

酒西盆地晚新生代沉积物重矿物分析与高原北部隆升^①

宋春晖^{1,2} 孙淑荣¹ 方小敏^{1,2} 孙东¹

(兰州大学西部环境教育部重点实验室 & 资源环境学院 兰州 730000)

(中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室 西安 710075)

摘要 沉积物的形成是地壳差异升降运动的物质记录。位于青藏高原北缘的酒西盆地晚新生代沉积比较敏感和全面记录了高原北部的构造运动和隆升过程。老君庙剖面晚新生代沉积物重矿物分析表明 13 MaBP 以来酒西盆地南部沉积物中重矿物具规律性变化,依据重矿物具规律性变化和沉积特征,揭示了青藏高原北缘晚新生代以来地壳运动经历了稳定期(13~8.26 Ma)、逐步阶段性隆升期(8.26~4.9 Ma)和急剧强烈整体阶段性隆升期(>3.66~0 Ma)三个重大构造演化过程。

关键词 重矿物 构造隆升 晚新生代 酒西盆地 青藏高原

第一作者简介 宋春晖 男 1959 年出生 教授 沉积学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

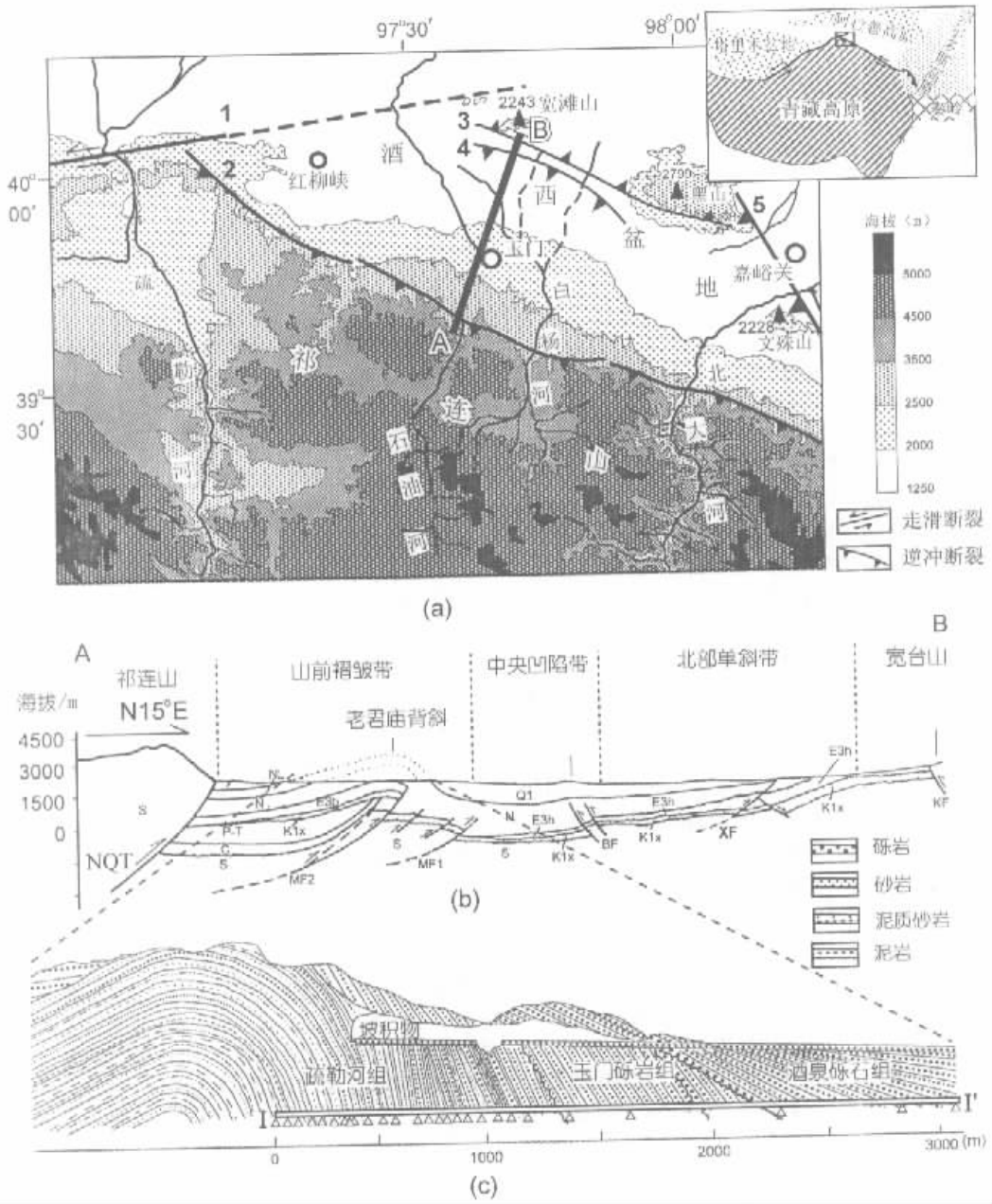
青藏高原隆升是新生代重大构造事件,它不仅是探索大陆岩石圈动力学机制和造山模型的理想场所,而且是检验气候—构造耦合关系和高原隆升环境效应的关键。但目前青藏高原隆起的时间、过程、幅度等重大问题仍然存在较大的分歧^[1],阻碍了一些重大理论的突破。沉积盆地保存着盆地水系范围内造山带岩石经风化、剥蚀、搬运并沉积下来的沉积物,这些沉积物记录着盆地在接受沉积过程中盆地动力学性质和周围造山带岩石圈特征的信息。因此,精细沉积盆地分析是造山带活动构造研究的一条重要途径^[2,3]。青藏高原内部和周缘盆地是在高原的挤压变形和隆起过程中形成,任何高原地壳差异升降运动都会被盆地沉积物所记录。在喜马拉雅山南部通过对山前凹陷新生代地层西瓦利克群的绝对年代测定和构造—沉积环境研究,成功地恢复了喜马拉雅山的构造隆升历史^[4~7]。然而,青藏高原北部这一工作的详细研究十分薄弱,限制了对高原北部隆升过程的认识。高原北缘的祁连山是南北向挤压应力的主要承受者,在其山前凹陷带河西走廊内沉积了渐新世以来几千米厚的地层,酒西盆地位于河西走廊西端,并地处高原北部边界阿尔金走滑断裂和祁连山北缘逆冲断裂交汇处,因此,酒西盆地新生代地层在探讨高原北部构造演化中具有重要的地位。鉴于此,我们在过去 4 年中开展了酒泉盆地新生代地层与高原隆升相关研究^[8~12],本文侧重讨论酒西盆地地层发育完整

