

青藏高原东北部新近纪古流向与 物源分布对隆升的响应

杨永锋^{1,2,3)}, 张克信^{1,2)}, 徐亚东^{1,2)}, 宋博文^{1,2)}, 张健钰⁴⁾, 骆满生¹⁾,
季军良^{1,2)}, 陈奋宁⁵⁾, 陈锐明⁵⁾

1) 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉, 430074; 2) 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉, 430074; 3) 陕西省地矿局区域地质矿产研究院, 陕西咸阳, 712000;
4) 武汉地质矿产研究所, 武汉, 430205; 5) 西安地质矿产研究所, 西安, 710054

内容提要:通过对青藏高原东北部 11 个新近纪沉积盆地的沉积相演化、古流向和物源演变的详细对比研究, 揭示了研究区新近纪 4 次沉积演变与构造隆升的响应。①中新世早期(23~19.5Ma): 阿牙克库木湖、柴达木、德令哈和酒泉盆地的古流向和物源分析表明东昆仑和阿尔金已经抬升成剥蚀区。循化、贵德和临夏等盆地物源和古流向指示西秦岭和拉脊山也已成为隆起区。区域上整体地势差异不显著。②中新世早中期(17.5~15Ma): 区域湖盆面积扩大, 阿牙克库木湖、索尔库里、柴达木和酒泉盆地的资料反映东昆仑、阿尔金和祁连山已经全面隆升, 贵德—循化、临夏盆地的古流向反映为盆地周缘型, 指示西秦岭和拉脊山明显抬升, 区域差异隆升造成盆地凹陷扩张进入湖泛期。③中新世中晚期(10~7Ma): 阿牙克库木湖、索尔库里、柴达木和酒泉盆地沉积物的粒径和沉积速率增大, 与热年代学证据一致, 揭示出阿尔金山和祁连山进一步快速隆升。贵德、循化和临夏盆地古流向和物源反映为显著的多源性, 除西秦岭和拉脊山外, 位于循化和临夏两盆地间的积石山也开始隆起。④上新世(5.3Ma 以来): 索尔库里、柴达木和酒泉盆地古流向没有明显变化, 沉积速率和粒径继续增大, 阿尔金和祁连山加速隆升为高海拔地貌。贵德盆地主物源区是拉脊山。区域上, 地势差异加强, 湖盆被肢解后逐步萎缩消亡。

关键词: 新近纪; 古流向; 物源分布; 隆升; 青藏高原东北部

本文研究区位于东经 84°~106°、北纬 34°~39° 之间, 西起阿尔金断裂系, 东至六盘山断裂带, 南部以东昆仑山—西秦岭断裂系为界, 北部到达河西走廊(图 1)。区内发育阿尔金、祁连、东昆仑和西秦岭等巨型山系, 在山系之间及其周边广布新生代陆相盆地, 山系与盆地呈“盆—山”相间的地貌格局, 主要有柴达木、德令哈、索尔库里、阿牙克库木湖、酒泉、肃北、西宁—兰州、贵德—循化和临夏等盆地, 盆地内新生代沉积发育良好。柴达木和索尔库里盆地中新世主要接受油砂山组沉积, 中新世末期—上新世沉积狮子沟组; 酒泉盆地中新世时广泛沉积疏勒河组, 上新世沉积苦泉组和玉门组; 贵德—循化、西宁—兰州和临夏盆地中新世—上新世自下向上依次发育他拉组上段、咸水河组、临夏组和积石组(张克信等, 2010a, 2010b)。

21 世纪以来, 高原东北部新生代沉积的物源、古流向的研究已经获得了一些研究成果。宋春晖等(2001, 2003, 2006)通过对索尔库里、柴达木、贵德、酒泉等盆地中叠瓦状砾石、砂砾岩透镜状展布方向、交错层理前积纹层产状等数据的统计, 恢复了古水流方向, 并结合沉积物中砾石成分的统计, 总结了高原东北缘的地貌格局演化以及古流向和物质分布特征。方小敏等(1997, 2004, 2007)对酒泉、临夏、贵德和西宁盆地的新生代地层进行了详细的古地磁年代测定, 探讨了各盆地的沉积相演变、古流向和物源变化对祁连山、拉脊山隆起的响应。朱利东等(2004)通过对酒泉、柴达木等盆地沉积充填序列、沉积相展布、古流向和物源分析, 探讨了高原北部的盆—山演化过程。常宏等(2001, 2004)较详细划分了索尔库里盆地中—上新世沉积相, 揭示了沉积环境与隆升

注: 本文为中国地质调查局国家青藏专项项目(编号 1212010610103、1212011121261)和国家自然科学基金(编号 40921062)共同资助的成果。

收稿日期: 2011-11-20; 改回日期: 2012-04-10; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 杨永锋, 1983 年生, 男。硕士研究生, 从事沉积学研究。Email: yangyongfeng011031@163.com。通讯作者: 张克信。Email: kx_zhang@cug.edu.cn。

图 1

表 1 青藏高原东北部新近纪沉积古流向数据统计表

Table 1 Neogene sedimentary paleo-current directions statistics data in Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau

时代	年龄 (Ma)	柴达木盆地大柴旦大红沟剖面(PM1)(本文)	循化盆地西沟剖面(PM2)(本文)	柴达木盆地西岔沟剖面(PM3)(宋春晖, 2006)	索尔库里盆地依屯拉克和索尔达坂剖面(PM4和PM5)(常宏, 2004)	肃北盆地铁匠沟剖面(PM9)(宋春晖, 2006)	酒泉盆地石羊圈剖面(PM10)(宋春晖等, 2001)	酒泉盆地老君庙(PM11)(宋春晖, 2006)	贵德盆地阿什贡(PM7)(宋春晖, 2006)	贵德盆地甘家(PM8)(宋春晖等, 2003)
上新世 N ₂	2.6	P8=200° n=9 P7=193° n=24	P8=284° n=25	P4=196° n=107	P5=158° n=10 P4=163° n=15	P8=12° n=103 P7=5° n=20 P6=40° n=93	P7=248° n=108 P6=264° n=107 P5=336° n=93	P5=26° n=117 P4=20° n=100 P3=30° n=107	临夏组	临夏组
中新世晚期 N ₁ ³	5.3	P5=245° n=19 P4=255° n=9	P6=242° n=18 P5=224° n=25 P4=274° n=25	P3=153° n=132	P3=150° n=7	P5=15° n=100 P4=10° n=124 P3=303° n=120 P2=4° n=106 P1=347° n=102	P5=336° n=112 P4=298° n=113 P3=274° n=12 P2=207° n=113 P1=261° n=102	P2=355° n=102 P1=48° n=130	咸水河组	咸水河组
中新世中期 N ₁ ²	8	P3=173° n=9 P2=195° n=7		P2=200° n=110 P1=230° n=130	P2=90° n=8 P1=48° n=6				P2=217° n=36 P1=285° n=46	咸水河组
中新世早期 N ₁ ¹	17	P1=185° n=34	P3=290° n=22 P2=314° n=21 P1=188° n=19							
	23					白杨河组	白杨河组	白杨河组		

注:表中 P1~P8 表示古流向测量点编号;n 为每个测量点的测量总数;表中每个测量点的古流向数据是经过对原始测量数据校正后,经玫瑰花图投点做图所得。

之间的关系。孟庆泉(2008)对柴达木盆地东北缘怀头他拉剖面通过高精度磁性地层学研究,结合哺乳动物化石年代控制,建立了该剖面新生代地层的精细年代序列,通过对不同时期古流向、物源、沉积相分析,揭示了柴达木盆地东北缘沉积演化和南祁连山隆起的过程。本项目组于 2006 年在高原东北缘进行精细沉积学研究,其中张克信等(2007, 2008, 2010a, 2010b)对青藏高原新生代残留盆地的沉积演化进行了概略研究,从沉积序列和构造岩相古地理演化角度揭示了青藏高原新生代构造隆升与沉积响应的耦合关系;骆满生等(2010)和张捷钰等(2010)研究了循化盆地新生代地层剖面沉积相、古流向和物源变化及其与拉脊山、西秦岭隆起带的响应关系。

综上所述,前人对青藏高原东北部新生代沉积演化的研究多依据部分盆地少数几条剖面或单一剖面,缺乏通过对整体的高原东北部新生代沉积进行系统的古流向和物源分析,揭示隆升与沉积之间的响应过程。本文在对柴达木盆地大红沟和循化盆地西沟两条新近纪剖面古流向、物源和沉积相系统分析的基础上,结合阿牙克库木湖、索尔库里、柴达木、酒泉和贵德-循化盆地具有可靠年龄资料(古地磁年龄和哺乳动物化石)的若干代表性剖面,对各个剖面进行系统的古流向和物源分布及其演变分析和区域

对比研究,并结合该区已获得的构造热年代学资料(郑德文等, 2003; 陈正乐等, 2006; Yuan Wanming et al., 2006; Wang Guocan et al., 2011; Zheng Dewen et al., 2010),揭示高原东北部新近纪物源和古流向演化对隆升的响应。

1 实测剖面资料

本次在研究区内实测了 2 条新生代地层剖面,分别是青海大柴旦大红沟剖面(编号 PM1)和青海循化县积石镇西沟剖面(编号 PM2)(图 1),并在实测的两条剖面测量了大量交错层理前积纹层产状和叠瓦状排列砾石扁平面产状,获取了古水流数据,并在沉积相分析的基础上对上述 2 条剖面所有的古水流数据进行了校正,使其恢复到原始沉积的水平方位(表 1)。利用 Linda D P Thompson + Todd A Thompson 版权(1993)的 Rose 1.0 软件对校正后的古水流数据进行处理,绘制了各剖面的古流向玫瑰花图,并详细统计了剖面上沉积砾石的成分组合,作为分析沉积物源的基础材料(表 1,图 2,图 3)。

1.1 青海大柴旦大红沟剖面

本次实测的大红沟剖面总厚 5400m,可分 584 层,其中新近系自下而上依次划分为渐新统一中新统上干柴沟组(EN_g, 30~18.5Ma)、中新统油砂山组(N_{1x}, 18.5~8.5Ma)(可分为上下两段)和中新

