

云南江城勐野井钾盐成矿新认识

郑绵平¹⁾, 张 震^{1)*}, 尹宏伟²⁾, 谭筱虹³⁾, 于常青⁴⁾, 施林峰¹⁾,
张雪飞¹⁾, 杨尖絮²⁾, 焦 建¹⁾, 武国朋^{5, 1)}

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037;

2) 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093;

3) 云南省地质调查院, 云南昆明 650051; 4) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

5) 中国矿业大学, 北京 100083

摘 要: 本文通过深入分析滇西南以往地质调查研究资料, 而从中发现存在的疑点, 从新特提斯形成局限海的成盐背景和滇西南特定的复杂的地质构造条件出发, 通过大量地面地质调查、沉积相、盐构造及水化学研究, 推断勐野井地区勐野井组中马尾丝状钾盐矿体可能是沿断层由深部侏罗纪含钾岩系挤压塑流到表层来的。因财制宜, 选用低频大地电磁法(EH4)、高精度电磁频谱探测法(MES)轻便适用的物探手段, 同时结合以往重力勘查(1/10 万), 综合分析表明, 该区深部有多组盐层存在。为验证上述找钾新思路, 部署了 2 口钾盐中深钻, 其钻探成果与该认识相一致。其中第 1 钻井(MK-1)已完钻, 在中侏罗统花开左组中部钻遇厚 70 m 含钾岩盐层; 第 2 钻井(MK-2)已钻遇花开左组上部含膏岩系。与此同时, 还进行了 Sr 同位素和包体测温以及盐体构造和沉积特征等分析。综上所述, 论证了勐野井钾盐成矿机制, 提出了深部侏罗系盐底辟浅部贯入的“二层楼成矿模式”。以此为指导, 部署了区域性高精度重力测量(1/5 万)、MES 探测和浅钻工程, 拓展了兰坪—思茅成盐带深、浅部找钾前景。

关键词: 勐野井钾盐; 特提斯; 成盐成钾背景; 侏罗系盐底辟; “二层楼成矿模式”

中图分类号: P619.211; P611 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.01.03

A New Viewpoint concerning the Formation of the Mengyejing Potash Deposit in Jiangcheng, Yunnan

ZHENG Mian-ping¹⁾, ZHANG Zhen^{1)*}, YIN Hong-wei²⁾, TAN Xiao-hong³⁾, YU Chang-qing⁴⁾,
SHI Lin-feng¹⁾, ZHANG Xue-fei¹⁾, YANG Jian-xu²⁾, JIAO Jian¹⁾, WU Guo-peng^{5, 1)}

1) MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093;

3) Institute of Geological Survey of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650051;

4) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

5) China University of Mining & Technology, Beijing 100083

Abstract: Through an intensive analysis of the data obtained from previous geological survey and study in southwestern Yunnan, the authors found some doubtful points. Starting with the salt-forming setting of the restricted sea formed in Neo-Tethys and the specific and complex geological and structural conditions of southwestern Yunnan and based on considerable ground geological surveys and sedimentary facies, salt structure and hydrochemical studies, the authors infer that the horsetail potash beds in the Mengyejing Formation of Mengyejing area were squeezed up and flowed in the plastic form through faults from the deep Jurassic potassic

本文由中国地质调查局“钾盐资源调查评价”计划项目(包括工作项目“油钾兼探实施方案和调查评价综合研究”(编号: 1212011085524); “滇西南古近纪盐盆地钾盐资源调查评价”(编号: 1212011085517))和 NSFC-云南联合重点基金项目(编号: U0833601)联合资助。

收稿日期: 2013-11-29; 改回日期: 2013-12-10。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 郑绵平, 男, 1934 年生。研究员, 中国工程院院士。主要从事盐湖学与盐类矿床地质学研究。E-mail: zhengmp2010@126.com。

*通讯作者: 张震, 男, 1980 年生。博士。主要从事盐类矿床地质学与沉积学研究。E-mail: zhangzhenbj@163.com。

rocks onto the surface. In this study, light, portable and practical geophysical means such as the low-frequency magnetotelluric method (EH4) and high-precision method for detecting the electromagnetic spectrum (MES) were used; in addition, the previously-used gravity survey (1:100,000) was also employed. An integrated analysis indicates that there exist several salt beds at the depth. For the purpose of verifying the above-mentioned new idea of potash search, two potash intermediately deep boreholes were drilled, and the drilling results are consistent with this idea. Of the two boreholes, one (MK-1) has been completed and encountered a 70 m thick potash-bearing halite bed in the central part of the Middle Jurassic Huakaizuo Formation, and the other (MK-2) has intersected a gypsum-bearing sequence in the upper part of the Huakaizuo Formation. Meanwhile, Sr isotope study, inclusion thermometry and analyses of the structure and sedimentary features of the salt body were carried out. In summary, the authors demonstrate the formation mechanism of the Mengyejing potash deposit and put forward a “two-storey potash-forming model”, i.e., Jurassic salt body lies in the deep part and diapirism in the shallow part. Guided by this model, the authors deployed regional, high-precision gravity survey (1:50,000), MES spectrum and shallow drilling engineering, thus expanding prospects of potash exploration in the deep and shallow parts of the Lanping-Simao salt-forming belt.

Key words: Mengyejing potash; Tethys; salt- and potash-forming setting; Jurassic salt diapirism; “two-storey potash-forming model”

我国滇西南是古盐类资源最为发育地区之一,该区勐野井钾盐矿床是我国唯一的古代氯化物型钾盐矿床,已探明岩盐分布面积仅为 3.5 km²,而钾盐分布面积达 2.8 km²,钾矿层平均含 KCl 8.81%,保有 KCl 资源储量为 1676.04 万吨。但关于其钾盐矿床的成因,前后流行“陆源”(钾盐地质科学研究所,1980)、“火成成盐”(吴天柱,1981)、“深卤补给”(曲懿华,1982;夏文杰等,1983)、“多源补给”(如海源、陆源、风化盐、深卤及古再溶盐和古残余湖水等补给)(颜仰基等,1981;许效松等,1983;肖章程等,2009;张从伟等,2010)、“海源”(邓尔新,1982;云南省地质矿产局等,1986;张从伟等,2011)、“海源陆相”(帅开业,1987)、“海源和深源补给”(曲懿华,1997;曲一华等,1998)、“富钾火山岩及古盐和含钾风化岩”(张从伟等,2010)等,至今尚未有定论或形成统一认识。

主张“陆源”观点者,根据矿区盐层中含有大量泥砾,而且在勐野井组仅发现陆相化石,提出勐野井成盐盆地可与滇中地区陆相成盐盆地相类比;主张“火成成盐”观点者,根据盐体中泥砾的赋存形态、盐体的内部结构特征、古盐砾岩及盐晶包体的特点,认为勐野井钾盐矿床是深部直接源于地幔的“火成盐体”,塑状盐流侵位于勐野井组红色陆相地层的产物;主张“多源补给”观点者,根据本区盐矿的物质成分特征及分布、具有物源指示意义的地球化学指标等多方面,指出勐野井矿床的成矿物质来源具有多源性;主张“深卤补给”观点者,根据兰坪—思茅盆地与泰国呵叻盆地同源性特点,指出勐野井盐盆地为海水补给为主,且受到陆源水混入内陆沉积环境,另外又据溢晶石的成层析出而提出成盐物质可能来源于深层卤水;主张“海源”观

点者,根据矿体中多种微量元素(Br、Rb、Sr、B等)的地球化学性质及盐类矿物组合特征,认为勐野井钾盐矿床是海源陆相成因;主张“富钾火山岩及古盐和含钾风化岩”观点者,认为本区成盐期火山活动所产生的富钾玄武-安山质火山凝灰岩及古盐和含钾风化岩也可能为勐野井矿床提供了部分物源。此外,有些学者根据本区可溶盐类气体包裹体特征认为该矿床为沉积-交代富集、层控性质的矿床(詹行礼等,1981)。

本文从区域性特提斯的成盐背景和滇西南特定的复杂的地质构造条件出发,通过多次对勐野井矿山调查和盐构造分析,以及地质地表露头研究,结合地球化学特征,提出了滇西南找钾的新认识:推断勐野井矿钾盐层是由深部挤压塑流到表层来的,可能有钾盐层被覆盖于其他地层之下,而并非以往普遍所认为的“古近纪”钾盐矿床;对中生代受构造运动影响强烈的滇西南地区钾盐找矿提供了新的思路。

勐野井地区位于兰坪—思茅盆地的东南部,行政区划主要隶属云南省普洱市江城县,地处边境,南东与越南、老挝接壤(图 1)。兰坪—思茅盆地位于特提斯—喜马拉雅造山带中的三江造山(亚)带,其东、西两侧为全球性规模的欧亚板块和印度板块。东侧的龙门山断裂带和金沙江—哀牢山断裂带,是欧亚板块与特提斯—喜马拉雅造山带边界。西侧分布于缅甸中部的那加山缝合线(钟大赉等,1999),是印度板块与特提斯构造域的分界线。特殊的构造位置,决定了盆地的形成演化和改造,受到印度地块、青藏地块和华南地块的联合作用和影响(图 2),盆地的演化和构造特性十分特殊和复杂,具有十分鲜明的地域特色,近几十年来一直是国际、国内地

