

滇西兰坪古近系盆地硼元素法定量恢复 古盐度及其意义

刘 腾, 朱志军

(东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013)

摘 要:通过对兰坪盆地古近纪野外剖面中含盐泥岩—泥质粉砂岩—粉砂岩微量和常量元素的测定, 利用 Adams 和 Couch 古盐度计算公式、Walker“相当硼”判别法及锶钡比值法定量—半定量地分析了该区古盐度特征。结果表明, 古盐度在 6.5‰~22.05‰之间, 盐度变化明显, 以半咸水沉积为主, 其次为淡水沉积。沉积中心主要位于云龙县—兰坪县一带, 古盐度值最高, 平面上表现为从沉积中心向盆地周缘盐度逐渐降低, 并与其所伴生的沉积环境表现出良好的对应关系。结合盆地沉积相、古环境及古地理特征, 综合分析认为云龙县—兰坪县一带含盐系地层具有优越的钾盐成矿前景。

关键词:兰坪盆地; 钾盐; 古盐度; 硼元素法

中图分类号: P343.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2016)03-0008-09

引 言

钾盐是我国紧缺的重要战略资源之一, 主要用于生产钾肥, 而钾肥是农业 3 大肥料之一, 直接关乎国家粮食的生产安全, 对经济发展具有非常重要的意义。作为一个拥有 13 亿人口的农业大国, 我国是世界第一大钾肥消费国和第二大进口国, 对外依存度高达 75%^[1-7]。因此, 大力开展钾盐矿床的寻找工作仍是地质学家面临的一大课题。

我国钾盐资源探明储量仅占世界的 2.2%, 且 98% 为盐湖卤水钾盐矿床^[1,7-10], 主要分布在青海柴达木盆地和新疆罗布泊的 11 个现代盐湖中, 而高品位的可溶性固体钾盐稀缺, 仅在云南江城勐野井探明储量 $1\ 199 \times 10^4\ \text{t}$ ^[1,6,9-10]。前人对羌北—滇西盐类成矿带^[2]南部的兰坪—思茅盆地含盐带进行了大量的研究工作。颜仰基等从地层中陆生化石角度分析, 认为勐野井组为干旱气候的内陆成盐

环境, 盆地中盐类矿床为陆相干湖成钾作用形成, 且成盐物质具有多源性。许效松等通过盐类矿物中 Br、B、Sr 等微量元素特征的研究, 认为兰坪、思茅地区一系列盐矿的原始溶液具有同类型分异特点, 并且物质来源有共同性。李朝阳等认为勐野井钾盐矿床具有陆相热水沉积特征。张从伟等认为盆地钾盐矿床成矿物源具有多源性, 以残存古海水为主, 兼有陆源水体的补给。岳维好等认为该区成盐与盐湖的蒸发沉积直接相关, 成矿具明显的蒸发沉积韵律, 钾盐矿层的产出受地层、岩相、构造等因素的控制, 将勐野井式钾盐矿厘定为新生代(湖相)沉积型钾盐矿, 并圈定了兰坪—云龙等 3 个预测区。利用沉积物中的硼定量恢复古盐度, 亦有很多人做过研究和应用^[11-21]。本文尝试在前人工作的基础上, 通过硼元素法恢复古盐度, 结合盆地沉积相、古环境特征以及古地理恢复, 以期从含盐系地层的地球化学特征来探索研究区是否具有找钾远景。

收稿日期: 2015-06-17; 修回日期: 2015-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41362008, U0933605)和江西省教育厅科技项目(GJJ14475)联合资助

作者简介: 刘 腾(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积学。Email: 1194734309@qq.com。

1 地质背景

1.1 兰坪盆地的形成与演化

兰坪盆地地处欧亚板块、印度板块和特提斯三大构造域的交汇部位,是著名的“三江”构造带的重要组成部分。盆地东邻金沙江—哀牢山深大断裂,西接澜沧江深大断裂,北起维西,南达景东(图1)。兰坪盆地主体为一中新世代大陆边缘裂谷盆地,与北部昌都盆地、南部思茅以及老挝、泰国万象、呵叻盆地共同组成了一个

规模巨大的裂谷盆地系^[19-23]。兰坪盆地是中三叠世发展起来的一个陆内多旋回盆地,伴随中特提斯洋开启,兰坪中生代盆地原型开始形成,并开始演化^[24],并经历了陆内裂谷盆地(T_3-J_1)—拗陷盆地(J_2-K_1)—前陆盆地(K)—走滑盆地(E)的复杂演化过程^[25]。演化过程中以地壳上升、海水后退、沉积范围缩小为总的趋势,其间因海水的反复进退,产生了多个成盐时期,并造成一些地层的缺失;同时原有含盐盆地在深部断裂的控制和造山运动的影响下遭受很大的改造和破坏^[23]。