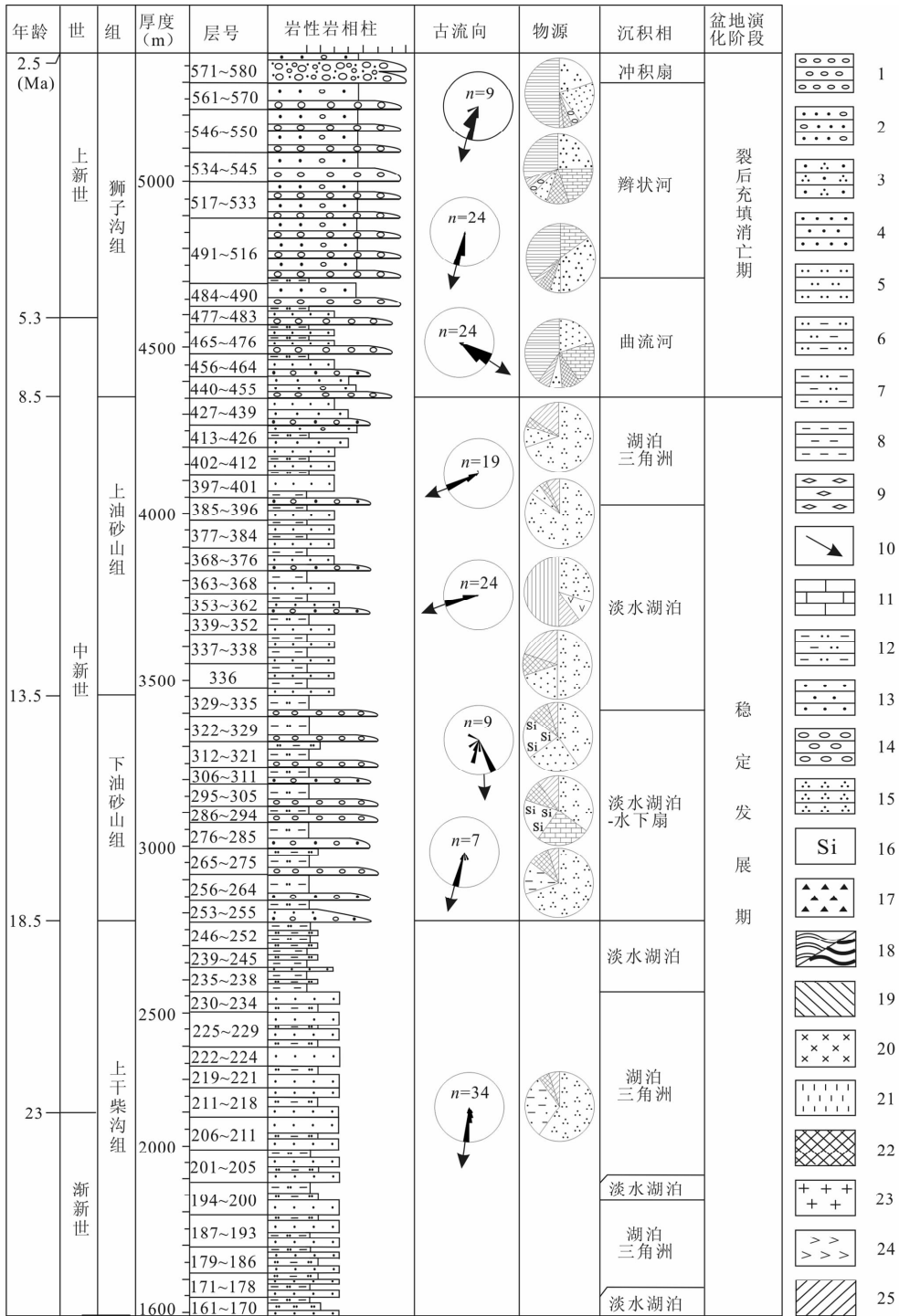


图 2 青海省大柴旦大红沟渐新统一上新统实测剖面柱状图

Fig. 2 Neogene stratigraphic column of the Dahonggou Section, Dachaidan, Qinghai Province

1—砾岩;2—含砾砂岩;3—石英砂岩;4—砂岩;5—粉砂岩;6—泥质粉砂岩;7—粉砂质泥岩;8—泥岩;9—石膏;10—古流向;物源成分:11—灰岩;12—粉砂质泥岩;13—石英砂岩;14—砾岩;15—石英岩;16—硅质岩;17—变质岩;18—片岩/板岩;19—混合岩;20—基性岩;21—超基性岩;22—火山岩;23—花岗岩;24—安山岩;25—其他

1—Conglomerate; 2—sandy conglomerate; 3—quartz sandstone; 4—sandstone; 5—siltstone; 6—muddy siltstone; 7—silty mudstone; 8—mudstone; 9—gypsum; 10—paleocurrent; Provenance: 11—limestone; 12—silty mudstone; 13—quartz sandstone; 14—conglomerate; 15—quartzite; 16—silicite; 17—metamorphic rock; 18—schist/slate; 19—migmatite; 20—basic rock; 21—ultrabasic rock; 22—igneous rock; 23—granite; 24—andesite; 25—others

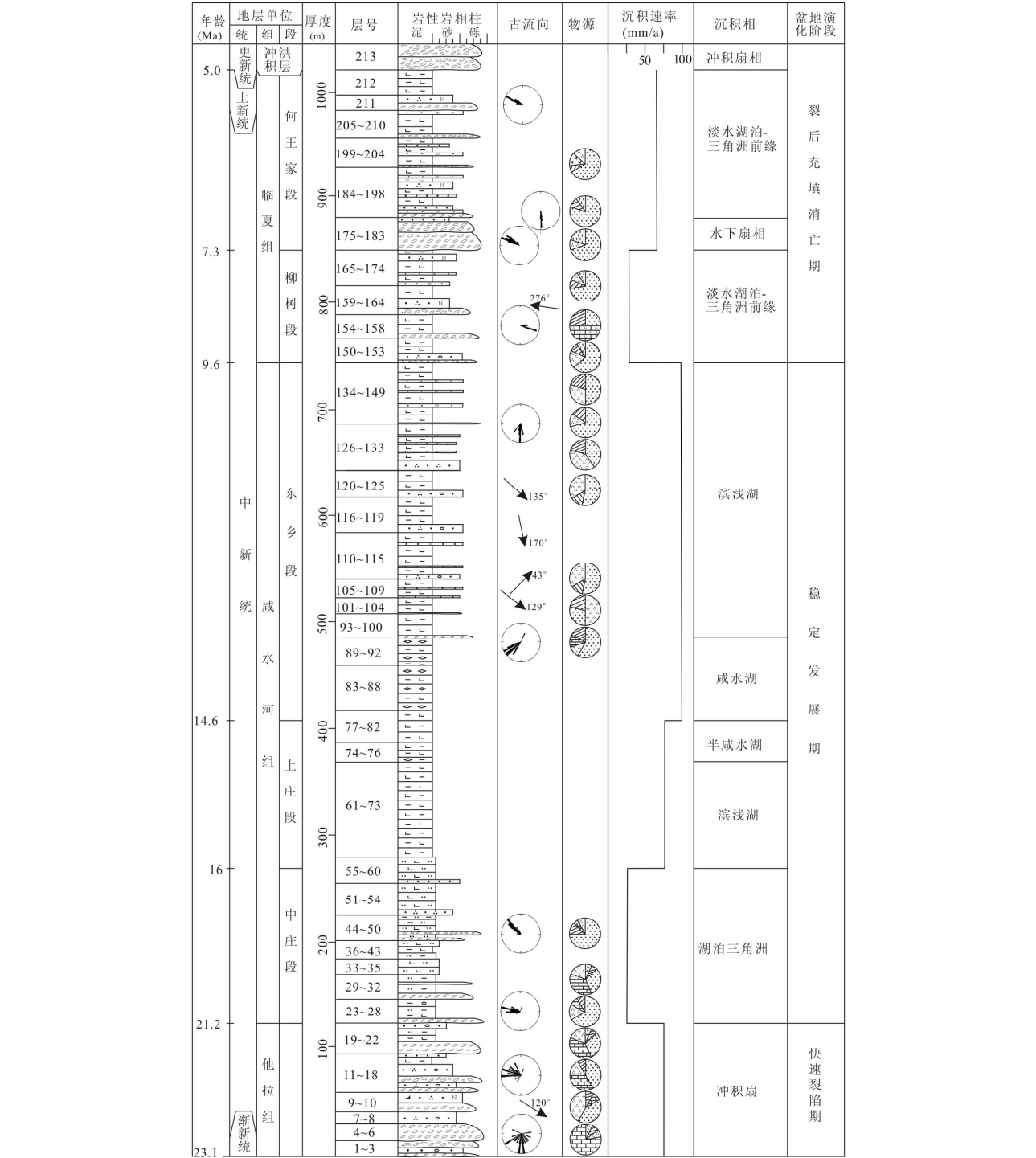


图 3 青海省循化县积石镇羊圈贡拜西沟—上庄渐新统一上新统实测剖面柱状图(图例见图 2)

Fig. 3 Oligocene to Pliocene stratigraphic column of the Yangjuangongbaixigou—Shangzhuang Section, Jishi Town, Xunhua County, Qinghai Province (Legend are the same as fig. 2)

统一上新统狮子沟组($N_{1-2}s$, 8.5~2.5Ma)(图 2)。

上干柴沟组和油砂山组均为湖泊-三角洲相交互沉积,其中前者整体粒度较小,以湖泊相为主,古流向为 185°;后者粒度增大,以三角洲相为主,下段古流向为 195°,上段古流向由 173° 逐渐转变为

255°、245°。其砂岩斜层理前积纹层和滑塌变形构造枢纽产状所指示的古水流方向为 SSW、SSE 和 S 向,其砾石成分主要为石英岩、砂岩、硅质岩和花岗岩,少量以灰岩和火山岩为主,来自北侧的南祁连山脉(绿梁山),沉积古地势为北高南低。