的石油沟老君庙剖面 13 MaBP 以来沉积物中重矿物特征,并结合其沉积特征,研究晚新生代以来高原北部隆升过程,为青藏高原隆升的研究提供科学依据。

1 地质概况

酒西盆地位于甘肃省河西走廊的西端,南以祁连山北缘断裂带为界、北至赤金峡山—宽台山—黑山断裂带(即河西走廊北缘的断裂带),西达阿尔金断裂带,东抵嘉峪关—文殊山,盆地海拔 2 000~2 300 m 左右,祁连山高达 4 500 m 以上,盆地演化主要受阿尔金走滑断裂和祁连山北缘逆冲断裂带的控制(图 1)。盆地内部由南向北划分为三个带:南部山前褶皱带、中央拗陷带和北部单斜带(图 1b)。新生代盆地基底和周边由古生界和中生界地层组成,总厚度达 19 000 m^[13],下古生界为海相碎屑岩、碳酸盐岩和火山碎屑岩建造,上古生界是海陆交互相和陆相碎屑岩与碳酸盐岩建造,中生界为陆相碎屑岩成煤成油建造。盆地内新生代除缺失古—始新统地层外,地层出露完全,由下而上划分为火烧沟组、白杨河组、疏勒河组(进一步划分为下部弓形山段、中部胳膊塘沟段和上部牛胳膊段)、玉门砾岩组、酒泉砾石组和戈壁砾石组^[13],各组之间为平行或角度不整合接触。由于酒泉盆地新生代地层未发现重要的哺乳动物化石,其时代未定论^[13~19],为此,我们

① 国家教委重大项目(00-05)和国家重点基础研究发展规划(G1998040809)资助



(a) 1. 阿尔金走滑断裂 2. 北祁连山断裂 3. 宽台山断裂;
 4. 新民堡断裂 5. 嘉峪关—文殊山断裂; A-B. (b) 剖面位置 (b) 引自文献^[13];
 NQT. 北祁连山断裂; MF₁. 庙北 1 号断裂; MF₂. 庙北 2 号断裂; BF. 白扬河南断裂;
 XF. 新民堡断裂; KF. 宽台山断裂; S. 志留系; C. 石炭系; P-T. 二叠—三叠系; K_{1x}. 下白垩系;
 E_{3h}. 火烧沟组; E_{3b}. 白扬河组; N. 疏勒河组; Q. 第四系 (c): I - I' 实测剖面位置; △. 采样点位置

图 1 酒西盆地位置 (a), 盆地南北向剖面 (b), 及老君庙剖面
 Fig. 1 Location of the Jiuxi Basin (a), South-North section of the Basin (b), Laojunmiao section

对酒西盆地老君庙剖面厚度达1 960 m的晚新生代地层进行了高精度磁性年代地层学定年^[8~10]。老君庙剖面位于盆地南缘石油河谷地老君庙背斜北翼,由于石油河的切割,地层连续完整出露。老君庙背斜核部由疏勒河组弓形山段构成,向北为实测剖面位置,依次出露疏勒河组胳膊塘沟段和牛胳膊套段、玉门砾岩组、酒泉砾岩组和戈壁砾石组(图1c,图2),其年代分别为: $>13 \sim 8.3$ 、 $8.3 \sim 4.9$ Ma、 $3.66 \sim 0.93$ Ma、 $0.84 \sim 0.14$ Ma和 $0.14 \sim 0$ Ma BP^[8~10],岩性特征详见文献^[12]。

2 样品采集与处理

沉积物重矿物是指比重大于2.68,在岩石重含量常常小于1%,颗粒比较细,化学性质稳定,抗风化能力强的一些矿物。它们是碎屑物质的重要组成部分,伴随其它一些碎屑物质产生,搬运,乃至沉积的全部过程中。沉积物重矿物保留下许多与沉积环境和构造运动相关的信息,通过对这些信息的提取和研究,可以获取与构造—沉积环境相关的重要结论。沉积物重矿物采样工作顺石油河谷地西岸进行。实测剖面长3 000多米,经过地层产状校正后实际厚1 960 m。在疏勒河组重砂样品一般采样间距50 m左右,部分地段加密,而其上砾石层一般采样间距控制在约100 m左右(图1c)。自然重砂样品通过室内筛析,粒径取0.1~0.25 mm筛样,经H₂O₂和稀HCl处理,用三溴甲烷分离富集,获取比重大于2.89的重矿物进行鉴定分析。重矿物鉴定用体视显微镜法和油浸法。油浸法由德国Leitz厂生产的OR—THOCUX—POX—BX型偏光显微镜完成。重矿物含量计算采用颗粒统计法,每个样品统计颗粒在1 000粒以上。

3 重矿物组成基本特征

重矿物按其化学性质和抗风化能力划分为不稳定矿物、较稳定矿物、稳定矿物和最稳定矿物。本研究区内共鉴定出重矿物20多种,其中稳定矿物和最稳定矿物有石榴子石、电气石、斜黝帘石、磁铁矿、铬铁矿、赤铁矿、褐铁矿、褐铁矿化立方体黄铁矿、铌钽铁矿、黑钨矿、钛铁矿、榍石、锆石、独居石、金红石、锡石等。不稳定矿物和较稳定矿物有普通角闪石、阳起石、黑云母、绿帘石、绿泥石、方解石、水化黑云母、白云母、磷灰石等。将剖面各样品中出现率 $>90\%$ 的重矿物称为常见矿物,零星出现且含量低者称其少量矿物。根据重矿物几何形态、晶面特征、含量变化和组合等矿物学特征,将剖面划分出四个明显不同的重矿物变化阶段(表1和图2,表中样品序号自下而上地

层由老至新)。

3.1 稳定重矿物段(样品1~3)

该段位于剖面下部,年代对应于13~12.18 Ma。该段稳定矿物和最稳定矿物有石榴子石、黑褐色电气石、斜黝帘石、锆石、榍石、独居石、独居石、锡石、铌钽铁矿、黑钨矿、铬铁矿、磁铁矿、褐铁矿、钛铁矿等,其中常见矿物石榴子石含量5.27%~26.04%(平均14.67%),黑褐色电气石为1.01%~2.56%(平均1.70%)。不稳定矿物有少量普通角闪石、黑云母、水化黑云母、绿泥石和绿帘石,其中常见矿物普通角闪石含量为0%~0.86%(平均0.55%),黑云母为0%~5.12%(平均3.26%),而阳起石含量为0%。重矿物形态以颗粒圆化程度高,形态以沿长轴方向延伸的椭圆形居多,矿物表面多具不规则的溶蚀小坑,呈麻点状,粗糙暗淡,透明度差。此外,各种矿物粒度比较细,一般0.1 mm左右。上述特征表明该段重矿物以形态浑圆、颗粒细小、稳定矿物和最稳定矿物含量高、不稳定矿物含量极低为特征。

3.2 较稳定重矿物段(样品4~11)

年代对应于12.18~8.26 Ma。该阶段重矿物总体特征类似于前期,但各样品中不稳定矿物含量相对增加,且矿物形态也略有变化。在常见稳定矿物中石榴子石和黑褐色电气石变化较明显,前者含量1.72%~14.82%,平均含量由前期的14.67%降为6.23%,其形态除浑圆状外出现少量次棱角不规则粒状。而后者多呈不规则粒状和较完整的复三方柱晶体,含量0.20%~5.42%,平均含量由前期的1.7%增至2.8%。另外,也存在少量锆石、金红石等最稳定矿物,在常见不稳定矿物中阳起石含量增加明显,由前期0%增加最高可达3.38%(平均1.64%)。黑绿至绿色普通角闪石呈不规则粒状和柱状集合体,平均含量由前期的0.55%增加至1.49%,最高可达3.97%。黑云母平均含量由前期的3.26%上升至4.01%,最高可达18.49%。可见该段仍以稳定和稳定矿物为主,但不稳定矿物明显增加,表明构造背景小规模的变化。

3.3 不稳定重矿物段(样品12~22)

位于剖面中部,年代对应于8.26~4.9 Ma。该阶段缺乏最稳定矿物,主要常见重矿物为石榴子石、黑褐色电气石、铬铁矿、磁铁矿、褐铁矿、赤铁矿、斜黝帘石、绿帘石、阳起石、普通角闪石和黑云母。重矿物含量以稳定和稳定矿物减少、不稳定和较稳定矿物增加的总趋势下,各种矿物含量呈现高低交叉锯齿状变化为特征(表1,图2)。其中常见最稳定矿物电气石含量最低0.50%、最高3.1%、平均1.49%,常见稳定

矿物石榴子石最低3.28%、最高9.0%、平均6.13%；和平均
常见不稳定矿物阳起石含量最低1.1%、最高10.84%

表 1 老君庙剖面沉积物中常见重矿物含量(wt%)

Table 1 Contents of main heavy minerals of Laojunmiao section(wt%)

序号	样品号	厚度位置	磁铁矿	铬铁矿	石榴子石	黑色电气石	斜黝帘石	绿帘石	阳起石	普通角闪石	黑云母	其它
27	Ljm3 100	1 947.36	28.00	17.20	4.30	1.00	8.50	6.40	10.00	14.00	10.00	
26	Ljm2 864	1 877.5	38.00	19.20	3.00	0.00	7.00	4.30	13.00	9.00	6.00	
25	Ljm2 216	1 713.61	29.53	21.83	6.04	0.35	6.71	2.70	9.38	14.08	9.35	
24	Ljm1 600	1 408	37.70	23.70	6.00	1.00	3.30	6.40	6.80	9.50	5.60	
23	Ljm1 250	1 206	34.50	41.80	4.60	0.50	2.00	6.80	4.00	4.50	1.20	
22	Ljm1 135	1 103	34.60	20.00	4.70	2.00	13.00	9.60	3.50	4.00	9.00	
21	Ljm1 100	1 071.55	46.00	26.00	6.00	1.00	6.00	4.30	4.30	2.00	5.40	
20	Ljm1 020	999.64	23.74	34.00	7.00	2.00	7.40	13.00	5.65	1.24	6.65	
19	Ljm950	936.73	43.00	30.44	3.42	0.50	0.00	5.50	10.84	0.50	6.00	
18	Ljm852.0	843.89	17.60	44.92	3.28	1.00	6.44	7.14	8.14	9.00	3.00	
17	Ljm835.6	827	30.80	0.00	7.42	2.23	19.20	16.70	7.20	2.27	4.73	☆
16	Ljm801	794.15	38.68	0.00	9.00	3.10	25.16	16.60	3.00	2.40	2.20	
15	Ljm766	760.34	24.69	56.50	4.00	1.19	0.70	5.50	3.68	2.28	1.45	
14	Ljm738.5	733.4	28.50	36.34	8.10	0.70	7.30	11.44	3.47	2.68	1.21	
13	Ljm702.4	698.52	25.21	40.17	6.38	2.27	8.53	12.23	1.10	2.01	2.03	
12	Ljm577	575.69	40.00	30.04	8.09	0.37	6.36	2.77	5.00	4.55	2.55	
11	Ljm526	524.97	27.53	29.41	6.76	5.42	14.07	8.81	3.38	0.53	2.56	☆
10	Ljm454.5	453.86	24.05	38.40	7.21	4.47	12.29	10.10	0.95	0.00	1.18	☆
9	Ljm360	359.8	1.93	19.11	6.53	3.80	41.09	24.75	1.45	1.33	0.00	
8	Ljm352	351.92	31.98	26.29	5.60	2.03	17.35	6.10	3.04	1.00	5.44	☆
7	Ljm326	326	3.36	18.88	1.72	0.70	19.09	5.28	0.59	1.87	1.68	☆
6	Ljm268	268	10.32	40.72	4.35	1.85	8.58	24.04	1.28	3.97	2.41	☆
5	Ljm211	211	26.67	9.59	14.28	3.96	5.82	15.42	2.39	2.84	18.49	
4	Ljm162	162	3.13	20.02	2.82	0.20	3.35	60.63	0.00	0.41	0.30	☆
3	Ljm108	108	34.85	23.31	5.27	1.01	14.69	9.63	0.00	0.86	5.12	☆
2	Ljm83.5	83.5	5.62	0.00	12.70	1.52	76.19	2.89	0.00	0.00	1.40	
1	Ljm2	2	13.24	5.45	26.04	2.56	1.72	38.08	0.00	0.24	0.00	☆

注：星号代表含少量锆石、榍石、独居石等重矿物。

5.08% ,普通角闪石最低0.5%、最高9.0%和平均3.0% ,以及黑云母最低1.21%、最高9.0%和平均3.98%。该段各种重矿物粒度不均匀,形态、晶面特征也出现差异。晶体形态除浑圆状外,出现较多次棱角或不规则粒状,其中浑圆状或椭圆状颗粒表面多具麻点状溶蚀痕迹、透明度差和不太新鲜,而不规则或次棱角状粒状都比较新鲜和颗粒表面平整光滑,如稳定矿物石榴子石除浑圆状颗粒外,出现较多不规则棱角状颗粒,并具明显贝壳状断口,黑褐色电气石多呈规则复三方柱状晶体(晶面纵纹明显),少量呈棱角状。不稳定矿物普通角闪石、阳起石多呈不规则粒状和柱状集合体,颗粒较新鲜,镜下可见较多的柱状解理。上述特征表明该阶段属构造活动期产物,区域构造并具稳定和与不稳定交替变化的特征。

3.4 极不稳定重矿物段(23~27)

该阶段位于剖面上部,年代对应于3.66~0 Ma。该阶段不存在最稳定矿物锆石、金红石和榍石,常见最稳定矿物黑褐色电气石含量降低至0.35%~1%(平均为0.57%),常见稳定矿物石榴子石含量降低至3%~6.04%(平均4.79%),而常见不稳定矿物和较稳定矿物阳起石、普通角闪石和黑云母开始大量出现,其中阳起石含量4.00%~13.00%(平均8.64%),普通角闪石含量4.50%~14.08%(平均10.22%)和黑云母含量1.20%~10.00%(平均6.43%)。各种重矿物形态主要呈次棱角至棱角状不规则颗粒,如石榴子石几乎全部为棱角状不规则粒状,贝壳状断口明显,颗粒表面平整光滑,很新鲜,透明度高。黑褐色电气石多呈较粗复三方柱和菱面体聚形柱状晶体,晶面纵纹明显,透明度高。阳起石和普通角闪石呈柱状或

柱状集合体 颗粒表面新鲜,透明度较高。上述矿物颗粒均比较粗大,一般粒径0.125~0.25 mm。另一方面,在重砂样品中出现大量岩石碎屑。上述特征反映

该段重矿物以矿物颗粒新鲜、棱角明显、粒度变粗、稳定矿物和最稳定矿物含量急剧减少、不稳定矿物和较稳定矿物含量大幅增

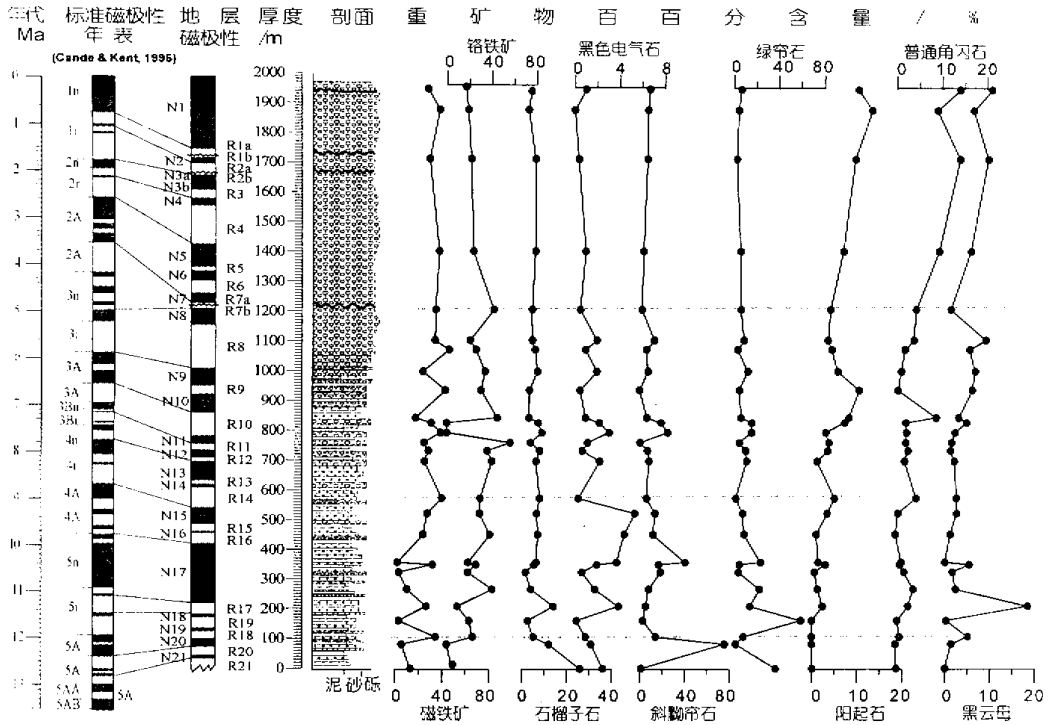


图 2 老君庙剖面地层年代和常见重矿物含量变化

Fig.2 Stratigraphic succession, paleomagnetic dating and content variation of main heavy minerals

加为特征。

4 重矿物演化、沉积物特征与高原北部隆升

青藏高原的构造隆升控制着高原周边及内部新老盆地的形成和演化,而盆地沉积物的形成是地壳差异升降运动的物质记录^[20]。为提取重矿物所受环境影响的信息,采用重矿物含量比值 K_1 、 K_2 和 F 作为矿物风化指数的指标,其中 K_1 = 不稳定矿物(普通角闪石 + 黑云母)/较稳定矿物(帘石类矿物), K_2 = 不稳定矿物(普通角闪石 + 黑云母)/稳定矿物(石榴子石 + 电气石), $F = K_1 + K_2$ 。 K 和 F 值越小,不稳定矿物含量越小,表明构造稳定,风化作用时间长和

风化作用越彻底,反之则为构造不稳定和快速风化特点。通过上述对老君庙剖面沉积物中重矿物组合、形态、晶面花纹以及重矿物含量在地层剖面垂直方向上变化的详细研究,结合其沉积物沉积特征,将高原北部晚新生代以来构造演化划分为三个主要阶段(图 3,其中 b 是以 30 m 为步长由剖面底部向上统计砂质砾岩和砾岩在地层中所占的比例)。

4.1 相对稳定期 (> 8.26 Ma)

13~8.26 MaBP,盆地南缘沉积了 590 m 的粉砂岩、泥岩和砂岩夹砂质砾岩,该阶段重矿物由稳定重矿物段和较稳定重矿物段组成,沉积速率相对低和古流向所示物源为南部祁连山区(图 3d,e)^[12]。其中重矿物以颗粒细(0.1 mm 左右),表面粗糙、透明度差、多呈次圆粒状、稳定矿物和最稳定矿物种类多且含量高、不稳定矿物种类少且含量很低为特征, K_1 、 K_2 和 F 值均较低(平均值分别为 0.19、0.57 和 0.76)。上述

特征表明高原此阶处于构造相对稳定期,造成沉积物经过长期风化、搬运和磨蚀,形成不稳定矿物大多被分解,而稳定重矿物的相对富集,特别 13~12.18 Ma 重矿物稳定段 K_1 、 K_2 和 F 值均最低,平均值分别为

0.09、0.35和0.44)代表构造稳定、山盆地形高差小的青藏高原北部夷平期。

4.2 逐步阶段性隆升期(8.26~<4.9 Ma)

8.26~<4.9 MaBP,盆地南缘了602 m的粉砂岩、

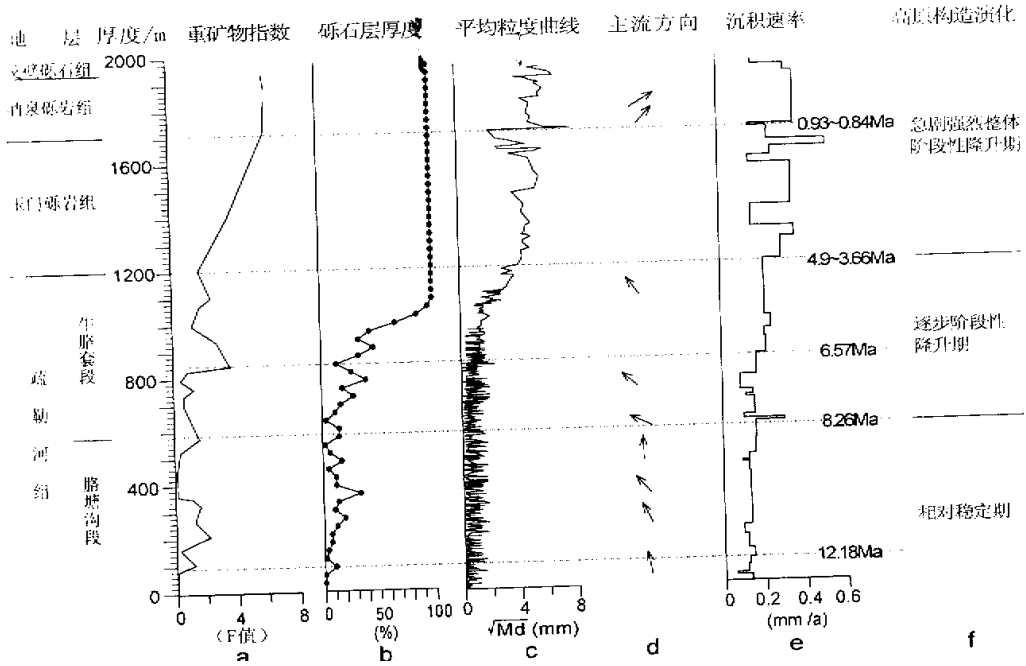


图3 重矿物和沉积物记录与高原隆升

Fig.3 Uplift history of the northern Tibetan Plateau suggested by heavy minerals and sedimentary response in Jiuxi Basin

泥岩、泥质砂岩、砂质砾岩和砾岩,剖面层序向上粒度变粗、砾岩增多变厚以及顶部转为厚层砾岩(图2,图3b、c)。重矿物由前期较稳定重矿物段转变为不稳定重矿物段,矿物组合发生变化,前期出现的少量最稳定矿物锆石、金红石、独居石基本消失,常见稳定矿物的含量较前期减少(如石榴子石平均含量由前期的8.53%降为6.13%,黑褐色电气石平均含量由前期的2.5%降至1.49%),不稳定矿物明显增多(如普通角闪石平均含量由前期的1.19%增至3.0%),表明区域构造开始进入活动期。由于该阶段各种常见重矿物含量在剖面垂向上(自下而上)呈现出规律性高低交叉的锯齿状变化以及粒度不均匀和矿物形态多样化(浑圆状、椭圆状和棱角明显的不规则粒状)特征, K_1 、 K_2 和 F 值变化幅度大(图3a),最低值分别为0.11、0.38、0.49和最高值分别为1.18、2.8、3.69。特别样品序号12(对应年代8.26 Ma)和18(对应年代6.57 Ma)中代表性常见最稳定矿物黑褐色电气石含

量分别由5.42%突然降至0.37%和由2.23%减少至1.0%,而常见不稳定矿物普通角闪石含量由0.53%突然变至4.55%和由2.27%猛增至9.0%(表1,图2)。上述表明青藏高原祁连山已经由构造相对稳定期进入构造活动的过度阶段,并且该期构造以逐步阶段性活动与相对稳定交替为特征。这一构造隆升过程也为沉积演化^[12]和沉积速率(图3e)所清晰记录。

4.3 急剧强烈整体阶段性隆升期(>3.66~0 Ma)

>3.66~0 MaBP盆地南缘沉积了>770 m玉门砾岩至戈壁砾石组的巨厚层分选极差的砂砾岩和砾岩(图2,图3b)。该期重矿物演化由前期不稳定重矿物阶段变化为极不稳定重矿物阶段,重矿物形态发生明显变化,圆化度高的圆形和次圆形颗粒极少,主要呈棱角明显的不规则粒状,发育贝壳状断口,矿物颗粒变粗。重矿物组合中最稳定矿物锆石、金红石、楣石、锡石和钛铁矿完全消失,稳定矿物急剧减少,不稳定矿物和岩屑大幅增加,其中稳定矿物平均含量:石榴

子石由前期6.13%减至4.79%、黑褐色电气石由前期1.49%降为0.57%、而不稳定矿物平均含量:阳起石由前期5.08%提高为8.64%、普通角闪石由3.0%猛增至10.22%、黑云母由3.98%增加为6.42%。同时, K_1 、 K_2 和 F 值均达到最高(平均值分别为1.53、3.29和4.82)。此外,在重砂样品中出现大量的灰岩、侵入岩和变质岩岩屑。上述特征表明高原北缘祁连山此阶段急剧强烈隆升,导致物源区老地层的抬升,使山盆高差加大,造成沉积物快速风化和剥蚀以及近距离搬运和迅速堆积。另一方面,结合古流向、沉积物粒度和沉积速率变化以及构造事件(图2,图3c、d、e)^[10,12],表明该期构造隆升属阶段性整体隆升,如0.93~0.84 Ma期构造活动,形成玉门砾岩组与酒泉砾石组角度不整合,使古流向从前期以NW向为主彻底转变成NE向,并使期后沉积砾石粒度和沉积速率进一步变大,形成样品25号(对应年代0.84 Ma)中最稳定重矿物黑褐色电气石由1.0%降至0.35%,不稳定重矿物:普通角闪石由9.5%猛增至14.08%、阳起石由6.8%提高至9.38%和黑云母由5.6%增加到9.35%,以及 K_1 、 K_2 和 F 值分别高达2.49、3.67和6.17。

5 结论

(1) 根据老君庙剖面晚新生代沉积物中重矿物含量、形态、晶面花纹和组合变化等矿物学分析,表明13 MaBP以来高原北缘酒西盆地南部沉积物中重矿物具规律性变化,剖面自下而上划分为四段:13~12.18 Ma为稳定重矿物段、12.18~8.26 Ma为较稳定重矿物段、8.26~<4.9 Ma为不稳定重矿物段和>3.66~0 Ma为极不稳定重矿物段。

(2) 依据重矿物具规律性变化和沉积物沉积特征,表明青藏高原北缘13 MaBP以来地壳运动经历了稳定期(13~8.26 Ma)、逐步阶段性隆升期(8.26~<4.9 Ma)和急剧强烈整体阶段性隆升期(>3.66~0 Ma)三个重大构造演化过程。

参考文献(References)

- Li J J, Fang X M. Uplift of the Tibetan Plateau and environmental changes [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(23): 2 117~2 124
- Métivier F, Gaudemer Y. Mass transfer between eastern Tian Shan and adjacent basins (central Asia): constraints on regional tectonics and topography [J]. Geophysics Journal International 1997, 128: 1~17
- Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, et al. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric Mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau [J]. Geophysics Journal International, 1998, 135: 1~47

- Johnson N M, Opdyke N D, Johnson G D, et al. Magnetic polarity stratigraphy and ages of Siwalik Group rocks of the Potwar, Pakistan [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1982, 37: 17~42
- Johnson N M, Stix J, Tauxe L, et al. Paleomagnetic chronology, fluvial processes, and tectonic implications of the Siwalik deposits near Chinji village, Pakistan [J]. Journal of Geology, 1985, 93: 27~40
- Nakayama K, Ulak P D. Evolution of fluvial style in the Siwalik Group in the foothills of the Nepal Himalaya [J]. Sedimentary Geology, 1999, 125: 205~224
- Burbank D W, Reynolds G H. Sequential late Cenozoic structural disruption of the northern Himalayan foredeep [J]. Nature, 1984, 311: 114~118
- 赵志军, 方小敏, 李吉均等. 酒泉砾石层的古地磁年代与青藏高原隆升 [J]. 科学通报, 2001, 43(14): 1 208~1 212 [Zhao Zhijun, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. Paleomagnetic dating of the Jiuquan Gravel in the Hexi Corridor: Implication on the mid-Pleistocene uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(23): 2 001~2 004]
- 史正涛, 业渝光, 赵志军等. 酒泉盆地晚新生代地层的 ESR 年代 [J]. 中国科学, 2001, D 辑, 31(增刊): 164~168 [Shi Zhengtao, Ye Yuguang, Zhao Zhijun, et al. ESR dating of late Cenozoic molassic deposits in the Jiuxi Basin [J]. Science in China, Series D, 2001, 44 (Supp.): 203~209]
- 方小敏, 赵志军, 李吉均等. 祁连山北缘酒西盆地晚新生代磁性地层与高原隆升 [J]. 中国科学, D 辑, 2002, 待刊 [Fang X M, Zhao Z J, Li J J, et al. Magnetostratigraphy of the late Cenozoic Laojunmiao anticline in the northern Qilian Mountains and its implication on the northern Tibetan uplift [J]. Science in China, Series D, 2002, in the press]
- 傅开道, 高军平, 方小敏等. 祁连山中西段沉积物粒径和青藏高原隆升关系模型 [J]. 中国科学, D 辑, 2001, 31(增刊): 170~174 [Fu Kaidao, Gao Junping, Fang Xiaomin, et al. Relationship model of sediment grain size and Tibetan Plateau uplift in middle-west parts of Qilian mountain [J]. Science in China, Series D, 2001, 44 (Supp.): 210~217]
- 宋春晖, 方小敏, 李吉均等. 青藏高原北缘酒西盆地 13 Ma 以来沉积演化与构造隆升 [J]. 中国科学, D 辑, 31(增刊): 155~162 [Song Chunhui, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. Tectonic uplift and sedimentary evolution of the Jiuxi Basin in the northern margin of the Tibetan Plateau since 13 Ma BP [J]. Science in China, Series D, 2001, 44 (Supp.): 192~202]
- 玉门油田地质志编写组. 中国地质石油志卷十三, 玉门油田 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1989. 53~102 [Yuman Oil Field Geology Editorial Group. Petroleum Geology of China Vol. 13, Yuman Oil Field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989. 53~102]
- 孙健初. 祁连山一带地质史纲要 [J]. 地质论评, 1942, 7(1~3): 17~25 [Sun Jianchu. Synopsis for geology of the Qilianshan region [J]. Geological Review, 1942, 7(1~3): 17~25]
- 余伯良. 甘肃走廊新构造运动的特征与意义 [R]. 见: 中国科学院地质部编辑. 中国科学院第一次新构造运动座谈会发言记录. 北京: 科学出版社, 1957. 119~126 [Yu Boliang. Characteristic and significance of neotectonism in the Gansu Corridor [R]. In: The Records of the First Symposium on Neotectonic Movements of the Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1957. 119~126]
- 中国地层典编委会. 中国地层典—第三系 [M]. 北京: 地质出版