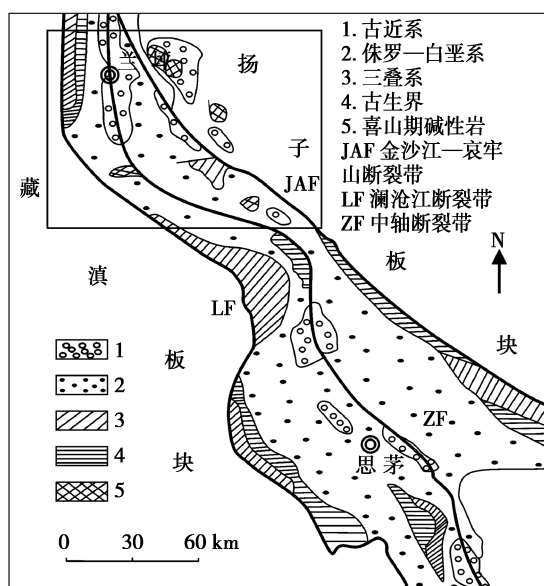


图1 兰坪中新世代盆地地质与构造略图

Fig. 1 Sketch geological and tectonic map of Lanping Mesozoic-Cenozoic basin

1.2 盆地地层及主要含盐层

兰坪中新世代陆相沉积盆地地层主要包括中上三叠系、侏罗系、白垩系、古近系和新近系,受喜山运动的影响,有些层系有不同程度的缺失^[19,23]。古近系地层在盆地内分布广泛,主要出露于云龙县西泚江沿岸,以及兰坪县的拉井镇、河西乡等地,主要地层有云龙组、果郎组、宝相寺组(图2),其岩性特征简述如下。

云龙组(E_1y) 集中分布于兰坪—检槽及金顶—白洋场一带。为一套含盐河湖相红色砂泥质沉积,下段底部为泥质胶结的杂色泥砾岩、

含石膏泥砾岩。中部为钙质泥岩、粉砂岩夹薄层细砂岩。顶部为灰绿色、杂色粉砂质泥岩及含石膏化泥晶灰岩。云龙组与下伏上白垩统虎头寺组或南新组呈假整合接触。云龙组是本区最重要的含盐层位,其下部泥砾岩段具有较好的找钾前景^[19]。