狮子沟组主体为三角洲和河流相粗碎屑沉积,由砾石叠瓦状构造和砂岩斜层理前积纹层产状恢复早期古水流方向为 124° ,晚期变为 193° 至 200° ,从 SSE 向变为 SSW 向。砾石成分虽略有变化,但仍以石英岩、灰岩、砾岩、火山岩等为主。物源和古水流分析显示源区仍为南祁连山脉一带,古地势变化不明显。

1.2 青海循化西沟剖面

本次实测的循化剖面总厚 1047m,可分 213 层,自下而上依次划分为渐新统一中新统他拉组(ENt, $>23.1\sim 21.1\text{Ma}$)、中新统咸水河组(N_1x , $21.1\sim 9.6\text{Ma}$)(自下而上分为中庄段 N_{1cz} 、上庄段 N_{1sz} 、东乡段 N_{1d})和中新统一上新统临夏组($N_{1-2}l$, $9.6\sim 5\text{Ma}$)(自下而上分为中新统柳树段 N_{1l} 和中新统一上新统何王家段 $N_{1-2}h$)(图 3)。

他拉组冲积扇相砾岩的古流向经历了从 188° 向 314° 和 290° 的转变,呈 NW 和 SSE 向,少数为 S 和 W 向,NW 向的砾石成分与盆地南侧西秦岭北缘逆冲带的三叠系和二叠系岩性组合一致,而 SE 向的砾石成分可能来自盆地北部的拉脊山元古宇化隆岩群,反映盆地南部的西秦岭和北部的拉脊山均已为隆起区,为盆地提供近源沉积物。

咸水河组上庄段和东乡段为咸化湖-三角洲相。根据叠瓦状排列的扁平状砾石产状发现上庄段时期古流向主要为北偏东向,盆地北缘古流向主要为 S、SW 向(骆满生等,2010)。东乡段的古流向为 242° 、 129° 、 170° 、 135° 、 190° ,少量 NE 向,物源分析表明砾石成分为砂岩、火成岩、硅质岩、石英岩和少量变质岩(张键钰等,2010)。物源分析表明南部的西秦岭和北部的拉脊山共同提供物源,但古流向的变化指示中庄段时期南部的西秦岭为主物源区,盆地古地势南高北低;到东乡段时期北部的拉脊山为主物源区,古地势变为北高南低。

临夏组柳树段和何王家段主体为湖相-三角洲前缘相,夹水下扇相粗碎屑沉积,古流向为 284° ,以 NWW 向为主,少量为 S 和 NW 向。砾石成分以砂岩为主,其次为灰岩、花岗岩、石英岩、硅质岩、板岩、片岩、片麻岩和少量泥岩、大理岩、超基性岩,反映为多向物源,除南部的西秦岭、北部的拉脊山外,东部的积石山也已明显隆起,成为主要的物源区。

剖面顶部以一套巨厚砾岩层结束,为冲积扇相的积石组,古水流方向主要为 NWW—N 向,砾石成分以砂岩、石英岩为主(骆满生等,2010)。靠近化隆一带古水流方向为 182° ,以花岗岩、火山岩为主,其

次为硅质岩、泥岩等(刘少峰等,2007),盆地现代周缘的系列山系已经全部形成。

2 高原东北缘古流向和物源时空分布特征

为了进行详细区域对比研究,本文对比了青藏高原东北缘柴达木盆地西岔沟剖面(编号 PM3,宋春晖,2006)、索尔库里盆地依屯布拉克剖面和达坂剖面(编号分别为 PM4 和 PM5,常宏等,2001;常宏,2004)、阿牙克库木湖盆地花条山剖面(编号 PM6,陕西省地质调查院^①,2003)、贵德盆地阿什贡剖面和甘家剖面(编号分别为 PM7 和 PM8,宋春晖等,2003;宋春晖,2006)、肃北盆地铁匠沟剖面(编号 PM9,宋春晖,2006)、酒泉盆地石羊圈剖面 and 老君庙剖面(编号分别为 PM10 和 PM11,宋春晖等,2001;宋春晖,2006)等 9 条剖面(图 4)。与实测的两条剖面的研究方法相同,本文对研究区前人的 9 条科研剖面中新近纪沉积序列的古流向和物源数据进行了系统收集和分析(表 1,图 4)。

本文总结研究区实测和科研共 11 条剖面,把新近纪分为中新世早期($23\sim 17\text{Ma}$)、中新世中期($17\sim 8\text{Ma}$)、中新世晚期($8\sim 5.3\text{Ma}$)和上新世($5.3\sim 2.6\text{Ma}$)4 个时间段,结合高原东北缘新近纪沉积古地理时空演化特征(另文发表),绘制了研究区沉积古流向演变图(图 5)和沉积物源演变图(图 6)。

2.1 中新世早期($23\sim 17\text{Ma}$)

高原东北缘自西向东分布有阿牙克库木湖盆地、柴达木盆地、德令哈盆地、酒泉盆地、贵德-循化盆地、临夏盆地等。

阿牙克库木湖盆地主要沉积滨浅湖相的石壁梁组,在盆地西部新疆若羌县花条山一带古水流方向经历了从北西向的 320° 、 305° 逐渐转变为北北东向的 15° 、 23° (陕西省地质调查院^①,2003),指示东昆仑山已呈现为隆起区,向该盆地提供物源。

柴达木盆地该时期为盆地稳定发展期,盆地整体持续下降,形成几乎遍及全盆地的上干柴沟组和下油砂山组的细碎屑沉积,沉积厚度巨大(张克信等,2010a,2010b)。西岔沟一带此时为三角洲前缘和三角洲平原亚相沉积,根据砾石 AB 面统计结果指示此时古水流方向为 200° 和 230° ,统计砾石成分以变砂岩、石英岩、片岩和花岗闪长岩为主,少量凝灰岩(宋春晖,2006),指示北部的阿尔金山提供物源。盆地东部的大红沟剖面为湖泊-三角洲相的旋回,古水流呈 S 向,物源来自南祁连山。

图 4

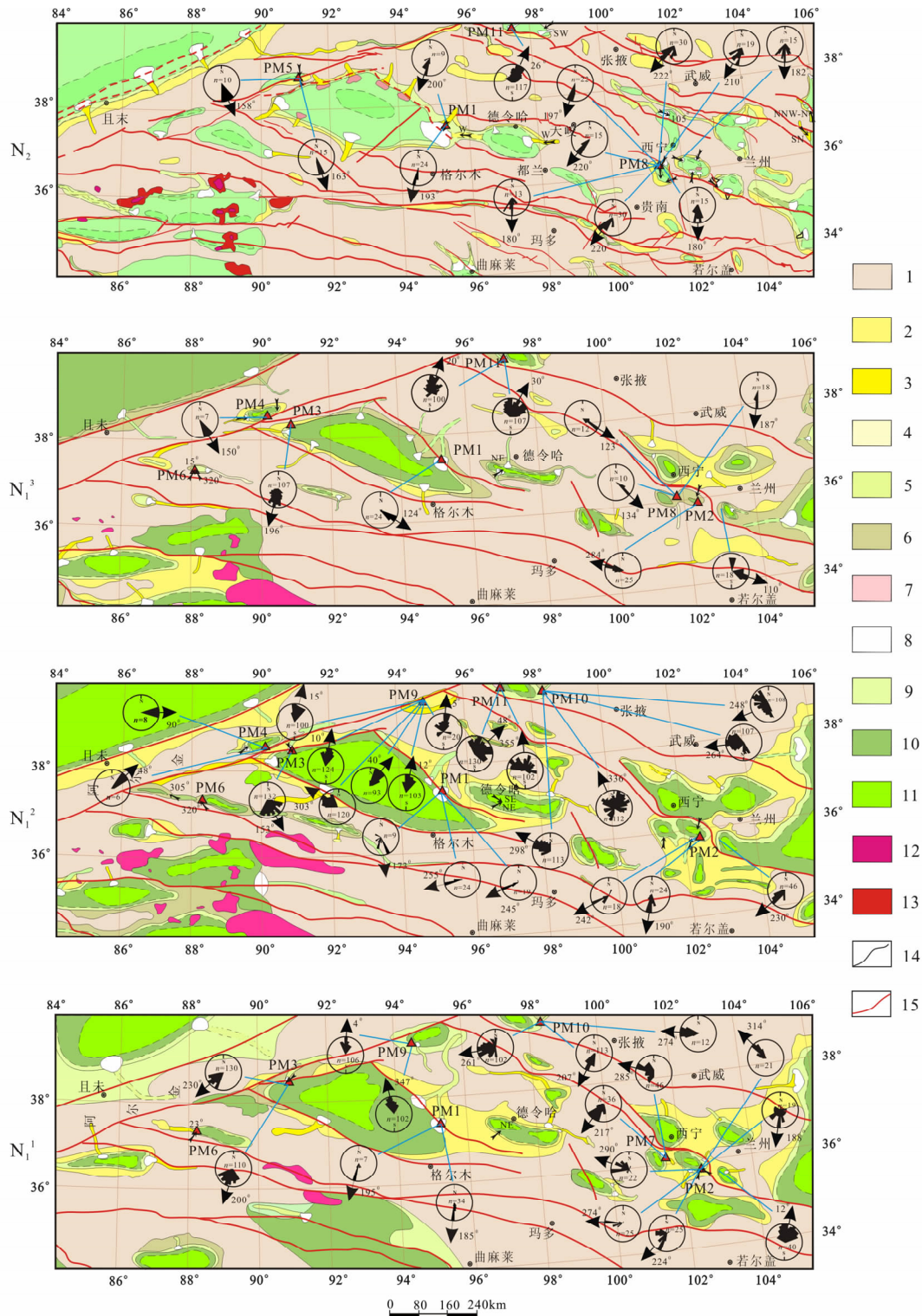


图 5 青藏高原东北部中新世—上新世岩相古地理及古流向演变图

Fig. 5 Mio-Pliocene lithofacies palaeogeography and paleocurrent evolution chart in Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau

1—剥蚀区; 2—冲积扇相; 3—辫状河相; 4—曲流河相; 5—河道亚相; 6—冲积平原亚相; 7—水下扇相; 8—湖泊三角洲相; 9—滨湖亚相; 10—浅湖亚相; 11—深湖亚相; 12—火山溢流相; 13—火山爆发相; 14—沉积相界线; 15—断裂; 物源图例见图 2

1—Erosion area; 2—alluvial fan; 3—braided river; 4—meandering river; 5—river flow; 6—flood plain; 7—underwater fan; 8—lacustrine delta; 9—coastward lake; 10—shallow lake; 11—deep lake; 12—volcanic effusive facies; 13—volcanic eruption facies; 14—boundary of lithofacies; 15—fault; legend for provenance are the same as fig. 2

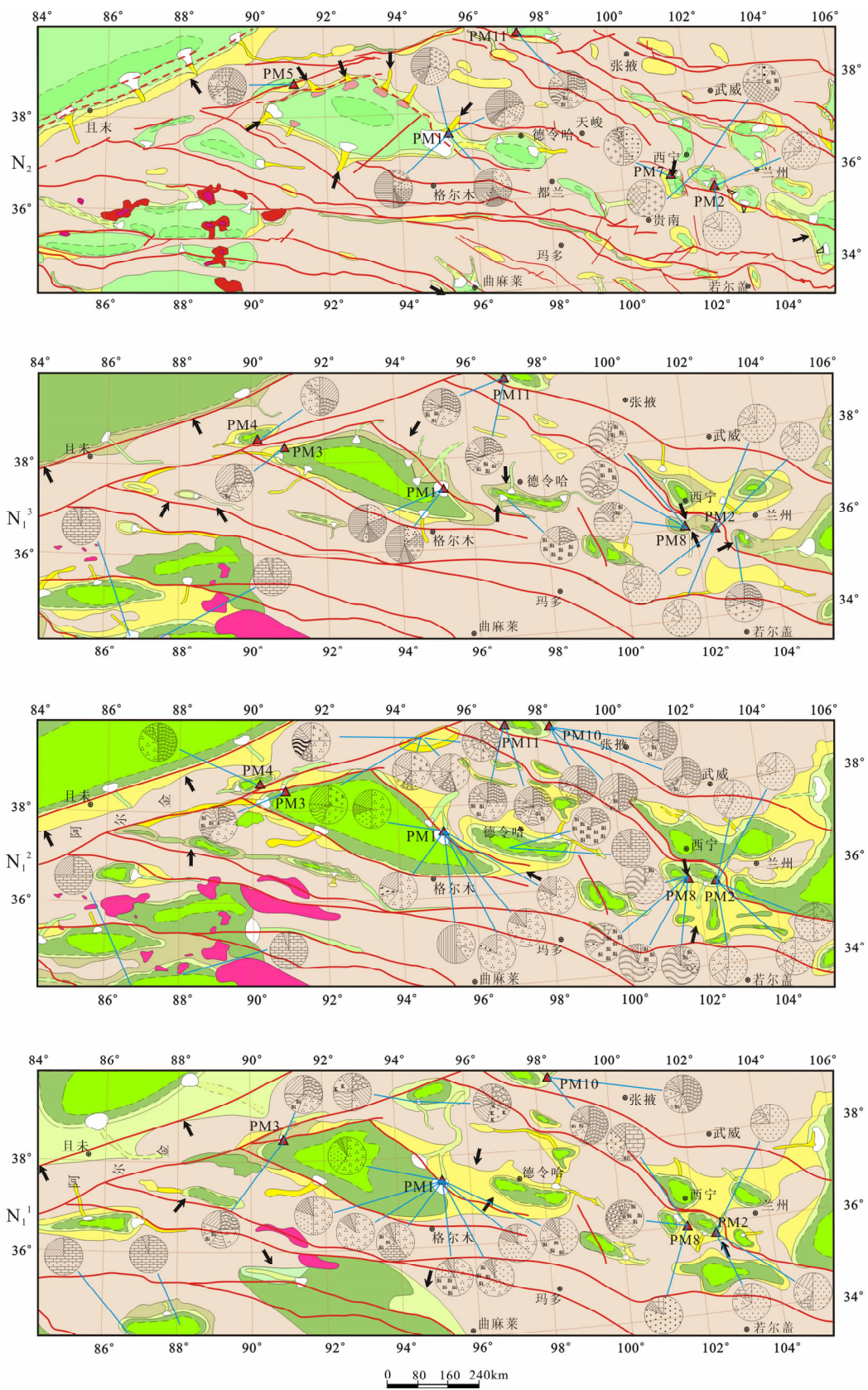


图 6 青藏高原东北部中新世—上新世岩相古地理及沉积物源演变图(图例见图 2 和图 5)

Fig. 6 Mio-Pliocene lithofacies palaeogeography and provenance evolution chart in Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau (legend are the same as fig. 2 and fig. 5)

德令哈盆地西南的怀头他拉镇南 10km 的古流向以 NE 向为主,表明此时德令哈盆地西南部和南部的东昆仑山地区为物源区(孟庆泉,2008)。

酒泉盆地南部石羊圈一带形成细粒半深湖相夹水下扇相沉积,从前积纹层中获得的古水流方向为 261° 、 207° 和 274° ,砾石成分以变质砂岩、石英岩、硅质岩、辉绿岩、安山岩为主,夹少量灰岩和片岩(宋春晖等,2001;宋春晖,2006),物源区位于盆地东部,此时盆地南侧的北祁连隆升不明显。

循化盆地积石镇西沟一带古流向分析认为他拉组古水流方向主要为 314° 和 290° ,咸水河组中庄段古水流方向为 274° 和 224° ,砾石成分以砂岩、石英岩、灰岩为主,表明沉积物主要来自北部的拉脊山和南部的西秦岭隆起带。

贵德盆地在阿什贡一朶让一带为沉积较厚的山麓冲洪积扇相砾岩及砂砾岩,古流向为 285° 和 217° ,砾石砾径统计表明,砾径最大为 5cm,一般为 0.2~2.5cm,说明这时拉脊山隆起高度不太高(宋春晖等,2003;宋春晖,2006);贵德门附近砾石成分以砂岩、变质砂岩、硅质岩、灰岩为主,夹少量花岗岩、辉绿岩等(刘少峰等,2007),说明此时盆地东南部的西秦岭以及北侧的拉脊山已经隆起。

临夏盆地东乡县毛沟一带咸水河组湖相沉积中古流向为 12° (方小敏等,1997,2007),可知由南部的西秦岭隆起带提供物源。

2.2 中新世中期(17~8Ma)

到该时间段,研究区开始出现索尔库里盆地,且由于湖盆扩张,柴达木盆地和德令哈盆地相连为一个整体盆地。

阿牙克库木湖盆地此时为深湖相沉积,盆地西部花条山一带所获得的古水流方向为 320° (陕西省地质调查院^①,2003),盆地南缘的东昆仑山为物源区。

索尔库里盆地地下陷接受沉积,发育洪积扇-滨浅湖相沉积,盆地南缘阿卡托山古水流方向为 48° ,并且砾石成分简单,主要为凝灰质砂岩、变砂岩、石英岩;后期变为半深湖-水下扇相沉积,古水流方向为 90° ,砾石成分相对前期更为复杂,出现花岗岩、花岗闪长岩、基性火山岩等砾石(常宏等,2001;葛肖虹等,2002,2006),指示出盆地东缘的阿尔金山和盆地南缘的祁漫塔格山逐渐成为隆起区。

柴达木盆地和德令哈盆地沉积范围比中新世早期更为广大,在青海茫崖镇干柴沟-西岔沟一带以湖泊-三角洲相沉积为主,古水流方向由 153° 转变为

90° ,砾石成分以石英岩、变质砂岩、硅质岩、板岩、片岩等变质岩为主(宋春晖,2006)。大柴旦大红沟一带为三角洲相沉积,古水流方向由 173° 逐渐转变为 255° 、 245° ,砾石成分以石英岩、砂岩、火山岩为主,含少量岩屑、火山岩。青海怀头他拉镇南 10km 一带古流向为 NE、SE 向为主,油砂山组沉积下部砾石成分以灰岩为主,上部以硅质岩、变质砂岩为主(孟庆泉,2008),可推测阿尔金山、南祁连山(埃姆尼克山)进一步隆升成为物源区。

酒泉盆地此时处于欠补偿的沉积环境,在石羊圈一带主要为半深湖-浅湖夹扇三角洲相,古水流方向由前期 298° 、 336° 转变为 264° 、 248° ,砾石成分以变质砂岩、硅质岩、石英岩为主,辉绿岩、安山玢岩、变质砾岩和片岩明显增加。在老君庙一带为浅湖-三角洲相,古水流方向由 48° 转变为 355° ,砾石成分以变质砂岩、石英岩、硅质岩、片岩、灰岩、辉绿岩等为主(宋春晖等,2001;宋春晖,2006;Song Chunhui et al.,2001),反映物源区为北祁连山。

循化盆地和贵德盆地此时主要为咸化湖相沉积,积石镇西沟一带为深湖、浅湖和三角洲亚相,晚期出现水下扇相沉积,早期古流向主要为北偏东向,盆地北缘古流向主要为 S、SW 向(骆满生等,2010),晚期古流向主要为 242° 、 129° 、 170° 、 135° 、 190° ,砾石成分为砂岩、火成岩、硅质岩、石英岩和少量变质岩(张捷钰等,2010)。临夏盆地东乡县毛沟一带古水流方向为 230° ,王家山古水流方向为 SEE(方小敏等,1997,2007)。区域上,这几个盆地可能相连成为一个大的湖盆,南部的西秦岭和北部的拉脊山共同为湖盆提供物源。

2.3 中新世晚期(8~5.3Ma)

