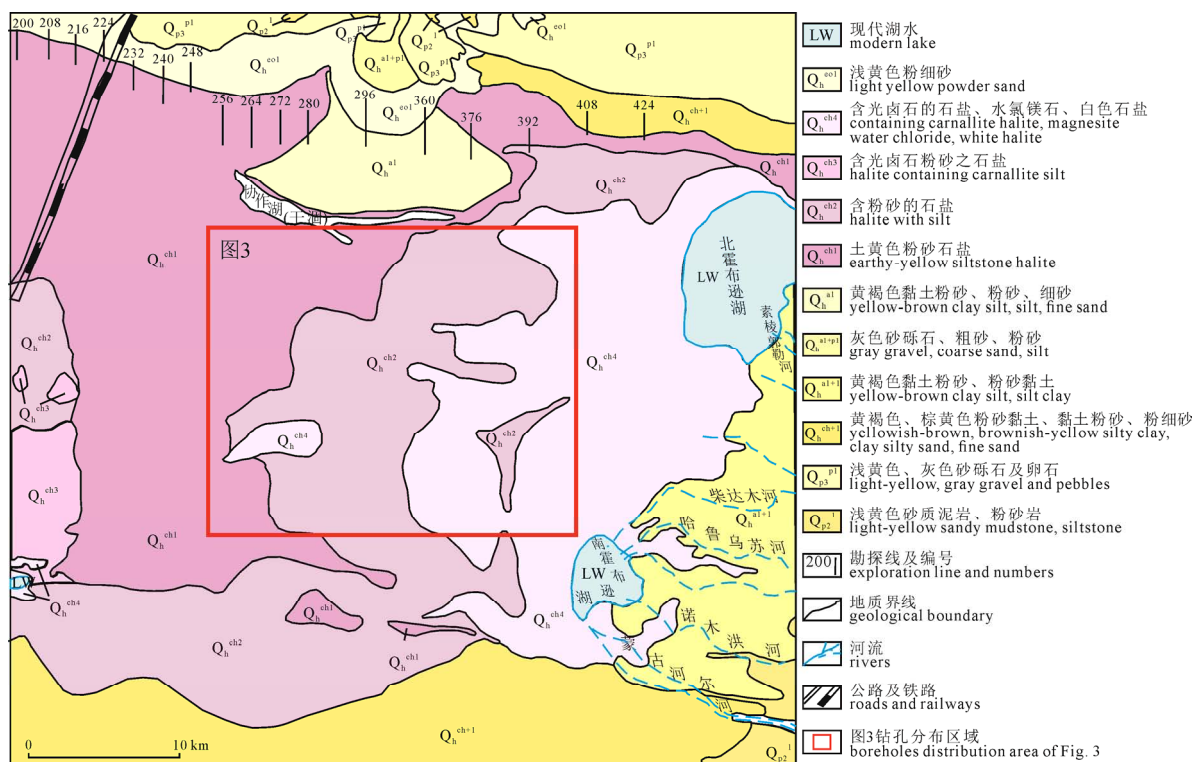


图 2 研究区地层特征

Fig. 2 Stratigraphic characteristics of the study area

采取原状固体样品测试孔隙度,剥去包裹在样品表面的盐粉或黏土,用双层棉纸包裹并用塑料胶带包扎后蜡封,样品长度 10~15 cm,共采集孔隙度样品 44 个。由于 2004 年补充勘探时孔隙度测试样品采集较少,故本次研究工作选择 2011 年储量核实工作中同孔位采集的 44 件孔隙度测试数据进行了对比分析。

2.2 样品测试方法

固体样品经粗、中、细多级破碎筛分至 100 目后进行矿物种类及含量分析。实验条件为:电压为 40 kV,电流为 30 mA, Cu 靶 $K\alpha$ 辐射($\lambda=1.5406$),扫描角度(2θ)为 $5^\circ\sim 80^\circ$,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$ 。各矿物种类的检出及相对百分含量的确定由该仪器自带的软件 X' Pert High Score Plus 完成。卤水样中 K^+ 、 Na^+ 用 180-80 原子吸收测定(EM); Mg^{2+} 用 EDTA 容量法; Cl^- 用 $AgNO_3$ 容量法;密度用波美质量密度(比重)仪或采用质量密度(比重)瓶测得。主要组分的检测限如下: $SO_4^{2-} < 0.1 \text{ mg/L}$, $Mg^{2+} \leq 0.05 \text{ mg/L}$ 。