果郎组(E_2g) 集中分布在兰坪及云龙境内。主要为一套紫红色粉砂岩、泥岩与砂岩互层沉积,整合于云龙组之上。

宝相寺组(E_2b) 仅分布于兰坪县拉井镇附近。主要为杂色块状砾岩、含砾石英粗砂岩,向上变为灰白色厚层中粒石英砂岩,顶部为浅

黄色中薄层钙质细砂岩夹泥质粉砂岩。宝相寺组下部主要为滨湖—浅湖相沉积,中上部主要呈不整合接触。

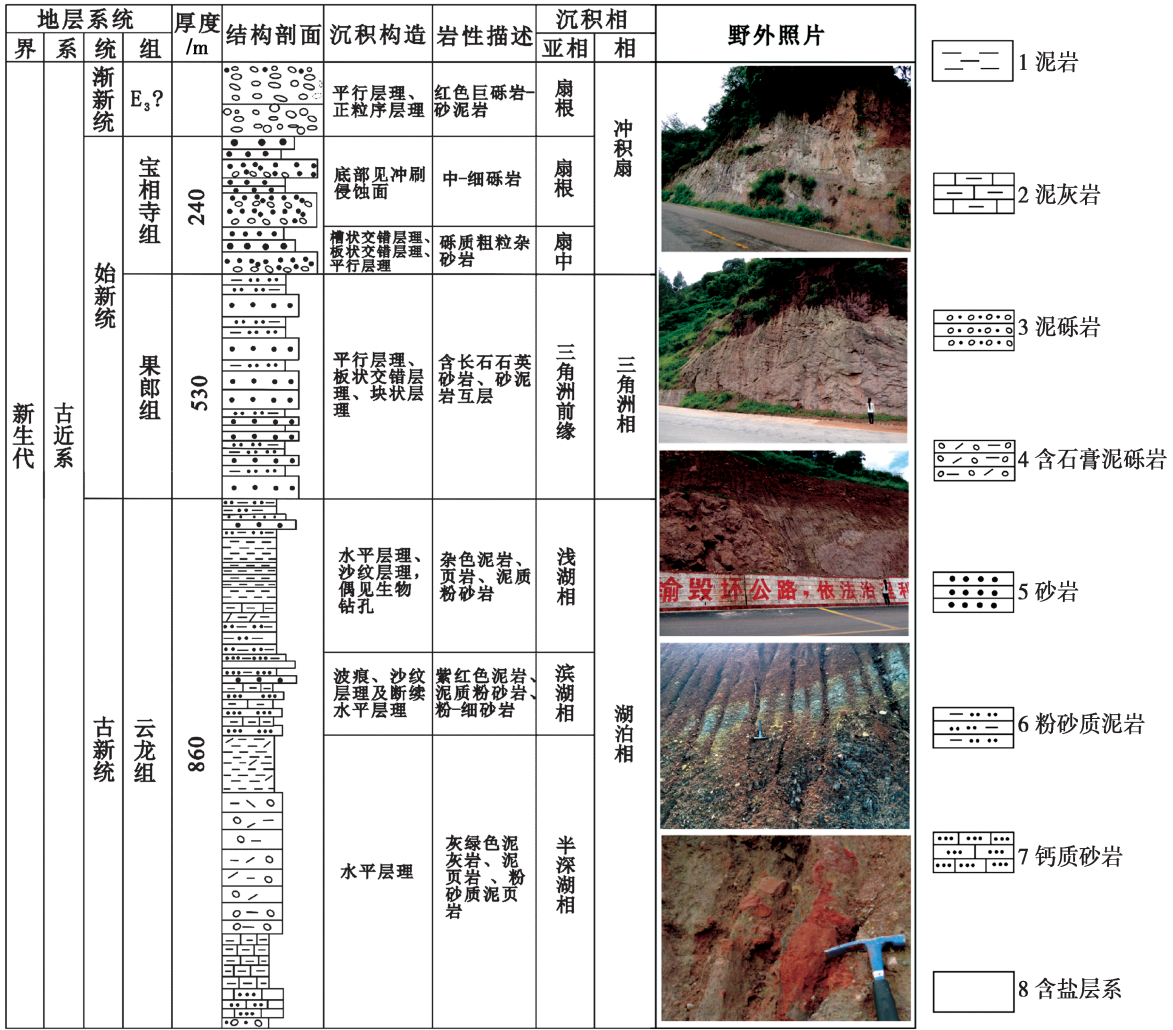


图 2 兰坪盆地古新统地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive columnar section of Paleogene strata in Lanping

2 古盐度定量分析

2.1 样品采集与测试

兰坪盆地古近纪地层自下而上可分为古新统云龙组、中一下始新统果郎组、上始新统宝相寺组和渐新统。本次调查发现盐矿点遍布整个兰坪盆地(图 3),但主要样品集中在云龙县与兰坪县,共采取样品 54 块;精选 18 块未受风化影响的云龙组含盐泥岩—泥质粉砂岩—粉砂岩样品进行粘土矿物分离,经 X 射线分析得知粘

土矿物以伊利石为主,再结合样品的常量元素和微量元素特征,进行古盐度的计算。

通过对样品的 B、Ba、Sr 等微量元素及 K₂O 含量进行测试,利用 Walker 和 Adamas 经验公式计算古盐度^[14-18]。样品测试由北京地质研究院测试研究中心完成。微量元素及硼元素依据 DZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则,测试仪器为 HR-ICP-MS(Element I);测试环境的温度为 20℃,湿度为 30%。常量元素依据 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法中 X 射线荧光光谱法测定主、次元素含量,测试仪器飞利浦 PW2404

型 X 射线荧光光谱仪。

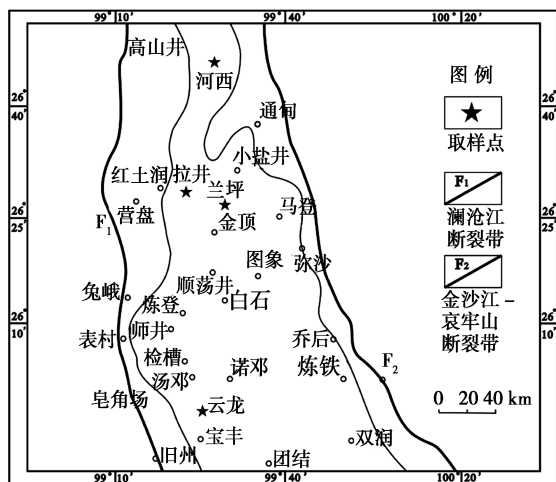


图3 采样平面位置图

Fig. 3 Sampling sites

2.2 古盐度计算

盐度是指介质中所有可溶盐的质量分数,是区别海相和陆相环境的主要标志;而古盐度是指保存于沉积物之中的盐度,作为一项重要的地球化学指标,在诸多方面得到了应用。古盐度的定量计算方法有很多种,主要有微量元素法、同位素法等^[14-17]。同位素法主要用于判断淡水与海水环境,多用于海相碳酸盐岩研究中;而对古盐度进行定量计算,目前主要采用微量元素法^[26-27],且以硼元素法应用最为广泛。

1) 硼元素法 在微量元素中,硼元素对于盐度的反应比较敏感,并且硼元素在各种地球化学分析方法中是比较容易确定的一种元素。大量研究表明,粘土中硼元素的含量可以指示其形成时水介质的古盐度值,因此硼元素常被作为反映盐度的一个较好的指标来使用^[15-17]。

自然界水体中硼的浓度是盐度的线性函数。已有实验证明,粘土矿物中提取出的硼含量与溶液中硼的浓度有关^[18-26],粘土矿物从水体中吸收的硼含量与水体的盐度可表示为双对数关系式,即所谓的佛伦德奇吸收方程,

$$\lg B = C_1 \lg S + C_2。$$

式中, B 为吸收硼含量 (10^{-6}); S 为盐度 (‰); C_1 和 C_2 是常数。此方程式即为利用硼和粘土矿物定量计算古盐度的理论基础。

常用的古盐度计算公式还有 Adamas 公式和 Couch 公式。Adamas 公式是亚当斯结合现代河口沉积的地球化学资料和佛伦德奇方程总结出的经验公式,

$$S_p = 0.0977X - 7.043。$$

式中, S_p 为古盐度 (‰); X 为“相当硼”含量 (单位 ‰ , 计算古盐度时需换算成 $\mu\text{g/g}$)。

Couch (科奇) 公式,

$$S_p = 10^{(\lg B^* - 0.11)/1.28}。$$

式中, S_p 为古盐度 (‰); B^* 为“校正硼”含量 (计算古盐度时单位需换算成 $\mu\text{g/g}$)。

由于溶液中的硼一旦被粘土矿物吸收固定,无论其呈吸附状态存在或是进入粘土矿物晶格,都不会因后期物理和化学条件变化而迁移,因而现代沉积和古代岩石记录中样品硼含量的分析结果可作为其最初沉积时的水体盐度标志^[18]。兰坪盆地样品粘土矿物较单一,主要为伊利石^[28-29],因此可以直接运用 Adamas 公式进行古盐度的计算^[14-17]。

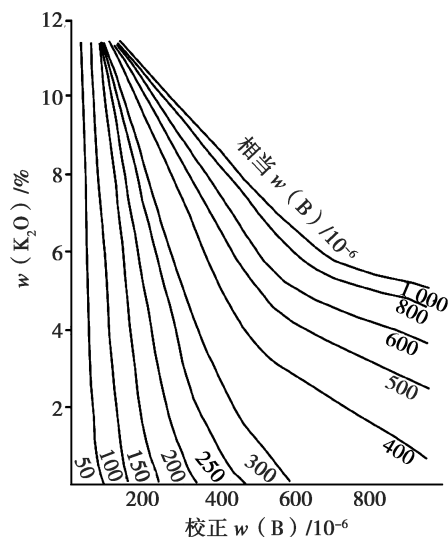


图4 Walker“相当硼”换算曲线

Fig. 4 Conversion curve of Walker equivalent boron

研究表明,伊利石中硼含量与钾含量有关。为了在同等条件下对比,需计算相当于 K_2O 含量为 5% 时硼含量,即“相当硼含量”。为此, Walker 等^[30]根据硼和钾含量做出一系列换算曲线 (图 4), 根据泥岩的 K_2O 含量 (‰) 和校正硼含量,即可在该曲线上查得“相当硼含量”。

依据 Walker 校正公式,

$$“B”=8.5\times B_{\text{样品}}/K_2O_{\text{样品}}。$$

式中,“B”为校正硼含量;8.5 为纯伊利石中理论 K₂O 浓度;*B*_{样品}和 K₂O_{样品}指样品的实测结果。将计算得到的“相当硼含量”代入 Ad-amas 公式可得到古盐度值(表 1)。计算结果表明,云龙县内古盐度平均 13.25‰;兰坪县内古盐度平均 12.70‰。

利用“相当硼含量”亦可划分沉积物的咸水、半咸水、淡水相,Walker 等认为“相当硼含量”在 300×10⁻⁶~400×10⁻⁶之间为海相沉积;200×10⁻⁶~300×10⁻⁶间为半咸水相沉积;<200×10⁻⁶为淡水相沉积。可以看出,在云龙县和兰坪县以半咸水沉积为主,只有在兰坪县城地区以淡水沉积为主。

表 1 兰坪盆地样品“相当硼”质量分数和古盐度计算数据
Table 1 The “equivalent boron” content and paleosalinity of sample in Lanping Basin

样品 编号	采样 位置	硼含量 <i>w</i> (B)/10 ⁻⁶	K ₂ O 含量 /%	校正硼含量 <i>w</i> (“B”)/10 ⁻⁶	相当硼含量 <i>w</i> (X)/10 ⁻⁶	古盐度值 /‰	古盐度 环境
L-115-1	检槽	62.1	2.92	180.77	151.24	7.73	淡水
L-140-1		93.4	3.09	256.93	248.39	17.22	半咸水
L-144-3(1)		67.2	2.84	201.13	176.83	10.23	淡水
L-146-1		40.1	1.22	279.39	236.83	16.10	半咸水
L-148-1		43.6	1.66	223.25	200.36	12.53	半咸水
L-152-1		65.6	2.14	260.56	232.77	15.70	半咸水
L-96-0	云龙	134	3.24	351.54	297.81	22.05	半咸水
L-96-3		52.4	1.51	294.97	221.08	14.56	半咸水
L-101-1		79.4	2.18	309.59	235.62	15.98	半咸水
L-107-4		28	1.47	161.90	144.71	7.10	淡水
L-109-2		14.4	2.64	46.36	45.55	2.60	淡水
P2-19-1		119	3.13	323.16	285.54	20.85	半咸水
P2-35-1	河西	24.9	0.97	218.20	216.14	14.08	半咸水
P2-41-2		145	4.29	287.30	231.81	15.60	半咸水
P4-0-3		83.7	3.22	220.95	197.88	12.29	淡水
P4-0-7	兰坪	79.2	2.39	281.67	250.45	17.43	半咸水
P4-1-1		66.6	3.31	171.03	138.66	6.50	淡水
P4-8-2		67	3.69	154.34	159.51	8.54	淡水

样品中 B 元素含量及常量元素 K₂O 均由北京地质研究院测试研究中心分析,含量均为质量分数

2) 锶钡法(Sr/Ba) 锶钡法是常用的恢复古盐度的方法之一。锶和钡的化学性质较相似,但锶的迁移能力比钡的迁移能力强;在水介质酸性较强的淡水湖泊中,矿化度很低,锶和钡都以碳酸盐的形式保留在湖水中;当湖水不断咸化和矿化度逐渐增高时,钡首先以硫酸钡形式沉淀出现,湖水或海水继续浓缩到一定程度

后才能产生硫酸锶的沉淀,因此锶钡比值(Sr/Ba)可以作为古盐度的标志。一般来讲,淡水沉积物中 Sr/Ba 值小于 1,而海相沉积物中 Sr/Ba 值大于 1,Sr/Ba 值为 1.0~0.6 为半咸水相^[31-34]。计算结果显示,研究区 Sr/Ba 比值介于 0.08~0.94 之间(表 2),主要为淡水沉积物,而无海相沉积。

表2 兰坪盆地锶、钡含量

Table 2 The content of strontium and barium in Lanping Basin

样品编号	锶含量 $/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	钡含量 $/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$	样品编号	锶含量 $/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	钡含量 $/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$w(\text{Sr})$ $/w(\text{Ba})$
L-115-1	122	332	0.37	L-107-4	94.5	1145	0.08
L-140-1	130	277	0.47	L-109-2	87.7	382	0.23
L-144-3(1)	116	209	0.56	P2-19-1	70.6	224	0.32
L-146-1	98.4	270	0.36	P2-35-1	122	152	0.80
L-148-1	176	188	0.94	P2-41-2	58.9	429	0.14
L-152-1	116	294	0.39	P4-0-3	93.6	409	0.23
L-96-0	259	281	0.92	P4-0-7	241	311	0.77
L-96-3	129	155	0.83	P4-1-1	108	425	0.25
L-101-1	149	320	0.46	P4-8-2	108	400	0.27

样品中 Sr、Ba 含量均由北京地质研究院测试研究中心分析

3) 古盐度总体特征 Walker“相当硼”、Adamas 古盐度、Sr/Ba 质量比等几项古盐度指标之间存在差异。以 Adamas 古盐度与 Walker“相当硼”之间的相关性最好,因而可作为本次环境分析的主要依据。同时参考 Sr/Ba 质量比参数,发现研究区古盐度介于 2.60‰ ~

22.05‰, 涵盖淡水—半咸水等类型, 但以 10‰~30‰ 的半咸水居多。综合分析表明, 随着盐度的增大, 微量元素硼、“相当硼含量”逐渐增大, Sr/Ba 的比值也逐渐增加, 表现出线性正相关关系。由此表明, 兰坪盆地云龙—兰坪一带以半咸水沉积为主, 间有淡水侵入。

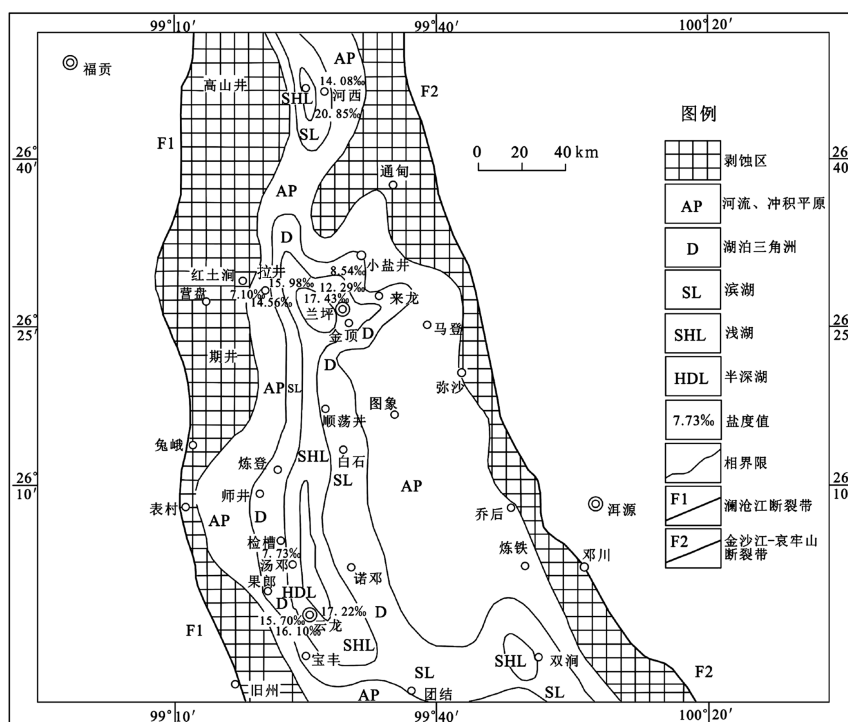


图5 兰坪盆地古近系盐度分布图

Fig. 5 Salinity distribution map of Paleogene in Lanping Basin

3 古盐度特征及其指示意义

3.1 古盐度特征与沉积环境

钾盐矿床的形成与沉积环境关系密切,钾盐沉积通常发育于蒸发岩盆地演化的最终阶段。在没有外界水供给的情况下,钾盐沉积常位于盆地的中心并呈“牛眼式”出现;若有外界水供给,钾盐沉积则常位于盆地的中心一侧呈“泪滴式”出现^[35]。因而,研究并恢复兰坪盆地钾盐主要析出时期——古新世的沉积环境就显得至关重要。在前人研究的基础上,结合区域构造背景和沉积相剖面特征(图 2),绘制了兰坪盆地古近纪古盐度分布图(图 5)。可以看出,燕山运动晚期,剧烈的抬升作用在滇西兰坪地区表现为,古新统云龙组不整合覆盖在下白垩统虎头寺组之上,盆地面积进一步缩小,形成彼此独立的中、小型陆相盆地。受干旱、炎热气候影响,兰坪盆地表现为盐湖沉积;盆地周缘及东部大部分地区发育冲积平原—滨浅湖相沉积;在盆地西部的师井、检槽一带发育浅湖—半深湖相沉积^[36]。结合古盐度计算结果可知,云龙县古盐度平均值为 14.36‰,主要为浅湖相沉积,河西乡剖面古盐度平均值为 16.84‰,为滨湖相沉积;兰坪县与拉井镇样品古盐度值近似,分别为 11.19‰和 11.42‰,为浅湖相沉积。根据越靠近湖泊中心盐度越高的特点,古盐度值的变化趋势也反映出沉降中心主要分布在兰坪县和云龙县。

研究表明,兰坪盆地古近纪湖泊水体为淡—半咸水,结合古代及现代气候等资料,古近纪云龙组以干旱气候为主,在前期构造和海水的作用下,盆地内形成大量的石膏、石盐和盐泉;盆地中盐层和碎屑岩互层,红色岩层和灰绿色盐层交替,表明在干旱的成盐期存在湿润的气候间断^[19];整个古近纪干湿交替的气候变化有利于盆地中钾的富集。

3.2 指示意义

兰坪—思茅盆地是我国具有大型钾盐成矿

条件和找矿前景的重点地区之一。产于新生代勐野井组棕红色、杂色盐溶泥砾岩建造中的勐野井钾盐矿床是目前我国发现的唯一古代固体钾盐矿床,成矿具有明显的蒸发沉积韵律,钾盐的产出受地层、岩相、构造等因素的控制,是新生代(湖相)沉积型钾盐矿的典型矿床^[21,37-41]。兰坪—云龙县的成矿条件与之相似,可作为钾盐矿床的预测工作区^[19,21]。

蒸发岩矿物中的常量元素(K, Mg)、微量元素(Br, B, Sr, Li, Rb)同位素($\delta^{11}\text{B}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{37}\text{Cl}$)的地球化学行为常常应用于钾盐矿床的实际研究中,这些元素和同位素地球化学特征具有很好的指示成盐卤水演化和钾盐沉积演化的作用^[42]。

前人对于该区微量元素的研究主要集中在微量元素的含量和同位素地球化学两个方面。前者主要用来研究成盐卤水的蒸发浓缩程度和成盐阶段,后者则主要用来指示物质来源。在成矿物质来源方面,前人进行了大量研究工作,指出钾盐的物质来源具有多源性和复杂性^[20,22,37-43],在此不赘述。本文通过 B、Sr 等微量元素特征与勐野井钾盐矿床进行对比研究,进行了兰坪盆地钾盐矿床的预测工作。

现代海水中 B 含量为 4.7×10^{-6} ,淡水中则一般不含 B,海相沉积物中 B 含量 100×10^{-6} 。勐野井钾盐矿床中盐岩的 B 含量最高值为 80.4×10^{-6} ,最低值为 0.3×10^{-6} ,平均值为 23.0×10^{-6} ^[44];兰坪盆地 B 含量最高值为 134×10^{-6} ,最低值为 28×10^{-6} ,平均值为 71.08×10^{-6} ,与海相沉积物的 B 含量较接近。

Sr 在海水中的浓度为 8×10^{-6} 。Sr 的含量与矿石的类型有关,钾盐中含量最低,其次为石盐、泥砾质石盐;在混杂沉积的钾盐和泥砾岩中, Sr 含量较高,在石膏中含量最高。勐野井钾盐矿床中盐岩的 Sr 含量最高值为 94×10^{-6} ,最低值为 8×10^{-6} ,平均值为 41×10^{-6} ^[45];兰坪盆地 Sr 含量最高值为 230×10^{-6} ,最低值为 94.5×10^{-6} ,平均值为 143.35×10^{-6} 。

综合古盐度、地球化学特征与古地理的关系,兰坪—云龙地区位于古近系陆相湖泊沉积的中心位置,与典型新生代(湖相)沉积型钾盐矿—勐野井钾盐矿床具有相似的成矿地质背

景、找矿条件及矿化特征等,有较强的可比性,综合分析认为该区具有良好的固体钾盐找矿前景。

4 结 论

对兰坪盆地云龙、兰坪地区古近纪含盐泥岩—泥质粉砂岩—粉砂岩进行了古盐度测试及分析,结果表明古盐度在 2.6‰ ~ 22.05‰ 之间,变化范围较大,大部分样品属半咸水沉积,其次为淡水沉积。沉积中心主要分布在云龙—兰坪一带,古盐度值最高,平面上表现为从沉积中心向盆地周缘盐度逐渐降低,并与其所伴生的沉积环境表现出良好的对应关系。

兰坪—思茅盆地是受深断裂控制、构造封闭条件良好的大型凹陷盆地,在古近系古新统持续干旱气候条件下,形成巨厚蒸发岩矿床。云龙—兰坪在大地构造背景、成矿年代、沉积特征及硼元素地球化学特征等方面与思茅勐野井钾盐矿床有较好的可比性和相似性,对比研究认为兰坪盆地云龙—兰坪地区具有优越的成矿条件。

参考文献:

- [1] 王春连,刘成林,王立成,等. 钾盐矿床成矿条件研究若干进展[J]. 地球科学进展,2013,28(9):976-987.
- [2] 郑绵平,张震,张永生,等. 我国钾盐找矿规律新认识和进展[J]. 地球学报,2012,33(3):280-294.
- [3] 马鸿文,苏双青,刘浩,等. 中国钾资源与钾盐工业可持续发展[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京);北京大学),2010,17(1):294-310.
- [4] 魏东岩. 试论钾盐矿床的成矿条件[J]. 化工矿产地质,1999,21(1):1-6.
- [5] 刘成林,焦鹏程,王弭力. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质,2010,29(4):581-592.
- [6] 徐文礼,杨更,李建兵,等. 塔里木盆地西部钾盐成矿条件分析[J]. 地质与勘探,2011,47(6):1099-1106.
- [7] 程怀德,马海州,谭红兵,等. 钾盐矿床中 Br 的地球化学特征及研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2008,27(4):399-408.
- [8] 朱洪发,刘翠章. 从世界大型钾盐矿床形成的控制条件评述我国几个重要含盐系找钾前景[J]. 矿物岩石,1985,5(3):51-59.
- [9] 郑大中,郑若锋. 钾盐矿床的物质来源和成矿机制[J]. 云南地质,2006,25(2):125-142.
- [10] 郑大中,郑若锋. 论钾盐矿床的物质来源和找矿指示[J]. 盐湖研究,2006,14(4):9-17.
- [11] 颜仰基,袁敬阁,康承林,等. 云南思茅勐野井组盐类矿床的成钾条件[J]. 中国地质科学院院报,1981,2(1):29-47.
- [12] 许效松,吴嘉陵. 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,1983,5:17-36.
- [13] 李朝阳,王京彬,肖荣阁,等. 滇西地区陆相热水沉积成矿作用[J]. 铀矿地质,1993,9(1):14-22.
- [14] 刘秀明,王世杰,孙承兴,等. 古盐度研究的一种重要工具:锶同位素[J]. 矿物学报,2000,20(1):91-96.
- [15] 李进龙,陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. 油气地质与采收率,2003,10(5):1-4.
- [16] 游海涛,程日辉,刘昌岭. 古盐度复原法综述[J]. 世界地质,2001,21(2):111-117.
- [17] 王敏芳,黄传炎,徐志诚,等. 综述沉积环境中古盐度的恢复[J]. 新疆石油天然气,2006,2(1):9-13.
- [18] 唐云凤,伊帆,吴驰华. 湖泊硼含量和盐度关系模拟实验研究[J]. 盐湖研究,2010,18(2):14-21.
- [19] 杨尖絮,尹宏伟,张震,等. 滇西兰坪—思茅盆地成钾地质条件分析[J]. 大地构造与成矿学,2013,37(4):633-640.
- [20] 张从伟,高东林,马海州,等. 兰坪—思茅盆地钾盐矿床的物质来源探讨[J]. 盐湖研究,2010,18(4):12-18.
- [21] 岳维好,高建国,李云灿,等. 云南省勐野井式钾盐矿床找矿模型及预测[J]. 地质与勘探,2011,47(5):809-822.
- [22] 韩元红,马海州,袁小龙,等. 兰坪—思茅盆地与呵叻高原钾盐矿床综合对比[J]. 盐湖研究,2011,19(3):1-7.
- [23] 曲懿华,袁品泉,帅开业,等. 兰坪—思茅盆地钾盐成矿规律及预测[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [24] 廖宗延,陈跃昆. 兰坪—思茅盆地原型的性质及演化[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005,33(11):1527-1531.
- [25] 尹汉辉,范蔚茗,林舸. 云南兰坪—思茅地洼盆地演化的深部因素及幔—壳复合成矿作用[J]. 大地构造与成矿学,1990,14(2):113-124.
- [26] 文华国,郑荣才,唐飞,等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J]. 矿物岩石,2008,28(1):114-120.
- [27] 王昌勇,郑荣才,刘哲,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长9油层组古盐度特征及其地质意义[J]. 沉积学报,2014,32(1):159-165.
- [28] 时林,高东林,张从伟,等. 兰坪—思茅盆地古新统粘土矿物研究与成盐环境探讨[J]. 盐湖研究,2011,19(4):8-14.
- [29] 曲懿华,袁品泉,帅开业,等. 兰坪思茅盆地钾盐成矿规律及预测[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [30] Walker C T, Price N B. Departure curves for computing paleosalinity from boron in illites and shales[J]. AAPG,

- 1963, 47(5): 833–841.
- [31] 姚远. 德令哈海硼元素法定量恢复古盐度及其古气候意义[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2005.
- [32] 许璟, 蒲仁海, 杨林, 等. 塔里木盆地石炭系泥岩沉积时的古盐度分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(3): 509–517.
- [33] 张健, 李晓海, 郑月娟, 等. 内蒙古扎鲁特地区上二叠统林西组古盐度分析[J]. 地质与资源, 2013, 22(6): 471–477.
- [34] 刘俊田, 梁浩, 侯全政, 等. 三塘湖盆地晚石炭世沉积环境中的古盐度恢复[J]. 新疆石油天然气, 2011, 7(1): 1–6.
- [35] 魏继生, 文华国, 李建兵, 等. 古盐度计算与古地理恢复在塔里木盆地钾盐勘探中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(2): 185–190.
- [36] 朱志军, 姜勇彪, 郭福生, 等. 兰坪盆地古近纪沉积相类型及沉积环境演化[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(3): 409–418.
- [37] 郑绵平, 张震, 尹宏伟, 等. 云南江城勐野井钾盐成矿新认识[J]. 地球学报, 2014, 35(1): 11–24.
- [38] 郑智杰, 尹宏伟, 张震, 等. 云南江城勐野井盐类矿床 Sr 同位素特征及成盐物质来源分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2012, 48(6): 719–727.
- [39] 袁秦, 秦占杰, 魏海成, 等. 云南江城勐野井组钾盐成矿时代及其古环境研究[J]. 地球学报, 2013, 34(5): 631–637.
- [40] 苗卫良, 马海州, 张西营, 等. 云南兰坪—思茅盆地江城勐野井钾盐矿床 SHK4 孔含盐系粘土矿物特征及其成钾环境指示意义[J]. 地球学报, 2013, 34(5): 537–546.
- [41] 高翔, 方勤方, 姚薇, 等. 云南兰坪—思茅盆地勐野井钾盐矿床物质组分对成因的指示[J]. 地球学报, 2013, 34(5): 529–536.
- [42] 时林, 高东林, 张从伟, 等. 地球化学研究方法在钾盐找矿中的应用[J]. 盐湖研究, 2012, 20(1): 57–63.
- [43] 肖章程, 黄和旺. 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, 2009, 8(23): 9–11.
- [44] 许建新. 云南勐野井钾盐矿床地球化学与成因研究[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2008.
- [45] 焦建. 思茅盆地侏罗纪区域成盐找钾研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.

Paleosalinity Quantitative Recovery by Boron Element Method and Its Significance for Paleogene Lanping Basin in the Western Yunnan

LIU Teng, ZHU Zhi-jun

(College of Geosciences, East China Institute of Technology, Nanchang, 330013, China)

Abstract: Though the analysis of major and trace elements of the Paleogene saline clay-argillaceous siltstone-siltstone samples collected from field outcrops in Lanping basin, palaeosalinity character of these regions was revealed by quantitative, semiquantitative method involving calculation using Adams and Couch palaeosalinity formula, equivalent boron determination suggested by Walker and strontium-barium ratio. The results indicate the palaeosalinity changes obviously, in the range of 6.5‰ ~ 22.05‰, and display that the majority of samples show semisaltwater sedimentary environment, while freshwater environment is secondary. The sedimentary center is mainly distributed in Yunlong and Lanping County with higher palaeosalinity values. In plane view, the paleosalinity values decrease as far away from the sedimentary center to the peripheral basin, and its associated sedimentary environment show good corresponding relation. According to the basin sedimentary facies, paleoenvironment and paleogeographic characteristics, the authors consider that the salt-bearing stratum of Yunlong-Lanping County has a superior potassium metallogenic prospect.

Key words: Lanping basin; Potassium; Palaeosalinity; Boron element method