- 社, 1999. 22~97 [China Strata Editorial committee. Strata of China : the Tertiary system [M]. Beijing : Geological Publishing House , 2000. 22~97]
- 17 中国地层典编委会. 中国地层典—第四系[M]. 北京 :地质出版社 2000. 47~92 [China Strata Editorial committee. Strata of China : the Quaternary system [M]. Beijing : Geological Publishing House , 2000. 47~92]
- 18 陈杰, 卢演涛, 丁国瑜. 祁连山西段及酒西盆地地区第三纪构造运动的阶段划分[J]. 第四纪研究 , 1995 , 15 (3) : 263 ~ 271 [Chen Jie , Lu Yanchou , Ding Guoyu. Division of the Tertiary tectonic phase in the region of West Qilianshan and Jiuxi Basins [J]. Quaternary Sciences , 1995 , 15 (3) : 263 ~ 271]
- 19 黄华芳, 彭作林, 卢伟等. 酒西盆地、酒东盆地第三系磁性地层的划分与对比[J]. 甘肃地质 , 1993 , 2 (1) : 6 ~ 16 [Huang H F , Peng Z L , Lu W , et al. Paleomagnetic division and comparison of the Tertiary system in Jiuxi and Jiudong Basins [J]. Acta Geologica Gansu , 1993 , 2 (1) : 6 ~ 16]
- 20 王鸿祯, 刘本培, 赵锡文等. 地史学教程 [M]. 北京 :地质出版社 , 1986. 47 [Wang Hongzhen , Liu Benpei , Zhao Xiwen , et al. Geohistory [M]. Beijing : Geological Publishing House , 1986. 47]

Analysis of Tectonic Uplift and Heavy Minerals of Sediments on Jiuxi Basin in the Northern Margin of Tibetan Plateau since the Late Cenozoic

SONG Chun-hui^{1 2} SUN Shu-rong¹ FANG Xiao-min^{1 2} SUN Dong¹

(National Laboratory of Western China 's Environmental Systems and College of Resources and Environment , Lanzhou University , Lanzhou 730000)

(State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology and Institute of Earth Environment , Chinese Academy of Sciences , Xi 'an , Shaanxi 710075)

Abstract Sediments in basins could record the ascending and descending difference of the earth crust. The sediments of the Late Cenozoic in the Jiuxi basin , located in the northern margin of the Tibetan plateau , have sensitively and completely recorded the uplifting process of northern plateau. The heavy minerals of sediments have the regulatory variety in the Laojunmiao section of Jiuxi basin since 13 MaBP ; detailed study of the heavy mineral has revealed four heavy mineral stages of sedimentary evolution. they are : ①stable heavy mineral associations before 12.18 Ma BP , ②relatively stable heavy mineral associations between 12.18 and 8.26 Ma BP , ③unstable heavy mineral associations between 8.26 and 4.9 Ma BP , and ④the very unstable heavy mineral associations since 3.66 Ma BP. The associated mountain erosion and uplift are suggested having experienced three phases on the uplifting process of the northern Tibetan Plateau , that is , tectonic stable (13 ~ 8.26 Ma BP) , gradual staggered uplift (8.26 ~ < 4.96 Ma BP) , and rapid intense intermittent mass uplift (> 3.66 ~ 0 Ma BP).

Key words heavy mineral , sediments , Late Cenozoic , tectonic uplift , Tibetan Plateau