岩芯样品孔隙度测试方法:将样品分离至单晶状态加入同类型卤水(反向法)测试给水度,给水度与通过湿度换算出同类卤水所占体积比之和为孔隙度。样品测试单位为青海省柴达木综合地质矿产勘查院岩矿测试中心,该方法主要优点是卤水能在短时间内充分进入样品孔隙,解决了原状岩芯浸泡过程中排气不及时孔隙不能充分被卤水充填的问题,提高了测试结果精度。

3 结果分析

3.1 储卤层固体钾盐分布特征分析

通过对固液转化前(2004 年)采集的 210 件岩芯样品进行固体钾矿物及其含量分析(图 3),结果表

明,在平面上,KCl 含量在 ZK28002 孔和 ZK28004 孔品位较高,平均品位为 0.19%,最高值为 0.27%,而位于东北部的钻孔 ZK36002、ZK39205、ZK39203 出现 KCl 低值,平均品位 0.11%。纵向上,含钾储层厚度由沉积中心(20.51 m)至边缘(12.35 m)逐渐减小,而各孔中固体钾沉积呈现出周期性波动变化特征,其含量高值区段分别位于 1.00~2.50 m、5.00~7.50 m、9.30~10.80 m、14.10~15.30 m 等 4 个深度区段(图 4)。

从以上分析结果可以看出,储层中固体钾在空间上分布具有一定的规律性,KCl 含量与含钾层厚度存在正相关,含钾盐层厚度越大,KCl 平均含量越高;外界补给源对固体钾分布影响明显,越靠近补给源,KCl 含量呈持续下降趋势;自西向东,KCl 整体含量呈持续下降趋势,ZK28002、ZK28004 两钻孔位于矿区西南部,含钾盐层厚度较大、钾盐品位相对较高。

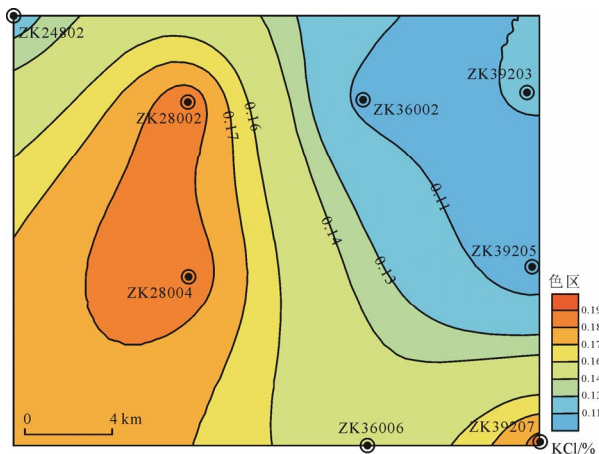


图 3 钻孔位置和固体钾盐含量等值线
Fig. 3 The site of the borehole and the contour map of solid sylvite concentration

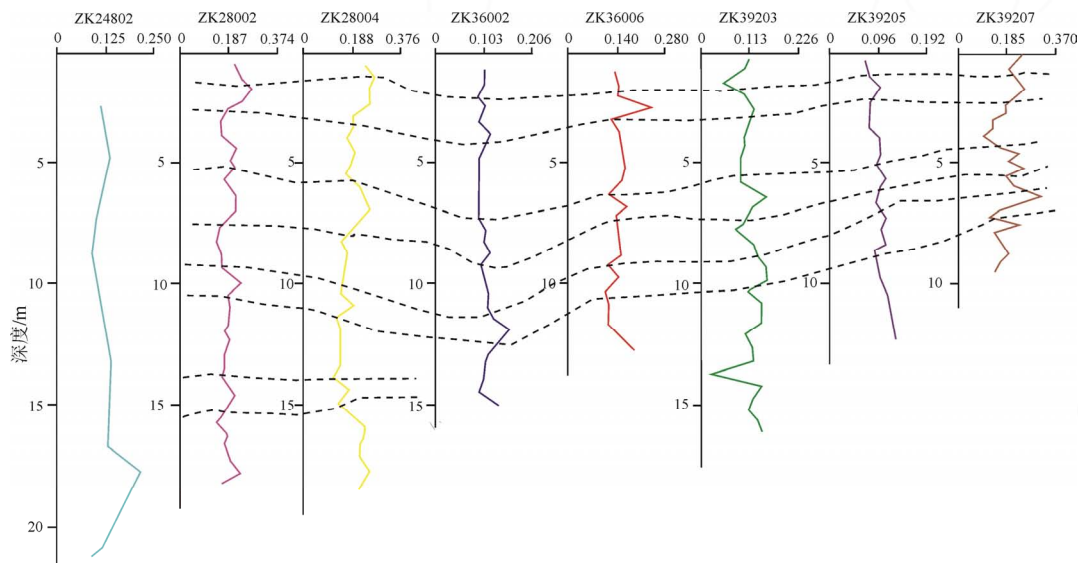


图 4 垂向上钻孔深度及固体 KCl 含量/%
Fig. 4 The depth of the borehole and solid KCl concentration /% in the vertical direction