该时期区域湖盆逐渐进入萎缩期,各大沉积盆地均开始接受粗碎屑沉积物。

阿牙克库木湖盆地为滨湖-浅湖相的石壁梁组,在盆地西部花条山一带所获得的古水流方向从 15° 转变为 320° (陕西省地质调查院^①,2003),盆地南缘的东昆仑山仍旧为物源区。

索尔库里盆地水体变浅,由滨浅湖转变为三角洲相,依屯布拉克一带转变为冲洪积扇相沉积,古水流方向转变为 150° ,砾石成分统计表明砾石以石英岩、变质砂岩、硅质灰岩、燧石等为主(常宏等,2001),物源区为西北侧的金雁山(阿尔金山)。

柴达木盆地和德令哈盆地沉积面积缩小,沉积中心逐渐向东部迁移,在盆地边缘却为不整合接触。在西岔沟一带以扇三角洲沉积为主,古水流方向为

196°,砾石成分以变砂岩、石英岩、片岩、板岩、硅质岩和安山岩为主(宋春晖,2006)。大柴旦镇大红沟主要为曲流河相,恢复古水流方向为124°,经统计分析砾石成分以石英岩、灰岩、砾岩、火山岩等为主。怀头他拉镇南主要为三角洲相为主,古水流方向以NE方向为主,但水流方向并不集中,还有NW向和E向的流向,砾石成分比较复杂,主要为硅质岩和泥砾,其次为石英岩、变砂岩、片麻岩和灰岩(孟庆泉,2008),推断沉积物可能来源于北缘的阿尔金山、埃姆尼克山和祁连山,不过此时隆升的高度仍旧不高。

酒泉盆地进入盆地萎缩阶段,疏勒河组以扇三角洲-冲积扇相为主,老君庙一带为扇三角洲夹浅湖相沉积,古流向为30°、20°方向,砾石成分以变质砂岩、石英岩、硅质岩、片岩、板岩、灰岩、花岗岩和片麻岩为主,砾石成分中灰岩和片麻岩相对明显增加(宋春晖等,2001;宋春晖,2006;Song Chunhui et al.,2001),推断北祁连山地区构造隆升显著。

贵德、循化-化隆盆地和临夏-定西盆地在该期亦开始萎缩,为滨湖-三角洲相,湖缘的水下扇砾岩和砂岩层增多,明显表现出水体向上变浅的进积型序列(张克信等,2010a,2010b)。贵德盆地北部浅湖相沉积中突然大规模、频繁出现水下扇-三角洲沉积,在甘家一带主要为三角洲前缘沉积,古流向为134°、123°、187°,贵德门一带砾石成分以泥岩、砂岩、变质砂岩、硅质岩、板岩、火山岩、灰岩为主(宋春晖等,2003;宋春晖,2006)。循化-化隆盆地此时主要为三角洲前缘-水下扇相沉积,积石镇西沟村一带古流向为284°,砾石成分以砂岩为主,其次为灰岩、花岗岩、石英岩、硅质岩、板岩、片岩、片麻岩和少量泥岩、大理岩、超基性岩。临夏-定西盆地由湖相细粒沉积转变为辫状河流相沉积,临夏市王家山村一带主要为冲积平原相-浅湖相沉积,古水流方向为110°,砾石成分主要为变质砂岩、花岗岩、灰岩、片岩等(宋春晖,2006),指示除了南部的西秦岭和北部的拉脊山,东部的积石山也明显隆升为湖盆提供物源。

2.4 上新世(5.3~2.6Ma)

到上新世,区域大型湖盆均进入裂解消亡期,广泛发育河流-冲积扇相粗碎屑沉积物。

阿牙克库木湖盆地已经消亡,而索尔库里盆地在索尔库里达坂一带为滨浅湖-冲积扇相沉积,根据砾岩层中砂岩透镜体的粗糙斜层理前积层产状恢复古水流为163°、158°(图3),砾石成分除了变质砂岩外相对前期硅质灰岩、白云岩、花岗闪长岩、辉长岩或基性火山岩含量大幅增加(常宏,2004),指示盆地

西北侧的金雁山进一步隆升使老地层出露剥蚀,为盆地提供物源(常宏等,2001;常宏,2004;宋春晖,2006;陈正乐等,2006)。

柴达木盆地此时在西南缘西岔沟一带为扇三角洲相沉积,古流向以向南为主,砾石成分变得复杂(宋春晖,2006)。在大柴旦镇大红沟主要为辫状河-冲积扇相,古流向方向为193°~200°,砾石成分以石英岩、灰岩、砾岩、砂岩、火山岩为主,指示阿尔金山和南祁连山等物源区大规模快速隆升。

酒泉盆地在北祁连山前主要为冲积扇相,并与上覆的玉门砾岩呈平行或角度不整合接触,砾岩中砂岩和变质砂岩砾石成分增加,而石英和花岗岩相对减少,古水流方向为26°(宋春晖等,2001;宋春晖,2006;Song Chunhui et al.,2001),北祁连山延续了前期的构造隆升。

贵德盆地在甘家一带为辫状河流-冲积扇相沉积,古水流方向为210°、220°、222°、197°,向南盆地中部逐渐转变为辫状河控型三角洲-浅湖沉积,湖盆范围缩小,自北向南沉积物粒度变细,砾岩层厚度变小。盆地北部拉脊山南麓古水流方向为180°,盆地南部瓦家村一带古水流大致向北(宋春晖等,2003;宋春晖,2006)。

循化-化隆盆地由于周缘山系强烈逆冲与盆地整体隆升,沉积一大套冲积扇相积石组砾岩,南部古水流方向主要为NWW-N向,砾石成分主要为砂岩、石英岩等(骆满生等,2010);而北部的古水流方向为182°,砾石成分以花岗岩、火山岩为主,其次为硅质岩、泥岩等(刘少峰等,2007),表明南部的西秦岭、北部的拉脊山和东部的积石山进一步快速隆升。

3 盆地分析对构造隆升的响应

在详细对比分析研究区内各盆地中新世—上新世4个演化阶段的沉积相演化、古流向和物源演变的基础上,绘制了研究区4个演化阶段岩相古地理和古流向、物源演变图(图5,图6)。结合前人获得的构造热年代学资料(郑德文等,2003;陈正乐等,2006;Yuan Wanming et al.,2006;Wang Guocan et al.,2011;Zheng Dewen et al.,2010),本文进一步探讨青藏高原东北部新近纪沉积盆地分析与构造隆升事件之间的耦合关系(图7)。

3.1 构造隆升阶段1(23~19.5Ma)

陈正乐等(2002,2006)对阿尔金山不同部位所做的构造热年代学研究发现在且末—若羌—茫崖一带的数据以22~17Ma最为集中。Edward等

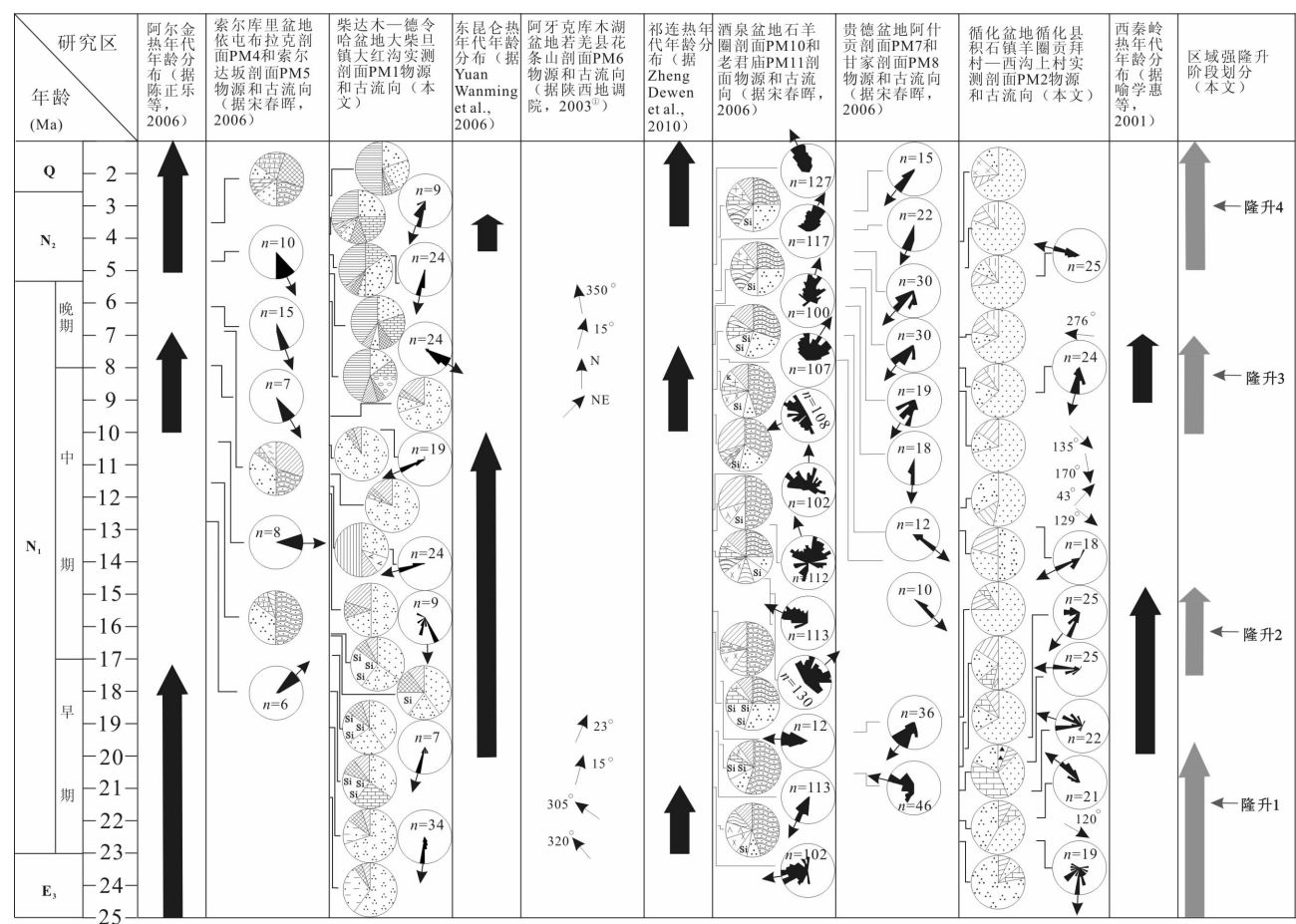


图 7 青藏高原东北部中新世—上新世古流向和物源分布与构造热年代格架对比及强隆升阶段划分(图例见图 2)