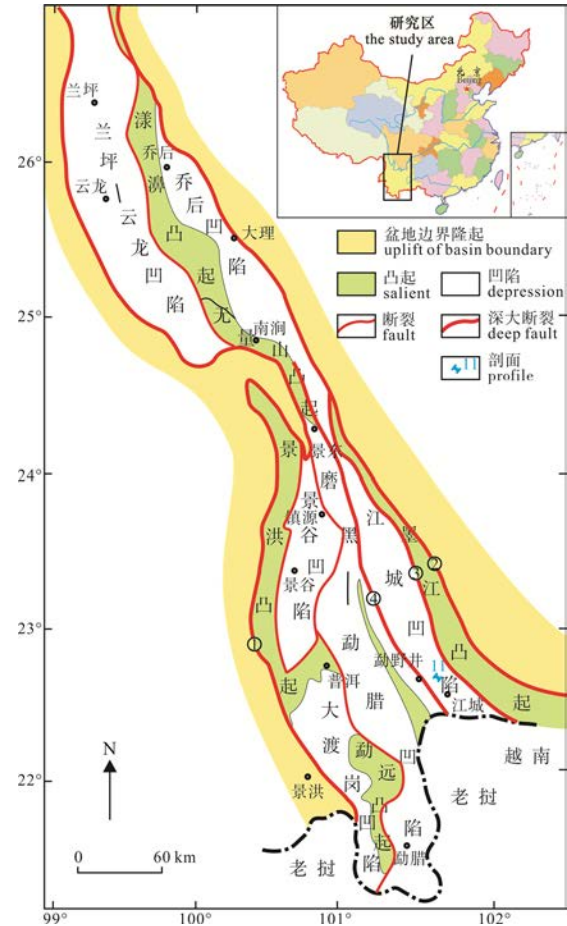


图 1 兰坪—思茅盆地区域地质略图
(据原云南十六地质队, 1980; 有修改)
Fig. 1 Regional geological map of Lanping-simao basin
(modified after No. 16 Geological Party of Yunnan, 1980)
①-澜沧江深大断裂; ②-哀牢山—金沙江深大断裂;
③-阿墨江断裂; ④-把边江断裂
①-Lancang River deep fault; ②-Ailao Mountain-Jinsha River deep fault; ③-Amo River fault; ④-Babian River fault

学界关注的热点(Hite, 1979; Tapponnier et al., 1982; Sengör, 1989; 钟大赉等, 1989; 翟明国等, 1990; 从

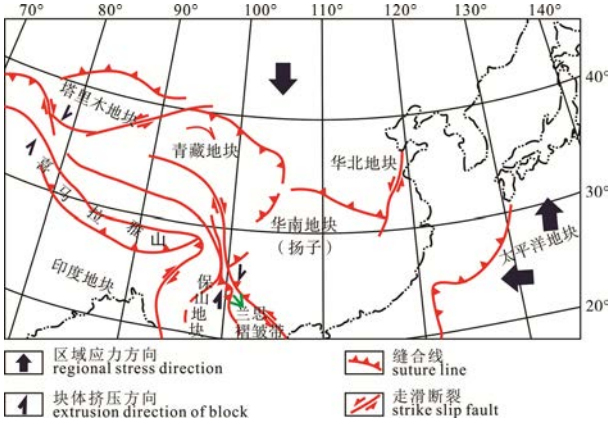


图 2 兰坪—思茅盆地所处的大地构造位置
(据朱夏, 1986; 有修改)
Fig. 2 Geotectonic location of Lanping-simao basin
(modified after ZHU, 1986)

柏林等, 1993; 范承钧等, 1993; 郑绵平等, 1989, 2012; Utha-Aroon, 1993; Metcalfe, 1997; 潘桂棠等, 1997; 钟大赉等, 1999; 薛纪春等, 2002; Wang, 2005; Hou et al., 2007; 杨立强等, 2011)。

研究区沉积了厚逾万米的海相、海陆交互相至陆相的中新生代地层, 从下至上主要由三叠系、侏罗系、白垩系和古近—新近系组成。由于本文篇幅所限, 在此仅将其列于表 1。

1 含盐地层特征及含钾建造

滇西南中、新生代气候以干热气候为特征, 是成盐作用的鼎盛时期。区域主要的含盐地层主要有上三叠统歪古村组、下侏罗统漾江组(张科寨组)、中侏罗统花开左组(和平乡组)及上白垩纪勐野井组。

1.1 上三叠统歪古村组

据前人认识, 滇西南三叠系不含盐, 但近年研究工作表明, 上三叠统歪古村组中多处发现盐霜、

表1 云南江城地区与邻区地层划分与对比(据蒋志文等, 1980, 补充修改)
Table 1 Stratigraphic division and correlation of Jiangcheng area and its adjacent areas, Yunnan Province
(modified after JIANG et al., 1980)

磨黑盐区			勐野井矿区			思茅凹陷			思茅凹陷			兰坪凹陷			思茅凹陷			兰坪—思茅盆地			磨黑—江城地区		
1960—1964年			1963年			1964—1965年			1966—1968年			1966—1971年			1975年			1998年			(本文)		
K			K			K			E			E			E ₂₋₃			E ₂₋₃					
J			J			J			J			J			J			J			J		
磨黑组			野狼山组			曼宽河组			曼宽河组			曼宽河组			等黑组			等黑组			等黑组		
J 砂岩			野狼山组			曼宽河组			曼宽河组			曼宽河组			等黑组			等黑组			等黑组		

盐泉和石膏。石膏层分布较为普遍, 兰坪盆地共有石膏矿床(点)11处, 其中著名的金顶石膏矿不仅达到大型规模(曲一华等, 1998), 而且还发现盐泉多处。思茅盆地勐腊易武发现石膏矿点1处、盐泉多处(曲一华等, 1998)。滇中区的相同地层称“云南驿组”, 业已在弥渡金山探明大型石膏矿床1处(曲一华等, 1998)。这表明该组也可能成为成盐的层位。

1.2 下侏罗统漾江组(张科寨组)

本组岩性、厚度变化较大, 在景东龙街、陈营哨等地该组中见有紫红色泥砾岩及纤维状石膏层(厚约1.5 m), 景谷茂密一带夹黄绿色泥砾岩及灰绿色含泥砾泥岩(厚约1 m), 勐腊兰田见有杂色泥砾岩及纤维状石膏(肖荣阁等, 1993)。

此外, 在考贡—麻磨一带南北长约5 km、东西宽约3 km范围内出露一系列盐泉。据地表水系Cl⁻异常研究, 异常区多位于漾江组分布地段, 故推测该组上部是可能的含盐层位(云南省地质矿产局八一四队, 1990)。

1.3 中侏罗统花开左组(和平乡组)

本组有强烈的含盐显示, 盐霜、盐泉、石膏遍布全区, 部分地区尚有泥砾岩分布, 部分盐泉有找钾水化学异常。景东—江城地区, 部分地区花开左组顶部有泥砾岩或角砾状泥岩、含砾泥岩分布, 泥砾岩中往往夹有石膏(云南省地质调查局, 1976)。据

云南省地质矿产局八一四队调研(云南省地质矿产局八一四队, 1990), 在双台树附近李家村, 石膏呈脉状、团块状产出, 含膏层厚达100.65 m; 完塘附近发育层状青石膏; 团田附近马大村, 该组顶部夹薄层石膏; 普洱黎明一带泥砾岩出露于该组顶部并含石膏; 江城向斜东翼的团山—柏木山一带长约6 km均有泥砾岩分布, 以杂色泥砾为主, 厚度一般10~25 m, 并有盐溶喀斯特微地貌, 泥砾岩中普遍含次生石膏脉; 和平寨向斜泥砾岩厚度约30 m, 并夹多层石膏(单层厚度0.2~0.3 m, 最厚者1 m)。

1.4 上白垩统勐野井组

勐野井组(云龙组)广泛分布于兰坪—思茅盆地各红色小盆地中, 一般数平方千米到数十平方千米。由于勐野井组沉积受近南北向深大断裂控制, 使其在平面上具带状(含盐带)分布特点。各带古新统盐系分布面积591~1830 km², 且岩性特征变化不大, 但各带发育程度、含盐(钾)及成盐作用却有差异(云南省地质矿产局八一四队, 1994)。

思茅盆地内由于构造的不均一性形成一系列相对深凹的次盆地(盐凹), 面积大小不等, 构成景谷含盐带、整董含盐带、勐腊含盐带和江城含盐带等4个含盐带及若干亚带(图3)(云南省地质矿产局八一四队, 1994)。盐矿床的平面形态多呈椭圆状、长圆状及不规则状, 厚度变化大, 一般中间厚, 边缘薄, 最

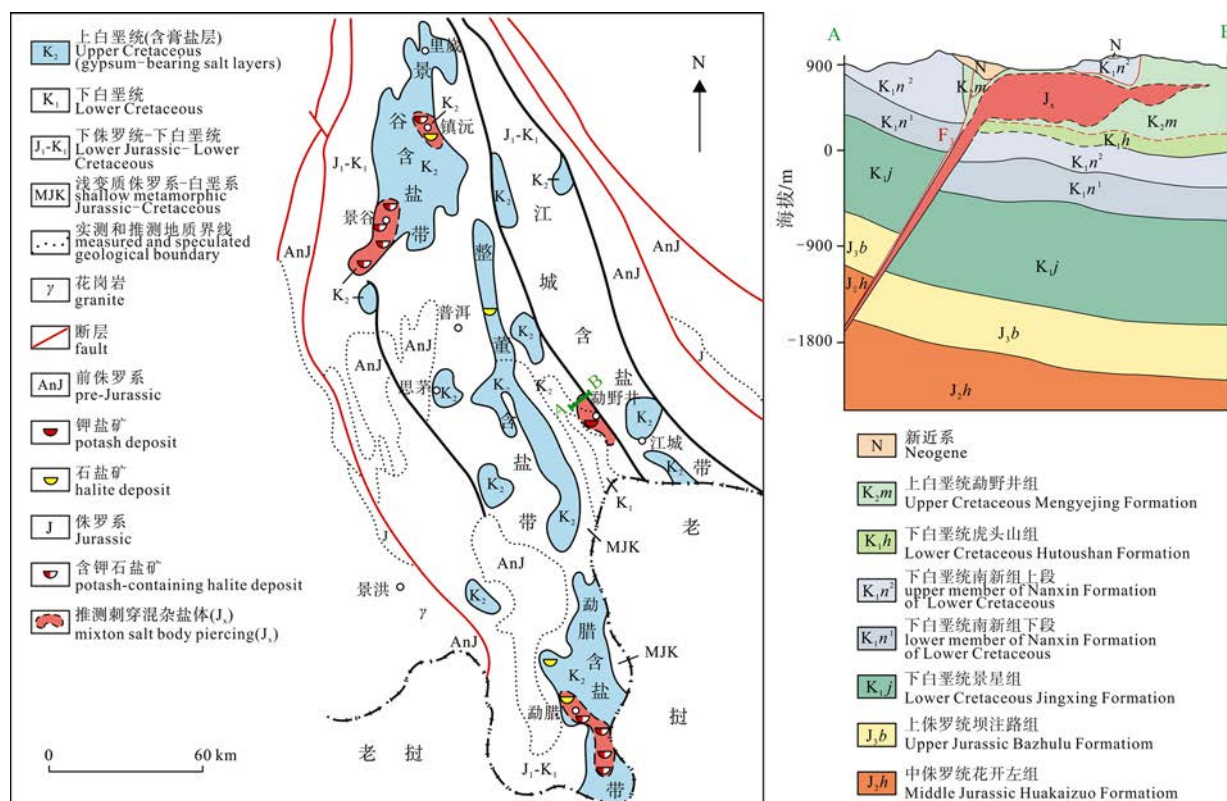


图3 思茅盆地勐野井组含膏盐带与贯入侏罗系含钾盐体分布示意图

Fig. 3 Schematic geological map showing the gypsum-bearing salt belt of Mengyejing Formation and the penetrated potassium-containing salt body of Jurassic in Simao basin

大厚近 700 m, 一般厚 150 m 以上。盐层在纵、横两度空间上呈透镜状和似层状, 且有分支现象。盐层埋藏深度随构造部位而异, 一般小于 150 m, 背斜轴部尤浅, 向斜部位较深, 最深达 900 m。

勐野井组盐系可分上、中、下三段(肖荣阁等, 1993)。下段: 碳酸盐、泥砾岩、粉砂岩、泥灰岩夹层状硬石膏和白云石条带, 厚 10 m。中段: 棕红色粉砂岩、泥岩夹少量细砂岩, 黄色泥岩、泥灰岩薄层, 厚 400~1000 m。上段: 分上下亚段, 下亚段石膏以及石盐、钾盐(后者很可能为深部含盐岩系塑流贯入, 详见下述)等蒸发岩、泥砾岩夹泥岩、粉砂岩, 盐层厚 55~178 m, 最厚 626 m, 地表见各种泥砾岩、粉砂岩、泥岩, 厚 100~650 m; 上亚段棕红色粉砂岩、泥岩夹少量砂岩, 厚 10~50 m。

通过分析思茅盆地景谷、江城及勐腊等含盐带钻孔资料, 发现所有见盐钻孔中岩盐均与碎屑岩直接接触, 缺乏碳酸盐及硫酸盐相过渡, 这反映了思茅盆地勐野井组含膏盐带中含钾岩系可能为其下部侏罗系的显示, 表明在深部可能存在较广泛的含钾盐层。

2 侏罗纪成盐成钾环境

2.1 古构造

按成矿域应大致等同构造域的认识(陈毓川等, 2007), 郑绵平等将我国蒸发岩划分为扬子盐类成矿域、华北盐类成矿域、塔(里木)—柴(达木)盐类成矿域和羌北—滇西盐类成矿带(郑绵平等, 2006, 2010, 2012)。本区隶属位于特提斯构造域东部的羌北—滇西盐类成矿带, 该带多属于扬子板块的构造组分, 中间有昌都、临沧、巴塘和羌塘等微陆块分布, 相对周边造山带较为稳定。

滇西南含盐建造多产于构造相对稳定的地区(郑绵平等, 2010), 由于受深断裂控制, 盐盆地沉积相带的展布较为复杂, 难于与牛眼式、泪滴式吻合。由于古断裂的差异性活动, 致使兰坪—思茅盆地基

底存在明显差异, 逐步形成凸起、凹陷相间分布的格局, 形成典型的断凹型盆地, 凹陷内受更次一级古断裂的控制所形成若干个盐凹带(含盐带)。

本区自板块运动发生俯冲活动以来, 经历了数次重要的扩张和挤压之后, 随着俯冲带不断西移, 亚洲大陆不断向外增生, 早先被分割的小型地块逐渐镶嵌拼合成为新增大陆的活动边缘, 为蒸发岩盆地的形成奠定了基础。印支期后, 构造运动强度相对减弱, 运动方式已转为板内活动为主, 表现为深大断裂所包围的断块之间的上升和下降, 这有利控制蒸发岩盆地的发育; 断块构造活动促进了盆底地形的分异和多级盐盆地的形成, 而有利于卤水流动和盐类的沉积分异。

2.2 古地理、古纬度环境

羌北—滇西盐类成矿带在侏罗纪以来, 新特提斯(Sengör, 1989; Metcalfe, 1997)是在逐渐关闭的过程中形成了局限海, 并在中晚侏罗世、白垩纪晚期、古近纪初期多期处于炎热干旱气候环境。特别是中晚侏罗世, 多位于赤道以北 $N20^{\circ}$ 低纬度区, 形成有利于成盐成钾的古地理古气候环境。而循新特提斯带, 在滇西—羌塘盆地西部有中晚侏罗世含钾盐盆地发育, 在土库曼—乌兹别克斯坦已发现晚侏罗世巨型钾盐矿床, 由此继续往西, 在墨西哥也发现侏罗纪钾矿床(郑绵平等, 2006, 2010, 2012)。

在思茅盆地, 中晚侏罗纪世, 随着新特提斯洋打开, 海水由西部再次侵入, 盆地再次接受沉积, 其两侧演化为沉降幅度相对较小的地垒, 而残留盆地中部则演化为两个地堑, 中间大约以营盘山地垒相隔(云南省地质矿产局八一四队, 1990)。此时保山一带为海湾浅海, 发育碳酸盐岩沉积, 沿澜沧江一带(早期的火山岛弧带)可能发育障壁岛。思茅残留盆地所在地区为岛后泻湖潮坪环境, 发育滨海平原相砂泥岩、潮坪相泥岩、灰岩夹砂岩和泻湖相砂泥岩和膏盐层等。晚侏罗世, 地壳开始抬升, 海水后撤, 盆地演化为海陆交互盆地, 由于地壳隆升幅

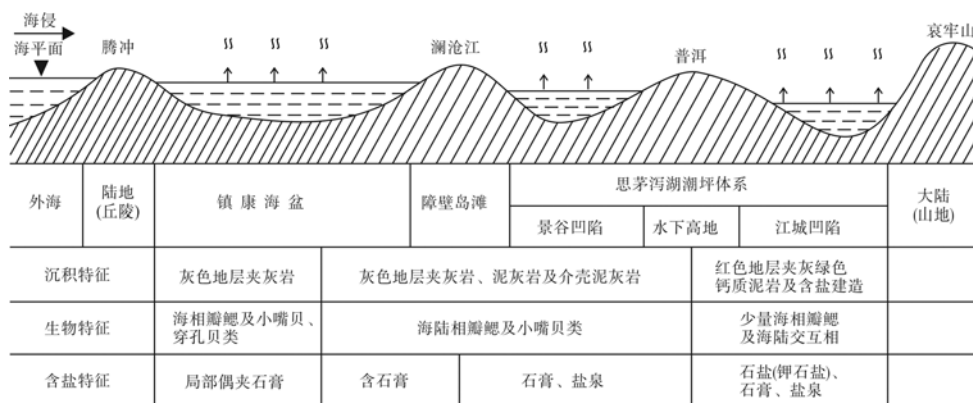


图 4 滇西南中侏罗世多级蒸发岩盆地示意剖面图

Fig. 4 Schematic geological section of the middle Jurassic multistage evaporite basin in southwest Yunnan

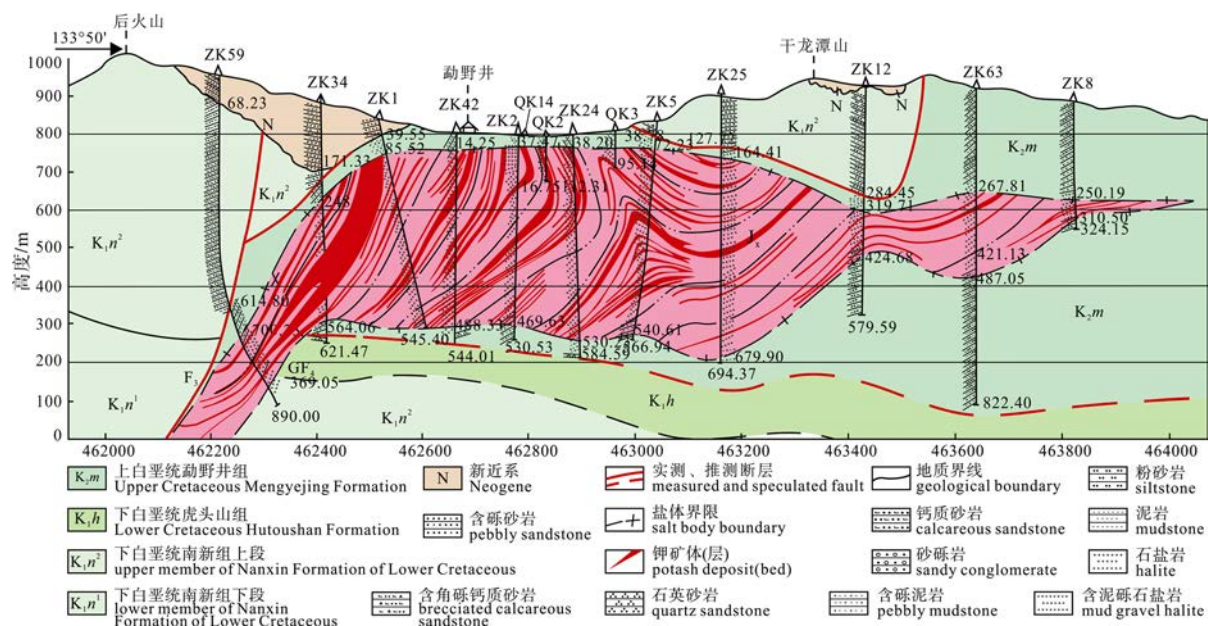


图5 云南江城勐野井钾盐矿区第11号地质剖面(据云南省地质局第十六地质队, 1980, 稍有补充)

Fig. 5 No. 11 geological section of the Mengyejing potash deposit in Jiangcheng County, Yunnan Province (modified after No. 16 Geological Party of Yunnan Province, 1980)

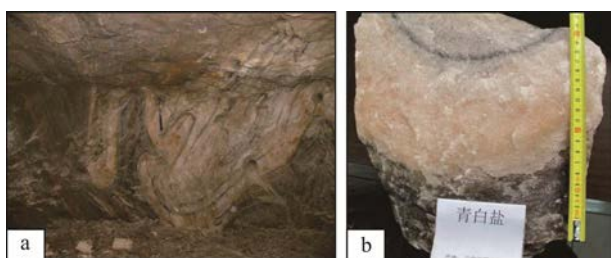


图6 勐野井钾盐矿盐体变形现象

Fig. 6 Salt deformation in the Mengyejing potash deposit

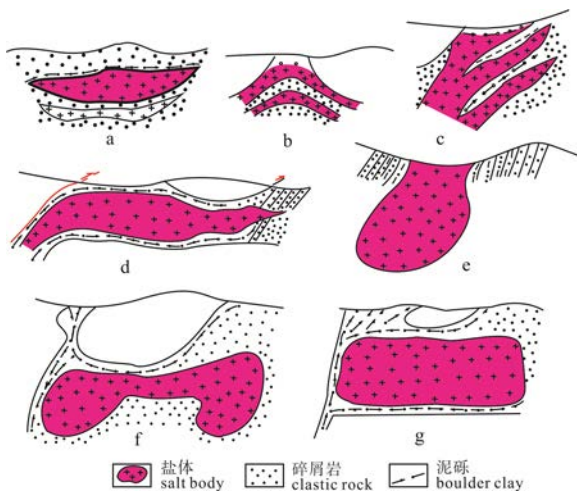


图7 滇西南地区盐体的各种形态示意图

(据帅开业, 1987)

Fig. 7 Schematic map of various forms of salt bodies in Southwest Yunnan(after SHUAI, 1987)

a-磨黑; b-文卡; c-整董; d, f, g-勐野井; e-富民者北
a-Mohei; b-Wenka; c-Zhengdong; d, f, g-Mengyejing;
e-Fuminzhebei

在兰坪—思茅盆地东部, 沉积物以红色为主夹少量灰色层, 故有“红侏罗”之称。沉积相由西向东的规律性变化, 共同构成一个多级蒸发岩盆地的古地理景观(图4)。从海洋到内陆, 海水由淡化到浓缩, 外围盆地海水的初步浓缩为内部盆地较高阶段的浓缩做准备, 因此兰坪—思茅地区的石膏、泥砾岩的分布较澜沧江以西丰富得多, 并有大量盐泉出露, 构成多级盆地的成盐模式, 而成为滇西南中侏罗世成盐的显著特征。

3 钾盐成矿新认识

勐野井钾盐矿床成矿模式与现代盐湖和古生代陆表含盐盆地的特征相比, 有较大差异, 前人不但对勐野井式钾盐成因模式具有不同的见解, 而且对其成钾时代也囿于并未考虑后期盐体变化, 而认为属于上部红层(白垩系或古新统)。本文通过近几年多次对勐野井矿井剖面与地质地表露头调查和盐构造分析, 基于盐类地质成矿基本原理, 而推断勐野井钾盐体是盐底辟作用由深部挤压塑流到表层来的, 可能有含钾盐盐系被覆盖于第三纪—白垩纪地层之下。为了验证上述认识, 从有限经费出发而选用费用少、适用的低频大地电磁法(EH4)和高精度电磁频谱探测法(MES)。取得结果表明, 在工区深部存在2组岩盐段异常, 并与以往1/10万重力成果大体可相对照。

3.1 钾盐体变形现象

勐野井钾盐矿床遭受后期构造改造的一个重要证据, 便是盐岩中发现的大量宏观和微观变形现象: ①钾盐剖面结构呈马尾丝状展布, 盐层褶皱、

度不一, 隆升幅度大的西部局部地区(如保山—镇康一带)露出水面而缺失上侏罗统。

揉皱普遍(图 5), 青白盐贯入青灰色钾盐层中, 形成香肠状“盐层”, 盐体内部不均匀塑性流动标志明显(图 6); ②从总的盐体外形看, 多数剖面形态或呈轴部膨大的背斜隆起, 或呈畸变的不规则盐体, 不但在勐野井矿井(图 5, 7)而且在滇西南磨黑、文卡、整董等地也能见及(图 7)。

这些现象表明, 本区中、新生代的蒸发岩在沉积以后经历过不容置疑的变形变质作用, 现在的展布形态已不能反映其原始沉积面貌。因此, 从传统的沉积模式角度分析是不够的, 还需充分考虑后期构造演化 and 影响, 从更广阔的地质构造背景加以分析。

3.2 钾盐体沉积相突变

蒸发岩沉积的一般规律表明, 固体钾盐通常是在石盐大量沉积之后析出的, 钾盐在蒸发岩沉积系统中的分布有一定的规律性: 成盐成钾卤水在正常封闭的盆地中, 蒸发作用使盐类物质按溶解度先后沉积; 剖面上成为一个旋回性构造, 钾盐分布在中上部 and 顶部; 平面上则由盆地边缘到中心, 按溶解度从小到大依次发育碳酸盐—硫酸盐—石盐—钾盐。

从矿区地质剖面上看(图 5), 含钾盐体呈“盐坨状”与围岩(碎屑岩)呈“物理”接触, 缺乏与化学岩类(硫酸盐类和碳酸盐岩类)呈过渡关系, 这显然与蒸发岩沉积分带规律相悖。此外, 钾盐层剖面结构呈马尾丝展布, 靠近 F_3 断层(图 5), 钾盐体产状与断层产状几乎一致, 并未发现真正盐体的“根”, 是否还有规模更大的盐体深埋之下? 特别是许多盐体内

部混有若干大小不等的岩块, 而且往往出现在盐体中心部位, 与正常搬运沉积规律显然不符。

从岩相角度, 兰坪—思茅盆地内若干个盐凹带(含盐带)未发现盐系碎屑粒度由粗变细的边缘相, 说明原始盐盆的沉积范围较现在分布大。各盐盆尽管相隔较远, 但在大区域范围内, 其物质组分及微量元素组成一致, 反映它们具有相同的物质补给来源和相似的蒸发沉积条件。这些似乎互不相干的小盐盆, 实际在地史上至少在同一含盐带内它们的水体曾经是相通的, 甚至是同一大盐盆, 而现在展布的独立盐盆不过是一种刺穿盐体, 由深部较大的原生盐层经后期强烈构造运动而部分往上刺穿的结果(见图 3, 5)。

3.3 钾盐体贯入构造

我国中新生代盐体构造形态表明, 盐体变形的主要力源, 应来自于区域构造, 特别是断裂构造活动产生的侧压力。就思茅地区而言, 东西两侧的深大断裂(东为哀牢山深断裂, 西为澜沧江深断裂)控制了拗陷的边界, 喜山期本区处于强大的挤压应力场中, 大规模的逆冲-逆掩断裂相继发生并多期活动, 导致盐体变形过程中断裂与软流同时发生。喜山运动的多幕活动均以 SW—NE 向挤压为主, 因此盐体总体变形都是受北西向的断裂所控制。沿断裂带, 由于盐体塑性变形而刺穿至薄弱的浅层中。因此, 在某些后期构造掩盖面积大的地区, 即使盐系出露范围很小, 也可能隐伏有类似勐野井规模的钾盐矿床。

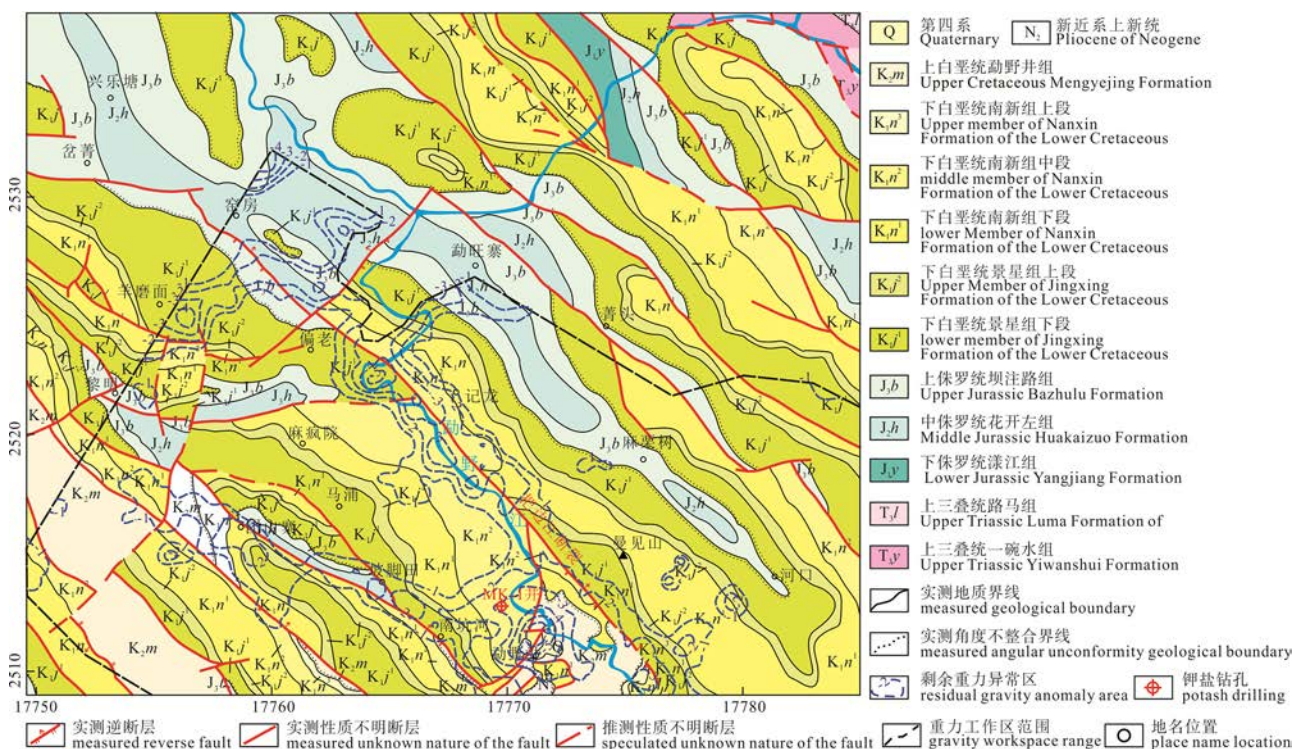


图 8 云南勐野井—磨黑地区地质-重力综合解释图

Fig. 8 Comprehensive interpretation map of the geology and gravity in Mengyejing-Mohei area, Yunnan Province

从上图 5 可看出,含钾盐体在矿区西北侧沿 F_3 断层(勐野井钾盐矿边界断层)具倾向 NW 的贯入构造。此外,据镜下观察,在钾盐体晶体表面发现擦痕、机械压痕、凹坑以及化学溶蚀痕迹等现象,表明盐体受构造挤压后产生塑性流动的结果。

3.4 地球物理特征显示

(1)重力异常显示

云南勐野井—磨黑地区 1/5 万剩余重力异常平面图(东方地球物理公司综合物化探处 2013 年实测)反映了勐野井周边地区重力负异常情况。本区重力异常线强烈弯曲,局部异常零乱无序,充分表明区内断裂纵横交错,将一完整的沉积盐盆地分割成为若干复杂的地体。区内主要发育 4 个重力低异常区,包括东南部勐野井低重力异常区、中部偏老—记龙低重力异常区、西部羊磨面附近低重力异常区及西北部的重力低异常区。除勐野井矿区强度较大以外,其余皆在 -2 mGal 上下。在重力异常特征资料基础上,结合区域主要断裂和后期断裂构造的分布,对主要重力负异常区进行了重新解释(图 8)。

我国中生代盐体构造形态表明,盐体变形的主要力源应来自于区域构造,特别是断裂构造活动产生的侧压力。本区的盐体构造反映了在强大挤压力下变形的特点,这与中生代以来区域构造的活动历史有关,特别是受喜山运动的强烈影响所致。通过总结前人对滇西南地区中—新生代构造运动的认识(何科昭等, 1996; 段建中等, 2001), 认为喜山期的幕式运动中,第一期和第三期对滇西南地区影响为甚,尤其是中始新世以来的喜山第一期。

从区域构造背景分析,勐野井—磨黑地区主构造断裂为印支期的把边江断裂带和营盘山—大过岭断裂带,呈 NW—SE 向展布;后期喜山期以来的构造断裂较多,切割并追踪主构造断裂,而呈 NE—SW 向展布。总体上,本区重力负异常区呈串珠状向 NW 展开、向 SE 收拢,这与思茅凹陷的主要断裂构造(如把边江断裂、营盘山断裂等)展布方向一致(图 8),该展布方向与始新世以来 NE—SW 向挤压应力格局相吻合。而且,本区几乎所有重力负异常区均沿断裂带周围展布,尤其是异常小于 3 mGal 区域受后期断裂构造即 NE—SW 向展布的断层控制更为明显。这些地区也是两组断裂带控制的沉降盆地和构造地层封盖性薄弱区。此外,工区布格重力异常和剩余重力异常显示区内发育有三排 NW 向展布的重力正异常带,这与地质资料显示的工区内主体褶皱构造发育特征一致。

因此,通过对比重力负异常区和地层封盖性薄弱的断裂带,表明两组或多组近似垂直展布的断裂

带交叉点附近区域,有利于盐类沉积的流动聚集,并易沿断裂通道向上流动;同时,结合勐野井矿区钾盐矿床盐构造的特征,认为多期断裂活动是盐构造形成的主导因素。

(2)MES(高精度电磁频谱探测)显示

在滇西南勐野井地区,其地层主要以砂、泥岩为主的碎屑岩层,各地层不同岩性在电性方面存在一定差异,因此通过地质大调查项目开展了 MES 探测。结果表明,该区泥质粉砂岩、泥岩电阻率值仅在 $30 \sim 100 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,石英砂岩具有次高的电阻率 $400 \sim 2500 \Omega \cdot \text{m}$,而含泥砾岩盐最高的电阻率达 $1000 \sim 6000 \Omega \cdot \text{m}$,其值是围岩(粉砂岩、泥岩)的 $10 \sim 200$ 倍。根据勐野井地区已知钻孔钾 1 井的地层资料与 MES 测试结果对比分析,认为电阻率在 $1000 \sim 4000 \Omega \cdot \text{m}$ 之间的层段代表了勐野井组中的岩盐层,其电阻率值高出该区砂、泥岩 $5 \sim 15$ 倍,同时在此类高电阻率层下部亦存在高电阻率层,电阻率值均高于 $4000 \Omega \cdot \text{m}$,按其地球物理特征,结合磁场强度显示低异常,均反映可能是深部地层的岩盐层引起的异常(图 9)。

(3)EH-4(低频大地电磁法)探测响应特征

研究表明,在已评价勐野井钾盐矿区中,盐体(钾盐)表现为高电阻率特征,电阻率几何平均值在 $3302 \sim 40943 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,其含盐层位与所测高阻区的顶底深度及展布范围吻合较好。同时,工区存在 2 组高阻区,分别位于上部埋深 $150 \sim 1500 \text{ m}$ 和下部一般埋深均在 1500 m 以下;上部呈蜂窝状,其中勐野井钾矿层即在其列(图 10);下部呈不规则起伏似层状,向呈底辟蘑菇状上冲。由此推断在电阻率高值的深部地层(可能侏罗系)可能发育有盐类沉积物(已证实侏罗系无厚层碳酸盐岩沉积物)。

3.5 Sr 同位素示踪

针对勐野井钾盐矿的青钾、红钾、绿钾、青白

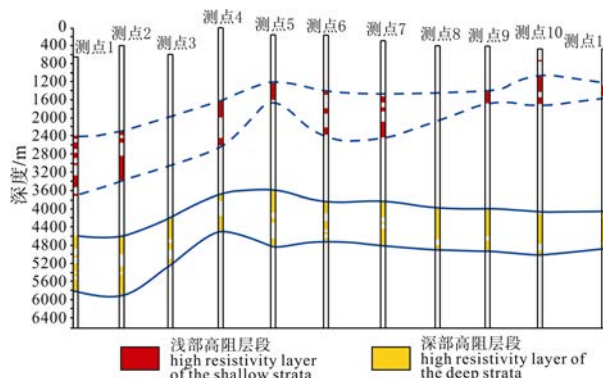


图 9 云南江城地区 MES 测点剖面对比简化图
(据北京达创高科科技有限公司, 周仁安等, 2011 简化)
Fig. 9 Cross-section comparative schematic map of MES measuring point in Jiangcheng area, Yunnan Province
(modified after ZHOU et al., 2011)

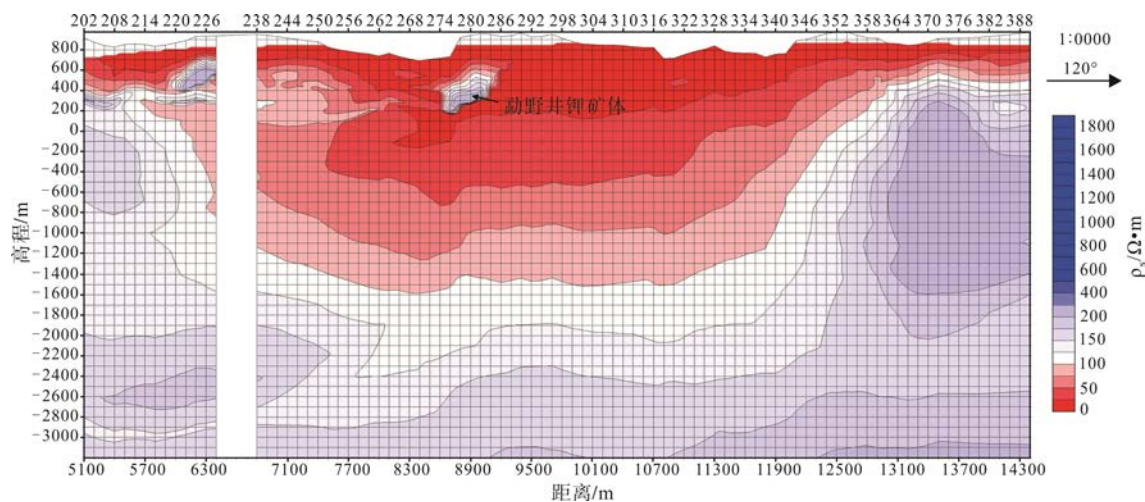


图 10 云南江城勐野井地区 EH4 4000 m 反演断面图(李文尧等, 2011)

Fig. 10 4000 m inversion sectional drawing of EH4 measuring in Jiangcheng area, Yunnan Province (after LI et al., 2011)

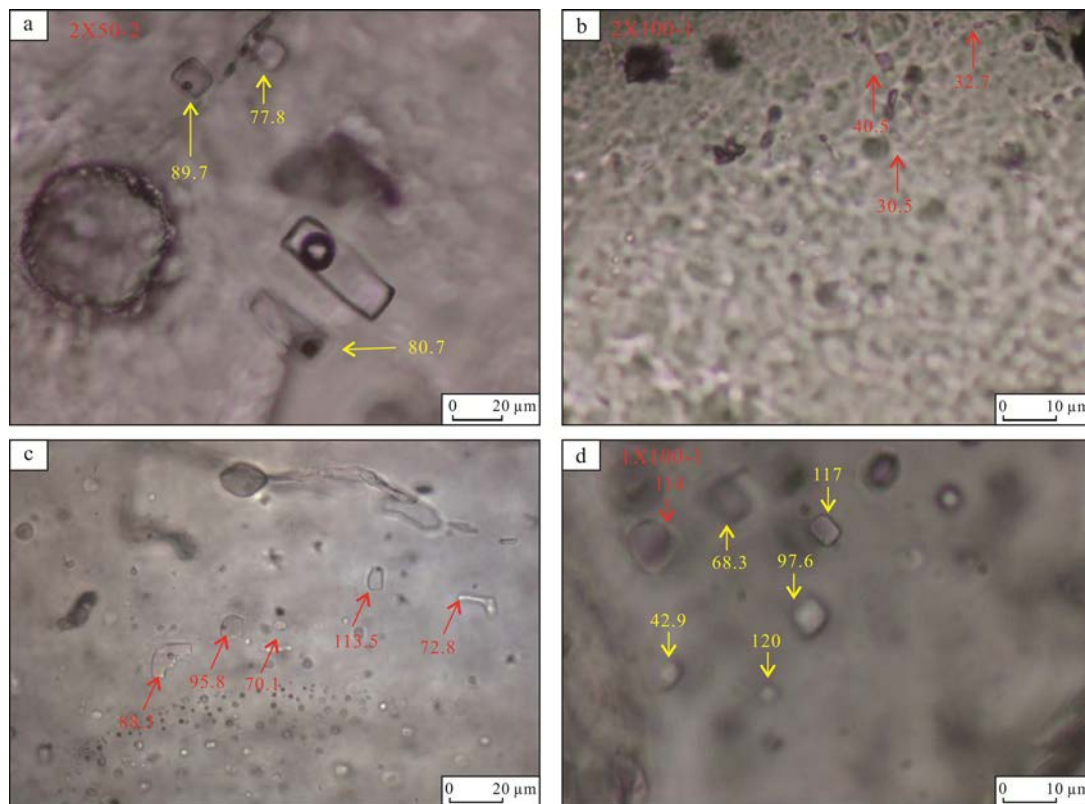


图 11 勐野井钾盐矿石盐包裹体测温

Fig. 11 Thermometry of salt inclusions in the Mengyejing potash deposit

a-含钾石盐中气液两相包裹体; b-含钾石盐中单液相包裹体; c-青白盐中气液两相包裹体; d-红钾中气液两相包裹体
a-gas-liquid inclusions in potassium halite; b-single liquid inclusions in potassium halite;
c-gas-liquid inclusions in greenish white salt; d-gas-liquid inclusions in red sylvite

盐、红盐等 20 件代表性盐样, 进行了 Sr 同位素分析($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)和 Rb-Sr 含量分析测试。分析结果显示除个别盐样, 勐野井盐样 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围基本落于 0.707121 和 0.709734 之间, 基本上与侏罗纪到现代的海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值吻合, 将上述 Sr 同位素的测量值分别进行新近纪、白垩纪、侏罗纪的校正, 发现含泥砾少的结晶盐与新近纪海水 Sr 同位素特征一致, 而含泥砾较多的盐样与侏罗纪海水 Sr 同位

素特征相吻合。

测试结果表明, 勐野井矿区盐体的原始成盐时代为侏罗纪, 受构造活动的影响, 侏罗纪“原盐”(原始沉积的盐层)沿断层侵出至地表, 受陆源水的混染改造, 部分原盐发生重结晶(郑绵平等, 2012)。

3.6 包裹体测温

本次对勐野井钾盐矿 20 件石盐(钾石盐)样品进行了流体包裹体研究。结果表明, 石盐流体包裹体

主要有两种类型:单液相和气液两相。其中,以单液相占优,其包裹体较发育,形态多样,主要为负晶形,少数为不规则状、柱状,大小多为 5~12 μm ,极少部分 12~20 μm ,测温平均 57°C 左右,普遍为 35~65°C,最高 130°C,最低 11.2°C。气液相包裹体测温平均 90°C 左右,最高 124°C,最低 39.7°C,普遍为 80~110°C 之间,气液比一般 3%~7%,个别 10% 左右,形态呈规则立方体形,立方体与石盐晶体结晶方向一致(图 11)。这代表在蒸发成盐后期有构造运动发生或热液叠加与补给,推测这与喜山期区域构造运动,深部成盐挤压受力后,温度升高,沿断裂塑性流动有关。

以上研究表明,在勐野井地区,甚至兰坪—思茅含盐带深部有规模较大的盐类(含钾盐层)沉积,由此认为有必要通过钻探手段进行直接验证。

3.7 钻探工程验证

通过以上对勐野井地质调查研究,结合物探资料成果的综合认识,进一步提出类似勐野井钾盐矿层很可能是源于深部原盐层,由于后期复杂而强烈的构造运动挤压发生塑性流变,运移至浅部地层中,并受到浅部上覆地层的“保护”。

综上认识,故第一作者作为“钾盐资源调查评价”计划项目负责人,承中国地质调查局经费支持和云南省有关领导同志给予各方面支持,而得以部署两口深钻探,以验证上述找钾新思路。因此,在勐野井北西与南东方向部署的 2 口钾盐钻孔分别为:MK-1 井(E101°37'29.2", N22°41'28")、MK-2 井(E 101°41'39", N22°38'48")。其中, MK-2 井位于江城县宝藏乡勐野江西侧的山腰处,而且勐野江西侧无桥梁可供载有大型钻探设备的车辆通行,唯有长 30 m 左右,宽 1 m 左右吊桥横跨江面之上,其仅容单人穿行通过。若按此方案拟定 MK-2 钻孔位置实施钻探,则急需建桥、开山修路,这不仅耗时、耗资,而且该地区天气较为恶劣,进入雨季难于修路架桥。由于云南省国土资源厅提出倒计时开展钾盐找矿工作,加快云南钾盐钻探的实施进度,故项目组研究决定将 MK-2 井位置调整至其东南侧约 950 m 处,紧靠勐野江的东岸,其最终井位坐标为 E101°42'9.1", N22°38'37.6"。后经 MES(高精度电磁频谱探测)测试分析,认为该点实施钻探仍处目的层的边缘,而且与 EH4 测试分析结果及重力资料相对吻合。两井区均位于江城县城 296°方向,直距 18 km(公路线距 35 km),隶属于江城县宝藏乡管辖。井口位置分别位于宝藏乡大地坡南垦河南岸和坡脚村南约 1 km 处勐野江东北侧的二级阶地之上。

根据勐野井地质地表调查及 MK-2 井钻探成果,

证实侏罗系和平乡组发育有大量石膏斑块、石膏脉与盐脉;近期, MK-1 井已完钻,通过钻探所揭示地层发现,在井深 2253~2323 m(J_2h)段发育石盐沉积(图 12),并见部分钾石盐填充石盐裂隙中。此外,前期江城宝藏乡七一桥—江城县城剖面的孢粉露头样品测试成果,表明侏罗系和平乡组化石较丰富,但保存不好;其中 2 个样品显示孢粉组合成分单调,以克拉梭粉属 *Classopollis* 大量出现为主要特征(图 13),含量高达 93.4%,还见有少量苏铁粉属 *Cycadopites*、光面三缝孢属 *Leiotriletes*、杪椌孢属 *Cyathidites*、圆形粒面孢属 *Cyclogranisporites*、三角粒面孢属 *Granulatisporites*。其中克拉梭粉属 *Classopollis* 在南方繁盛于侏罗纪—白垩纪,其余化石分布时代较长,未见白垩纪的典型化石,这反映以上 2 个样品时代为中、晚侏罗世。结合该地区侏罗系区域地层特征及组段划分标志等,由此确定 MK-1 井所钻遇石盐段(2253~2323 m)为中侏罗系和平乡组。

该勘探成果印证了之前所提出新的科学认识:钾盐层是由深部挤压塑流到表层来的,并有钾盐层被覆盖于其他地层之下。由此证明,思茅盆地侏罗系具备成盐成钾条件的认识,也与物探、地化等资料解译成果得到较好的印证。

4 钾盐成矿机制初步分析

通过盆地的构造演化、含盐建造和沉积特征等地质条件综合分析,江城勐野井钾盐矿床是在多级盆地成盐背景下形成的,经过后期构造运动由底部沉积层运移至浅部赋矿层的后期富集型钾盐矿床。

矿床的成因机制:兰坪—思茅盆地为受深大断裂控制、构造封闭条件良好的大型坳陷盆地,在侏罗纪海侵时,盆地接受大量海水物质补给,在构造运动末期盆地抬升,并逐步演变成多级盆地,发育浅水盐湖—干盐湖泻湖环境,在持续干旱的气候条件下,盐湖逐渐演化成巨厚的盐类矿床,次级盆地对盐类物质的水平分异起控制作用,在其盆地边缘或各次盆地中可能沉积有钾盐矿床。在成盐后构造运动过程中,由于盐类物质具有极强的可塑性,使得深部原盐在区域性构造作用下,通过大型通道(断层)发生由下向上的塑性流动,迁移至浅部合适层位,本文将其称为“二层楼成矿模式”——深部沉积,浅部刺穿、贯入(图 14)。

5 结论

(1)滇西南中生代气候以炎热、干旱为特征,是成盐作用的鼎盛时期。区域主要的含盐地层有上三

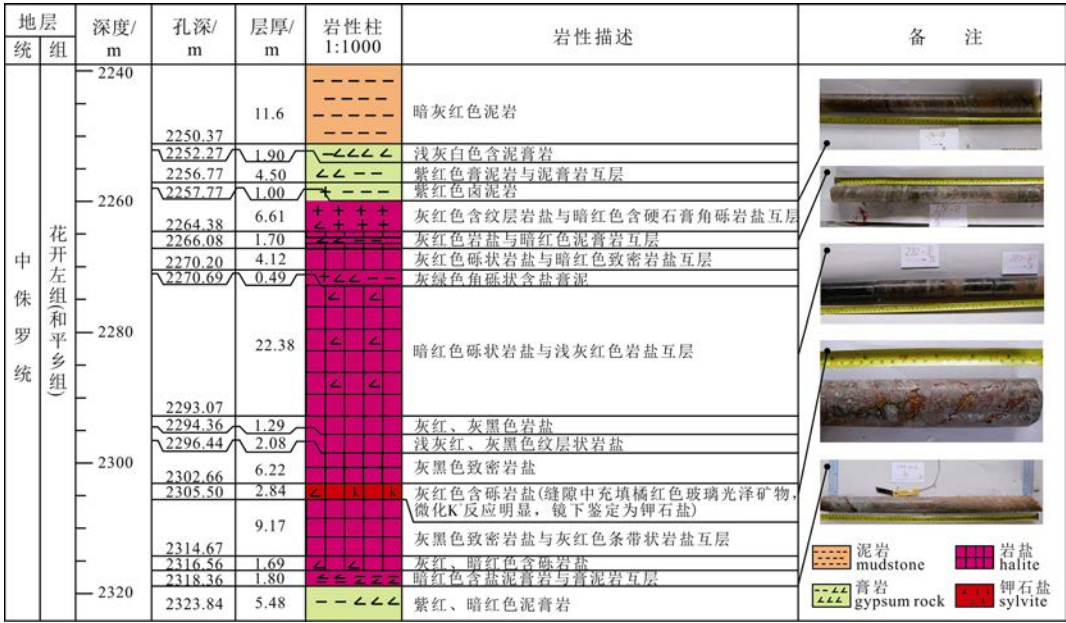


图 12 云南江城钾盐基准井 MK-1 井岩盐段柱状图

Fig. 12 Columnar section of the halite segment in the potash benchmark Well MK-1 of Jiangcheng area, Yunnan Province

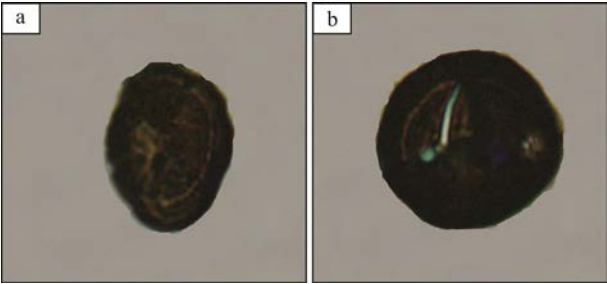


图 13 云南江城宝藏乡七一桥—江城县城剖面
孢粉样品(克拉梭粉属 *Classopollis*)

Fig. 13 Pollen samples from the Qiyi Bridge-Jiangcheng County section in Yunnan Province(*Classopollis*)

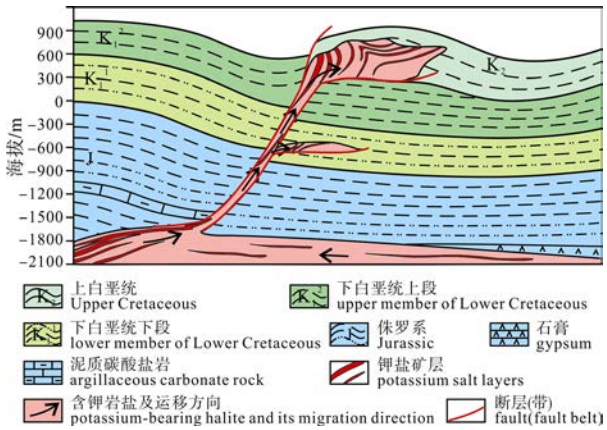


图 14 云南勐野井钾盐矿床成矿模式

Fig. 14 Metallogenic model of the Mengyejing potash deposit, Yunnan Province

叠统歪古村组、下侏罗统漾江组(张科寨组)、中侏罗统花开左组(和平乡组)及上白垩纪勐野井组。前人认为其成盐时期为古近纪,但在成因上存在诸多难以解释的难题;本次经过地质、物探和地球化学

等研究,确定勐野井钾盐矿床为海相成因,其钾盐来自于侏罗系。本区侏罗纪含盐(钾)岩系受控于古构造、古地理及古纬度条件等,而形成多级成盐成钾盆地。

(2)通过大量地面地质调查、沉积相、盐构造及水化学研究,推断勐野井地区勐野井组中钾盐层是通过断层由深部挤压塑流到表层来的,可能有含钾盐岩系被覆盖于第三纪—白垩纪地层之下。经电测表明,该区深部有多组盐层存在。为验证上述找钾新思路,部署了 2 口钾盐中深钻,其钻探成果与该认识相一致。

(3)本区重力负异常区呈串珠状向 NW 展开、向 SE 收拢,这与思茅凹陷的主要断裂构造展布方向一致。通过对比重力负异常区和地层封盖性薄弱的断裂带,表明两组或多组近似垂直展布的断裂带交叉点附近区域,有利于深部盐体刺穿、贯入;结合勐野井矿区钾盐矿床盐构造的特征,分析认为多期断裂活动是盐构造形成的主导因素。

(4)提出了早期盐沉积形成底辟,局部向浅部刺穿、贯入的“二层楼成矿模式”。这种成矿模式扩展了滇西南地区钾盐找矿思路和视野,在构造较为发育的地区,后期深埋的盐层可能在构造运动下向浅部合适层位贯入,这表明在区域找钾过程中,需探究后期构造活动引起的盐体变化和分辨原始沉积的矿层和“次生”的赋矿层位。

致谢: 本项目承云南省国土资源厅、云南省地质调查局、普洱市国土资源局,以及江城县、宝藏乡领导和相关同志的关心和鼎力协助,使本项目工程施

工得以顺利进行;参加本项目前期工作的人员还有中国地质科学院地质研究所刘俊英研究员、国土资源实物地质资料中心蒋忠惕高级工程师、中国地质科学院矿产资源研究所李金锁副研究员、王宇硕士生等。在此一并致谢!

参考文献:

- 陈毓川,王登红,朱裕生,徐志刚,任纪舜. 2007. 中国成矿体系与区域成矿评价(上册)[M]. 北京:地质出版社: 64-71.
- 从柏林,吴根耀,张旗,张儒媛,翟明国,赵大升,张雯华. 1993. 中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化[J]. 中国科学(B辑), 23(11): 1201-1207.
- 邓尔新. 1982. 云南省江城、勐腊一带钾矿床和盐溶岩类的特征、形成条件以及找矿问题[J]. 地球化学, (2): 143-154.
- 段建中,薛顺荣,钱祥贵. 2001. 滇西“三江”地区新生代地质构造格局及其演化[J]. 云南地质, 20(3): 243-252.
- 范承钧,张翼飞. 1993. 云南西部地质构造格局[J]. 云南地质, 12(2): 139-147.
- 何科昭,赵崇贺,何浩生,帅开业. 1996. 滇西陆内裂谷与造山作用[M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 钾盐地质科学研究队. 1980. 云南思茅地区钾盐地质研究论文集[C]. 昆明:云南省地质局.
- 蒋志文,欧阳林. 1980. 云南兰坪—思茅地区上白垩统一选第三系含盐系地层的划分对比[R]. 昆明:云南省地质局.
- 李文尧,廖忠. 2011. 云南省普洱市江城县勐野井钾盐矿区物探低频大地电磁法勘查报告[R]. 昆明:昆明鑫地地质勘探有限公司.
- 潘桂棠,陈智梁,李兴振,颜仰基,许效松. 1997. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京:地质出版社.
- 曲一华,袁品泉,帅开业,张瑛,蔡克勤,贾疏源,陈朝德. 1998. 兰坪-思茅盆地钾盐成矿规律及预测[M]. 北京:地质出版社.
- 曲懿华. 1982. 钾盐矿床母液来源的新途径——深卤补给[J]. 矿物岩石, (1): 7-14.
- 曲懿华. 1997. 兰坪-思茅盆地与泰国呵叻盆地含钾卤水同源性研究——兼论该区找钾有利层位和地区[J]. 化工矿产地质, 19(2): 81-98.
- 帅开业. 1987. 云南中、新生代地质构造演化与蒸发岩建造[J]. 现代地质, 1(2): 207-229.
- 吴天柱. 1981. 云南勐野井钾盐矿床的成因[J]. 化工地质, (1): 1-8.
- 夏文杰,李秀华. 1983. 蒸发岩成因理论研究中的几个问题——以云南勐野井钾盐石盐矿床为例[J]. 矿物岩石, (3): 1-11.
- 肖荣阁,陈卉泉,袁见齐. 1993. 云南中新生代地质与矿产[M]. 北京:海洋出版社.
- 肖章程,黄和旺. 2009. 云南省思茅盆地固体钾盐矿成矿物质来源[J]. 中国西部科技, 8(23): 9-11.
- 许效松,吴嘉陵. 1983. 云南勐野井钾盐矿床特征,微量元素地球化学及成因探讨[J]. 中国地质科学院院报, 5(1): 17-36.
- 薛纪春,陈毓川,杨建民,王登红,杨伟光,杨清标. 2002. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. 矿床地质, 21(1): 36-44.
- 颜仰基,袁敬阁,康承林,王泽文,王光新. 1981. 云南思茅拗陷勐野井组盐类矿床的成钾条件[J]. 中国地质科学院院报(成都地质矿产研究所分刊), 2(1): 29-47.
- 杨立强,邓军,赵凯,刘江涛. 2011. 哀牢山造山带金矿成矿时序及其动力学背景探讨[J]. 岩石学报, 27(9): 2519-2532.
- 云南省地质局第十六地质队. 1980. 云南省江城县勐野井钾盐矿区详细勘探地质报告[R]. 昆明:云南省地质局第十六地质队.
- 云南省地质矿产局,成都地质矿产研究所,成都地质学院. 1986. 云南思茅盐矿地质[M]. 北京:地质出版社.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 云南省地质矿产局八一四队. 1990. 云南侏罗系成盐条件与找钾可能性研究[R]. 昆明:云南省地质矿产局八一四队.
- 云南省地质矿产局八一四队. 1994. 云南省第二轮钾盐成矿远景区划[R]. 昆明:云南省地质矿产局八一四队.
- 云南省地质调查局. 1976. 区域地质调查报告:普洱幅-F47-VII(地质部分)[R]. 昆明:云南省地质调查局.
- 翟明国,从柏林,乔广生,张儒媛. 1990. 中国滇西南造山带变质岩的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素年代学[J]. 岩石学报, 11(4): 1-11.
- 詹行礼,张云震. 1981. 云南勐野井钾盐矿床包裹体特征及矿床成因初探[J]. 成都地质学院学报, (2): 103-110.
- 张从伟,高东林,马海州,韩文霞. 2010. 兰坪-思茅盆地钾盐矿床的物质来源探讨[J]. 盐湖研究, 218(4): 12-18.
- 张从伟,高东林,张西营,唐启亮,时林. 2011. 兰坪-思茅盆地与楚雄盆地古新统含盐系地球化学特征对比[J]. 盐湖研究, 19(3): 8-14.
- 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[J]. 地质通报, 25(11): 1239-1246.
- 郑绵平,向军,魏新俊,郑元. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京:北京科技出版社.
- 郑绵平,袁鹤然,张永生,刘喜方,陈文西,李金锁. 2010. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报, 84(11): 1523-1553.
- 郑绵平,张震,张永生,刘喜方,尹宏伟. 2012. 我国钾盐找矿规律新认识和进展[J]. 地球学报, 33(3): 280-294.
- 钟大赉, TAPPONNIER P, 吴海威, 张连生, 嵇少丞, 钟嘉猷, 刘小汉, SCHAERER U, LACASSIN R, LELOUP P. 1989. 大型走滑断层——碰撞后陆内变形的重要形式[J]. 科学通报, 34(7): 526-529.
- 钟大赉,季建清,胡世玲. 1999. 新特提斯洋俯冲时间: 变质洋壳残片 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 微区年龄[J]. 科学通报, 44(16): 1782-1785.
- 周仁安,周丹. 2011. 云南省江城县勐野钾盐矿区高精度电磁频谱探测成果报告[R]. 北京:北京达创高科科技有限公司.
- 朱夏. 1986. 朱夏论中国含油气盆地构造[M]. 北京:石油工业出版社.

References:

814 Geological Brigade of Geology and Mineral Resources Bureau

- of Yunnan Province. 1990. Salt conditions and the potassium possibility of Jurassic in Yunnan Province[R]. Kunming: 814 Geological Brigade of Geology and Mineral Resources Bureau of Yunnan Province(in Chinese).
- 814 Geological Brigade of Geology and Mineral Resources Bureau of Yunnan Province. 1994. The second round of potash mineralization prospect zoning of Yunnan Province[R]. Kunming: 814 Geological Brigade of Geology and Mineral Resources Bureau of Yunnan Province(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, ZHU Yu-sheng, XU Zhi-gang, REN Ji-shun. 2007. Chinese mineralization system and as-sessment of regional mineralization(Volume One)[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CONG Bo-lin, WU Gen-yao, ZHANG Qi, ZHANG Ru-yuan, ZHAI Ming-guo, ZHAO Da-sheng, ZHANG Wen-hua. 1993. Tectonic evolution of tectonic belt rocks of Paleotethys in West Yunan, China[J]. Science in China(Series B), 23(11): 1201-1207(in Chinese).
- DENG Er-xin. 1982. Characteristics, conditions of formation and prospecting of the potash deposits and salt dissolved rocks in Jiangcheng-Mengla areas, Yunan Province[J]. Geochimica, (2): 143-154(in Chinese with English abstract).
- DUAN Jian-zhong, XUE Shun-rong, QIAN Xiang-gui. 2001. The Cenozoic geological tectonic framework and evolution in the Three-river area of West Yunnan[J]. Yunnan Geology, 20(3): 243-252(in Chinese with English abstract).
- FAN Cheng-jun, ZHANG Yi-fei. 1993. On the structural pattern of Western Yunnan[J]. Yunnan Geology, 12(2): 139-147(in Chinese with English abstract).
- Geological and Mineral Resources Bureau of Yunnan Province, Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu College of Geology. 1986. Geology of the Saline Deposits in Simao District, Yunnan[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Geological Scientific Research Team of Potash. 1980. Collection of the potash geological research of Simao area in Yunnan[C]. Kunming: Geological Bureau of Yunnan Province(in Chinese).
- Geological Survey of Yunnan Province. 1976. Regional Geological Survey Report: Pu'er Sheet-F47-VII(Geology)[R]. Kunming: Geological Survey of Yunnan Province(in Chinese).
- HE Ke-zhao, ZHAO Chong-he, HE Hao-sheng, SHUAI Kai-ye. 1996. Intracontinental rift and orogeny in Western Yunnan[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese with English abstract).
- HITE R J. 1979. Potash deposits of the Korat plateau, Thailand and Laos[J]. Economic Geology, 74(2): 48-458.
- HOU Zeng-qian, ZAW K, PAN Gui-tang, MO Xuan-xue, XU Qiang, HU Yun-zhong, LI Xing-zhen. 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in S.W. China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types[J]. Ore Geology Reviews, 31(1-4): 48-87.
- JIANG Zhi-wen, OUYANG Lin. 1980. Division and Correlation of Salt-bearing Strata in Upper Cretaceous-Lower Tertiary in Lanping-Simao Area[R]. Kunming: Yunnan Geological Bureau(in Chinese).
- LI Wen-yao, LIAO Zhong. 2011. Geophysical investigation report of the low-frequency magnetotelluric method of Mengyejing potash deposit in Jiangcheng County of Pu'er City, Yunnan Province[R]. Kunming: Kunming Xindi Geological Exploration Co., Ltd(in Chinese).
- METCALFE I. 1997. The Paleo-Tethys and Paleozoic-Mesozoic tectonic evolution of Southeast Asia[C]/Dheeradilok P. Hinthong C. Chaodumrong P. et al. Eds. Proceedings of the International Conference on Stratigraphy and Tectonic Evolution of Southeast Asia and the South Pacific.Bangkok, Thailand, 260-272.
- No. 16 Geological Brigade of Yunnan Province. 1980. Detailed Exploration Geological Reports of Mengyejing Potash Deposit of Jiangcheng County, Yunnan Province[R]. Kunming: No. 16 Geological Brigade of Yunnan Province(in Chinese).
- PAN Gui-tang, CHEN Zhi-liang, LI Xing-zhen, YAN Yang-ji, XU Xiao-song. 1997. Eastern Tethyan tectonic evolution[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- QU Yi-hua, YUAN Pin-quan, SHUAI Kai-ye, ZHANG Ying, CAI Ke-qin, JIA Shu-yuan, CHEN Chao-de. 1998. Potash-forming rules and prospect of Lower Tertiary in Lanping-Simao basin, Yunnan[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- QU Yi-hua. 1982. Deep Brines—A New Origin of Potash Deposits[J]. Rocks and Minerals, (1): 7-14(in Chinese with English abstract).
- QU Yi-hua. 1997. On affinity of potassium bearing brine in Lanping-Simao basin, China to that in Ale basin, Thailand, and location of target areas for potassium hunting in former basin[J]. Geology of Chemical Minerals, 19(2): 81-98(in Chinese with English abstract).
- SENGÖR A M C. 1989. Tectonic Evolution of the Tethyan Region[C]. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers: 1-22.
- SHUAI Kai-ye. 1987. Geologic-tectonic evolution and evaporate formation of Mesozoic-Cenozoic era in Yunnan[J]. Geoscience, 1(2): 207-229(in Chinese with English abstract).
- TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, ARMIJO R. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 10(12): 61-616.
- UTHA-AROON C. 1993. Continental origin of the Maha Sarakham evaporates, northeastern Thailand[J]. Journal of Southeast Asia Earth Sciences, 8(1-4): 193-203.
- WANG H Z. 2005. An outline of the tectonic evolution of China[C] //Selected Works of Wang Hongzhen. Beijing: Science Press: 394-406.
- WU Tian-zhu. 1981. Geneses of Mengyejing potash deposit in Yunnan[J]. Chemical Geology, 1: 1-8(in Chinese).

- XIA Wen-jie, LI Xiu-hua. 1983. About the theoretic original study of evaporates-from the potash-halite deposit in Mengyejing, Yunnan[J]. Rocks and Minerals, (3): 1-11(in Chinese with English abstract).
- XIAO Rong-ge, CHEN Hui-quan, YUAN Jian-qi. 1993. Cenozoic geology and mineral resources of Yunnan[M]. Beijing: Maritime Press(in Chinese).
- XIAO Zhang-cheng, HUANG He-wang. 2009. Mineralization material sources of solid potash deposits in Simao basin, Yunnan Province[J]. Chinese Western Science and Technology, 8(23): 9-11(in Chinese).
- XU Xiao-song, WU Jia-ling. 1983. Potash Deposits in Mengyejing, Yunnan-A Study of Certain Characteristics, Geochemistry of Trace Elements and Genesis of the Deposits[J]. Journal of Chinese Geological Academy of Sciences, 5(1): 17-36(in Chinese with English abstract).
- XUE Ji-chun, CHEN Yu-chuan, YANG Jian-min, WANG Deng-hong, YANG Wei-guang, YANG Qing-biao. 2002. Analysis of Ore-forming Background and Tectonic System of Lanping Basin, Western Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 21(1): 36-44(in Chinese with English abstract).
- YAN Yang-ji, YUAN Jing-lang, KANG Cheng-lin, WANG Ze-wen, WANG Guang-xin. 1981. Some Factors Governing the Precipitation of Potash Salts in Mengyejing Formation, Simao sag, Yunnan[J]. Journal of Chinese Geological Academy(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources Division), 2(1): 29-47(in Chinese with English abstract).
- YANG Li-qiang, DENG Jun, ZHAO Kai, LIU Jiang-tao. 2011. Tectono-thermochronology and gold mineralization events of orogenic gold deposits in Ailaoshan orogenic belt, Southwest China: Geochronological constraints[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(9): 2519-2532(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, CONG Bo-lin, QIAO Guang-sheng, ZHANG Ru-yuan. 1990. Sm-Nd and Rb-Sr geochronology of metamorphic rocks from SW Yunnan orogenic zones, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 11(4): 1-11(in Chinese with English abstract).
- ZHAN Xing-li, ZHANG Yun-zhen. 1981. Inclusions characteristics and potash deposit genesis of Mengyejing potash deposit in Yunnan[J]. Journal of Chengdu College of Geology, (2): 103-110(in Chinese).
- ZHANG Cong-wei, GAO Dong-lin, MA Hai-zhou, HAN Wen-xia. 2010. A Tentative Discussion on Material Source of Potash Deposit in Lanping-Simao Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 18(4): 12-18(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Cong-wei, GAO Dong-lin, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, SHI Lin. 2011. Comparasion of Geochemistry Characteristics in Palaeocene Salt-bearing Strata of Lanping-Simao Basin and Chuxiong basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 19(3): 8-14(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, QI Wen, ZHANG Yong-sheng. 2006. Present situation of potash resources and direction of potash search in China[J]. Geological Bulletin of China, 25(11): 1239-1246(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, XIANG Jun, WEI Xin-jun, ZHENG Yuan. 1989. Saline Lakes of Tibetan Plateau[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press(in Chinese).
- ZHENG Mian-ping, YUAN He-ran, ZHANG Yong-sheng, LIU Xi-fang, CHEN Wen-xi, LI Jin-suo. 2010. Regional Distribution and Prospects of Potash in China[J]. Acta Geologica Sinica, 84(11): 1523-1553(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, ZHANG Zhen, ZHANG Yong-sheng, LIU Xi-fang, YIN Hong-wei. 2012. Potash Exploration Characteristics in China: New Understanding and Research Progress[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(3): 280-294(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Da-lai, JI Jian-qing, HU Shi-ling. 1999. Neo-Tethys subduction time: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ micro age of the metamorphic oceanic crust[J]. Chinese Science Bulletin, 44(16): 1782-1785(in Chinese).
- ZHONG Da-lai, TAPPONNIER P, WU Hai-wei, ZHANG Lian-sheng, JI Shao-cheng, ZHONG Jia-you, LIU Xiao-han, SCHAEERER U, LACASSIN R, LELOUP P. 1989. Large-scale strike-slip faults-the major structure of intracontinental deformation after collision[J]. Chinese Science Bulletin, 34(7): 526-529(in Chinese).
- ZHOU Ren-an, ZHOU Dan. 2011. Achievement report of high-precision method to detect the electromagnetic spectrum in Mengyejing potash deposit, Jiangcheng County, Yunnan Province[R]. Beijing: Beijing Dachuanggaoke Technology Co., Ltd(in Chinese).
- ZHU Xia. 1986. Discussion of the structure of petroliferous basins in China by Zhuxia[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).