3.2 开采前后储卤层系统变化特征

通过对 2004 年和 2019 年岩芯样品固体钾含量 (<10 m)对比分析(表 1), 研究发现, 溶采前, 钻孔 KCl 含量最大值出现在钻孔 ZK28004 的 HJ03 样品(深度 1.0 ~ 1.5 m)和钻孔 ZK28002 的 HJ04 号样品(深度 1.5 ~ 2.0 m), 其含量均为 0.27%, 与其对应的 2019 年采集的钻孔 QK28004-1 的 HJ03-1 样品(深度 1.0~1.5 m)KCl 含量为 0.09%, 钻孔 QK28002-1 的 HJ04-1 样品(深度 1.5 ~ 2.0 m)KCl 含量为 0.04%; 2004 年采集的 5 个钻孔中 KCl 含量算术平均数为 0.15%, 与其对应的 2019 年获取的该 5 个钻孔 KCl 含量算术平均数为 0.09%。由此可见, 经过 15 年大规模开采该地区钾盐资源后, 储卤层中固体钾矿含量较 2004 年降低明显, 降低约 40%。水平方向上(图 5), KCl 含量均呈现出明显的降低趋势, 但是降低幅度表现出不均匀的特点, 其中, 含量高值区段 ZK28002 和 ZK28004 钻孔 KCl 平均品位较补水前降低了约 75%, 相对低值区段的 ZK24802、ZK36002 孔中 KCl 平均品位降低了约 40%。

由于钻孔 ZK28002(QK28002-1)样品完整性及数量均优于其他钻孔, 因此, 本文以该钻孔为例分析了研究区储卤层固体钾盐开采前后在垂向上的变化(图 6)。在 2004—2019 年开采过程中, 该孔固体钾盐溶解率最高为 92.96%, 最低为 37.50%, 平均

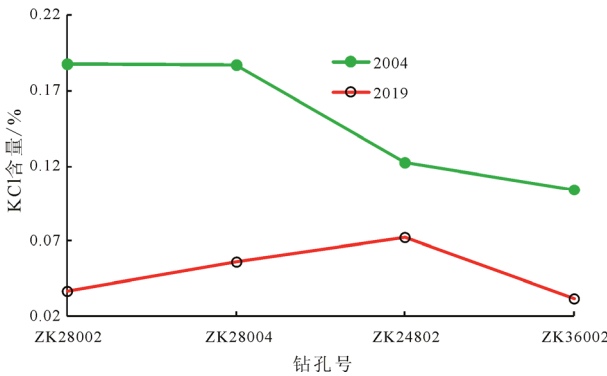


图 5 补水前(2004 年)后(2019 年)水平方向上储卤层中 KCl 含量变化
Fig. 5 Changes in KCl content in the brine reservoir before (2004) and after (2019) water replenishment

溶解率达到 80.47%。开发前, KCl 含量最高值出现在储层深度 1.5 m 处, 其含量为 0.27%; KCl 含量最低值位于储层 15.11 m, 其含量为 0.14%。经过多年溶解抽卤开采, 2019 年, 采集同层位岩芯样品, 与上述对应层位 KCl 含量对比, 分别降至 0.019%和 0.035%。分析得知, 在整个钻孔中, KCl 含量最高的层位, 其固液转化率也是最大的。

孔隙度是衡量地层储水空间大小的重要指标。由孔隙度测试结果可以看出(图 7), 2011 年各钻孔样品孔隙度最大值 25.23%, 最小值 13.82%, 平均孔隙度为 19.36%, 与之相对应, 2019 年各钻孔

表 1 2004 年和 2019 年研究区 5 个钻孔固体钾盐含量变化对比
Table 1 Comparison between the solid potash content of five boreholes during 2004 and 2019