Fig. 7 Mio-Pliocene intense uplift stages of the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau on the basis of paleocurrent, provenance and thermochronology (legend are the same as fig. 2)

(2001)根据热年代学资料揭示阿尔金山东北部在 26~19Ma 经历了强剥露冷却事件。拜永山等 (2008)报道了阿尔金南侧祁漫塔格一带磷灰石裂变径迹测年数据,其中以 22~17Ma 的年龄数据为主。阿尔金在中新世早期处于山脉快速隆升期,不过隆升速率、幅度相对较小。在柴达木盆地西部西岔沟一带出现特征成分凝灰岩,表明阿尔金断裂对盆地西部的影响增强(宋春晖,2006)。上述事实充分说明阿尔金断裂带在渐新世末期—中新世早期经历了强构造隆升阶段。

祁连山在 23Ma 左右发生强烈构造活动,造成了新近纪地层与古近纪地层的不整合接触,酒泉盆地在 23~21Ma 左右接受的疏勒河组下部的辫状河相粗碎屑沉积是对此次构造活动的记录(宋春晖,2006;张克信等,2007,2008,2010b; Zhang Kexin et al., 2008)。21Ma 后酒泉盆地南部石羊圈一带古流向显示古水流平行祁连山向西,部分向西南方向,砾石成分以变质岩为主,表明此时祁连山区比较稳

定,高差较小,物源区祁连山的剥蚀速率很低并逐步达到夷平状态,物源供给不足(宋春晖等,2001;宋春晖,2006;Song Chunhui et al., 2001)。柴达木盆地东北部大柴旦大红沟一带古水流方向主要为 SSW 和 S 向,显示沉积古地势为北高南低,砾石成分主要以石英岩、硅质岩等变质岩系为主,南祁连山地区已经开始隆起遭受剥蚀并向盆地北部提供物源。

东昆仑山区的构造热年代学资料揭示的构造隆升事件在该时期表现不明显,但是基于阿牙克库木湖盆地和德令哈盆地的古流向和物源分析指示东昆仑山可能为初始抬升阶段,为山体北部的湖盆提供远源的细碎屑沉积物。

循化、贵德、临夏等盆地的古流向和物源分析表明,砾石主要成分与西秦岭北缘逆冲带和拉脊山的特殊岩性相一致(宋春晖,2006;张健钰等,2010),表明南侧的西秦岭和北侧的拉脊山此时已隆起成陆,不过此时隆升的幅度不是很高。

3.2 构造隆升阶段 2(17.5~15Ma)

随着高原东北缘盆山耦合的相互作用,湖盆进一步扩张,索尔库里盆地形成,并揭示出盆地东缘的阿尔金山和盆地南缘的祁漫塔格山进一步抬升。柴达木盆地东西部地区的资料分析均表明阿尔金山经历早期隆升已经到了一定高度,而砾石成分统计表明盆地西北部物源供应区除了阿尔金山还包括南祁连。油砂山组下段底部的浅湖夹三角洲沉积的砾岩中首次出现大量灰岩砾石,这可能代表了15Ma左右阿尔金山的隆升(宋春晖,2006;常宏等,2001;常宏,2004)。15.7Ma左右青海柴北缘怀头他拉镇南一带古水流方向为NE向(孟庆泉,2008),砾石成分主要为含腕足类化石的灰岩,砾径较粗、磨圆较差,推断物质来源于近源的埃姆尼克山,代表了埃姆尼克山的隆升。15.3Ma左右古水流方向转变为SE向,砾石成分以硅质岩、变砂岩、片麻岩等变质岩为主,推断物源主要来自南祁连山区的长城系党河群和寒武系黑刺沟群(青海省地质矿产局,1991),代表当时南祁连山的进一步隆升,但砾径相对较小、分选好和磨圆度较高,推测祁连山这一时期构造隆升高度并不高。

东昆仑山的热年代学资料显示出强烈的岩石隆升剥露(Yuan Wanming et al., 2006),并得到阿牙克库木湖盆地和德令哈盆地的沉积响应,指示东昆仑的一次强烈隆升事件。

贵德盆地贵德群的物源主要来源于拉脊山隆起带和西秦岭隆起带。循化县积石镇羊圈贡拜—西沟此时古流向主要为北偏东向,砾石成分表明南部的西秦岭和北部的拉脊山共同提供物源,不过盆地的主要物源供应区为西秦岭隆起带,表明此时古地势可能南高北低。临夏盆地东乡县毛沟一带古水流方向表明东北部的拉脊山这一时期隆升到一定高度(方小敏等,1997;宋春晖,2006)。郑德文等(2003)根据临夏盆地碎屑磷灰石裂变径迹年龄研究获得其剥蚀源区在约14Ma存在一次快速剥露。

3.3 构造隆升阶段 3(10~7Ma)

柴达木盆地西部10Ma时沉积的砾石砾径较粗大,表明阿尔金进一步隆升,约10~8Ma时沉积环境转变为较稳定的浅湖夹三角洲沉积,砾石砾径相对变细,反映此时阿尔金虽然发生了隆升,但是由于剥蚀使其高度相对降低(宋春晖,2006)。盆地东北部古水流从前期的SSW和SWW向逐渐转变为SE向,砾石成分除了前期的石英岩外,出现了大量灰岩和砾岩,灰岩和砾岩的出现表明祁连山在8Ma左右

发生明显构造隆升。此时柴东北缘怀头他拉镇南一带古水流方向以NE方向为主,但水流方向并不集中,泥砾磨圆度较差(孟庆泉,2008),推断沉积物可能来源于周围的埃姆尼克山和祁连山,不过此时构造隆升的高度并不高。

索尔库里盆地南缘阿卡托山在10Ma左右古水流方向转变为NE向,砾石成分分析推测物源区为南部昆仑山皮牙孜塔格山区;大约9.88Ma以后古水流方向转变为E向,砾石成分中出现花岗岩、花岗闪长岩、基性火山岩等砾石(常宏等,2001;葛肖虹等,2006;Zhang Kexin et al., 2010),推断物源区从前期的昆仑山转变为盆地西部阿尔金山的金雁山区,金雁山区构造隆升形成本区新的物源区。

此时酒泉盆地的老君庙一带古水流方向以北东和北向为主,砾石成分分析表明祁连山为物源供应区,约8.6Ma时古水流方向向北,沉积速率相对前期突然增大表明快速隆升使祁连山海拔增高(宋春晖等,2001;宋春晖,2006;Song Chunhui et al., 2001)。

大约8Ma左右,拉脊山开始强烈隆升,南北边缘断裂向盆地快速扩展(王国灿等,2010)。贵德盆地的贵德县阿什贡北古水流标志判断此时古流向为SE—S向,由下而上扇三角洲相砾岩增多、厚度增大、砾径变粗以及沉积速率逐渐增大的特征表明盆地北部拉脊山逐渐隆升使区域夷平面解体(宋春晖等,2003;宋春晖,2006)。循化盆地西沟一带的古流向从前期的S—SW向转变为以NW为主,砾石成分反映了物源的多源性,除南部的西秦岭、北部的拉脊山外,东部的积石山也已明显隆起,成为主要的物源区。临夏盆地王家山村古水流方向为SEE(方小敏等,1997,2007),砾石成分表明物源区为西北部的拉脊山。郑德文等(2003)根据临夏盆地碎屑磷灰石裂变径迹年龄研究获得西秦岭隆起带在约8Ma左右存在一次快速剥露。

3.4 构造隆升阶段 4(5Ma以来)

上新世是青藏高原加速隆升剥露期,阿尔金断裂带中部阿羌地区的磷灰石裂变径迹测年结果显示阿尔金山在5.15~4.15Ma发生了快速剥露作用(陈正乐等,2006),表明阿尔金断裂在上新世早期发生了快速走滑作用并伴随山体的快速隆升剥露。索尔库里达坂一带的古流向与前期相比没有太大变化,沉积物中砾石成分复杂、分选极差,与前期相比,硅质灰岩、白云岩、花岗闪长岩、辉长岩或基性火山岩含量大幅增加,指示盆地西北侧的金雁山进一步

隆升使老地层出露剥蚀,为盆地提供物源(常宏等,2001;常宏,2004;宋春晖,2006;陈正乐等,2006)。3.6Ma以来七个泉一带在3.6~3.1Ma沉积速率达到最大值(宋春晖,2006;陈正乐等,2002),说明受阿尔金走滑逆冲断裂的巨大影响,阿尔金山物源区大规模隆升,盆地西部坳陷区也逐步发生抬升。

柴达木盆地东北部在3.6Ma左右古水流方向从前期SE向转变为SSW向,砾石成分统计表明南祁连山为主要物源供应区,盆地沉积速率逐渐加快,砾石砾径逐渐增大,说明祁连山发生了大规模快速隆升。酒泉盆地沉积的玉门砾岩组下段与疏勒河组之间的区域性平行或角度不整合接触,是对高原构造强烈隆升的响应,古流向依然为NNE向,砾石中砂岩、变质砂岩成分增多(宋春晖,2006)。青藏高原周缘及内部沉积盆地普遍沉积粗砾石层堆积,沉积速率明显加快,均表明青藏高原东北部的快速构造隆升(王国灿等,2010)。祁连、东昆仑和黄河源自3.6Ma以来受近东西向系列逆冲和走滑断层控制,表现出了急剧快速隆升和断裂强烈地向盆地扩展、地貌反差加大的特征(Cui Zhijiu et al.,1998;宋春晖等,2001;宋春晖,2006;张培震等,2006;方小敏等,2007;袁道阳等,2007)。

