

中国三叠纪钾盐沉积 ——以四川为例

黄建国

(西南石油地质局第二地质大队)

[内容提要] 中国三叠系蒸发岩分布于华南,面积超过 $100 \times 10^4 \text{km}^2$,发现硫酸钾盐及富钾卤水,钾盐矿物有杂卤石、无水钾镁矾、硫酸钾石及多钙钾石膏等,富钾卤水矿化度 $255 \sim 382 \text{g/l}$,含钾量 $4 \sim 49 \text{g/l}$ 。蒸发盆地的发展受控于古构造及古地理,经历了开放台地—局限台地—堰塞湖—盐湖的发展阶段。钾盐沉积后,经历多阶段的复杂演变。富钾卤水中的钾主要来自硫酸钾盐的深滤,其次来自蒸发浓缩卤水及火山灰吸附钾的释放。杂卤石与富钾卤水的钾同位素测年值分别为 $210 \sim 150 \text{Ma}$ 及 $264 \sim 150 \text{Ma}$,说明固液相钾盐同源。从地质背景及成矿环境预测,三叠系的钾盐类型只能是硫酸钾盐,主要目的层为 T_1j^{5-2} 及 T_2j^{4-2} ,主要成矿带为构造分异及钾异常明显的四川盆地东、西部,富钾卤水的储集取决于蒸发岩地层的含钾性、碳酸盐夹层的裂隙发育程度及构造控矿条件。找矿模型应是油气钾卤兼探。

关键词 三叠纪 蒸发岩 盐类沉积 钾盐矿产地质特征 钾卤演变 钾盐类型 找矿模型

1 绪言

1.1 问题的提出

钾肥是农经作物需要的化学养分之一。世界上人均钾肥消耗量为 4.5kg ,美国高达 25kg ,中国不到 0.5kg ,供需矛盾突出,氮磷钾肥不合比例,其主要问题是资源情况不明。过去的工作曾将三叠系选定为有钾盐前景的重要层位之一,并进行了预测研究,旨在寻找氯化物钾盐,但未能如愿。三叠系究竟能找到什么类型的钾盐,至今仍是人们关注的问题。

1.2 蒸发岩的分布

中国三叠系由碎屑岩、碳酸盐及蒸发岩组成。在昆仑—秦岭一线以南为海相沉积,以北为陆相沉积。在华南海相区,龙门山以西为地槽型沉积,以东为地台型沉积^[1],形成了四个蒸发沉积盆地,其分布面积超过 $100 \times 10^4 \text{km}^2$ (图1)。

1. 三江蒸发盆地(图1a) 中国最西部的三叠纪蒸发岩分布于西藏芒康及金沙江流域,石膏赋存于上三叠统波里拉组(T_3b)及甲丕拉组(T_3j)中,累积厚度 188m ,沿江分布的盐泉有钾异常显示。

2. 上扬子台地边缘蒸发盆地(图1b) 分布于台地西缘的盐源及康定一带,石膏、石盐赋存于中三叠统上部,盐源的盐构造中石盐钻厚超过 750m 。

3. 下扬子蒸发盆地(图1c) 以石膏、硬石膏为主,蒸发岩厚 $100 \sim 600 \text{m}$,分布于苏皖一带,赋存于中、下三叠统之间。

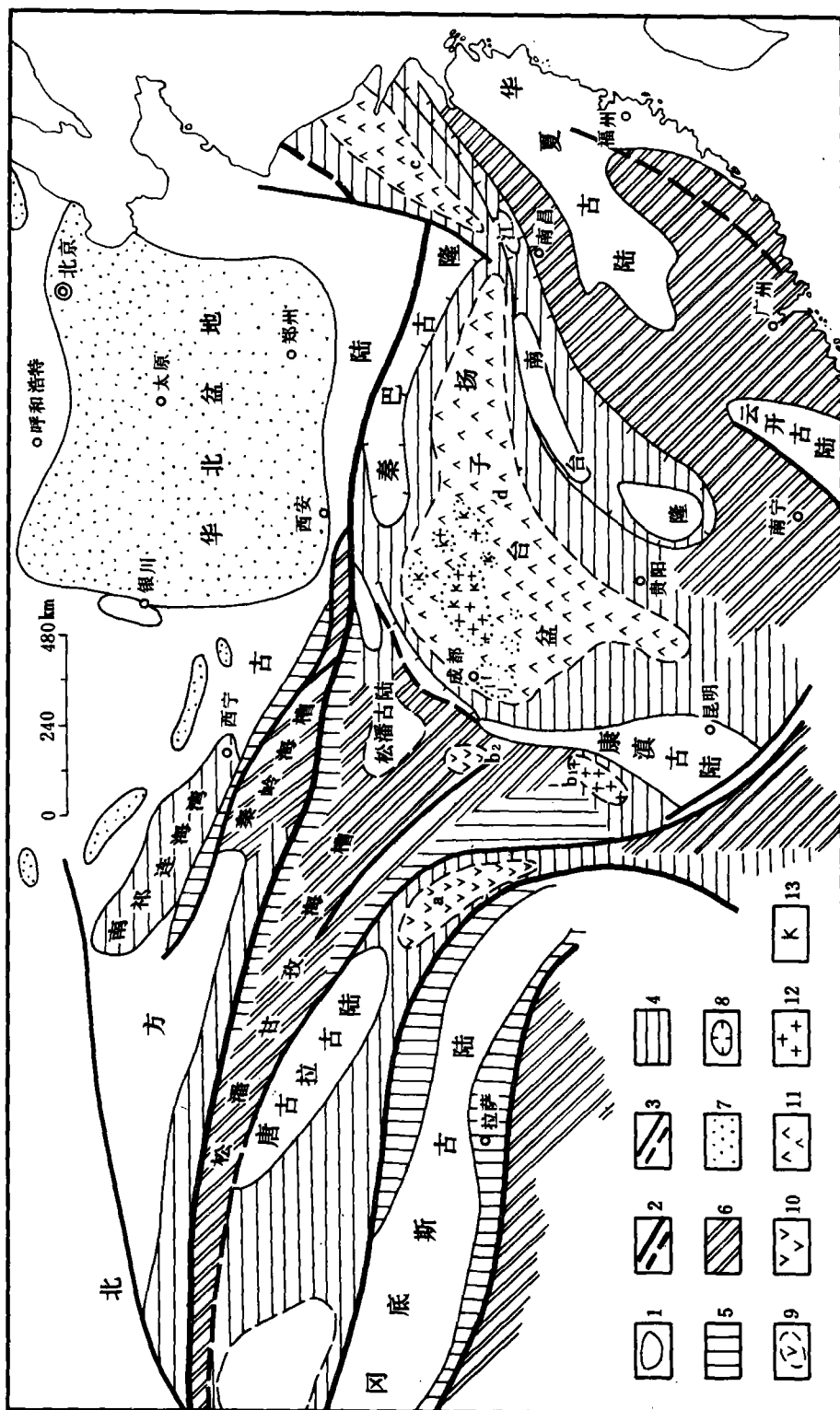


图1 中国早、中三叠世沉积及蒸发岩分布图

1. 古陆及剥蚀区; 2. 地壳板块消减带; 3. 古断裂带; 4. 台地碳酸盐(为主)沉积; 5. 岛弧海槽碎屑岩沉积; 6. 海槽碎屑岩—碳酸盐岩沉积; 7. 陆相碎屑岩沉积; 8. 台缘隆起; 9. 蒸发沉积盆地; 10. 石膏岩; 11. 硬石膏岩及碳酸盐岩; 12. 石盐岩; 13. 钾盐(杂卤石+无水石膏)沉积

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of the Early and Middle Triassic sediments and evaporites in China

1 = ancient land and denuded area; 2 = crustal plate subduction zone; 3 = palaeo fault zone; 4 = platform carbonate (-dominated) sediments; 5 = island arc - trough clastic rock; 6 = trough clastic rock - carbonate rock; 7 = continental clastic rock; 8 = platform-margin uplift; 9 = evaporitic sedimentary basin; 10 = gypsum; 11 = anhydrite and carbonate rock; 12 = halite; 13 = potash salts (polyhalite + langbeinite)

4. 中、上扬子蒸发盆地(图1d) 蒸发岩分布于川、滇、陕、黔、鄂等省区,面积超过 $60 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。蒸发岩赋存于中、下三叠统的雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组(T_2l 、 T_{1j} 、 T_{1f}),累积厚度500~1200m。该盆地是中国三叠纪蒸发岩最发育、保存最好的地区,已发现钾盐线索。本文以四川为例,探讨当前提出的钾盐成矿及找矿前景问题。

2 盐类矿产沉积地质特征

2.1 蒸发岩系层序

以四川三叠系模式图(图2)为中国三叠系的代表剖面,剖面结构为碳酸盐岩与蒸发岩的韵律层。划分为8个段(亚段)级蒸发岩系,它们是飞仙关组的 $T_{1f}^3 \rightarrow T_{1f}^4$,嘉陵江组的 $T_{1j}^1 \rightarrow T_{1j}^2$ 、 $T_{1j}^3 \rightarrow T_{1j}^4$ 、 $T_{1j}^5 \rightarrow T_{2l}^{1-1}$,雷口坡组的 $T_{2l}^{1-2} \rightarrow T_{2l}^{1-3}$ 、 $T_{2l}^{2-1} \rightarrow T_{2l}^{2-2}$ 、 $T_{2l}^{3-1} \rightarrow T_{2l}^{3-2}$ 、 $T_{2l}^{3-3} \rightarrow T_{2l}^{4-2}$ 。以下选述 T_{1j}^4 、 T_{1j}^5 及 T_{2l}^4 蒸发岩系。

1. 嘉四(T_{1j}^4)蒸发岩系 由白云岩及蒸发岩组成,包括5个由白云岩—硬石膏岩—石盐岩沉积序列,厚9~369m,一般80~150m,蒸发岩占60%~90%,石盐岩等占10%~30%,钾异常层厚1.5~8.0m,出现于剖面的中、下部。

2. 嘉五($T_{1j}^{5-1} \rightarrow T_{2l}^{1-1}$)蒸发岩系 由碳酸盐岩、蒸发岩及凝灰岩组成,主要为膏、盐与杂卤石的韵律结构,厚25~506m,一般50~120m,含盐率10%~30%,含钾率5%~10%。图3说明该蒸发岩系发育,钾盐广泛分布于绿豆岩上下,具有确定的层位。

3. 雷四(T_{2l}^4)蒸发岩系 由白云岩及蒸发岩组成,剖面结构为硬石膏与石盐的韵律层,含杂卤石,厚5~640m,一般100~300m,含盐率及含钾率分别为8%~41%,1%~6%。

2.2 岩相古地理面貌

1. 沉积相 用沉积标志及具有环境意义的岩石类型来表示沉积微相^[3,8]。图4为研究区内观察到的岩石及其在相剖面上的分布与环境解释,并据以划分出台缘生物礁相、开阔台地相、局限台地相、滨岸平原相及河流相等。在台地局限海的基础上,从潟湖发展演化到盐湖。海相盐湖有深、浅盐湖之分,钾盐沉积于极浅水环境的滨岸盐湖及干盐湖中。

2. 古地理面貌与沉积景观 三叠纪华南海经历了从台地的形成到消亡,最后上升成陆的发展演化过程。其中特别值得一提的是与钾盐沉积密切相关的奥伦尼克期沉积相古地理及早、中三叠世之交火山喷发时的盐湖沉积景观。

(1)奥伦尼克期沉积相古地理 在上扬子台地上,由于磁性基底构造边缘的挠折,近陆一侧的均衡沉降及台缘的沉积负载^[15],导致台缘隆起或礁、滩屏障的形成,从而由台隆、古陆及障壁岛围成了近 $60 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的大型蒸发沉积盆地(图5)。据峨眉、旺苍、合川及奉节的古地磁测试数据及大量沉积记录,说明当时的古纬度为 $19^\circ \sim 26^\circ \text{ N}$,水体深度50~200m,蒸发岩中层纹构造发育,有干裂,有氧化铁晕染的红石盐及其高溴异常,硬石膏岩Mg/Ca比值高,出现“热相”矿物杂卤石。表明古气候炎热、干燥,盐湖水体咸化程度高。经历三次海平面的升降,浅滩化及成盐作用增强,在大蒸发盆地的基础上进一步分异成若干次盐盆,有利于钾盐沉积。

(2)火山喷发时的盐湖沉积景观 早、中三叠世之交的火山喷发沉积(俗称“绿豆岩”)分布于上扬子台地及黔桂槽海,在台区厚1~5m,槽区厚10~200m。岩石类型有玻屑凝灰岩、凝灰角砾岩、硅质岩及铝绿磷石粘土岩等,化学组分及其质量分数变化是 SiO_2 45%~79%, Al_2O_3 8%~16%, CaO 0.1%~9.0%, MgO 0.7%~17.3%, Na_2O 0.04%~0.54%, Fe_2O_3 0.4%~

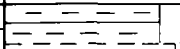
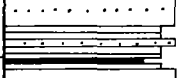
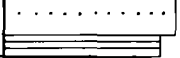
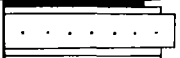
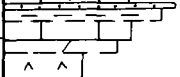
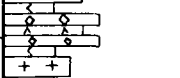
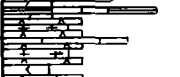
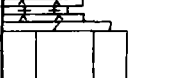
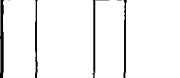
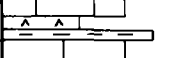
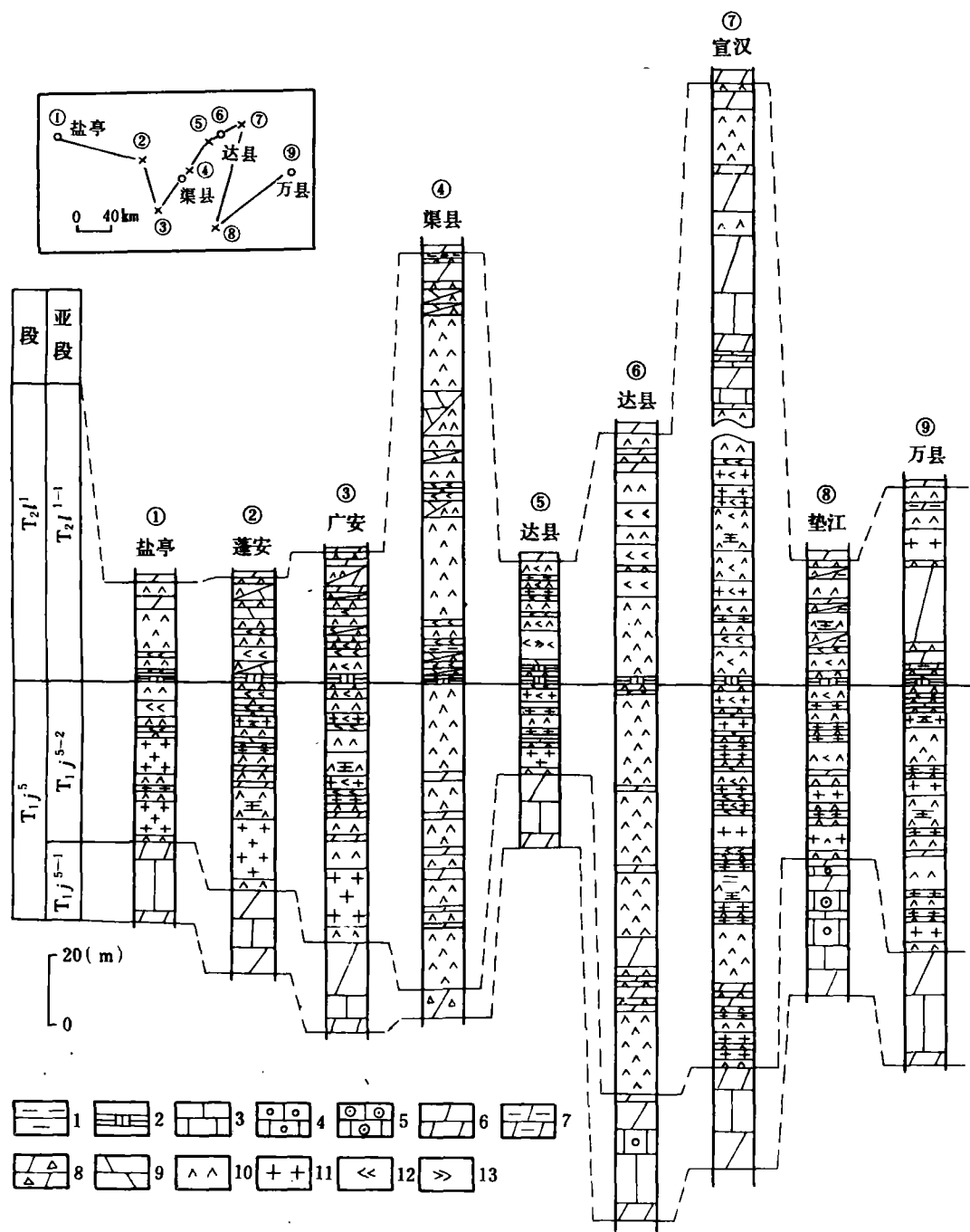
组	段	亚段	厚度 m	地层柱	岩性简述
珍珠冲组	J ₁ z		3200		泥岩
须家河组	T ₃ xj		2800		T ₃ xj 由厚层砂岩及煤系组成
小塘子组	T ₃ x				T ₃ x 页岩、砂质泥岩与砂岩互层
马鞍塘组	T ₃ m				T ₃ m 泥(页)岩、砂岩与生物碎屑灰岩互层
天井山组	T ₂ l		2400		T ₂ l 石灰岩、生物碎屑灰岩夹薄层白云岩, 底部为砂、泥岩
雷口坡组	T ₂ l ⁴	2	2000		T ₂ l ⁴ 白云岩、硬石膏岩与石盐岩互层、顶部夹杂卤石岩及钙芒硝岩
	T ₂ l ³	2			T ₂ l ³ 石灰岩、泥质灰岩、硬石膏岩、石盐岩组成三个含盐韵律, 上下为石灰岩、泥质灰岩
	T ₂ l ²	2	1600		T ₂ l ² 泥质白云岩、硬石膏岩互层
	T ₂ l ¹	2			T ₂ l ¹ 由石灰岩、白云岩与硬石膏岩、石盐岩组成, 下部夹薄层杂卤石及无水钾镁矾, 底为绿豆岩
嘉陵江组	T ₁ j ⁵	2	1200		T ₁ j ⁵ 白云岩与硬石膏岩、石盐岩组成二个含盐韵律。第二韵律中夹薄层杂卤石等钾镁盐矿。下部为石灰岩及白云岩
	T ₁ j ⁴	2			T ₁ j ⁴ 白云岩与硬石膏岩、石盐岩互层组成五个含盐韵律, 中上部夹薄层杂卤石
	T ₁ j ³	3	800		T ₁ j ³ 石灰岩夹白云岩
	T ₁ j ²	2			T ₁ j ² 石灰岩、白云岩、硬石膏岩互层, 可分为三个沉积韵律, 顶部夹石盐岩
	T ₁ j ¹	1			T ₁ j ¹ 石灰岩夹鲕状灰岩、生物碎屑灰岩
飞仙关组	T ₁ f ⁴		400		T ₁ f 砂岩与石灰岩、泥灰岩互层, 夹粉砂质灰岩, 顶部为硬石膏岩。可分四个岩性段, 自西向东, 由碎屑岩向石灰岩过渡
长兴组	P ₂ c		0		礁石灰岩

图2 四川盆地三叠纪地层模式图

Fig. 2 Stratigraphic model of the Triassic strata in the Sichuan Basin

图3 T_{1j}^{5-1} — T_{2l}^{1-1} 蒸发岩系对比图

1. 泥岩; 2. 绿豆岩; 3. 石灰岩; 4. 鲕状灰岩; 5. 针孔状灰岩; 6. 白云岩; 7. 泥质白云岩; 8. 角砾状白云岩;
9. 菱镁矿岩; 10. 硬石膏岩; 11. 石盐岩; 12. 杂卤石岩; 13. 无水钾镁矾

Fig. 3 Correlation of the T_{1j}^{5-1} — T_{2l}^{1-1} evaporitic series in Sichuan

1=mudstone; 2=mung bean rock; 3=limestone; 4=oolitic limestone; 5=pinhole limestone;
6=dolomite; 7=muddy dolomite; 8=brecciated dolomite; 9=magnesite rock;
10=anhydrite; 11=halite; 12=polyhalite rock; 13=langbeinite

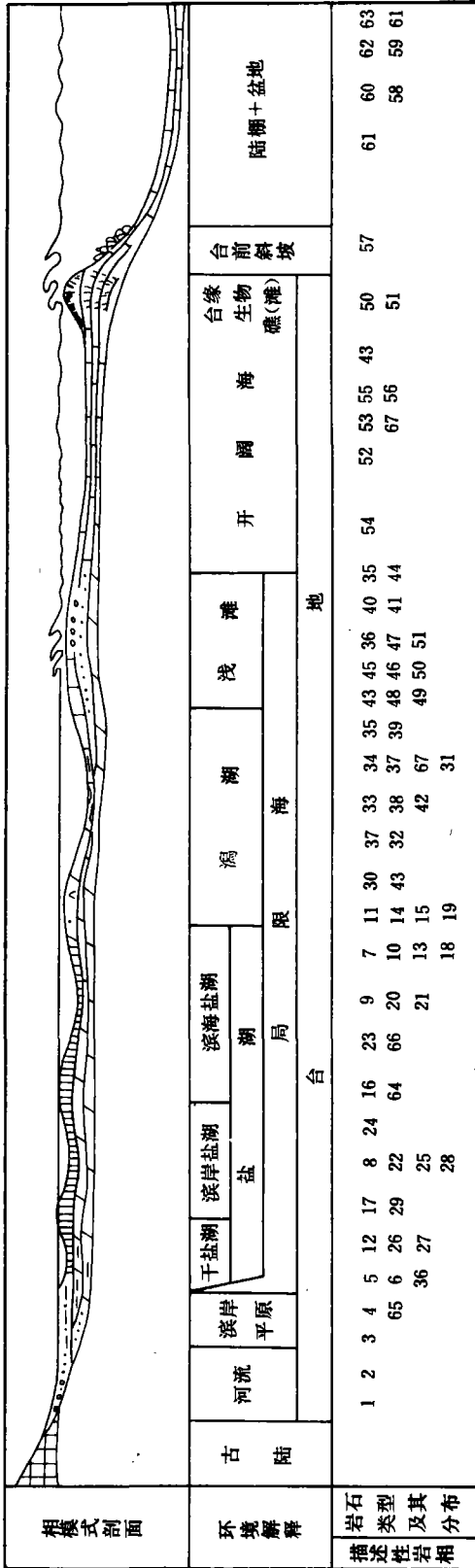


图 4 岩石类型与沉积相模式图

1. 含砾粗砂岩—交错层理砂岩—平行层理砂岩—砂纹层理粉砂岩—含灰质结核泥岩粉砂岩; 2. 具梗、板状泥岩粉砂岩; 3. 杂色泥岩、粉砂岩互层;
4. 具砂纹层理的紫红色泥岩、粉砂岩; 5. 层状钙芒硝岩; 6. 含硬石膏结核的紫红色粉砂岩、泥岩; 7. 藻屑硬石膏岩; 8. 具纹理的块状硬石膏岩; 9. 毫米层纹状石膏岩;
10. 叠层藻纹硬石膏岩; 11. 条状白云质硬石膏岩; 12. 层状白云质硬石膏岩; 13. 粒屑硬石膏岩; 14. 燕尾硬石膏岩; 15. 含晶簇状硬石膏的微晶白云岩; 16. 藻纹硬石膏岩; 17. 瘤状、肠状硬石膏岩; 18. 砾屑硬石膏岩; 19. 叠层白云质硬石膏岩; 20. 纹层状白云质硬石膏岩; 21. 雾状白云质硬石膏岩; 22. 块状白云质硬石膏岩; 23. 含硬石膏团块的白云岩; 24. 层状白云质硬石膏岩; 25. 层状白云质硬石膏岩; 26. 瘤(肠)状白云质硬石膏岩; 27. 块状白云质硬石膏岩; 28. 含无水硬石膏的白云岩; 29. 条带状白云质硬石膏岩; 30. 含硬石膏斑点的白云岩; 31. 厚层白云质硬石膏岩; 32. 粉晶白云质硬石膏岩; 33. 无明显示沉积构造的白云岩; 34. 杂色泥岩、泥云岩互层; 35. 含有孔虫砂屑灰岩; 36. 具交错层理砂岩粉屑层; 37. 含双壳类的紫红色粘土岩、泥灰岩; 38. 层状白云质硬石膏岩; 39. 条带状白云质硬石膏岩; 40. 介壳白云质硬石膏岩; 41. 颗粒灰岩与叠层白云质硬石膏岩; 42. 层状白云质硬石膏岩; 43. 蠕虫状白云质硬石膏岩; 44. 介壳白云质硬石膏岩; 45. 藻白云质硬石膏岩; 46. 介壳白云质硬石膏岩; 47. 块状白云质硬石膏岩; 48. 颗粒白云质硬石膏岩; 49. 含砾砂屑灰岩; 50. 叠层白云质硬石膏岩; 51. 玛瑙纹白云质硬石膏岩; 52. 含梅百合白云质硬石膏岩; 53. 含礁石条带白云质硬石膏岩; 54. 含砂屑的中厚层白云质硬石膏岩; 55. 含菊石、底栖双壳类的页岩及薄层白云质硬石膏岩; 56. 薄板状、中层状白云质硬石膏岩; 57. 混杂角砾岩(塌积岩); 58. 薄板状泥晶白云岩; 59. 页状白云质硬石膏岩; 60. 瘤状白云质硬石膏岩; 61. 陆源碎屑白云质硬石膏岩; 62. 含菊石、海綿骨针、薄型双壳类的页岩、泥灰岩; 63. 含有孔虫化石的硅质岩、硅质页岩; 64. 粘土质层状白云岩; 65. 凝灰质层状白云岩; 66. 富硅质层状白云岩; 67. 粘土质硅质岩

Fig. 4 Model showing the rock types and sedimentary facies in the study area

1 = gravel-bearing coarse-grained sandstone - cross-bedded sandstone - parallel bedded sandstone - ripple bedded siltstone-mudstone (with liny concretions) rhythmic; 2 = sandstone and mudstone rhythmic with wedge, tabular and parallel beddings; 3 = variegated interbeds of mudstone and siltstone; 4 = purplish red mudstone and siltstone with ripple beddings; 5 = bedded glauconite rock; 6 = purplish red siltstone and mudstone with anhydrite concretions; 7 = algal anhydrite; 8 = massive anhydrite with lamination; 9 = mm-scale laminated anhydrite; 10 = stromatolitic anhydrite; 11 = ribbon dolomitic anhydrite; 12 = laminated anhydrite and magnesite rock; 13 = grained anhydrite; 14 = swallow-tail anhydrite; 15 = micritic dolostone with drusy anhydrite; 16 = algal laminated anhydrite; 17 = knobby and pygmatic anhydrite; 18 = gravelly anhydrite; 19 = stromatolitic dolomitic anhydrite; 20 = laminated halilith; 21 = fog halilith; 22 = massive halilith; 23 = halilith with anhydrite lumps; 24 = laminated polyhalite rock; 25 = laminated polyhalite-anhydrite rhythmic; 26 = knobby (pygmatic) polyhalite rock; 27 = massive polyhalite rock; 28 = langbeinite-bearing halite rock; 29 = banded gypsaceous dolostone; 30 = dolostone with anhydrite spots; 31 = thick-bedded micritic limestone; 32 = silty dolostone; 33 = limestone without sedimentary structures; 34 = variegated interbeds of mudstone and muddy dolostone; 35 = foraminifera-bearing calcarenite; 36 = sandstone rhythmic with cross beddings; 37 = bivalves-bearing purplish red claystone and marl; 38 = laminated dolostone; 39 = banded limestone; 40 = shell sparite - sandstone and mudstone rhythmic; 41 = interbeds of grainstone and stromatolite; 42 = laminated black marl and shale; 43 = vermicular limestone; 44 = shell tempestite (graded limestone); 45 = algal dolostone; 46 = shell limestone; 47 = massive oolitic limestone; 48 = grained dolostone; 49 = gravel-bearing calcarenite; 50 = stromatolitic limestone; 51 = limestone with agate lamination; 52 = crinoid-bearing micritic limestone; 53 = limestone with flint bands; 54 = sand-bearing moderate- to thick-bedded micritic limestone; 55 = shale and thin-bedded marl with ammonites and benthic bivalves; 56 = thin tabular and moderate- bedded micritic limestone; 57 = chaotic breccias (talus); 58 = thin tabular micritic limestone; 59 = shaly marl; 60 = knobby limestone; 61 = terrigenous turbidite; 62 = shale and marl with ammonites, sponge spicules and thin bivalves; 63 = foraminifera-bearing siliceous rock and siliceous shale; 64 = clayey tuff; 65 = tuffaceous claystone; 66 = claystone with siliceous beds; 67 = clayey siliceous rock

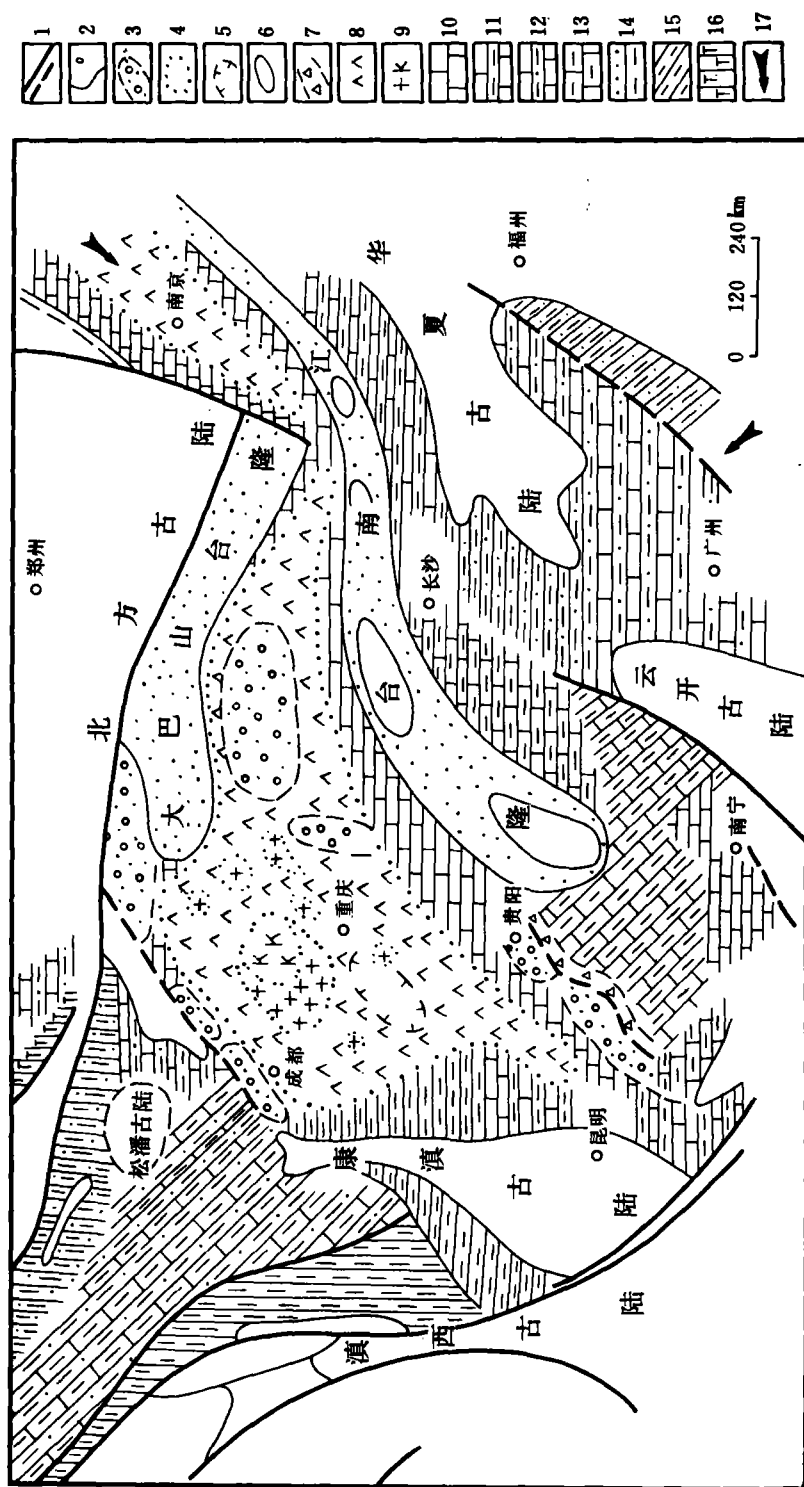


图5 华南早三叠世晚期(T_{1j})沉积相古地理图

1. 古断裂带; 2. 台缘隆起带; 3. 浅滩、障壁岛沉积; 4. 蒸发盆地碳酸盐—硫酸盐沉积; 5. 台内古隆起; 6. 古陆及剥蚀区; 7. 台前斜坡塌积带; 8. 台地蒸发盆地碳酸盐—硫酸盐沉积; 9. 含盐(钾)沉积; 10. 浅海碳酸盐沉积; 11. 浅海碳酸盐泥质沉积; 12. 浅海碳酸盐砂泥质沉积; 13. 浅海泥灰岩沉积; 14. 滨浅海碎屑岩沉积; 15. 边缘海砂泥岩沉积; 16. 岛弧海碎屑岩、火山岩沉积; 17. 主要海侵方向

Fig. 5 Sedimentary facies and palaeogeographic map of South China during the late Early Triassic

1=paleofault zone; 2=platform-margin uplift; 3=shoal and barrier-island sediments; 4=evaporite basin boundary; 5=intraplatform paleoup lift; 6=ancient land and denuded area; 7=foreslope talus; 8=carbonate-sulfate sediments in platform evaporite basins; 9=salt (potash)-bearing sediments; 10=shallow marine carbonate sediments; 11=shallow marine carbonate-muddy sediments; 12=salt (potash)-bearing sandy and muddy sediments; 13=shallow marine marl; 14=littoral- to shallow marine clastic rock; 15=epicontinental sea sandstone and mudstone; 16=island arc-trough clastic rock and volcanic rock; 17=main transgression direction

5.0%, FeO 0.1%~0.7%, TiO_2 0.1%~0.8%, CO_2 0.1%~21.8%, K_2O 2.2%~12.5%, H_2O 1%~8%, 并含有Be、Li、B、Ga 等稀有元素组分。绿豆岩属含钾铝硅酸盐类岩石。

岩石圈中的钾的平均质量分数为2.5%^[4], 沉积粘土岩及碳酸盐岩中 K_2O 质量分数为2.3%~3.2%。若以3%为背景值对比, 显然绿豆岩要高2~4 倍。图6 展示绿豆岩的钾异常。 K_2O 高值域与上扬子盐湖分布区相重合, 说明是火山灰散落在盐湖中, 吸附了卤水中的钾物质, 从而形成了绿豆岩的含钾异常。

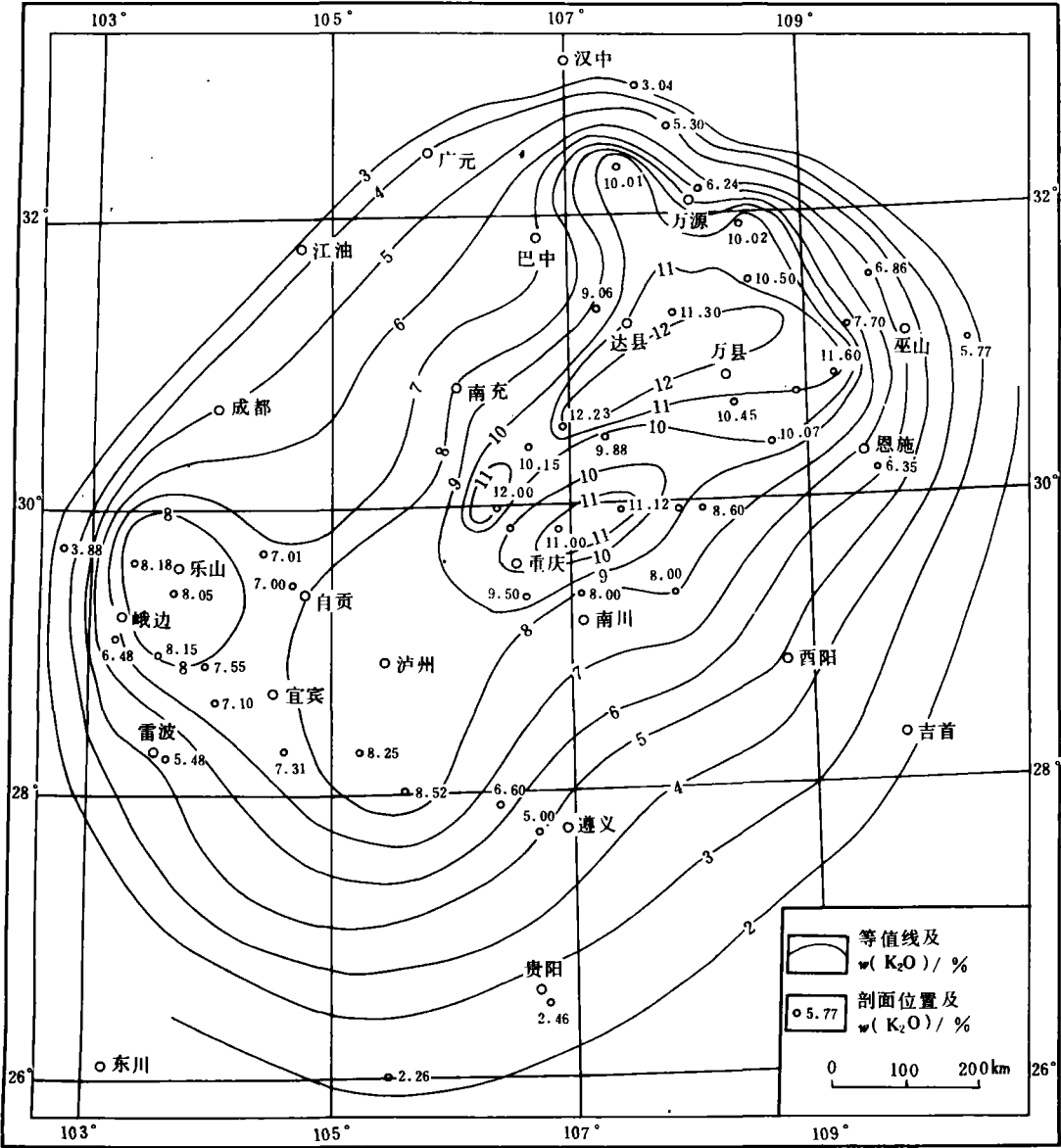


图6 上扬子台地绿豆岩 K_2O 的质量分数等值线图

Fig. 6 Mass fraction isogram of K_2O from the mung bean rocks within the Upper Yangtze platform

2.3 钾盐矿产地质概述

2.3.1 蒸发岩的含钾性与钾盐赋存状况

研究区内的蒸发岩不同程度地具有放射性钾异常。硬石膏岩中的钾物质多为交代钾矿

物,含量小于10%,放射性强度2~4 伽马, $w(K_2O)$ 为1%~5%;石盐岩类放射性强度2~7 伽马, $w(K_2O)$ 为1%~7%,钾矿物的体积分数为5%~15%,多为准同生交代产物;无水钾镁矾岩类放射性强度8~12 伽马, $w(K_2O)$ 为5%~11%,钾矿物的体积分数为6%~22%;杂卤石岩类,放射性强度6~16 伽马, $w(K_2O)$ 为6%~12%,钾矿物体积分数为30%~95%;凝灰岩类放射性强度8~20 伽马, $w(K_2O)$ 为6%~15%,为粘土岩结构钾及吸附钾。

以杂卤石为主的钾盐产出层位为 T_{1j}^{4-2} 、 T_{1j}^{5-2} 、 T_{2l}^{1-1} 及 T_{2l}^{4-2} 。杂卤石呈似层状、瘤肠状、团块状及星散状赋存于硬石膏岩及石盐岩之韵律层中,在硬石膏岩中多呈似层状、瘤肠状产出,而在石盐岩中则多呈团块状、星散状产出。据100条钻井剖面统计,杂卤石层数在1~27层范围内变化,单层厚0.01~7.00m,累积厚度一般小于10m,矿层纵横向变化都较大,但含钾岩系有确定的层位。

2.3.2 钾盐矿物与矿石

经过对取心蒸发岩的化学分析及薄片鉴定,发现有杂卤石、无水钾镁矾、硫锶钾石及多钙钾石膏等钾盐矿物^[2];通过计算机配矿处理的微量钾矿物($\leq 1\% \sim 5\%$)有硫钾石、钾芒硝、钾盐镁矾等。在德国哈勒实验室用雷-石盐分析见到的含量极微的钾盐晶体也能在薄片中找到,说明上述配算矿物有一定的参考价值。

1. 杂卤石($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$)分布于上扬子台地的11个次盐盆中,产出层位为 T_{2l}^{4-2} 、 T_{2l}^{1-1} 、 T_{1j}^{5-2} 、 T_{1j}^{4-2} 。矿物为肉红、乳白、深灰色,呈板状、板柱状、纤维状、菊花状、放射状、细粒状及不等粒状结构。矿物集合体呈斑块状、条带状、透镜状及层状构造。共生矿物有硬石膏、石盐、菱镁矿、石英、滑石、泥质、有机质及其它钾盐矿物。杂卤石为准同生及变质交代成因矿物。

2. 无水钾镁矾($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$)分布于四川达县、蓬安等地,在 T_{1j}^{5-2} 中呈星散状、团块状赋存于红石盐岩、含石盐硬石膏及含菱镁质杂卤石岩中;在 T_{2l}^{1-1} ,则多呈深灰、乳白色团块状、似层状赋存于硬石膏岩及菱镁质杂卤石岩中。最大单层厚1.19m,矿物体积分数为1%~22%,与杂卤石、石盐、硫镁矾、菱镁矿及硬石膏共生,并呈相互变质交代的复杂关系。当暴露于空气中时易潮解粉化成软钾镁矾、硫镁矾及泻利盐等矿物。

3. 硫锶钾石 $[K_2Sr(SO_4)_2]$ 亦名钾锶矾,见于四川渠县,赋存于 T_{2l}^{1-1} 条纹状及似瘤状硬石膏岩中,呈白色细一中粒集合体,可见锥柱状、双锥状晶体,通常呈分散粒状、团块状、网脉状。矿物含量 $< 5\%$,为次生矿物。

4. 多钙钾石膏($K_2SO_4 \cdot 5CaSO_4 \cdot H_2O$)亦名斜水钙钾矾,分布于四川渠县,赋存于 T_{2l}^{1-1} 硬石膏岩中。矿物呈白色、淡青色,油脂光泽,粗粒状、板状、菱板状晶体,集合体多呈团块状,体积分数为0.1%~8%,最高30%~50%,与杂卤石、硬石膏、石膏、菱镁矿、钾锶矾等矿物共生,为次生矿物。

钾盐矿石,指杂卤石矿,其化学组分及质量分数为 K_2SO_4 12.0%~27.7%, Na_2SO_4 0.2%~13.0%, $CaSO_4$ 31.9%~68.5%, $MgSO_4$ 8.0%~19.7%, $CaCO_3$ 0.1%~1.5%, $MgCO_3$ 0.7%~17.0%, $NaCl$ 0.1%~7.1%, H_2O 2.5%~6.0%,酸不溶物0.7%~11.2%。矿物组分主要是杂卤石,次有硬石膏、石盐及泥质有机质等。可划分11种矿石类型,其中以块状杂卤石及含石盐杂卤石矿品质最好, K_2SO_4 质量分数为25%~27%($\approx K_2O$ 13%±)。各类矿石中达到工业品位 $w(K_2O)$ 为8%者占81%。

2.3.3 富钾卤水

富钾卤水赋存于蒸发岩系之碳酸盐层破碎带中,其具体层位是 T_{1j}^{5-1} 、 T_2l^{1-1} 、 T_2l^{1-2} 、 T_2l^{1-2} ,累积厚度73m。卤水矿化度为155~382g/l,含钾量(K^+) 4~49g/l。 T_{1j}^{5-1} 岩层中卤水化学组分具有高钠、硼,富钾,贫镁、溴的特点,是沉积残余卤水与溶滤卤水的混合,属沉积变质卤水; T_2l^{1-1} 、 T_2l^{1-2} 层位中的卤水含钾富钠,贫镁、溴,为溶滤卤水; T_2l^4 卤水具有高钾、硼、钠,贫钙、镁、溴等特点,亦为溶滤卤水。富钾卤水含Br、B、Li、Sr、I等有益微量组分,具有良好的综合利用价值。

2.4 盐类沉积的某些地质规律

1. 中国海相三叠纪蒸发岩沉积主要分布于稳定地台区,具有碳酸盐沉积发育,蒸发岩层位多的特点。

2. 鉴于台地多依附于古陆,所以蒸发岩沉积总是与陆源碎屑岩相相联系。

3. 蒸发盆地的形成演化受古构造、古纬度、古地理控制,次盐盆的发展往往具有继承性特点。

4. 蒸发岩沉积出现于海退沉积序列中,沉积环境具有浅水浅盆性质,钾盐沉积属浅盐湖成矿模式。

5. 钾盐沉积后经历多阶段极其复杂的演变过程。地质背景及成矿环境决定了三叠系的钾盐只能是硫酸盐钾盐^[8]。

6. 古盐湖卤水中的钾(K^+)物质主要被杂卤石的沉积交代所消耗,部分被火山灰吸附,另一部份沦为残余晶间卤水。在成岩及构造变动时,它们转入碳酸盐及碎屑岩孔隙及裂隙中,储集演变成“黑卤”和“黄卤”。

7. 与国外典型钾盐矿床相比,中国三叠纪蒸发岩系中碳酸盐夹层更发育,石膏更厚,石盐太薄,因而盐构造及塑性变形流动相对较弱。深埋地腹的钾盐,层序清楚,构造简单,但在构造变动区,水动力条件复杂,钾盐难以保存。

3 钾卤演变与控矿条件

3.1 钾盐与富钾卤水的演变关系

钾盐沉积后经历了漫长而复杂的多阶段演变过程。本文从预测找矿角度出发,不再赘述具体的演变过程和阶段,而着重讨论演变的结果。杂卤石成因及硫酸盐剖面的形成机制研究已经取得进展,找到原生沉积、准同生交代及后生交代的确切地质记录以及与之对比的现代潟湖—盐湖沉积范例^[6]。从蒸发岩沉积序列、钾盐成矿环境及水文地球化学等方面所作的综合研究,认为富钾卤水与固相钾盐有直接成因联系。富钾卤水中的钾(K^+)物质来自蒸发浓缩的海水、盐湖火山灰吸附钾的解吸及固相硫酸钾盐的溶滤。

1. 海水蒸发成钾与沉积卤水 当海水蒸发到石膏沉积阶段时,卤水中 K^+ 含量达到2.6g/l,在石盐阶段达到9g/l;当蒸发浓缩到原体积的5%时,开始沉淀杂卤石^[7];当蒸发浓缩到原体积的1.0%~1.5%、浓度为33%~34%、密度为1.31g/cm³时,开始沉积钾石盐,这时卤水中 K^+ 含量达到25g/l。在深埋、压实、成岩与构造变动阶段,晶间卤水与石膏脱水及溶滤固相钾盐的混合水向上穿越蒸发岩,进入上覆的孔隙碳酸盐地层,经构造变动及成矿分异,便富集成黑卤或富钾卤水。

2. 火山灰吸附钾的释放 中三叠统雷坡口组底部的绿豆岩之钾异常,乃火山灰散落于上扬子盐湖区吸附盐湖卤水钾所致。吸附钾进入粘土矿物晶格,成为“含钾变质粘土”^[8]。在

成岩过程中,由于火山灰的释水及吸附钾的解析,使部份钾又转入液相。特别是构造变动后的暴露淋滤将使吸附钾再度流失,并与沉积及溶滤卤水的混合变质,转入上三叠统碎屑岩沉积体中者演变成“黄卤”。

3. 固相硫酸钾盐的溶滤 据上百口钻井剖面资料统计,固相钾盐几乎都是以杂卤石为主。杂卤石被称为难溶钾盐,通常认为富钾卤水与杂卤石并无直接联系,然而一个重要的现象是:凡有杂卤石保存的剖面,却无富钾卤水;而有富钾卤水的剖面则无杂卤石保存。为了解杂卤石的溶解性及溶解速度,笔者作了一个溶解试验。

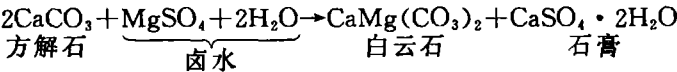
选5件试样,作成3cm³大小,溶剂为蒸馏水,体积为1000ml,模拟3000m深度井温90℃,以20%NaCl盐水溶解,静态溶解,定时搅拌。经过12小时溶解结果(表1),含星散状杂卤石的红石盐中66.3%~81.9%、块状杂卤石中22.8%~30.6%的钾(K⁺)进入溶液,钾的质量分数w(k)为1.38%~6.29%,折合KCl的质量分数w(NaCl)为2.6%~11.9%。这是在常压下获得的溶解参数。可以设想,经过构造变动、蒸发岩流动,在深埋、高压、高温、有NaCl-CaCl₂水参与的地质、物理、化学等综合作用条件下,更能促使杂卤石的溶解,向卤水提供钾物质。

表1 丹棱大深1井T₂l⁴杂卤石水溶试验成果

Table 1 Experimental results of the polyhalite solution from T₂l⁴ in the deep Da-1 well, Danling, Sichuan

试样 编号	矿石名称	试样(固)含钾量			进入溶液的 钾质量(g)	进入溶液的 钾质量分数	备 注
		原样质量(g)	w(K)/%	K质量(g)			
1	红石盐	22.64	7.31	1.655	1.10	66.31	以20%NaCl 盐水溶解
2	块状杂卤石	15.58	11.72	1.827	0.42	22.85	
3	块状杂卤石	15.58	11.72	1.826	0.56	30.60	
4	红石盐	44.16	1.85	0.82	0.61	74.82	
5	红石盐	47.26	2.36	1.12	0.91	81.94	

杂卤石的溶解,使溶液成为富含Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻的“混合”型卤水。然而在地层中人们采集到的却是富含Na⁺、K⁺、Br⁻、Cl⁻的氯化物型浓卤水,有人曾据此以预测深部原岩为钾石盐。但实际上在有钾异常水点附近打出的原生取心剖面上并无钾石盐,而是杂卤石岩。笔者认为,这个谜团要用沉积附加作用才能解开^[9]。可以找到的证据是在蒸发岩-碳酸盐岩沉积记录中发现大量次生(硬)石膏脉。在压实、深埋及成岩过程中,石膏脱水,盐卤水与溶解杂卤石中的Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻物质经热变质等综合作用,即产生石膏的附加沉积作用,在膏、盐及碳酸盐岩裂隙中形成新一代石膏时,消耗了混合卤水中的Ca²⁺、SO₄²⁻,并使盖层及夹层白云岩化:



很明显,在形成白云石及石膏过程中既消耗了Mg²⁺,也促使Ca²⁺、SO₄²⁻的再沉淀,从而“净化”了混合卤水,使之仅保存了易溶组分,成为相对富集Na⁺、K⁺、Br⁻、Cl⁻组分的氯化物型沉积变质卤水或溶滤卤水。

富钾卤水与杂卤石的成因联系,还可以从两者的放射性同位素测年资料得到印证。在达县深井及坑道中采集的T₁j⁵⁻²-T₂l¹⁻¹杂卤石,用K-Ar法测定的年龄值为210~156Ma;宣汉深井卤水用He法测年值为264~189Ma,用He-Ar法测年值为285~190Ma,用He-Ar定

$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 法测年值为231~150Ma^[10],三种方法的极值平均值为260~176Ma(宣汉卤钾测年值之所以略高于达县固相钾,主因是前者有更多沉积阶段的钾)。从以上测年数据可见,用不同方法测定的固相与液相钾盐年龄如此相近,说明两者同源,富钾卤水中的钾主要来自杂卤石的溶滤,与地质解释相辅相成。

3.2 蒸发岩的构造变动及其控矿作用

在钾卤资源控矿条件研究中,构造控矿是重要因素,而蒸发岩的构造变动及其控矿作用,还是一个正在探索的问题。

研究区内 $T_1j^4-T_2l^1$ 蒸发岩系厚度极值为97~1472m,现从统计数据厘定300~400m厚者视为正常厚度,小于此数者为“负性”盐构造,反之则为“正性”盐构造。拟从不同角度观察三叠系的盐构造:①从点上看,在一个井场可以打出结构及厚度迥然不同的剖面类型,常出现重复、缺失、直立、倒转、褶曲、断裂等现象,构造极其复杂。②从线上看,华蓥山背斜北段的州河露头及附近的烂泥湾钾盐勘探线剖面上,可见背斜轴部以石膏为主的盐构造。在达县与开县之间可见宣汉盐构造。在达县境内的龙会—铁山—双石庙—东岳寨—分水岭一带,可见三个盐构造(图7)。③从面上看,两构造的交汇转折带及应力消减带,常见盐构造群。根据钻井数据制作的微机处理图件,可见川东北的盐构造密集分布。 $T_1j^4-T_2l^3$ 地震地层厚度等值线图上的厚度极值为400~2000m,亦显示正负型盐构造的无序排列。从上述不难看到盐构造的存在及广泛分布。

按地质年代尺度衡量,蒸发岩被认为是活动地层或流变地质体。实验证明,使蒸发岩软化及岩盐流动的压力为 $(1500\sim 7000)\times 9.8\times 10^4\text{Pa}$ (15℃),但实际上 $<9.8\times 10^6\text{Pa}$ 。德国二叠系蒸发岩的破碎强度为 $(62\sim 477)\times 9.8\times 10^4\text{Pa}$ ^[11],就使那里的盐构造相当发育。四川三叠系蒸发岩埋深2000~4000m,地层压力 $(400\sim 800)\times 9.8\times 10^4\text{Pa}$,地静压力 $(800\sim 1500)\times 9.8\times 10^4\text{Pa}$ 。在高温、高压及边界挤压力,特别是地球的旋转能、地壳构造运动、褶曲断裂的复活、岩层的厚度密度差异、诸水平力与重力能、地壳热能、化学热能及矿物结晶能等的综合作用的驱使,足以使蒸发岩体流动。在构造活动期,其流速高达1~4km/Ma,由此可见盐构造的动态特点。

可以用粘滞流体热流体动力学的原理来解释蒸发岩的流动^[12]。流体运动依赖两个无量纲中若干参数的变化,包括流体的特征直径(或厚度)(D)、流体特征系数(V)、流体密度(ρ)、流体粘度(η)、温度差(ΔT)、热传导系数(K)、热胀系数(B)、重力加速度(g)及单位质量比热(C)等。雷诺数(Re)等于 $\rho \cdot V \cdot D/\eta$,雷利数等于格拉肖夫数与勃兰特数的乘积(λ)(振幅),而格拉肖夫数等于 $D^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \Delta T/\eta^2$,勃兰特数等于 C/K 。格拉肖夫数与勃兰特数的乘积控制着粘滞流体的热对流。实验证明,两个面之间的热对流,以对流环的形式发生。一个对流环包含一个封闭在环内部的涡旋管。

三叠系 $T_1j^4-T_2l^1$ 蒸发岩体模型(图8)可以视为一个统一的粘滞流体。 T_1j^{5-1} 碳酸盐夹层恰好位于对流环中部或涡旋管中央。蒸发岩系模式对比图(图9)反映,变化最大的就是 T_1j^{5-1} 及其上下的蒸发岩,出现缺失及多次重复,其源概出于上述诸综合力作用下的涡旋管作用。而 T_2l^{1-2} 之所以较少破坏是因为它相对靠近上固着体 T_2l^2 的缘故。

主要储卤层 T_1j^{5-1} 碳酸盐体在褶曲、断裂及破碎肢解后,结果使其处于被蒸发岩包围及不确定的空间位置上。这一方面为卤水的保存、储集、封闭创造了条件,另一方面也使卤水的侧向运移及储集性能受到限制,因卤及破碎带中的富钾卤水被有限地圈闭起来。由此可见,

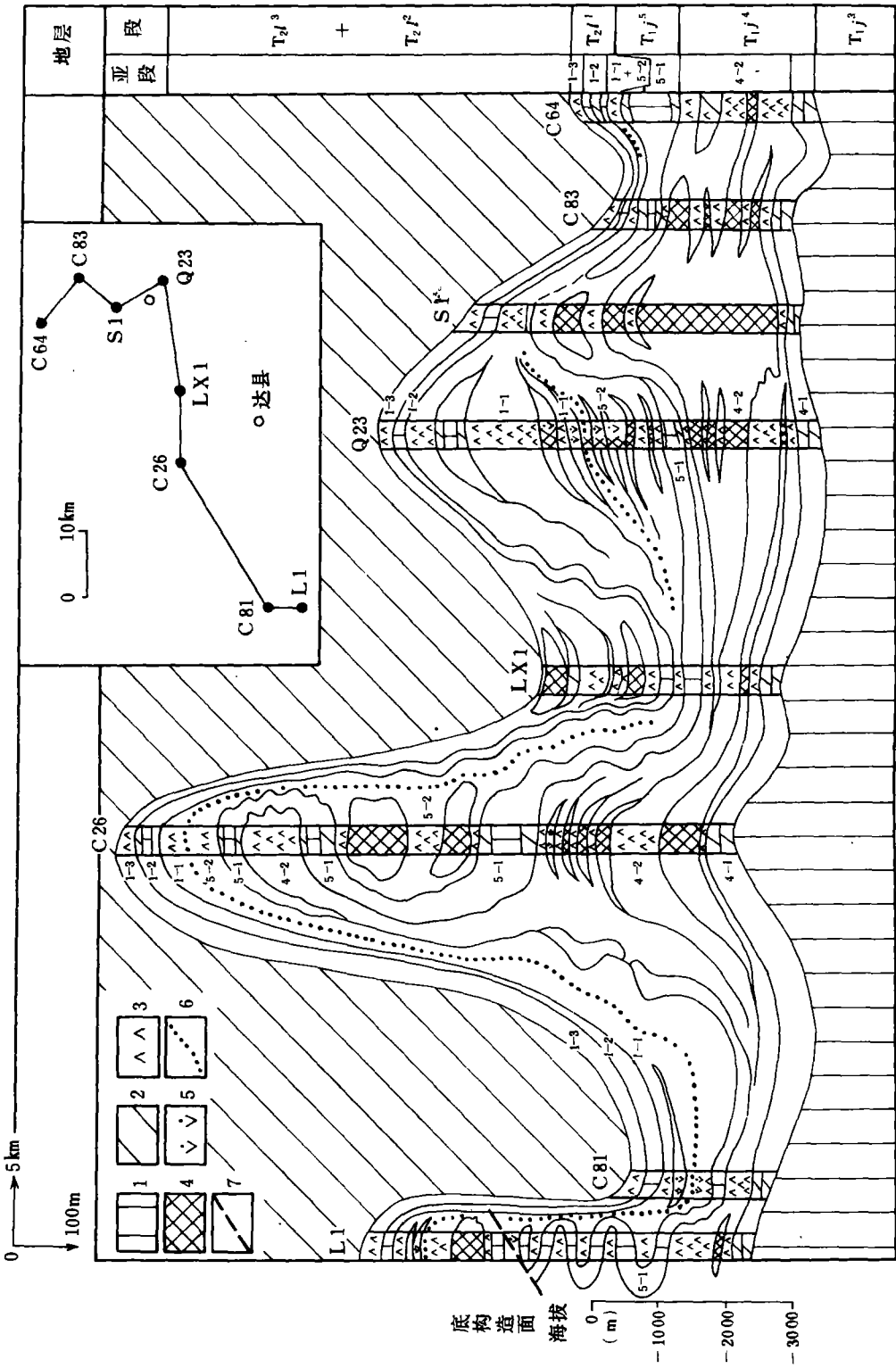


图7 盐构造示意图

1. 石灰岩; 2. 白云岩; 3. 硬石膏岩; 4. 石盐岩; 5. 杂卤石岩; 6. 绿豆岩层位; 7. 逆断层

Fig. 7 Schematic diagram showing the salt structures in the study area

1 = limestone; 2 = dolostone; 3 = anhydrite; 4 = halite; 5 = polyhalite rock; 6 = mung bean rock; 7 = reversed fault

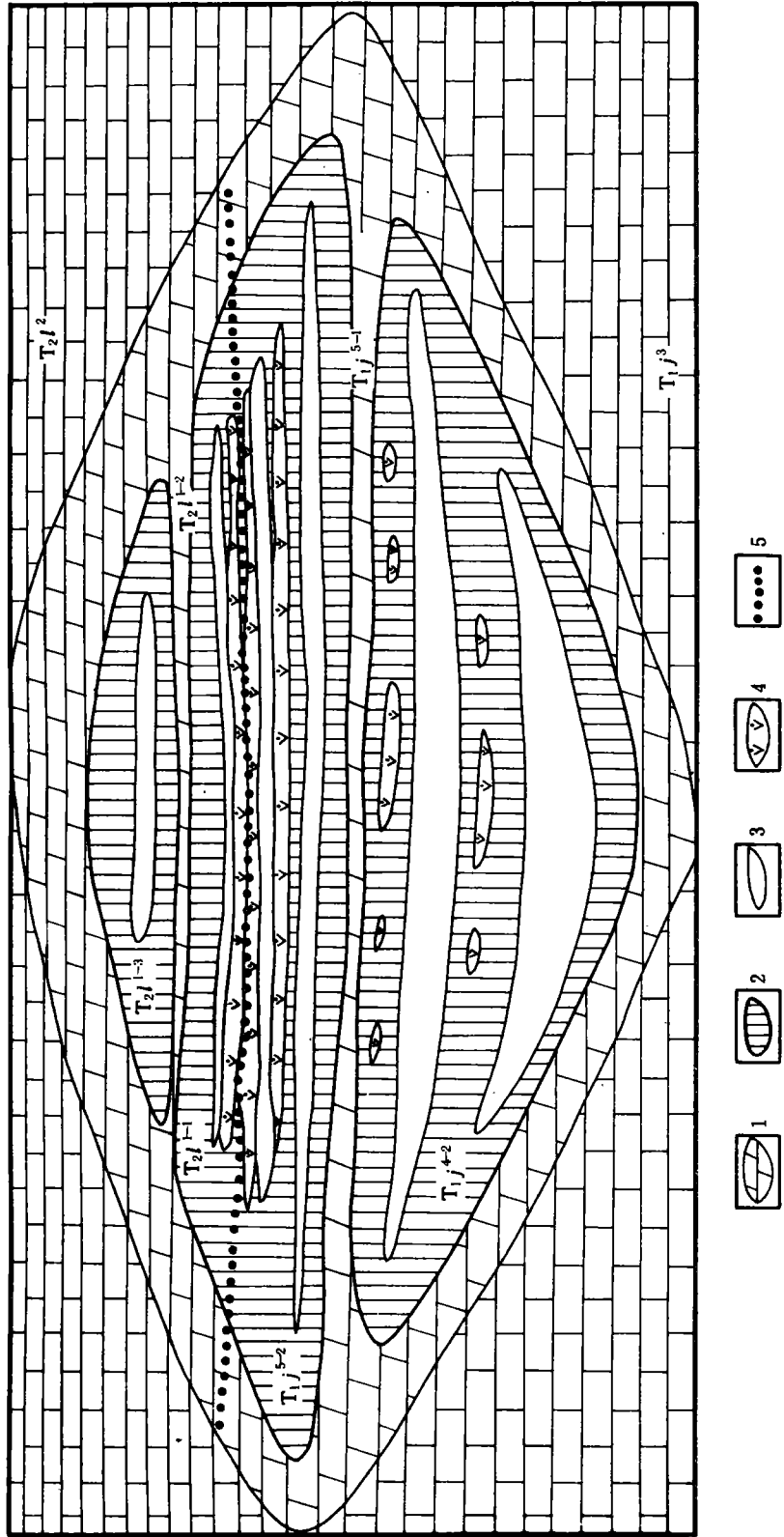


图8 蒸发岩体模型

1. 碳酸盐岩; 2. 硬石膏岩; 3. 石盐岩; 4. 杂卤石等钾镁硫酸盐岩; 2-4. 蒸发岩体; 5. 火山凝灰岩

Fig. 8 Model showing the morphology of evaporite bodies

1=carbonate rock; 2=anhydrite; 3=halite; 4=K- and Mg-sulfate rocks including polyhalite; 2 to 4=evaporite body; 5=volcanic tuff

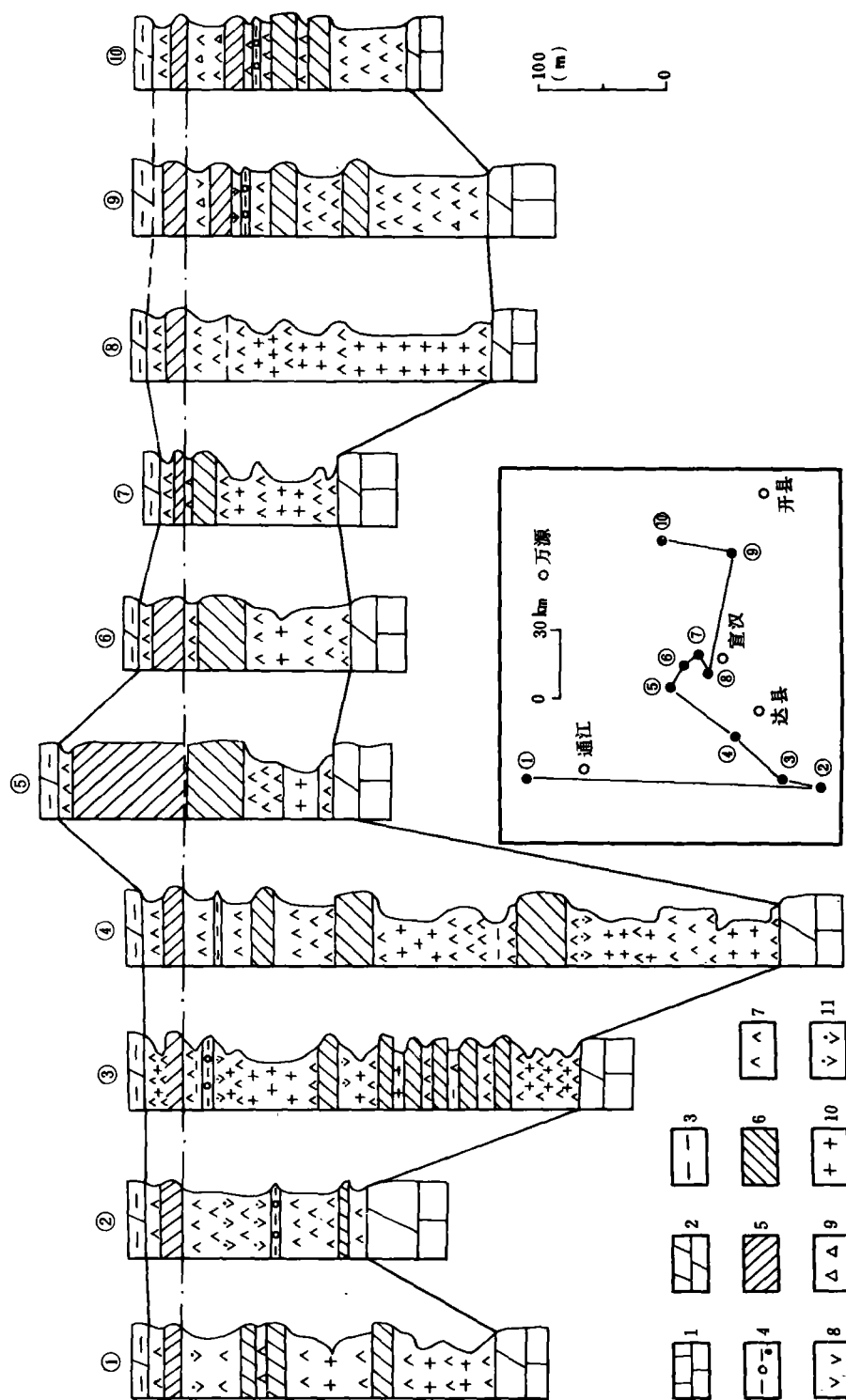


图9 $T_{1j^1}-T_{2l^2}$ 蒸发岩系剖面结构示意图

1. 石灰岩; 2. 白云岩; 3. 泥云岩; 4. 粘土岩; 5. 石膏岩; 6. 硬石膏; 7. 碳酸盐岩; 8. 杂卤石岩; 9. 角砾岩; 10. 石盐岩; 11. 杂卤石岩

Fig. 9 Sketch to show the sectional architectures of the $T_{1j^1}-T_{2l^2}$ evaporite series

1 = limestone; 2 = dolostone; 3 = muddy dolostone; 4 = claystone (muddy dolostone); 5 = gypsum rock; 6 = T_{1j^1} -carbonate rock; 7 = T_{1j^1} -carbonate rock; 8 = polyhalite rock; 9 = breccia; 10 = halite; 11 = polyhalite rock

卤层及其产卤量明显地受控于被圈闭的碳酸盐体规模、储集性能及构造变动时的破坏程度。

富钾卤水的储集也取决于地层的含钾性,即只有在含钾的蒸发岩系之碳酸盐夹层中才可能有富钾卤水,它具有明显地层控特点。低孔渗率(一般小于5%)的原生孔隙及次生溶孔型孔隙难于使分散状态的卤水富集,而真正能储集的只有裂隙型孔隙。裂隙型孔隙岩石的储集性能又受控于构造变动。总而言之,富钾卤水的储集取决于蒸发岩地层的含钾性、碳酸盐夹层的储集性能及圈闭卤水体的构造控矿条件。在构造成熟度中等、目的层圈闭良好的裂隙发育部位,才有利于富钾卤水的储集。

4 钾盐前景评估

4.1 钾盐成矿及找矿标志

1. 地球化学异常 当石盐中的 $w(\text{Br}^-)$ 质量分数达到 $250 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 或 $\text{Br} \cdot 10^3/\text{Cl}$ 值达到0.4以上及 $w(\text{K}^+)$ 质量分数 $\geq 0.0139\%$ 时, K^+ 、 Br^- 同步增长,并开始钾矿物析出,视为石盐的地球化学钾异常。

2. 稳定硫同位素异常 三叠系硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值从 T_1j^2 的34.9‰逐渐贫化至 T_2l^4 的14.9‰^[13],与国外钾盐矿床比较^[15],指示 T_2l^4 有可能出现高咸化阶段钾盐矿物。

3. 地球物理异常 地球物理测井中显示蒸发岩的钾放射性异常,放射强度60~160API,约相当于6~16伽马。

4. 水化学异常 溶滤水的水化学特征系数(表2) $\text{Br} \cdot 10^3/\text{Cl}$ 4.5~12.5, $\text{K} \cdot 10^3/\text{Cl}$ 28~237, $\text{K} \cdot 10^3/\Sigma\text{M}$ 16~136, K/B 3.9~19.1,分别与国外标准0.67~0.83, $>20.6 \sim 10$, 1.3~22.4相比^[14],显示高异常,预示深部有固相硫酸钾盐存在。

表2 中外卤水水化学特征系数对比表

Table 2 Comparison of the distinctive hydrochemical coefficients for the brines from some places of China and the world

序号	矿点、矿床名称	国家	地层	水化学特征系数					矿化度(g/l)	含钾量(g/l)
				$\text{K} \cdot 10^3/\Sigma\text{M}$	$\text{K} \cdot 10^3/\text{Cl}$	K/Br	$\text{Br} \cdot 10^3/\text{Cl}$	NNa/NCl		
1	达县亭子铺	中国	T_2l^{1-1}	24.10	48.06	—	—	0.81	344.99	10
2	宜汉付家山	中国	T_2l^{1-2}	16.84	28.39	6.31	4.5	0.90	255.84	4
3	宜汉川25井	中国	T_1j^{5-1}	75.25	128.51	15.50	8.29	0.77	352.69	25
4	邛崃平落坝	中国	T_2l^{4-2}	136.15	237.83	19.05	12.48	0.71	382.22	49
5	斯捷布尼克	乌克兰	N	34.7~41.9	53.3~65.2	—	—	0.1~0.39	276~316	9~13
6	普里皮亚特	乌克兰	N	—	2.4~5.9	—	11~19	—	317~422	6~11
7	上卡姆	俄罗斯	P	41.9~74.3	63.9~117.0	1.3~3.1	22.7~67.6	0.09~0.16	300~323	12~22
8	斯塔罗宾	白俄罗斯	D	42.2~123.4	66.2~208.8	6.5~22.4	8.8~11.4	0.08~0.49	295~330	13~38
9	帕拉多克斯	美国	S	—	7.8~44.4	—	6.4~66.7	—	136~421	20~33
10	涅帕	俄罗斯	E	53.2~59.2 (49.95)	53.4~94.4 (79.30)	3.19	19.7~26.4 (24.60)	0.25 (0.03)	599 (423.08)	12~16

5. 钾矿物异常 在蒸发沉积序列中已经发现杂卤石、无水钾镁矾等钾盐成矿及找矿的直接标志。

4.2 钾盐成矿预测

当前的讨论需要回答的主要问题是三叠系可能形成的是什么类型的钾盐? 本文的基本结论:不是氯化物钾盐,而是硫酸盐钾盐。有以下依据:

1. 从海洋的变化及地质时代看,自600Ma来,世界上的海水成分发生了本质的变化:二叠纪前的洋水成分为 $\text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{NaHCO}_3 - \text{RCl}$ 型,二叠纪至今则为 $\text{Mg} \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{RCl}$ 型。这与全球钾盐地层的分布恰好相吻合,即前寒武系及古生界主要为氯化物钾盐,而中生界则主要是硫酸盐型钾盐。

2. 从蒸发沉积盆地看,三叠纪蒸发盆地是在碳酸盐台地基础上形成的浅水浅盆,氯化物盐盆分布面积仅为硫酸盐盆面积的10%,基本上还是硫酸盐盆地。

3. 从沉积组合及沉积序列看,蒸发岩系的岩石组合为白云岩、硬石膏岩及石盐岩,沉积序列为云→膏→盐及膏→盐的频繁韵律层,其中硬石膏总量为60%~95%,指示海水的频繁交替及浅盆性质。从沉积记录及沉积时间看,主要还停留在石膏沉积阶段。

4. 从水文地球化学看,三叠系溶滤水水化学特征系数 $\text{Br} \cdot 10^3/\text{Cl}$ 、 $\text{K} \cdot 10^3/\text{Cl}$ 、 $\text{K} \cdot 10^3/\Sigma\text{M}$ 、 K/Br 值分别为4~12, 28~237, 16~136, 3~19,大都达到或超过国外硫酸盐型钾盐矿床淋滤水的钾异常标准,指示深部有硫酸钾盐。从川东氯化物型溶滤水化学组分统计看,出现 K^+ 与 Mg^{2+} 、 K^+ 与 SO_4^{2-} 离子呈正相关关系,而 K^+ 与 Cl^- 离子则呈负相关关系(图10),也说明深部钾盐不是氯化物型,而是硫酸盐型。

5. 从盐类矿物看,当前发现的钾盐矿物有杂卤石、无水钾镁矾、硫锶钾石及多钙钾石膏等,全部属于硫酸盐型钾矿物。从沉积序列看,当石盐沉积的 Br^- 值达到 $250 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 丰度时,剖面上出现的不是钾石盐,而是以杂卤石、无水钾镁矾为主的硫酸钾盐。

综合上述可以比较肯定,三叠纪形成、保存的钾盐不会是氯化物型钾盐,而只能是硫酸盐型钾盐。

4.3 硫酸钾盐的应用效果

世界上历来比较重视利用钾石盐来生产钾肥,但近年来有用硫酸钾盐生产钾肥的发展趋势。三叠系杂卤石岩深埋地腹,难以开采,但浅部保存的杂卤石依然得到合理的开发利用,并进行了肥效试验,取得了较好效果。使用杂卤石矿粉后农经作物的增产幅度为5%~37%,其中小麦增产10%~18%,水稻增产11%~37%,花生、油菜、棉花、芝麻增产5%~9%,甘蔗增产5%~21%,烟草增产8%~26%,西瓜增产16%~28%等等,可见增产效果比较明显。

施用 K_2SO_4 矿粉,有提高和增强作物抗旱、抗倒伏、抗病虫害的能力,有增加含糖量,改善作物质量,提高果类储存耐久性等多种功能。比之于用钾石盐生产的钾肥,杂卤石矿粉肥效期更长,也不板结土壤。也许更为重要的是,杂卤石矿开采及加工工艺简便,回收率可达99%,所有成分都可利用,无尾矿及废弃物处理之忧,成本低廉。

4.4 钾盐找矿前景

根据钾盐地质背景、成矿模式及找矿标志的初步研究,预测三叠系钾盐找矿的有利层位是嘉陵江组的 T_1j^4 、 T_1j^5 段及雷口坡组的 T_2l^1 、 T_2l^4 段,其中 T_1j^{5-2} 及 T_2l^{4-2} 段为主要目的层。成钾有利区为四川盆地,包括成都(I_1)、达县(I_2)、南充(II)、垫江(III_1)、万县(III_2)、自贡(IV_1)、江油(IV_2)、巴中(V_3)、大竹(IV_4)、邻水(V_5)、江北(V_6)等次盐盆(图11),尤其以构造分异及钾异常明显的宣汉—达县地带及成都—洪雅地带最为有利。在川东北主要是找浅部杂卤石及富钾卤水,具体指华蓥山、铜锣峡及明月峡背斜北段埋深小于1000m的杂卤石及低背斜区 $\text{T}_1\text{j}^{5-2} - \text{T}_2\text{l}^{1-2}$ 层位的富钾卤水;在西部主要是在盆地边缘寻找有石膏保存地带的

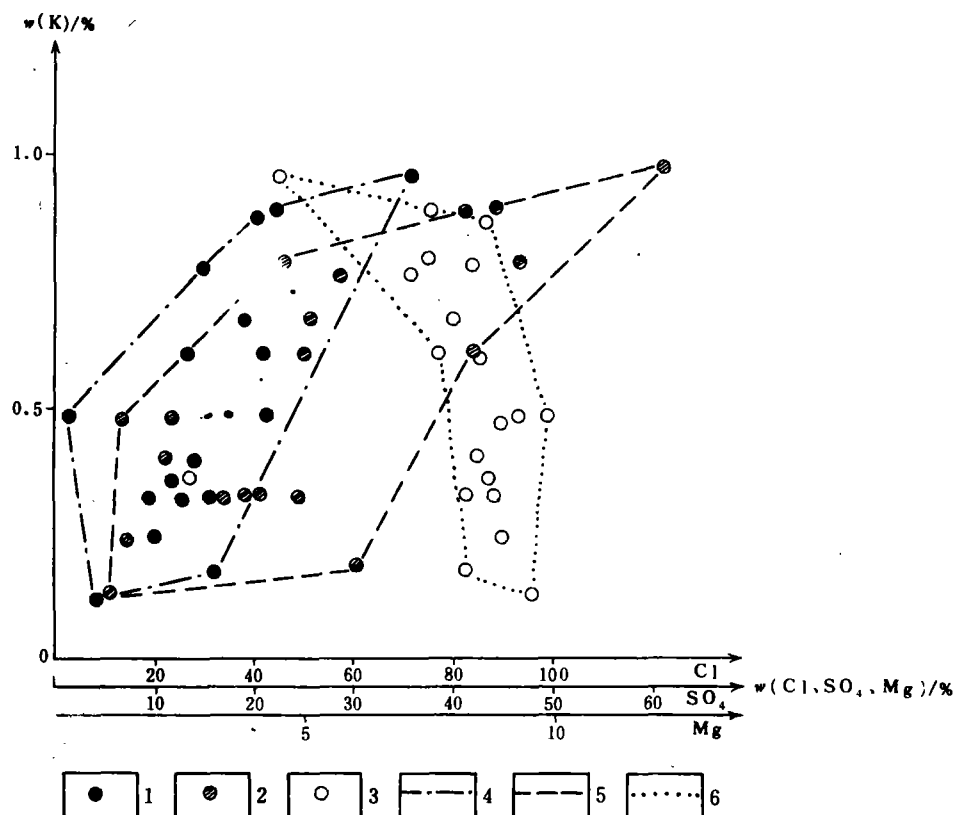


图10 氯化物型溶滤水K-SO₄-Mg、Cl关系图

1. K-SO₄ 落点位置; 2. K-Mg 落点位置; 3. K-Cl 落点位置; 4. K-SO₄ 关系域; 5. K-Mg 关系域; 6. K-Cl 关系域

Fig. 10 K-SO₄, Mg and Cl diagram of the chloride-type leachwater

1=K-SO₄ spots; 2=L-Mg spots; 3=K-Cl spots; 4=K-SO₄ field; 5=K-Mg field; 6=K-Cl field

杂卤石及T₂⁴层位的富钾卤水。因此,钾卤资源的找矿模型应是油气钾卤兼探。浅部着重找杂卤石,深部勘查富钾卤水。以浅为主,深浅结合,以油气先导,钾卤为目的,综合找矿,探采结合,努力促进硫酸钾盐及富钾卤水的开发利用,变资源为商品,以期取得较好的找矿效益和经济效益。

参加地质调查的还有刘世万、陈林蓉,参加水溶试验的有王琪英、陈邦安,参加钾矿物鉴定的有严肃容、喻显珍,成都地矿所杨大雄作同位素年龄测定,研究员吴应林先生对文稿的修改惠予指导帮助,特此表示由衷地感谢。

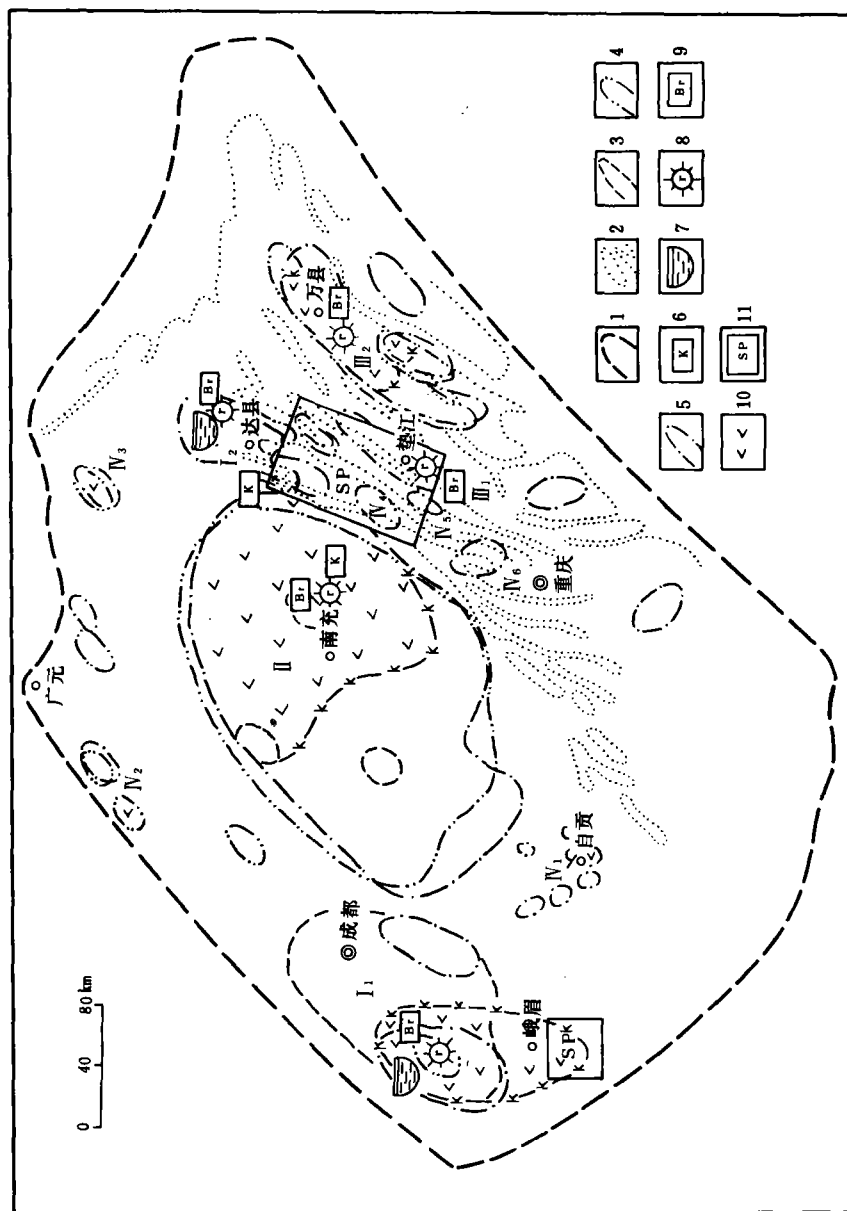


图11 钾盐成矿远景预测图

1. 盆地边界; 2. 盆内三叠系背斜构造; 3. T_2J^4 次盐盆或石盐分布区; 4. $T_1J^{5-2} - T_2J^{1-1}$ 次盐盆或石盐分布区; 5. T_1J^4 次盐盆或石盐分布区; 6. 无水钾镁矾区; 7. 高钾卤水区; 8. 具放射性钾异常区; 9. 溴异常区; 10. 杂卤石区; 11. 浅部杂卤石远景区

Fig. 11 Prognostic map of the potash salt perspectives in the study area

1 = basin boundary; 2 = intrabasinal Triassic anticlinal structures; 3 = extent of minor salt basins or halite in T_2J^4 ;

4 = extent of minor salt basins or halite in $T_1J^{5-2} - T_2J^{1-1}$; 5 = extent of minor salt basins or halite in T_1J^4 ; 6 = langbeinite field;

7 = K-rich brine field; 8 = radioactive K anomalous field; 9 = Br anomalous field; 10 = polyhalite field; 11 = perspective shallow-seated polyhalite field

参 考 文 献

- 1 杨遵义等. 中国的三叠系. 地质学报, 1982, 56 卷1 期.
- 2 曲一华等. 盐类矿物鉴定手册. 北京: 地质出版社, 1979
- 3 刘宝珺等. 岩相古地理基础及研究方法. 北京: 地质出版社, 1985
- 4 勒斯勒, H·J, 等. 地球化学表. 北京: 科学出版社, 1985
- 5 袁见齐等. 盐类沉积的演化阶段及其特征. 北京: 科学出版社, 1984
- 6 皮埃尔, C., 海相卤水与陆地水混合的一种早期成岩作用. 国外矿床地质, 1992, 第60 期.
- 7 布拉特, H·. 等. 沉积岩成因. 北京: 科学出版社, 1978
- 8 吴应林等. 上扬子地台早中三叠世岩相古地理及沉积矿产的环境控制. 重庆: 重庆出版社, 1989
- 9 沃克, R·G·. 沉积相模式. 地质部情报研究所, 1979
- 10 王东升. 川25 井富钾卤水的水文地球化学特征及找钾指示意义研究. 水文地质研究所所刊, 1985, 第3 号.
- 11 博歇特, J·A·. 盐类矿床. 北京: 地质出版社, 1976
- 12 谢德格, A·E·. 地球动力学原理. 北京: 科学出版社, 1977
- 13 黄建国等. 四川盆地三叠纪蒸发岩地层硫同位素的分布. 沉积学报, 1989, 7 卷2 期.
- 14 柯仁涅夫斯基, S·M·. 与盐类建造有关的矿产预测方法. 地质科学院情报所, 1974
- 15 Richter-Bernbur G. Geology of saline deposits, UNESO Paris, 1972

The Triassic potash deposits in China: an example from the Sichuan Basin

Huang Jianguo

No. 2 Geological Party, Southwest China Bureau of Petroleum Geology

ABSTRACT

The Triassic evaporites occupy an area of more than 1 million km² in southern China. They have found to be involved in potash salts and K-rich brines, including polyhalite, langbeinite, kalistrontite and geogeyit. The mineralization degrees of the K-rich brines range between 255 and 382 g/l, and K contents vary from 4 to 49 g/l. The evaporite basins are generally delimited by palaeotectonics and palaeogeography, and show a depositional evolution from open platform, through restricted platform, to barrier lagoon and finally to salt lake. The potash deposits thus have undergone several stages of evolution. The K in the K-rich brines is derived mainly from the leaching of potash sulphate, and subordinately from the concentrated brines through evaporation and volcanic ash. The K isotopic age determinations range between 156 and 210 Ma, and 150 and 264 Ma, respectively, indicating a same source of solid- and liquid-phase potash salts. It is inferred from geological background and mineral-forming environments that the Triassic potash salts only comprise one type, i.e. potash sulphate. The target horizons consist dominantly of T₁j⁵⁻² and T₂l⁴⁻², and mineralization zones are confined to the eastern part of the Sichuan Basin. The storage of K-rich brines depends upon the K-bearing potentiality of the evaporitic strata, fissure development in the carbonate rocks and structural controls on the potash deposits. The proposed model for the prospecting and exploration of the potash deposits suggests that further work should be conducted on both the potsh deposits and oil-gas deposits.

Key words: Triassic, evaporite, salt deposits, geological characteristics of potash deposits, K-bearing brine evolution, potash salt type, prospecting model