取样位置 /m		KCl 含量/%									
自	至	2004 年					2019 年				
		ZK24802	ZK28002	ZK28004	ZK36002	ZK39203	ZK24802	ZK28002	ZK28004	ZK36002	ZK39203
0	0.5	0.10	0.21	0.23	0.14	0.10	0.06	0.08	0.07	0.03	0.11
0.5	1.0	0.11	0.21	0.23	0.10	0.11	0.07	0.08	0.09	0.05	0.11
1.0	1.5	0.13	0.23	0.27	0.10	0.10	0.05	0.08	0.09	0.04	0.08
1.5	2.0	0.10	0.27	0.25	0.09	0.05	0.04	0.04	0.09	0.04	0.06
2.0	2.5	0.09	0.23	0.25	0.10	0.10	0.08	0.08	0.09	0.05	0.07
2.5	3.0	0.12	0.18	0.19	0.09	0.12	0.06	0.07	0.09	0.06	0.06
3.0	3.5	0.14	0.15	0.19	0.11	0.10	0.06	0.08	0.09	0.06	0.12
3.5	4.0	0.13	0.16	0.16	0.10	0.10	0.07	0.07	0.09	0.06	0.14
4.0	4.5	0.13	0.21	0.19	0.09	0.09	0.06	0.07	0.09	0.08	0.11
4.5	5.0	0.21	0.19	0.18	0.09	0.09	0.08	0.04	0.10	0.09	0.15
5.0	5.5	0.12	0.21	0.16	0.09	0.09	0.06	0.05	0.10	0.15	0.12
5.5	6.0	0.09	0.17	0.21	0.09	0.15	0.04	0.05	0.10	0.12	0.23
6.0	6.5	-	0.21	0.23	0.09	0.12	0.04	0.04	0.11	0.19	0.13
6.5	7.0	-	0.21	0.25	0.09	0.10	0.06	0.04	0.12	0.20	0.17
7.0	7.5	-	0.15	0.21	0.10	0.08	0.04	0.06	0.10	0.18	0.18
7.5	8.0	-	0.14	0.17	0.10	0.12	0.04	0.06	0.10	0.22	0.16
8.0	8.5	-	0.16	0.14	0.11	0.13	0.03	0.04	0.10	0.18	0.19
8.5	9.0	-	0.16	0.16	0.09	0.15	0.04	0.06	0.08	0.17	0.19
9.0	9.5	-	0.23	0.15	0.10	0.15	0.04	0.06	0.07	0.15	0.18
9.5	10.0	-	0.18	0.15	0.11	0.11	0.03	0.07	0.08	0.17	0.18

样品孔隙度最大值 29.13%，最小值 12.93%，平均孔隙度为 20.98%。可以看出，2019 年平均孔隙度变化范围更大，储层孔隙度总体呈增加趋势，部分钻孔中样品孔隙度相比 2011 年出现了降低的现象。相比 2011 年，孔隙度增加的样品共 26 件，其孔隙度增加值为 31.23%。孔隙度减小的样品 18 件，其孔隙度减小值为 12.65%。

随着盐湖资源开采力度逐渐增大，储卤层中卤水主要化学组分含量也发生了明显的变化。从表 2 可以看出，研究区液体 KCl 平均品位从 2004 年的 0.65% 下降至 2019 年的 0.47%，卤水中 NaCl 浓度也发生了明显下降，从 2004 年的 12.94% 降低至 2019 年的 7.65%。与前二者相反，研究区卤水中

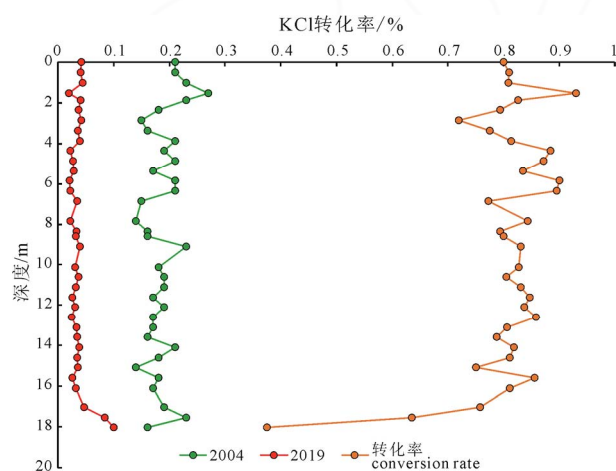


图 6 钻孔 ZK28002(QK28002-1)开采前后固体钾矿含量变化

Fig. 6 Variation of the solid KCl concentration in ZK28002 (QK28002-1)