上新世晚期由于区域构造活动使得贵德盆地周缘山体大规模隆升。拉脊山南麓古水流方向向南表明拉脊山这一时期完全隆起成为贵德盆地北部的物源供应区,盆地南部瓦家村一带古水流大致向北,反映了该时段周缘山体和盆地具整体急剧强烈快速构造隆升特点(王国灿等,2010)。此时积石山已经隆起,分隔循化-化隆盆地和临夏盆地,盆地内沉积砾石组砾岩,与下伏的临夏组何王家段存在沉积间断和不整合面,砾石成分统计表明盆地北部与南部物源截然不同,因此认为这是对盆地北部拉脊山和南部西秦岭发生构造隆升事件的直接响应。

4 讨论

本文通过对青藏高原东北部多个盆地新近纪沉积序列进行古流向和物源演变,划分了23~19.5Ma、17.5~15Ma、10~7Ma和5Ma以来4次主要隆升阶段,和前人通过构造热年代学等其他方法揭示的强构造隆升事件有较好的对比关系。Edward等(2001)曾根据热年代学资料揭示阿尔金山东北部的强剥露冷却事件发生在26~19Ma,而陈正乐等(2006)认为强剥露冷却事件在22~17Ma相对密集。拜永山等(2008)在阿尔金南侧祁漫塔格

一带的磷灰石裂变径迹年龄数据集中在22~17Ma。此外,柴西西岔沟地区的碎屑磷灰石裂变径迹数据揭示在19.52Ma发生快速抬升,对应于21.8Ma发生强烈的构造挤压(高军平等,2011),这与东昆仑山的热年代学资料指示的约20Ma强烈的岩石隆升剥露(冷却)事件是一致的(Yuan Wanming et al.,2006)。可以看出,沉积学研究揭示23~19.5Ma的隆升阶段与构造热年代学数据具有很好的对应关系。

东昆仑山的磷灰石FT年龄和热历史模拟得出16.3~10.0Ma的一次冷却历史(陈宣华等,2011),这与东昆仑山南部的12~6Ma的快速冷却期(袁万明等,2005)有一定交叉。同时,柴西西岔沟地区的碎屑磷灰石裂变径迹测试分析也认为柴西及其周缘山地在16.38Ma和7.38Ma分别发生强烈挤压,造成14.21Ma和8.76Ma的快速抬升(高军平等,2011);同一地区所做的磷灰石裂变径迹热演化模拟认为在16~14Ma和11.5~6.0Ma沉积物的源区发生明显的升降运动(王世明等,2008),两者之间的认识是一致的。

此外,10~7Ma的强构造活动期在阿尔金地区主要表现为阿尔金断裂的左旋走滑活动形成“正花状”构造,伴随着强烈的差异抬升剥露(刘俊来等,2003)。多个地段靠近阿尔金主断裂带的磷灰石裂变径迹年龄大部分集中在7~9Ma之间(刘俊来,2003;陈正乐等,2002;万景林等,2001;王瑜等,2002)。在青藏高原东北缘,郑德文等(2003)根据临夏盆地碎屑磷灰石颗粒裂变径迹年龄研究获得其蚀源区14Ma和约8~5.4Ma的两次快速剥露;拉脊山的强烈隆升也发生在约8Ma,促使南北边缘断裂向盆地快速扩展(王国灿等,2010);秦岭山脉始于10.5~7Ma的快速隆升剥露(刘建辉,2010)指示青藏高原东北部晚新生代隆升和对外扩展的过程。构造热年代学资料对17.5~15Ma的隆升事件虽有响应,但不是很明显,而与10~7Ma的隆升阶段之间的响应非常显著,可能是构造事件本身的强弱不同使得其与沉积记录之间的响应略有差异。

东昆仑山的末次快速隆升冷却事件发生在5.1~0.9Ma(陈宣华等,2011)。阿尔金断裂带中部阿羌地区的磷灰石裂变径迹测年结果显示阿尔金山在5.15~4.15Ma发生了快速剥露作用(陈正乐等,2006),表明阿尔金断裂在上新世早期发生了快速走滑并伴随山体的快速隆升剥露。相关研究与沉积记录反映5Ma以来的隆升阶段 also 具有很好的可对比

性。

其中,阿尔金断裂带是新近纪以来对青藏高原东北部影响最为显著的重大活动断裂之一,而且研究程度也最高。已有的基岩磷灰石裂变径迹年龄数据统计分析显示阿尔金山新近纪以来明显的峰值区间主要集中在22~17Ma、10~7Ma、5.5~4.5Ma和2.1~1.2Ma(Wang Guocan et al., 2011; 陈正乐等, 2006),这与沉积记录反映的4次隆升阶段之间几乎均有很好的响应。

5 结论

通过对青藏高原东北部11个新近纪沉积盆地的沉积相演化、古流向和物源演变的详细对比研究,揭示了研究区新近纪4次沉积演变与构造隆升的响应。

(1)中新世早期(23~19.5Ma):阿牙克库木湖盆地古流向为NW,柴达木盆地西和东北部为NNE和S,德令哈盆地为NE向,酒泉盆地南部为W向,结合物源分析表明东昆仑和阿尔金已经抬升成剥蚀区,南祁连山比北祁连隆起显著。循化、贵德和临夏等盆地物源和古流向指示西秦岭和拉脊山也已成为隆起区。但是,区域上整体地势差异不显著,阿尔金山地区的热年代学证据对比较好。

(2)中新世早中期(17.5~15Ma):区域湖盆面积扩大,阿牙克库木湖盆地古流向为NNE,柴达木西部为S向,而东部转变为W向,酒泉盆地东南部为W—N向,反映东昆仑、阿尔金和祁连山全面隆升。贵德-循化、临夏盆地的古流向反映为盆地周缘型,指示西秦岭和拉脊山明显抬升,反映区域构造差异隆升造成盆地凹陷扩张进入湖泛期。

(3)中新世中晚期(10~7Ma):阿牙克库木湖盆地古流向为NW,索尔库里盆地为SE—S向,柴达木盆地主体为S向,酒泉盆地为NNE,粒径和沉积速率增大,与热年代学证据一致,揭示出阿尔金山和祁连山进一步快速隆升。贵德、循化和临夏盆地萎缩,古流向和物源反映为显著的多源性,除西秦岭和拉脊山外,位于循化和临夏两盆地间的积石山开始隆起。

(4)上新世(5.3Ma以来):索尔库里盆地古流向为SSE向,柴达木和酒泉盆地古流向没有明显变化,沉积速率和粒径继续增大,阿尔金和祁连山加速隆升为高海拔地貌。贵德盆地北部古流向为SSW,主物源区是拉脊山。区域上,地势差异加强,湖盆被肢解后逐步萎缩消亡。

致谢: 本文是中国地质调查局国家青藏专项项目(Nos. 1212010610103、1212011121261)和国家自然科学基金(No. 40921062)的资助成果。中国地质调查局西南地调中心、西北地调中心和有关省、自治区地质调查研究院提供青藏高原及邻区1:25万区域地质填图资料,论文投稿后得到两位匿名评审专家非常有建设性的意见和帮助,在此谨表谢意!

注 释

① 陕西省地质调查院. 2003. 1:25万阿牙克库木湖幅(J45C003004)区域地质调查报告.

参 考 文 献

- 拜永山,任二峰,范桂兰,许长青. 2008. 青藏高原西北缘祁漫塔格山中新生快速抬升的磷灰石裂变径迹证据. 地质通报, 27(07): 1044~1048.
- 常宏,方小敏,安芷生,宋春晖,强小科. 2001. 索尔库里盆地中—上新世地层特征及其环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 21(3): 107~111.
- 常宏. 2004. 阿尔金索尔库里盆地晚第三系磁性地层研究与青藏高原北部隆升. 西安:中国科学院地球环境研究所博士论文.
- 陈宣华, Michael W M, 李丽, 尹安, 蒋荣宝, 万景林, 李会军. 2011. 东昆仑山带多期隆升历史的地质热年代学证据. 地质通报, 30(11): 1647~1660.
- 陈正乐, 万景林, 王小凤, 陈宣华, 潘锦华. 2002. 阿尔金断裂带8 Ma左右的快速走滑及其地质意义. 地球学报, 23(4): 295~300.
- 陈正乐, 宫红良, 李丽, 王小凤, 陈柏林, 陈宣华. 2006. 阿尔金山脉新生代隆升—剥露过程. 地学前缘, 13(4): 91~102.
- 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 陈怀录, 曹继秀. 1997. 甘肃临夏盆地新生代地层绝对年代测定与划分. 科学通报, 42(14): 1457~1471.
- 方小敏, 赵志军, 李吉均, 颜茂都, 潘保田, 宋春晖, 戴霜. 2004. 祁连山北缘老君庙背斜晚新生代磁性地层与高原北部隆升. 中国科学(D辑), 34(2): 97~106.
- 方小敏, 宋春晖, 戴霜, 朱迎堂, 高军平, 张伟林. 2007. 青藏高原东北部阶段性变形隆升: 西宁、贵德盆地高精度磁性地层和盆地演化记录. 地学前缘, 14(1): 230~242.
- 高军平, 方小敏, 宋春晖, 李生喜, 薛建平. 2011. 青藏高原北部中—新生构造—热事件: 来自柴西碎屑磷灰石裂变径迹的制约. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1466~1475.
- 葛肖虹, 刘永江, 任收麦. 2002. 青藏高原隆升动力学与阿尔金断裂. 中国地质, 29(4): 346~350.
- 葛肖虹, 任收麦, 马立祥, 吴光大, 刘永江, 袁四化. 2006. 青藏高原多期次隆升的环境效应. 地学前缘, 13(6): 118~130.
- 刘建辉. 2010. 贺兰山、秦岭山脉新生代伸展隆升及断层摩擦生热磷灰石裂变径迹分析. 北京: 中国地震局地质研究所博士学位论文.
- 刘俊来, 潘宏勋, 任收麦, 葛肖虹, 叶惠文. 2003. 阿尔金断裂双层花状构造的厘定. 地质科学, 38(1): 52~59.
- 刘少峰, 张国伟, Heller P L. 2007. 循化—贵德地区新生代盆地发育及其对高原增生的指示. 中国科学(D辑): 地球科学, 37(增刊1): 235~248.
- 骆满生, 张克信, 林启祥, 张健钰, 陈奋宁, 徐亚东, 陈锐明. 2010. 青藏高原东北缘循化—化隆地区新生代沉积古地理演化. 地质科技情报, 29(3): 23~31.

