羌塘盆地侏罗系元素地球化学特征与成盐层位分析

潘佳秋1),宋春晖1),鲍晶1),马丽芳1),颜茂都2),方小敏2),应红1),杨一博2)

1) 兰州大学地质科学与矿产资源学院,甘肃省西部矿产资源重点实验室,兰州,730000;

2) 中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室,北京,100101

内容提要:近年来在羌塘盆地侏罗系发现的大面积石膏层位和高盐度的盐泉水,显示羌塘盆地侏罗纪可能具 备成盐地质条件。本文通过对羌塘盆地雁石坪地区侏罗系元素地球化学分析,揭示了羌塘盆地侏罗纪特提斯洋海 平面与古气候变化以及蒸发岩沉积条件。全岩 Fe/Mn 比值和 CaCO3含量揭示布曲组和索瓦组沉积时期,由于特 提斯洋海水入侵,盆地沉积大量海相碳酸盐岩,盆地海平面处于高位时期;雀莫错组和夏里组沉积时期处于海退后 的海平面低值期。酸不溶态元素比值 K2 O/Al2 O3、Na2 O/Al2 O3以及 Na2 O/K2 O 和化学蚀变指数(CIA)揭示雁石 坪地区布曲组和夏里组沉积时期气候相对干旱,而雀莫错组和索瓦组沉积时期相对湿润。可溶态 K⁺、Na⁺含量仅 在夏里组出现高值,指示了该沉积时期有利于成盐。综合物源、古构造、古气候和古地理条件,本文认为羌塘盆地 侏罗系夏里组是最具成盐潜力的层位,今后成盐研究重点应该放在盆地中一西部地区侏罗系夏里组。

关键词: 羌塘盆地;沉积物;元素地球化学;成盐条件;侏罗纪

羌塘盆地位于青藏高原北部、特提斯-喜马拉雅 构造域东段,是在前寒武纪结晶基底和古生界褶皱 基底之上发育起来的以中生界海相沉积为主的一 个残留盆地(王剑等,2004,2010a,2010b),总面积 达 18×10⁴ km², 为青藏高原最大的中一新生代沉 积盆地,也是我国侏罗纪海相地层发育最好的地 区(夏国清等,2010)。与羌塘盆地并列于特提斯 洋北缘,具有相同大地构造背景的中亚卡拉库姆 盆地已经发现了巨型侏罗纪钾盐矿床。近年来的 野外地质调查也在羌北盆地发现了数处规模不等 的侏罗系石膏层和石膏丘露头(苏铁牛等,2007; 李亚林等,2008;李忠雄等,2008,2010;吴滔等, 2010),特别在羌北盆地发现多处盐泉(郑绵平等, 2010;牛新生等,2013),盐泉水成分达到了硫酸镁盐 沉积,接近钾盐的沉积指标(郑绵平等,2010)。因 此,羌塘盆地侏罗纪是否具有形成海相盐类矿床的 条件就成为重要的研究课题。本文通过对羌塘盆地 北部出露完整的雁石坪剖面侏罗系元素地球化学分 析,结合构造背景,从沉积环境与气候的角度分析其 可能成盐时段,为进一步研究羌塘盆地侏罗系蒸发 岩沉积提供依据。

1 区域地质概况与研究剖面

差塘盆地夹于西金乌兰-金沙江缝合带和班公 湖-怒江缝合带之间,南起冈底斯山-念青唐古拉山, 北至喀喇昆仑山-可可西里山,西以公珠错一革吉-多玛一线与阿里西部山地为界。以区内隆起带为 界,可以把羌塘盆地划分为北羌塘坳陷、南羌塘坳陷 和中央隆起带三个二级构造单元(李廷栋等,1985; 李才等,1996;黄继钧,2001)(图 1a)。盆地内主要 出露地层为三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系 和第四系,其中侏罗系广泛发育,地层出露全、厚度 大,其顶部被白垩系或古近系、新近系覆盖,底部与 三叠系或以下地层呈不整合接触。

研究区位于北羌塘盆地唐古拉山雁石坪镇一带,该区侏罗系露头良好、地层出露完整、层序清楚、 分层标志较为明显、化石丰富,是研究羌塘盆地侏罗 系的典型剖面。雁石坪剖面侏罗系厚度大于 3108m (图 1b、c),从下至上依次为雀莫错组、布曲组、夏里 组、索瓦组和雪山组,它们之间均呈整合接触。其中 雀莫错组(J₂q)厚度 1378m(实测剖面 0~1377m), 底部与下伏三叠系结扎群呈断层接触,是一套岩性

收稿日期:2015-07-12;改回日期:2015-08-20;责任编辑:周健。

注:本文为国家重点基础研究发展计划"973"项目(编号 2011CB403003,2013CB956403)、中国科学院战略性先导科技专项(编号 XDB03020402)和国家自然科学基金(编号 41272128)联合资助成果。

作者简介:潘佳秋,男,1988年生。硕士研究生,构造地质学专业。Email:panjq2012@lzu.edu.cn。





较为稳定的杂色碎屑岩,以紫红色、灰绿色砂岩、泥 岩为主,夹泥晶灰岩、生物碎屑灰岩或生物灰岩,具 水平层理、平行层里、交错层里和波状层理等,表现 为三角洲相沉积环境与潮坪相沉积环境;布曲组(J₂ b)厚度 668m(实测剖面 1378~2045m),是一套浅海 相碳酸盐建造,由灰黑色泥灰岩、微晶灰岩、生物灰 岩、生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩、亮晶砂屑灰岩夹少量 粉砂岩组成,具块状构造或水平层理,是典型的碳酸 盐台地相沉积环境;夏里组(J₂x)厚度 634m(实测剖 面 2046~2680m),岩性以紫红、灰绿色砂岩、粉砂 岩、泥岩为主,夹灰黑色、灰黄色砂质灰岩、泥灰岩和 生物灰岩和石膏层,层内发育水平层理、波状层理、 沙纹交错层理、潮汐交错层理等,层面见波痕和干裂 构造,以潮坪相沉积环境为特征;索瓦组(J₃s)厚度 422m(实测剖面 2681~3102m),岩性以大套灰黑色 碳酸盐岩夹灰绿色细碎屑岩组成,发育水平层理或 块状构造,以碳酸盐台地相沉积环境为特征;雪山组 (J₃x)厚度大于 6m(实测剖面 3103~3108m),构成 雁石坪向斜核部(大部分地层已被剥蚀),是一套以 紫红色碎屑岩为主夹少量灰岩的地层。

2 实验方法

本文对雁石坪剖面侏罗系中 2346 个样品进 行了水溶的 Na⁺和 K⁺测试,同时以大致 10m 间距 对剖面中 300 个沉积物样品分别进行醋酸溶解元 素和全岩样品元素含量分析。首先将样品磨碎至 200 目,称取 0.4~0.5g 样品放入 15mL 离心管, 加入 10mL 超纯水,摇晃均匀,静置 24h,离心后提 取上清液定容进行 Na⁺和 K⁺分析。另称取 0.2~ 0.3g 全岩样品放入 15mL 离心管,加入 10%的醋酸 10mL,摇晃均匀,静置 24h,离心后提取上清液 定容进行酸溶元素 Ca、Sr 和 Mg 分析。全岩分析 采取高压密闭混合酸溶法,每一批次使用标样和 空白作为质量控制。称取样品 20mg 于 Teflon 容 器中,加少量超纯水润湿,加入 1mL 硝酸和 1mL 氢氟酸于 Teflon 容 器中,用超声波振荡器振荡 20min,于 150℃加热板上蒸至近干后再次加入 1mL 硝酸和 1mL 氢氟酸于 Teflon 容器中,用超声 波振荡器振荡 20min,放入不锈钢罐中,拧紧后置 于 190℃烘箱中消解 24h;取出冷却后将 Teflon 容 器置于 150℃加热板上蒸至近干,加 1mL 硝酸蒸 至近干,重复两次。加 2mL 硝酸和 3mL 超纯水, 放入不锈钢罐中,拧紧后置于 150℃烘箱中提取 24h 以上,取出定容进行元素含量分析。上述前处 理所获取样品在中国科学院青藏高原研究大陆碰 撞与高原隆升实验室使用电感耦合等离子体发射 光谱仪(ICP-OES Leeman labs Prodigy-H)进行测 试。重复样分析表明所有测试元素含量相对标准 偏差均小于 2%。

3 结果和讨论

3.1 沉积物化学元素含量分布特征

雁石坪剖面侏罗系 2346 个沉积物水溶 K⁺、 Na⁺含量,300 个沉积物酸溶元素 Ca、Mg、Sr 含量、 全岩 Fe/Mn、酸不溶(残渣,即全岩元素含量减去酸 溶元素含量) K₂ O/Al₂ O₃、Na₂ O/Al₂O₃和 Na₂ O/ K₂O 元素比值以及化学蚀变指数(CIA)随深度变化 特征见图 2,侏罗系各组数据统计见表 1。

表 1 雁石坪剖面侏罗系各组元素含量与元素比值统计

Table 1	The statistical	parameters of	geochemical	proxies in	n each	formation of	Yanshiping sec	ction
---------	-----------------	---------------	-------------	------------	--------	--------------	----------------	-------

		水溶离子		酸溶			全岩	残渣			
		K ⁺	Na ⁺	Ca	Mg	Sr	Fe/Mn	$K_2O/$	Na ₂ O/	Na ₂ O	CIA
		$(\times 10^{-6})$	$(\times 10^{-6})$	(%)	(%)	$(\times 10^{-6})$		$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$/\mathrm{K_2O}$	
雪山组	Min	95.27	27.48	0.318	0.017	12.94	88.55	0.183	0.026	0.133	77.59
	Max	130.6	61.06	4.724	0.074	91.43	290.6	0.195	0.036	0.198	79.56
	Avg	115.2	41.47	2.042	0.044	44.25	164.0	0.188	0.029	0.156	78.52
索瓦组	Min	18.38	8.998	1.901	0.073	33.00	12.59	0.113	0.020	0.089	64.70
	Max	338.6	415.3	30.70	0.589	463.7	181.8	0.221	0.123	0.939	78.33
	Avg	123.9	55.62	18.25	0.292	248.8	45.67	0.180	0.054	0.323	73.90
夏里组	Min	10.91	0.284	0.123	0.024	6.976	4.852	0.118	0.014	0.057	62.61
	Max	587.4	915.4	19.65	1.856	166.5	295.9	0.285	0.142	0.842	77.44
	Avg	174.2	70.26	5.638	0.135	55.86	107.8	0.233	0.064	0.301	71.57
布曲组	Min	2.051	4.024	0.121	0.020	7.212	11.91	0.095	0.009	0.034	53.49
	Max	315.2	112.3	35.81	1.753	780.2	498.7	0.308	0.217	2.281	79.35
	Avg	99.51	36.71	27.66	0.505	427.5	36.36	0.209	0.861	0.452	67.30
雀莫错组	Min	17.99	3.380	0.084	0.008	2.290	4.594	0.063	0.007	0.033	52.27
	Max	445.2	239.3	21.21	1.770	44.09	1019	0.261	0.243	2.337	84.44
	Avg	150.6	63.26	1.634	0.083	33.59	188.6	0.180	0.083	0.510	73.53

水溶 Na⁺和 K⁺在夏里组含量明显高于其他各 组。从雀莫错组到布曲组含量有明显降低,布曲组 到夏里组含量有明显升高,达到剖面含量的最大值, 夏里组到索瓦组含量有下降趋势,索瓦组到雪山组 含量继续降低(图 2)。尽管二者在夏里组都呈现出 剖面中的最高值,但相关性上并不显著(图 3a)。

醋酸溶解组分的 Ca、Sr 和 Mg 含量在布曲组明 显高于其他各组。从雀莫错组到布曲组含量十分显 著的升高,布曲组到夏里组含量十分显著的降低,夏 里组到索瓦组含量明显升高,索瓦组到雪山组含量 明显降低(图 2)。Ca、Mg、Sr 含量的相关分析表明 (图 3b~d),Ca 与 Sr 表现出非常好的正相关,体现 了 Sr 和 Ca 相似的地球化学行为。Mg 与 Ca 以及 Mg 与 Sr 整体上也呈正相关关系,但部分 Mg 与 Ca 和 Sr 存在负相关(Ca 和 Sr 为相对低值时而 Mg 为 相对高值),这可能与碳酸盐岩被富含镁质海水作用 使方解石被白云石交代形成白云质石灰岩有关。

全岩样品 Fe/Mn 比值在雀莫错组最高(图 2)。 雀莫错组到布曲组比值显著降低,布曲组到夏里组 有明显升高,夏里组到索瓦组出现较为明显的降低, 索瓦组到雪山组再次升高。

夏里组酸不溶组分 K₂ O/Al₂ O₃ 比值高于其他 各组(图 2),从雀莫错组到夏里组含量升高,夏里组 到雪山组含量降低。Na₂ O/Al₂ O₃ 和 Na₂ O/K₂ O 随



图 2 雁石坪剖面沉积物水溶、酸溶组分全岩、残渣元素比值随深度变化曲线 Fig. 2 The lithology and the depth profiles of geochemical proxies in Yanshiping section

深度变化类似(图 2),从雀莫错组到布曲组含量升 高,布曲组到夏里组含量开始降低,夏里组到雪山组 持续降低。

3.2 海平面变化分析

Fe 与 Mn 的化学性质差异较大, Fe 的化合物 易在河口或滨岸地带富集,而 Mn 的化合物稳定性 比 Fe 的化合物强,可经过长距离迁移并在远离滨 岸的盆地中沉积下来,因此 Fe/Mn 比值可做为离岸 距离(或水深)的标志。具体而言,Fe/Mn 比值越大 水体越浅,Fe/Mn 比值越小水体越深(刘平略等, 1986; 王春连等, 2012)。剖面全岩 Fe/Mn 比值变化 可推断研究区从雀莫错组到雪山组,相对海平面变 化大致经历了低一高一低一高一低的变化特征。全 岩低 Fe/Mn 比值与富含浅海相碳酸盐建造的布曲 组和索瓦组所对应,同时也与酸溶组分高 Ca 和 Mg 含量对应,代表该时期海侵高海平面下丰富的碳酸 盐沉积。反之,雀莫错组、夏里组和雪山组高 Fe/ Mn 比值对应于酸溶组分低 Ca 和 Mg 含量,反映该 区低海平面时期碳酸盐沉积相对匮乏。上述海平面 变化趋势与前人根据沉积相和沉积物岩性获得的古 水深基本一致(常承法等,1992;李鸿睿等,2005;张 玉修等,2006,2007)。因此,该区侏罗纪特提斯海经 历了雀莫错组顶部到布曲组底部以及夏里组顶部到 索瓦组底部二次海侵、布曲组顶部到夏里组底部以 及索瓦组顶部到雪山组底部二次海退过程。

3.3 古气候变化分析

对比雁石坪剖面沉积物和上部大陆地壳

(UCC)主要氧化物含量(McLennan, 2001)有助于 揭示母源物质经过风化之后的元素富集和亏损程 度。如果某种氧化物的样品/UCC 比值大于 1,说 明该种氧化物相对富集,小于1则说明相对亏损。 分别把雁石坪剖面的五个组各氧化物含量的平均值 与 UCC 进行比较,可以看出布曲组和索瓦组 CaO 高度富集,夏里组 CaO 中度富集。这主要源于布曲 组和索瓦组大量的碳酸盐沉积,以及夏里组石膏层 (CaSO₄ • 2H₂O)的存在。由于大量碳酸盐含量在 布曲组和索瓦组的出现,使得这两个组的以陆源碎 屑来源为主的元素含量偏低(如 $Al_2 O_3$, $K_2 O$ 和 Fe₂O₃)。整个剖面各个组都呈现出 Na₂O 的高度亏 损,在雪山组、雀莫错组呈现 CaO 的相对亏损之外, 反应了 Na 和 Ca 这两种活动性元素在风化过程中 的流失。其余氧化物含量都与上部大陆地壳大致相 当(图4)。

通过雁石坪剖面沉积物氧化物含量与 UCC 的 比值可以说明物源碎屑在搬运至盆地过程中,Ca、 Na 是比较活泼的元素,可用来指示母岩物质化学风 化强弱和古气候状况(鲁新川,2007)。Al 在化学风 化作用过程中相对稳定,属于难迁移元素,通常将其 他元素与其相对含量的比值作为风化强度的判别依 据,易迁移元素与 Al 的比值随着化学风化作用的 加强而减小。而 K 和 Al 在本剖面的相似性,如剖 面中 Na₂O/K₂O 和 Na₂O/Al₂O₃ 的一致性变化, K₂O/Al₂O₃ 和 Na₂O/Al₂O₃ 的不同变化,共同说明



图 3 雁石坪剖面沉积物水溶 K⁺、Na⁺含量相关图与酸溶 Ca、Mg、Sr 含量相关图 Fig. 3 Correlation plots of K⁺-Na⁺ in water leaching (a), and Ca-Mg-Sr in acid leachate (b,c,d) of the Yanshiping section sediments



Yanshiping section sediments and the UCC

了当时的风化强度不足以使含钾矿物风化或者迁出风化剖面, K和 Al都表现为相对稳定的特征, 因此

本文不使用 K₂ O/Al₂ O₃ 作为化学风化的指标。另 一个广泛应用的化学风化指标是由 Nesbitt 等 (1982)在研究加拿大元古宙 Huronian 超群碎屑岩 时提出的:

化学蚀变指数 CIA=Al₂O₃/(Al₂O₃+Na₂O+ K₂O+CaO*)×100

式中氧化物为摩尔质量百分比, CaO*指硅酸盐矿 物中的氧化钙含量。CIA 值越高, 源区化学风化越 强, CIA 值越低, 源区化学风化越弱。由于 CIA 可 以灵敏反应上地壳主要造岩矿物长石在风化过程中 向粘土矿物的转化, 因而被广泛应用(Nesbitt et al., 1982; Rieu et al., 2007; Yan et al., 2010; Diskin et al., 2011; Roy et al., 2013; Umar et al., 2014)。

本次研究中, CIA 与 Na₂ O/Al₂ O₃和 Na₂ O/K₂ O

的变化趋势大致呈反相关(图 2), 雀莫错组下部 CIA 值较高, Na_2O/Al_2O_3 和 Na_2O/K_2O 较低, 到雀 莫错组上部 CIA 持续降低, 到布曲组 CIA 值达到最 低, 夏里组 CIA 值有小幅度升高, Na_2O/Al_2O_3 和 Na_2O/K_2O 开始降低, 索瓦组 CIA 继续升高, Na_2O/Al_2O_3 和 Na_2O/K_2O 持续降低, 达到雀莫错组水平。 CIA 与 Na_2O/K_2O 的相关图显示出 CIA 与 Na_2O/K_2O 府有关系(图 5), 共同反映了雁 石坪地区流域的化学风化及气候变化过程(Liu et al., 2013)。





雁石坪剖面沉积物的 Al₂O₃-(CaO*+Na₂O)-K₂O(Nesbitt et al.,1984;Fedo,1995)三角图解如 图 6 所示。图中 UCC 指向陆源页岩 PAAS 的方向 代表了典型的大陆初期风化趋势。最初的风化趋势 准平行于 A—CN 线,这主要是因为 Na、Ca 从斜长 石中迁移的速度通常要远大于 K 从微斜长石中迁 移的速度,导致 Na、Ca 大量淋失,高岭石、伊利石和 蒙脱石是该阶段的主要产物。风化趋势抵达 A—K 线意味着斜长石完全风化消失,此时的风化产物以 石英、高岭石、伊利石和钾长石为主。随着风化程度 的加剧,K 从含钾矿物中释放出来,剖面中的钾长 石和伊利石进一步风化而向含铝矿物(如高岭石或 三水铝石)转变,风化趋势线平行于 A—K 线。最 终,风化趋势向 A 顶点靠拢并到达 A 顶点,该阶段 的风化产物主要包括石英、高岭石、三水铝石和少量 铁钛氢氧化合物。由图 6 可知,雁石坪剖面各个组 的 A-CN-K 投点图基本都平行于 A—CN 连线,说 明当时气候整体相对比较干旱,化学风化强度比较 弱,并没有达到含 K 矿物(钾长石和伊利石)风化的 阶段,这也解释了之前 K₂O/Al₂O₃ 与 Na₂O/Al₂O₃ 呈现出不同变化趋势的原因。

综合上述分析, 雀莫错组下部 CIA 值较高, Na₂O/Al₂O₃和 Na₂O/K₂O 较低, 化学风化作用相对较强, 气候相对湿润。之后持续降低, 到布曲组 CIA 值达 到最低, 化学风化作用最弱, 属于气候干旱时期; 夏 里组 CIA 值有小幅度升高, Na₂O/Al₂O₃和 Na₂O/K₂O 开始降低, 化学风化作用相对较弱, 气候相对 干旱; 索瓦组 CIA 继续升高, Na₂O/Al₂O₃和 Na₂O/K₂O 持续降低, 达到雀莫错组水平, 化学风化作用 相对较强。

3.4 成盐条件分析

海相沉积成盐的条件是十分苛刻的,必须同时 满足构造稳定、有充足的物源补给、相对干旱的古气 候和有利的沉积地形等多方面因素(刘成林等, 2006,2010;Warren,2010;曹养同,2010;张华, 2014)。侏罗纪羌塘盆地隶属于特提斯-喜马拉雅构



图 6 雁石坪剖面沉积物 A-CN-K 三角图解 Fig. 6 A-CN-K diagram of the sediments in the Yanshiping section



图 7 雁石坪剖面成盐潜力探讨 Fig. 7 The potential of thesalt mineralizing of the Yanshiping section

造域东段,与中亚含巨型侏罗纪钾盐矿床的卡拉库 姆盆地并列于特提斯洋北缘,该区域周边造山带较 为稳定(郑绵平等,2012)。研究区侏罗纪经历了二 次完整特提斯洋的海侵一海退旋回过程。海侵和海 退的旋回有利于把海水中的盐类物质沉积于盆地凹 陷地带,为盆地成盐提供了良好的物质供给。

中晚侏罗世羌塘盆地处于赤道以北低纬度区 (任海东等,2013),具备炎热干旱的有利成盐气候环 境(蔚远江等,2002;谭富文等,2003;郑绵平等, 2012)。其中雀莫错组高 Fe/Mn 比值以及低 Ca、 Mg含量共同说明该时期海平面低,而 CIA 值较高, Na₂O/Al₂O₃和 Na₂O/K₂O 较低,显示了该时期相 对湿润的气候,对成盐不利。布曲组 CIA 值最低, 属于气候干旱时期,但低 Fe/Mn 比值以及高 Ca、 Mg含量显示该时期为海平面最高时段,沉积环境 属开阔碳酸盐台地环境,可能不利于成盐作用进行。 夏里组 CIA 值较低,Na₂O/Al₂O₃和 Na₂O/K₂O 较 高,气候干旱,另外高 Fe/Mn 比值以及低 Ca、Mg含 量显示该时期海平面较低,沉积环境属相对封闭的 潮坪环境,有利于保留海水带来的成盐物质,并且盐 类离子(K⁺、Na⁺)含量(图 2 和图 3a)在夏里组处于 整个剖面的最高值,野外地层中夹有石膏层,共同指示了夏里组具成盐潜力。索瓦组 CIA 处于高值, Na₂O/Al₂O₃和 Na₂O/K₂O 相对较低,气候相对湿润,并且低 Fe/Mn 比值以及高 Ca、Mg 含量显示出 该时期高海平面特征,沉积环境为开阔碳酸盐台地 环境,不利于成盐作用进行。综合以上分析,羌塘盆 地侏罗系夏里组是最具成盐潜力的层位(图 7)。

由于羌塘盆地雁石坪地区实测天然露头剖面未 发现石盐、钾盐、杂卤石等矿物,根据古地理图(李永 铁等,2006),雁石坪处于羌北盆地东部边缘地区。另 外中晚侏罗世羌塘地块和拉萨地块在东发生碰撞,海 退方向由东向西,因此,未来盐类矿床寻找和研究的 目的层应以盆地中、西部侏罗系夏里组为突破。

4 结论

通过岩性、全岩 CaCO₃含量以及 Fe/Mn 值,约 束了羌塘盆地侏罗纪雁石坪地区海平面经历了低— 高一低一高一低的旋回特征。

利用沉积物酸不溶态活动元素与不活动元素的 比值和 CIA 指数,建立了羌塘盆地中晚侏罗世古气 候曲线:雀莫错组属于半干旱气候,布曲组属于干旱 气候,夏里组属于干旱气候,索瓦组属于半干旱 气候。

综合构造、物源、气候、古地理等因素,确定了羌 塘盆地夏里组地层最具成盐潜力。

参考文献

- 曹养同.2010.新疆库车盆地古近系一新近系蒸发岩系发育规律及 其金属成矿研究.中国地质科学院博士学位论文.
- 常承法,徐贵忠. 1992. 特提斯及青藏碰撞造山带的演化特点. 大陆岩石圈构造与资源,1:18.
- 黄继钧. 2001. 藏北羌塘盆地构造特征及演化. 中国区域地质, 20 (2): 178~186.
- 李才,和钟铧.1996.西形成羌塘地区几个地质构造问题.世界地 质,15(3):18~23.
- 李鸿睿,董瀚,石文礼,欧春生,王晓伟. 2005. 羌塘盆地侏罗纪-早白垩世沉积充填序列分析. 甘肃地质学报,14(2):35~42.
- 李廷栋,肖序常,李光岑,高延林,周伟勤. 1985. 略论青藏高原的 地壳构造和地壳演化. 大自然探索,2:012.
- 李亚林, 王成善, 李永铁. 2008. 西藏羌塘盆地侏罗系膏盐岩与油 气成藏. 石油学报, 29(2): 173~178.
- 李永铁,谭富文,王剑,郭祖军.2006.西藏羌塘盆地中侏罗世布曲 期及夏里期岩相古地理与油气远景.古地理学报,8(4):499 ~508.
- 李忠雄,杜佰伟,汪正江,付修根,段志明.2008. 藏北羌塘盆地中 保罗统石油地质特征.石油学报,29(6):797~803.
- 李忠雄,何江林,熊兴国,吴涛,白培荣.2010.藏北羌塘盆地上侏 罗一下白垩统胜利河油页岩特征及其形成环境.吉林大学学 报:地球科学版,40(2):264~272.
- 刘成林,王弭力,焦鹏程,陈永志. 2006.世界主要古代钾盐找矿实 践与中国找钾对策.化工矿产地质,28(1):1~8.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨. 矿床地 质, 29(4): 581~592.
- 刘平略,周厚清,康桂云.1986. 松辽盆地元素分布及其与沉积环 境的关系.大庆石油地质与开发,5(2):11~15.
- 鲁新川. 2007. 临夏盆地 14~4.4 Ma 湖相沉积物元素地球化学特 征与气候变化. 兰州大学硕士学位论文.
- 牛新生,陈文西,刘喜方. 2013. 羌塘盆地多格错仁地区盐泉地球 化学特征及成钾预测.现代地质,27(3):621~628.
- 任海东,颜茂都,孟庆泉,宋春晖,方小敏.2013. 羌塘盆地磁倾角 浅化校正及其在构造上的应用.地质科学,48(2):543~556.
- 苏铁牛,张维忠,张树岐,张辉.2007.西藏比洛错一带布曲组中段 育盐地层的地质特征.吉林地质,26(2):10~15.
- 谭富文,王剑,王小龙,杜佰伟.2003. 藏北羌塘盆地上侏罗统中硅 化木的发现及意义.地质通报,22(11):956~958.
- 王春连,刘成林,胡海兵,毛劲松,沈立建,赵海彤.2012. 江汉盆 地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉 积环境意义.古地理学报,14(2):165~175.
- 王剑,谭富文,王小龙,杜佰伟,陈明.2004. 藏北羌塘盆地早侏罗世一中侏罗世早期沉积构造特征. 沉积学报,22(2):198~205.
- 王剑, 付修根, 李忠雄, 熊松. 2010a. 北羌塘盆地油页岩形成环境

及其油气地质意义. 沉积与特提斯地质, 30(3): 11~17.

- 王剑,付修根,谭富文,陈明,何江林.2010b. 羌塘中生代(T₃-K₁)盆地演化新模式. 沉积学报,(5):884~893.
- 吴滔,熊兴国,易成兴,白培荣,贺永忠,刘贞才.2010.北羌塘坳 陷胜利河组膏岩沉积环境.新疆石油地质,31(4):376~378.
- 夏国清,伊海生,黄华谷,武向峰,惠博.2010.藏北雁石坪地区夏 里组米级沉积旋回及成因.成都理工大学学报:自然科学版, 37(2):133~139.
- 蔚远江,杨晓萍,雷振宇,张洪,陆万雨. 2002. 羌塘盆地查郎拉地 区中新生代古气候演化初探.地球学报,23(1):55~62.
- 张华. 2014. 东特提斯北支晚白垩世一古新世古海水沉积演化及成 钾条件分析. 中国地质科学院博士学位论文.
- 张玉修,李勇,张开均,李亚林.2006.西藏羌塘盆地依仓玛地区中 上侏罗统碳酸盐岩特征及其环境意义.中国地质,33(2):393 ~400.
- 张玉修,张开均,李勇,李亚林,谢尧武,黎兵. 2007. 西藏羌塘盆 地东部中一上侏罗统沉积特征及沉积相划分. 大地构造与成矿 学,31(1): 52~62.
- 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. 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. 地球学报, 33(3): 280~294.
- Diskin S, Evans J, Fowler M B, Guion P D. 2011. Recognising different sediment provenances within a passive margin setting: Towards characterising a sediment source to the west of the British late Carboniferous sedimentary basins. Chemical Geology, 283(3): 143~160.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. Geology, 23(10): 921~924.
- Liu W J, Liu C Q, Zhao Z Q, Xu Z F, Liang C S, Li L B, Feng J Y. 2013. Elemental and strontium isotopic geochemistry of the soil profiles developed on limestone and sandstone in karstic terrain on Yunnan-Guizhou Plateau, China: implications for chemical weathering and parent materials. Journal of Asian Earth Sciences, 67: 138~152.
- McLennan S M. 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2(4):1021~1024.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 299(5885): 715~717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(7): 1523~1534.
- Rieu R, Allen P A, Plötze M, Pettke T. 2007. Climatic cycles during a Neoproterozoic "snowball" glacial epoch. Geology, 35 (4): 299~302.
- Roy D K, Roser B P. 2013. Climatic control on the composition of Carboniferous-Permian Gondwana sediments, Khalaspir basin,

Bangladesh. Gondwana Research, 23(3): 1163~1171.

Umar M, Friis H, Khan A S, Kelling G, Kassi A M, Sabir M A, Farooq M. 2014. Sediment composition and provenance of the Pab Formation, Kirthar Fold Belt, Pakistan: signatures of hot spot volcanism, source area weathering, and paleogeography on the western passive margin of the Indian plate during the Late Cretaceous. Arabian Journal for Science and Engineering, 39 (1): 311~324.

- Warren J K. 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. Earth-Science Reviews, 98(3): 217~268.
- Yan D, Chen D, Wang Q, Wang J. 2010. Large-scale climatic fluctuations in the latest Ordovician on the Yangtze block, south China. Geology, 38(7): 599~602.

Geochemical Characteristics and Salt-Forming Analysis of Jurassic Strata in the Qiangtang Basin

PAN Jiaqiu¹⁾, SONG Chunhui¹⁾, BAO Jing¹⁾, MA Lifang¹⁾, YAN Maodu²⁾,

FANG Xiaomin²⁾, YING Hong¹⁾, YANG Yibo²⁾

1) School of Earth Sciences & Key Laboratory of Western China's Mineral Resources of Gansu Province,

Lanzhou University, Lanzhou, 730000; 2) Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift,

Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101

Abstract

The gypsum-bearing strata and high-salinity spring have been found widely in the Jurassic strata of the Qiangtang basin in recent years, suggesting a potential for salt mineralization in the area. This study performed a comprehensive geochemical analysis in the Jurassic sediments in the Yanshiping area of the Qiangtang basin, combined with the sedimentary environments analysis, to reveal sea level fluctuations of Tethys Ocean, paleoclimate changes and potential of potassium deposit formation in the area. In order to obtain a clear indication of paleo-proxies and using the sediments with gypsum, carbonate and detrital material, we employed the water and acetic acid to distinguish the elements from water-soluble salts, carbonates and the silicate minerals in the bulk sediments. The results show that, ① the Fe/Mn ratios and CaCO₃ content in the bulk samples indicate that Buqu and Suowa formations display high sea level with low Fe/Mn and high carbonate content due to the transgression of the Tethys Ocean; however, the Quemocuo and Xiali formations were in the regression stage with high Fe/Mn and low carbonate content. (2) The chemical weathering proxies based on the oxides content in the silicate minerals, e.g., the ratio of $Na_2O/$ Al_2O_3 , and Na_2O/K_2O in the acid-insoluble fraction and chemical index of alternation (CIA), exhibit the much more arid paleoclimate with weak chemical weathering in the source areas periods of Buqu and Xial formations, while the relatively less arid climate with strong chemical weathering in periods of Quemocuo and Suowa formations. (3) The K⁺ and Na⁺ contents in water soluble salts, which are sensitive proxies of salt formation, show the much higher concentrations in the Xiali Formation and low concentrations in other formations. Summarized by provenance, tectonics, paleoclimate, and palegeographical conditions, the results indicate the Xiali Formation has the great potential of potassium deposits in the Qiangtang basin. Because Tethys Ocean retreating from the east to the west of the Qiangtang basin in Jurassic and Yanshiping locates in the eastern margin of the basin, there is no potassium deposits formation but some gypsum outcrop in this area. The further work of potassium deposits exploration should focus on the Xial Formation in the central and western part of the Qiangtang basin.

Key words: Qingtang basin; sediments; geochemistry; salt-forming condition; Jurassic