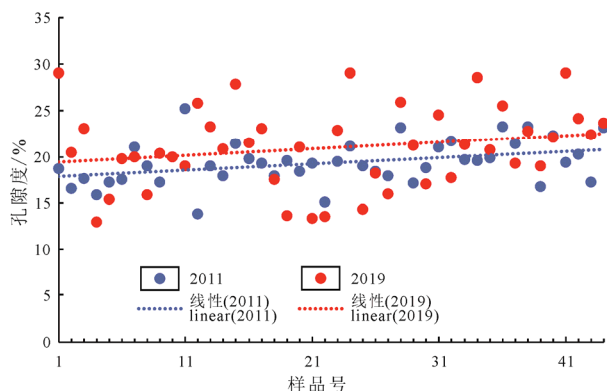


图 7 研究区 2011 年和 2019 年储卤层孔隙度变化

Fig. 7 The porosity of brine reservoir in the study area in 2011 and 2019

表 2 不同时期卤水中主要组分含量

Table 2 Differences in the main composition of brine in 2004, 2011, and 2019

年份	KCl/%	NaCl/%	MgCl ₂ /%
2004	0.65	12.94	9.47
2011	0.52	10.48	12.74
2019	0.47	7.65	15.80

MgCl₂ 含量从 2004 年的 9.47% 增加至 2019 年的 15.08%。

3.3 综合分析

霍布逊区段，自西向东，固体钾盐整体含量呈持续下降趋势，这一特征与整个察尔汗地区自西向东由别勒滩—达布逊—察尔汗—霍布逊钾矿层厚度逐渐变薄的整体变化趋势是一致的(袁见齐和霍承禹, 1981)。察尔汗盐湖的形成环境是典型的浅水沉积环境，盐类沉积是从别勒滩、达布逊、察尔汗、霍布逊发展推进的，由此造成了各区段含盐系的剖面不一致的情况。盐湖卤水浓缩演化过程中，远离盐湖中心，盐层沉积厚度变薄、卤水浓缩程度相对较低，反之，接近沉积中心，盐层沉积较厚，卤水浓缩程度相对较高。研究区东部地区为河流补给区，每年有大量淡、咸水由此进入盆地，溶解了部分固体钾矿导致含量降低(杨谦, 1992)。察尔汗盐湖的沉积模式类似于“泪滴式”(孙大鹏, 1974)，具有别勒滩、达布逊和察尔汗多个沉积中心。靠近沉积中心，沉积环境较为稳定，卤水富集浓缩程度较高，因此含钾盐层厚度较大、品位相对较高。

通过对开采前后储卤层中固体钾含量变化分析可知，固体钾盐含量越高，其固液转化速率就越快，含量降低幅度就越大，反之亦然。人工补给的水体由补水渠侧向入渗径流至下游采卤渠的过程中，由于储卤层孔隙结构存在差异性，促使水体在高渗透区聚集并快速流动，而在低渗透区流动缓慢或处于停滞状态(袁小龙等, 2018)。这一现象说明在补水溶矿过程中，固液转化率存在空间不均一性，孔隙度测试结果、抽水试验等数据分析成果可以明确判定，具有高含量 KCl 的储卤层渗透性大于低含量 KCl 的储卤层，其固液转化率大于后者。

研究区内固、液相钾盐矿的主要载体是固体石盐层，固、液相钾盐互相转化，当卤水达到一定浓度时，钾盐矿物结晶析出，与含钾卤水共同分布在固体石盐层孔隙中(吴必豪等, 1986)。盐层的孔隙度会随着卤水浓度变化而发生变化，当卤水浓度增高时，部分盐类矿物析出，充填在石盐晶间孔隙中，导致盐层孔隙度变小；而当卤水浓度降低时，则会溶解盐层中的盐类矿物，使晶间孔隙增大。通过抽水实验及卤水化学分析得知，2011—2019 年间，大规模抽采卤水以及人工补水溶矿工程将高矿化度卤水抽出并将低矿化度水体补给储卤层，导致晶间卤水矿化度降低，水位上升，盐层中固体钾盐等易溶盐类矿物发生溶解，使得晶间孔隙逐渐增大。通过孔隙度测试发现，孔隙度低的样品中细砂等碎屑矿物明显高于孔隙度高的样品。由此可见，固液转化过程中，与盐类矿物共存的细沙等碎屑物质随卤水发生横向和垂

向迁移并在高、低渗透区局部界面位置发生二次堆积,或迁移至低渗透区而使得该区域储层孔隙发生淤堵,从而降低了储卤层的孔隙性和渗透性。

多年盐湖资源开采行为使得低浓度补给水体不断溶解石盐层中的固体低品位钾矿,并与卤水混合,卤水中 KCl 总含量增加,而 KCl 浓度却由于稀释作用而降低;卤水中 NaCl 含量降幅较大,是由于高 NaCl 卤水大量抽取,低矿化度水体不断补给,同层位环境条件下,石盐比光卤石、钾石盐溶解缓慢。卤水中 MgCl_2 含量逐渐增高,这与人工补水溶解开采固体钾盐过程中老卤回灌有关。老卤是盐田晒盐后尾端残余的含高浓度 MgCl_2 液体,在盐湖资源固液转化开采过程中,通过将淡水与老卤以一定比例配制溶剂后注入盐层溶解固体钾盐矿,实现液化开采的目的。

4 结论

本文通过对研究区不同开采时段(2004 年、2011 年和 2019 年)钾盐含量变化、孔隙度变化以及卤水组分变化等进行了对比分析,得出以下结论:

(1)地下卤水资源大规模开采,大量高矿化度卤水被带出,低矿化度水体补给储卤层,促进了低品位钾盐类矿物的溶解,增大了储卤层的孔隙度。局部区域储卤层孔隙度较开发前发生减小的现象。这是由于储卤层孔隙性具有空间非均一性,存在高渗透区和低渗透区,低浓度水体渗流溶解过程中,在高渗透区持续溶解而孔隙度增大,形成渗流通道;低渗透区中流体相对停滞,且孔隙发生淤堵,孔隙度降低。

(2)对比不同时段固、液体 KCl 含量变化,其 KCl 品位均发生了降低,液体矿 KCl 品位下降值小于固体 KCl 品位下降值,原因是低品位固体钾矿发生了固液转化,使卤水中 KCl 总量增加,但由于混合稀释作用卤水中品位 KCl 品位表现为下降趋势;同时固体钾矿溶解效率与 KCl 含量有关, KCl 品位越高,溶解效果越好。

(3)卤水中 KCl、NaCl 含量均出现降低趋势,主要是由于大量卤水开采以及低矿化度水体的补给作用,使得卤水出现了淡化现象;卤水中 MgCl_2 含量明显增多,这与开采过程中老卤(主要成分为 MgCl_2)回灌有较大关系。

致谢: 野外工作过程中得到青海省柴达木综合地质矿产勘查院李得刚总工程师、谢学光高级工程师等的大力帮助和支持,项目组马宗德、马宏涛、李树伟参加了本次野外工作;论文修改过程中,青海省地质矿产勘查开发局总工程师潘彤、青海省柴达木综合地质矿产勘查院李东生教授级高级工程师在论

文修改过程中提出了很多建设性的宝贵意见。在此一并表示衷心感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by Qinghai Scholar Special Project (No. QHS201802), National Natural Science Foundation of China (No. 41807216), Chinese Academy of Sciences (No. ZDRW-ZS-2020-3), Applied Basic Research Project of Qinghai Province (No. 2020-ZJ-765), and The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (No. 2019QZKK0805).

参考文献:

- 蔡克勤, 高建华. 1994. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件[J]. 地学前缘, 1(3-4): 231-233.
- 常政, 袁小龙, 刘万平, 李梦玲, 苗卫良, 程怀德, 卜迪, 张昊, 张西营. 2022. 察尔汗盐湖固体钾盐溶解对溶剂注入速率响应机制研究[J]. 地球学报, 43(3): 287-294.
- 郭新华, 王春男, 马明珠. 2006. 青海柴达木盆地察尔汗盐湖首采区钾镁盐矿床开发及老卤排放对液体钾矿的影响现状[J]. 西北地质, 39(1): 98-104.
- 焦鹏程, 刘成林. 2020. 青海别勒滩低品位固体钾矿液化开发技术[M]. 北京: 科学出版社.
- 李瑞琴, 刘成林, 赵艳军, 刘万平, 王石军, 江雨彤. 2021. 青海别勒滩试验区低品位固体钾盐液化开采的野外实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 40(1): 76-88.
- 李文鹏. 1991. 察尔汗盐湖溶矿驱动开采模型及其软件开发[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 刘喜业, 李勇刚, 张兴儒, 崔小琴, 张爱华. 2014. 察尔汗盐湖表层低品位钾矿溶矿实验及数值模拟分析[J]. 无机盐工业, 46(8): 18-20.
- 龙鹏宇, 赵艳军, 胡宇飞, 杜江民, 何继辉, 王朝旭. 2022. 马海盐湖北部矿段低品位固体钾矿中钾盐矿物的赋存特征及成因探讨[J]. 地球学报, 43(3): 338-346.
- 孙大鹏, 吕亚萍. 1995. 察尔汗盐湖首采区卤水溶解光卤石实验的初步研究[J]. 盐湖研究, 3(4): 40-43.
- 孙大鹏. 1974. 我国某盐湖现代钾盐沉积的形成[J]. 地球化学, (4): 19.
- 王石军. 2005. 察尔汗盐湖钾镁盐矿床可采储量特征及其开采探讨[J]. 化工矿物与加工, 34(1): 30-32.
- 王文祥, 李文鹏, 刘振英, 郝爱兵, 王石军, 焦鹏程. 2010. 察尔汗盐湖低品位固体钾矿液化开采的现场试验研究探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 697-703.
- 王兴富, 王石军, 田红斌, 于雪峰, 朱金义, 刘万平. 2017. 青海盐湖提钾技术进展与我国钾肥工业的发展[J]. 化工矿物与加工, 46(11): 48-52.
- 王有德, 李正焕, 张兆广, 任金润, 马林, 高云, 覃功平, 李金献, 井忠民, 仪增寿. 2003. 青海省察尔汗盐湖霍布逊区段钾矿补充勘探报告[R]. 格尔木: 青海省柴达木综合地质矿产勘查院.
- 吴必豪, 段振豪, 关玉华, 连卫. 1986. 柴达木盆地察尔汗干盐湖钾镁盐的沉积[J]. 地质学报, 59(3): 286-296.
- 杨谦. 1992. 察尔汗盐湖盐层及钾矿层的分布规律[J]. 青海地质,

14(2): 66-80.

- 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[J]. 地球科学, 10(4): 1-9.
- 袁见齐, 霍承禹. 1981. 青海察尔汗盐湖钾盐矿床成因的若干问题[J]. 地球科学, 14(1): 207-213.
- 袁小龙, 盛金昌, 张西营, 李斌凯, 周同亮, 高东林. 2018. 昆特依盐湖浅部储卤层对卤水组成的影响[J]. 水文地质工程地质, 45(2): 13-20.
- 袁小龙, 张西营, 盛金昌, 高东林, 李斌凯, 都永生, 万维汉. 2018. 环境温度对盐湖卤水化学组成及储卤层渗透性变化的制约[J]. 地质学报, 92(8): 1724-1732.
- 郑绵平, 侯献华. 2017. 青海盐湖资源综合利用与可持续发展战略[J]. 科技导报, 35(12): 11-13.

References:

- CAI Ke-qin, GAO Jian-hua. 1994. Formation conditions of potassium deposit in Qarhan salt lake[J]. Earth Science Frontiers, 1(3-4): 231-233(in Chinese).
- CHANG Zheng, YUAN Xiao-long, LIU Wan-ping, LI Meng-ling, MIAO Wei-liang, CHENG Huai-de, BU Di, ZHANG Hao, ZHANG Xi-ying. 2022. A Study on the Mechanism of Influence of the Dissolution of Solid Potassium Salt in Qarhan Salt Lake to the Rate of Solvent Injection[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(3): 287-294(in Chinese with English abstract).
- GUO Xin-hua, WANG Chun-nan, MA Ming-zhu. 2006. Influence on the ore of development of the potash ore and the Laolu disposing in the first mine area of Qarhan saline lake, Qinghai[J]. Northwestern Geology, 39(1): 98-104(in Chinese with English abstract).
- HOMMEL J, COLTMAN E, CLASS H. 2018. Porosity-permeability relations for evolving pore space: A review with a focus on (bio-)geochemically altered porous media[J]. Transport in Porous Media, 124: 589-629.
- JIAO Peng-cheng, LIU Cheng-lin. 2020. Low grade solid potash mining technology in Bieletan saline lake, Qinghai[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- LI Rui-qin, LIU Cheng-lin, ZHAO Yan-jun, LIU Wan-ping, WANG Shi-jun, JIANG Yu-tong. 2021. A study of the field experimental liquefaction and exploitation of low-grade solid potassium resource in the Bieletan experimental area, Qinghai Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 40(1): 76-88(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-peng. 1991. The model of dissolving and driving exploitation and the software development in Qarhan Salt Lake[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- LIU Xi-ye, LI Yong-gang, ZHANG Xing-ru, CUI Xiao-qin, ZHANG Ai-hua. 2014. Dissolution experiment and numerical simulation on surface salt of Qarhan Salt Lake[J]. Inorganic Chemicals Industry, 46(8): 18-20(in Chinese with English abstract).
- LONG Peng-yu, ZHAO Yan-jun, HU Yu-fei, DU Jiang-min, HE Ji-hui, WANG Zhao-xu. 2022. Occurrence Characteristics and Genetic Study of Potassium Salt Minerals in Low Grade Solid Potassium Ore in the North Section of Mahai Salt Lake[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(3): 338-346(in Chinese with English abstract).
- MOLINS S, TREBOTICH D, STEEFEL C I, SHEN C P. 2012. An investigation of the effect of pore scale flow on average geochemical reaction rates using direct numerical simulation[J]. Water Resources Research, 48(3): W03527.
- NOIRIEL C, STEEFEL C I, YANG L, BERNARD D. 2016. Effects of pore-scale precipitation on permeability and flow[J]. Advances in Water Resources, 95: 125-137.
- PEREIRA NUNES J P, BIJELJIC B, BLUNT M J. 2016. Pore-space structure and average dissolution rates: A simulation study[J]. Water Resources Research, 52(9): 7198-7212.
- SUN Da-peng, LÜ Ya-ping. 1995. A preliminary investigation on carnallite-resolving experiment for intercrystal brines in the first exploitation area of Qarhan Salt Lake, Qinghai, China[J]. Journal of Salt Lake Research, 3(4): 40-43(in Chinese with English abstract).
- SUN Da-peng. 1974. The origin of recent potash deposits in a certain salt lake, China[J]. Geochimica, 4:230-248.
- WANG Shi-jun. 2005. Discussion on characteristics of workable reserves of potassium and magnesium salt deposit in Chaerhan Salt Lake and its mining[J]. Industrial Minerals and Processing, 34(1): 30-32(in Chinese with English abstract).
- WANG Wen-xiang, LI Wen-peng, LIU Zhen-ying, HAO Ai-bing, WANG Shi-jun, JIAO Peng-cheng. 2010. A tentative discussion on in-situ experimental liquefaction and exploitation of low grade solid potassium resources in Qarhan Salt Lake[J]. Mineral Deposits, 29(4): 697-703(in Chinese with English abstract).
- WANG Xing-fu, WANG Shi-jun, TIAN Hong-bin, YU Xue-feng, ZHU Jin-yi, LIU Wan-ping. 2017. Potassium extraction technology progress in Qinghai Salt Lake and development of potash fertilizer industry in China[J]. Industrial Minerals & Processing, 46(11): 48-52(in Chinese with English abstract).
- WANG You-de, LI Zheng-huan, ZHANG Zhao-guang, REN Jin-run, MA Lin, GAO Yun, QIN Gong-ping, LI Jin-xian, JING Zhong-min, YI Zeng-shou. 2003. Report on supplementary exploration of potassium deposits in the Hobson section of Qarhan salt lake, Qinghai province[R]. Golmud: Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute of Qinghai Province(in Chinese).
- WU Bi-hao, DUAN Zhen-hao, GUAN Yu-hua, LIAN Wei. 1986. Deposition of potash-magnesium salts in the Qarhan playa, Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 59(3): 286-296(in Chinese with English abstract).
- YANG Qian. 1992. Distribution regularity of saline beds and potash ore beds in Qarhan saline lake[J]. Qinghai Geology, 14(2): 66-80(in Chinese with English abstract).
- YUAN Jian-qi, HUO Cheng-yu, CAI Ke-qin. 1985. Characteristics of salt deposits in the dry salt lake and the formation of potash beds[J]. Earth Science, 10(4): 1-9(in Chinese with English abstract).
- YUAN Jian-qi, HUO Cheng-yu. 1981. Genesis of the sylvinitic deposits in the Charhan saline lake, Qinghai Province[J]. Earth Science, 14(1): 207-213(in Chinese with English abstract).
- YUAN Xiao-long, ZHANG Xi-ying, SHENG Jin-chang, GAO Dong-lin, LI Bin-kai, DU Yong-sheng, WAN Wei-han. 2018. Constraint of environmental temperature on chemical composition of brine and permeability of aquifer in the saline lake[J]. Acta Geologica Sinica, 92(8): 1724-1732(in Chinese with English abstract).
- YUAN Xiao-long, SHENG Jin-chang, ZHANG Xi-ying, LI Bin-kai, ZHOU Tong-liang, GAO Dong-lin. 2018. Influence of shallow reservoir upon the components of brines in the Kunteyi playa[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 45(2): 13-20(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, HOU Xian-hua. 2017. Comprehensive utilization and sustainable development strategy of Qinghaisalt lake resources[J]. Science and Technology Review, 35(12): 11-13(in Chinese).