- 孟庆泉. 2008. 柴达木盆地北缘晚新生代精细磁性地层学与沉积对构造的响应. 兰州: 兰州大学博士学位论文.
- 潘桂棠, 丁俊. 2004. 青藏高原及邻区地质图(1 : 150 万). 成都: 成都地图出版社.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 宋春晖, 方小敏, 李吉均, 高军平, 赵志军, 范马洁. 2001. 青藏高原北缘酒西盆地 13Ma 以来沉积演化与构造升降. 中国科学(D 辑)增刊, 31: 155~162.
- 宋春晖, 方小敏, 李吉均, 高军平, 孙东, 范马杰, 颜茂都. 2003. 青藏高原东北部贵德盆地上新世沉积环境分析及其意义. 第四纪研究, 23(1): 92~102.
- 宋春晖. 2006. 青藏高原北缘新生代沉积演化与高原构造升降过程. 兰州: 兰州大学博士论文.
- 王国灿, 张克信, 曹凯, 王岸, 徐亚东, 孟艳宁. 2010. 从青藏高原新生代构造隆升的时空差异性看青藏高原的扩展与高原形成过程. 地球科学—中国地质大学学报, 35(5): 713~727.
- 王世明, 马昌前, 余振兵, 陈志勇, 杨颖. 2008. 柴西新生代沉积源区及盆地热历史的磷灰石裂变径迹分析. 地质科技情报, 27(5): 29~36.
- 王瑜, 万景林, 李齐, 王非, 王二七. 2002. 阿尔金山北段阿克塞—当金山口一带新生代山体抬升和剥蚀的裂变径迹证据. 地质学报, 76(2): 191~198.
- 喻学惠, 莫宣学, Martin F, 苏尚国, 赵欣. 2001. 甘肃西秦岭新生代钾霞徽黄长岩火山作用及其构造含义. 岩石学报, 17(3): 366~377.
- 袁道阳, 张培震, 方小敏, 王志才, 宋春晖, 郑德文. 2007. 青藏高原东北缘临夏盆地晚新生代构造变形及过程. 地学前缘, 14(1): 243~250.
- 袁万明, 董金泉, 王世成, 杨志强. 2005. 东昆仑南部带磷灰石裂变径迹分析的地质意义. 核技术, 28(9): 707~711.
- 张槌钰, 张克信, 季军良, 骆满生, 陈奋宁, 徐亚东, 王岳明. 2010. 青藏高原东北缘循化盆地渐新世—上新世沉积相分析与沉积演化. 地球科学—中国地质大学学报, 35(5): 774~788.
- 张克信, 王国灿, 陈奋宁, 徐亚东, 骆满生, 向树元, 寇晓虎, 赵来时. 2007. 青藏高原古近纪—新近纪隆升与沉积盆地分布耦合. 地球科学—中国地质大学学报, 32(5): 583~597.
- 张克信, 王国灿, 曹凯, 刘超, 向树元, 洪汉烈, 寇晓虎, 徐亚东, 陈奋宁, 孟艳宁, 陈锐明. 2008. 青藏高原新生代主要隆升事件: 沉积响应与热年代学记录. 中国科学(D 辑): 地球科学, 38(12): 1575~1588.
- 张克信, 王国灿, 骆满生, 季军良, 徐亚东, 陈锐明, 陈奋宁, 宋博文, 梁银平, 张槌钰, 杨永锋. 2010a. 青藏高原新生代构造岩相古地理演化及其对构造升降的响应. 地球科学—中国地质大学学报, 35(5): 697~712.
- 张克信, 王国灿, 季军良, 骆满生, 寇晓虎, 王岳明, 徐亚东, 陈奋宁, 陈锐明, 宋博文, 张槌钰, 梁银平. 2010b. 青藏高原古近纪—新近纪地层分区与序列及其对隆升的响应. 中国科学(D 辑): 地球科学, 40(12): 1632~1654.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 袁道阳, 张广泉, 李传友, 王志才. 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与升降的讨论. 第四纪研究, 26(1): 5~13.
- 郑德文, 张培震, 万景林, 李传友, 曹继秀. 2003. 青藏高原东北边缘晚新生代构造变形的时序—临夏盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录. 中国科学(D 辑)增刊: 190~198.
- 朱利东. 2004. 青藏高原北部隆升与盆地和地貌记录. 成都: 成都理工大学博士论文.
- 朱利东, 王成善, 伊海生, 刘登忠, 向芳, 刘志飞, 赵西西, 刘顺. 2004. 青藏高原盆地系统演化与高原形成时间. 成都理工大学学报, 31(3): 249~255.
- Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian, Ge Daokai, Pang Qiqing, Xu Qinghai. 1998. On Kunlun-Yellow River tectonic movement. Science in China (Series D), Earth Sciences, 41(6): 592~600.
- Edward R S, Nicolas A, Marc J, Bradley D R, Mauice B. 2001. Jurassic to Cenozoic exhumation history of the Altyn Tagh range, northwest China, constrained by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and apatite fission track thermochronology. Geological Society of America Memoirs, 194: 247~267.
- Song Chunhui, Fang Xiaomin, Li Jijun, Gao Junping, Zhao Zhijun, Fan Majie. 2001. Tectonic uplift and sedimentary evolution of the Jiuxi Basin in the northern margin of the Tibetan Plateau since 13 Ma BP. Science in China (Series D), Earth Sciences, 44(Suppl): 192~202.
- Wang Guocan, Cao Kai, Zhang Kexin, Wang An, Liu Chao, Meng Yanning, Xu Yadong. 2011. Spatio-temporal framework of tectonic uplift stages of the Tibetan Plateau in Cenozoic. Science China, Earth Sciences, 54(1): 29~44.
- Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Liao Zhongli, Zhao Xin, Su Qi. 2001. Temperature and pressure condition of garnet lherzolite and websterite from west Qinling, China. Science in China (Series D), 44: 155~161.
- Yuan Wanming, Dong Jinquan, Wang Shicheng, Andrew Carter. 2006. Apatite fission track evidence for Neogene uplift in the eastern Kunlun Mountains, northern Qinghai-Tibet Plateau, China. Journal of Asian Earth Sciences, 27(6): 847~856.
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Cao Kai, Liu Chao, Zhu Zongmin, Xu Yadong, Chen Fenning, Kou Xiaohu, Meng Yanning, Chen Ruiming. 2008. Cenozoic sedimentary records and geochronological constraints of differential uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. Science in China (Series D), 51(11): 1658~1672.
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Ji Junliang, Luo Mansheng, Kou Xiaohu, Wang Yueming, Xu Yadong, Chen Fenning, Chen Ruiming, Song Bowen, Zhang Jianyu, Liang Yiping. 2010. Paleogene-Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and their response to Uplift of the plateau. Science in China (Series D), 84: 357~369.
- Zheng Dewen, Marin K C, Zhang Peizhen, Zheng Wenjun, Kenneth A F. 2010. Erosion, fault initiation and topographic growth of the North Qilian Shan (northern Tibetan Plateau). Geological Society of America, 6(6): 937~941.

Response of the Neogene Sedimentary Paleocurrent and Provenance Distribution
to Uplift of the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau

YANG Yongfeng^{1,2,3)}, ZHANG Kexin^{1,2)}, XU Yadong^{1,2)}, SONG Bowen^{1,2)}, ZHANG Jianyu⁴⁾,
LUO Mansheng¹⁾, JI Junliang^{1,2)}, CHEN Fenning⁵⁾, CHEN Ruiming⁵⁾

1) Key Laboratory of Biological and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan, 430074; 2) Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan, 430074; 3) Region of Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources and Mineral Research, Xianyang, Shaanxi, 712000; 4) Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan, 430205; 5) Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an, 710054

Abstract

Based on paleocurrent and provenance analysis of Neogene sedimentary basins in the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, sedimentary evolution responding to tectonic uplift can be divided into four processes: ① During Early Miocene (23 ~ 19.5 Ma): paleocurrent and provenance analysis of the Ayakkum, Qaidam, Delingha and Jiuquan Basin show that the East Kunlun and Altyn area had uplifted into land. The evidence from the Xunhua, Guide and Linxia Basin indicate that the Western Qinling and Lajishan area was also main uplift area. At the same time, thermochronological data of the Altyn area contrasts well with sedimentary record. Overall, the terrain was not outstanding. ② During early Middle Miocene (17.5 ~ 15 Ma), the sedimentary basins expanded, the Xorkol Basin appeared, and data from these basins reflect the mountain ridge, including the Eastern Kunlun, Altyn, Qilian, Western Qinling and Lijishan, uplifted significantly. Regional differential uplift caused expansion of these basins. ③ In Late Miocene (10 ~ 7 Ma), the granularity and sedimentary rate of these basins increased abruptly, indicated a rapid uplift of the surrounding mountains, consistent with thermochronological evidence of the Altyn, Qilian and Western Qinling. However, paleocurrent and provenance data of the Guide, Xunhua and Linxia Basin show a sensible multi-source, and paleocurrent in the Xigou area turned to NWW, inferring uplift of the Jishishan Mountain. ④ During Pliocene (since 5.3 Ma onwards), paleocurrent directions in the research area remained unchanged, but granularity and sedimentary rate continued to increase. The uplift of Altyn and Qilian Mountain accelerated rapidly. Paleocurrent of the northern Guide Basin was SSW, indicating the Lajishan Mountain was regional source area. Overall, the terrain differences strengthened in this area, and the sedimentary basins shrank and withered away gradually.

Key words: Neogene; paleocurrent; provenance; uplift; the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau