

文章编号: 1000-0550(2012)06-1106-09

柴西红沟子地区中新世气候变化与侵蚀速率控制因素^①

胡思虎¹ 张涛¹ 高军平¹ 宋春晖¹ 方小敏²

(1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院 & 西部环境教育部重点实验室 兰州 730000; 2. 中国科学院青藏高原研究所 北京 100085)

摘要 柴达木盆地西部地区发育良好的新生代地层详细地记录了周围山体的变形隆升、源区风化剥蚀历史和气候环境变化过程。通过对柴达木盆地西部地区红沟子剖面中新世沉积物氯离子、硫酸根离子和碳酸盐含量测量分析,将该区17~4.8 Ma气候演化分为四个阶段:17~16.7 Ma干旱阶段;16.7~7.4 Ma相对前期气候湿润,但气候具持续干旱特征(分别在14.7 Ma和10.7 Ma干旱加剧,8.7~7.4 Ma干湿波动加大);7.4~5.1 Ma相对湿润,干湿波动大;5.1~4.8 Ma干旱阶段。沉积速率表明:17~16.5 Ma侵蚀速率最高、16.5~9.8 Ma侵蚀速率较低、8.7~6 Ma侵蚀速率高。该区沉积速率变化与气候变化无明显关系,而与构造活动具良好的一致性,即构造活动时期对应侵蚀速率较高或突然增高阶段,因此区域构造活动是控制红沟子地区侵蚀速率的主要因素。

关键词 柴西地区 侵蚀速率 气候变化 中新世

第一作者简介 胡思虎 男 1983年出生 博士研究生 沉积学 E-mail: hush06@lzu.edu.cn

通讯作者 宋春晖 E-mail: songchh@lzu.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

中新世是新生代古气候变化的关键时期。造山带的侵蚀速率不仅受构造、气候、地形等因素的影响,而且对构造、气候、地形也产生重要作用,因此侵蚀速率是分析这些影响因素及其相互关系的切入点和关键数据依据。前人研究表明构造运动对地形的塑造是控制侵蚀速率的主要因素^[1-7],也有研究表明气候变化(降水)是控制侵蚀速率的主要因素^[8-12]。蒸发岩(碳酸盐、硫酸盐和氯化物)是不同干旱程度气候下的化学产物。随着气候干旱化加剧,淡水湖泊变成咸水湖并开始沉积碳酸盐;进一步干旱化使湖水浓缩达到硫酸盐的溶解度,硫酸盐沉淀析出;最终在极端干旱的气候下,湖水将进一步浓缩达到氯化物的溶解度,从而产生氯化物沉积^[13]。因此,这些蒸发岩或它们的阴离子(CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)的含量,可指示不同的盐度环境和干旱程度;通常蒸发岩含量的增加,尤其是它们的沉积顺序增加对应于干旱化的加剧^[14-16]。柴达木盆地西部地区发育良好的新生代地层详细记录了周围山体的变形隆升、源区风化剥蚀历史和气候环境变化过程。在此,本文在柴达木盆地西部的红沟子剖面,运用高精度古地磁年代来计算沉积速率(侵蚀速率),利用氯离子、硫酸根离子和碳酸盐含量变化来反映剖面的干湿变化(降水变化)^[17-19],

从而讨论侵蚀速率的变化情况及其控制因素。

1 研究区地质概况

柴达木盆地位于青藏高原北缘,36°~39°N和91°~98°E之间,东西长达850 km,南北宽约250 km,是阿尔金山、祁连山和昆仑山之间的山间盆地,海拔高度约2 600~3 200 m,地势自西北向东南倾斜,西北部广布第三纪疏松地层经风蚀而成的残丘和雅丹地貌,海拔3 000~3 200 m,东南凹陷区海拔2 700 m左右,堆积了巨厚的第四纪洪积和湖积层。

红沟子地区位于柴达木盆地西北部,与阿尔金断裂毗邻。红沟子背斜构造是柴西地区北西向展布的断鼻构造之一,其南为咸北凹陷,北为小梁山次凹,西北被北东向断裂所截(图1)。该构造主要由侏罗系和新生代地层组成。下一中侏罗统大、小煤沟组主要为灰绿色砾岩、砂岩和碳质页岩组成。下一中侏罗统之上依次沉积了新生代下油砂山组、上油砂山组、狮子沟组和七个泉组地层^[20]。红沟子剖面位于红沟子背斜构造的南翼,下油砂山组(约17~16.5 Ma)与侏罗系呈角度不整合接触,主要为黑灰色砾岩和角砾岩组成,夹浅棕红色砾质砂岩和砂质泥岩,向上砂岩增多,局部出露疙瘩状灰岩(藻灰岩),具粗糙层理

^①国家重点基础研究发展计划(973)项目(编号:2011CB403000、2010CB833401)和国家自然科学基金项目(批准号:40920114001、41021001、40872029、40902015)资助。

收稿日期:2012-02-02;收修改稿日期:2012-05-06

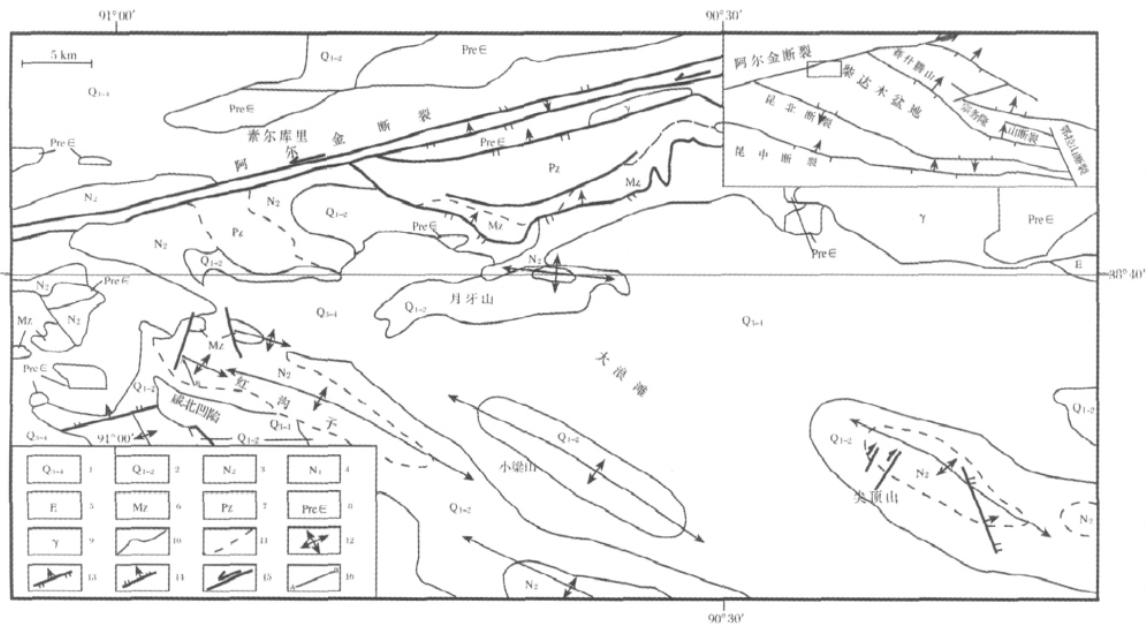


图 1 柴达木盆地西部红沟子地区构造和地质简图

1. 上更新统一全新统; 2. 下更新统一中更新统; 3. 上新统; 4. 中新统; 5. 古新统一渐新统; 6. 中生界; 7. 古生界; 8. 前寒武系; 9. 晚古生代花岗岩; 10. 地质界线; 11. 角度不整合界线; 12. 背斜轴迹; 13. 逆断层; 14. 正断层; 15. 走滑断层; 16. 剖面位置

Fig. 1 The tectonic and geological sketch map of the Honggouzi area in western Qaidam Basin

和冲—洪积相沉积特征; 上油砂山组 (16.5 ~ 9.8 Ma) 下部由砂岩、粉砂岩和泥岩夹砂质砾岩组成, 中部为灰绿、浅棕红色泥岩、粉砂质泥岩及砂岩, 上部为杂色粉砂质泥岩、泥岩、砂岩夹灰黑色砾岩。该组向上砾岩含量逐步增加, 中下部出现顺层或斜切层理石膏脉, 中部发育水平层理, 沉积经历了从扇三角洲与滨浅湖相到中浅湖相再至滨浅湖扇与扇三角洲相的演化; 狮子沟组 (8.7 ~ 4.8 Ma) 与下伏上油砂山组为角度不整合, 其下部主要为浅灰绿色砂岩、粉砂岩及粉砂质泥岩、黑灰色砾岩, 砾岩等粗碎屑岩向上减少。中部由厚层—块状浅灰绿色泥岩、粉砂质泥岩及少量砂岩组成。上部岩性与下部相似, 但砾岩等粗碎屑岩向上递增。该组沉积经历了滨浅湖与扇三角洲相到浅湖相再到滨浅湖与扇三角洲相的沉积演化; 七个泉组主要由洪积相灰黑色砾岩组成, 与狮子沟组呈角度不整合^[20] (图 2)。可见, 红沟子剖面沉积物不仅记录了该区湖盆水体由浅到深再到浅的变化过程, 同时也记录着该区中新世气候变化以及盆地周缘山地隆升—剥蚀过程。

2 样品采集和测定

沿红沟子剖面等间距 (1 m, 砾岩段视细粒碎屑

岩透镜体, 一般不超 3 m)、连续采集新鲜细粒碎屑岩 (泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩), 共计采集 508 块样品。室内将样品在 40℃ 烘箱内烘干后, 研磨成粉末状 (小于 120 目), 然后分别进行碳酸盐、硫酸根和氯离子含量测量。碳酸盐含量采用 karbonat-bombe 测定, 即测定样品与盐酸生成二氧化碳的压力来计算碳酸盐的含量^[21]; 硫酸根含量测定采用 EDTA 滴定法, 即用醋酸铵溶液处理样品后, 再用 EDTA 滴定总的硫酸根离子含量; 氯离子含量使用赛多利斯 pp-50 复合氯离子电极测量。各项重复测量的偏差均小于 5%。碳酸盐、硫酸根和氯离子含量分析结果见图 2 和表 1。

3 中新世气候变化

张涛等^[22] 利用沉积物磁化率各向异性, 结合砾岩中叠瓦状排列的砾石和砂岩中斜层理恢复了红沟子剖面的古水流方向, 结果表明该区物源主要为阿尔金山。对该剖面砾石成分统计分析表明, 母岩以变质岩和石英岩 (脉) 为主, 其灰岩含量较低, 同时该剖面上油砂山组和狮子沟组主要为浅湖相沉积。所以物源和沉积相对该剖面沉积物中硫酸根、氯离子和碳酸盐含量变化影响很小, 其含量变化应主要受控制于当时的气候变化。

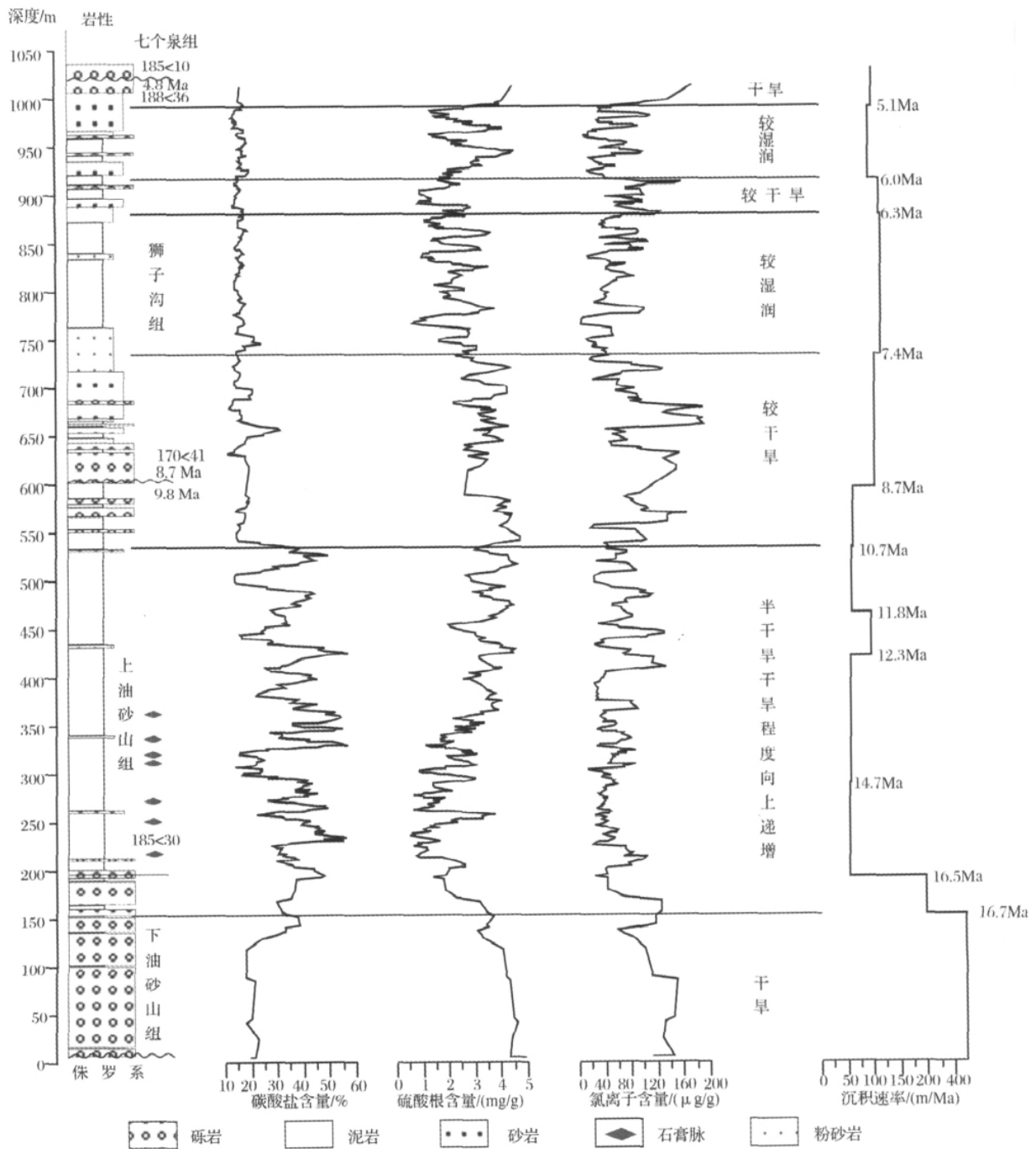


图2 红沟子地区岩性、气候与沉积(侵蚀)速率的对比(年代引自方小敏)

Fig. 2 The comparison of the lithology , climate and the sedimentary(erosion) rate of the Honggouzi area

在干旱气候环境下,随湖泊水体不断蒸发和湖水浓缩,湖泊水体中主要离子发生规律性变化:从以 $Ca^{2+}-HCO_3^- -CO_3^{2-}$ 为主变化到以 $Mg^{2+}-Ca^{2+}-SO_4^{2-}$ 为主,再到以 $Na^+-K^+-Cl^-$ 为主^[19, 20],即随着淡水湖向盐湖转化,湖泊依次经历了碳酸盐、硫酸盐、卤化物阶段的沉积。在碳酸盐阶段表现为高碳酸盐

以及低的硫酸根和氯离子含量,在硫酸盐阶段表现为高硫酸根、低碳酸盐和较高氯离子的含量,在卤化物盐湖阶段表现为高氯离子以及低硫酸根和碳酸盐含量,在过渡阶段具两者共同特征。

红沟子剖面没出现厚层的石膏层和代表更干旱气候的盐层,说明研究时段盆地水体未达到硫酸盐和

氯化物盐湖阶段,但沉积物氯离子和硫酸根含量的增加,可以代表干旱化的增强;上油砂山组底部(16.5~14.7 Ma)存在泥灰岩和高的碳酸盐(平均值为37.68%)、低的硫酸根(平均值为1.51 mg/g)和氯离子(平均值为26.64 $\mu\text{g/g}$)含量为特征(表1),表明此时盆地水体进入碳酸盐阶段。本文以该时段的硫酸根、氯离子和碳酸盐含量为标准,如果相对此阶段碳酸盐减少、硫酸根和氯离子含量增加,则代表气候环境相对干旱化,尤其是氯离子含量越高,代表干旱化越强;如果相对此阶段碳酸盐、硫酸盐和氯离子含量减小,代表气候环境相对湿润。综上所述,根据碳酸盐、硫酸根和氯离子含量变化(图2,表1),将柴达木盆地红沟子地区中新世气候环境变化可划分为:

17~16.7 Ma 是砾石层,满足实验要求(泥岩和粉砂岩)的样品很少,但是大体可以推断出这段时间的气候是干旱的,该段总体表现为高的硫酸根(平均值为3.9 mg/g)和氯离子(平均值为71 $\mu\text{g/g}$)含量、较高的碳酸盐含量(平均值为26%),应处于碳酸盐向硫酸盐过渡或少量硫酸盐阶段,代表干旱的环境。

16.7~7.4 Ma 相对前期湿润,但气候具持续干旱特征,总体表现为碳酸盐含量逐步减小,硫酸根和氯离子含量逐渐增加,特别在14.7 Ma 和10.7 Ma 干旱加剧和8.7 Ma 以后的干湿波动加大,此段具体可以划分为如下几个子阶段:16.7~14.7 Ma 此段总体表现为高的碳酸盐含量,平均值为(37.68%);低的硫酸根含量,平均值为(1.51 mg/g);低的氯离子含量,平均值为(26.64 $\mu\text{g/g}$),干湿波动较小,处于碳酸盐阶段,代表半干旱气候^[21]。14.7~10.7 Ma 此段

总体表现为高的碳酸盐含量,平均值为(32.19%);较高的硫酸根含量,平均值为(2.96 mg/g);较低的氯离子含量,平均值(33.83 $\mu\text{g/g}$)。这段同样存在较小的波动,但是总体上处于由碳酸盐或碳酸盐向硫酸盐过渡的阶段,气候较16.7~14.7 Ma 干旱,但仍处于半干旱气候。10.7~7.4 Ma 总体以较高的硫酸根(平均值3.52 mg/g)和氯离子(平均值55.36 $\mu\text{g/g}$)含量以及较低的碳酸盐含量(平均值15.96%)为特征,表明此阶段相对前阶段气候进一步变干。值得注意的是在8.7~7.4 Ma 之间代表干旱(较高氯离子和硫酸根含量和低碳酸盐含量)和代表湿润(较低的氯离子、硫酸根和碳酸盐含量)的样品交替出现(干湿波动大),但以代表干旱的为主。

7.4~5.1 Ma 相对气候湿润,但干湿波动大,总体表现为低的碳酸盐和氯离子含量,以及较高硫酸根含量(可能由于此段时间内干湿波动大,干旱期样品高的硫酸根加入,使得这段时间内硫酸根的平均含量较高)具体表现为:7.4~6.3 Ma 以较低的碳酸盐(平均值14.9%)、硫酸盐(平均值1.81 mg/g)和氯离子(平均值29.09 $\mu\text{g/g}$)含量为特征,表明该段气候相对湿润。此阶段内代表干旱(较高氯离子含量,硫酸根含量和低的碳酸盐含量)和代表湿润(较低的氯离子含量,硫酸根含量和碳酸盐含量)的样品交替出现(干湿波动大),但以代表湿润的为主。6.3~6 Ma 总体表现为较低的碳酸盐含量(平均值13.86%)、以及较高的硫酸根(平均值2.2 mg/g)和氯离子(平均值53.3 $\mu\text{g/g}$)含量,表明该段气候相对干旱,此段干湿波动也大。6.0~5.1 Ma 和7.4~6.3 Ma 特征基本

表1 沉积速率和硫酸根、氯离子、碳酸盐含量所代表的气候的对比

Table 1 Comparison of the sedimentation rate and the climate inferred from the Carbonate contents, Chloride ion contents and Sulfate radical contents

米数 /m	年代 /Ma	碳酸盐平均含量 /%	硫酸根平均含量 /(mg/g)	氯离子平均含量 /($\mu\text{g/g}$)	所代表的环境	沉积速率 /(m/Ma)
0~154	17~16.7	26	3.9	71	干旱	500
154~192	16.7~16.5	37.68	1.51	26.64	半干旱	240
192~289	16.5~14.7					54
289~420	14.7~12.3	32.6	2.63	30.7	半干旱	54.6
420~466	12.3~11.8	31.4	3.5	38.8	半干旱	92
466~536	11.8~10.7					63.6
536~596	10.7~9.8	15.96	3.52	55.36	较干旱	66.6
596~734	8.7~7.4					106.2
734~877	7.4~6.3	14.09	1.81	29.09	较湿润	130
877~915	6.3~6	13.86	2.2	53.3	较干旱	126.6
915~990	6~5.1	14.58	2.6	27.35	较湿润	83
990~1018	5.1~4.8	15.3	4.1	93.3	干旱	93

一致,但干湿波动更大,代表较湿润的环境。

5.1~4.8 Ma 以高的硫酸根(平均值 4.1 mg/g)和氯离子(平均值 93.33 $\mu\text{g/g}$)以及低碳酸盐(平均值 15.3%)含量为特征,代表干旱环境(全剖面最干旱的阶段)。

红沟子剖面沉积物硫酸根、氯离子和碳酸盐含量变化反映的上述该区中新世气候变化与周边地区环境指标记录的气候干湿变化有良好的一致性。如柴达木盆地、塔里木盆地、临夏盆地、天水盆地孢粉资料研究表明:17~15 Ma 之间比较湿润,于 15 Ma 左右开始变干,在 8 Ma 左右加速变干,或者干湿波动变大^[26~29]。在南海,万世明等^[30]利用化学风化指数和沉积物成分变化得出亚洲内陆经历了约 15 Ma、8 Ma 和 3 Ma 的干旱化事件。指示亚洲内陆干旱程度的北太平洋粉尘堆积也分别在 15 Ma 和 8 Ma 左右出现峰值^[31,32]。与此同时,5.1 Ma 的干旱事件也是普遍存在的,例如 CaCO_3 、 Cl^- 和化学元素分析揭示出 5.4 Ma 前后是中新世以来最干旱时期^[33,34];陕西府谷老高川成土碳酸盐的碳同位素组成特征表明 5.3~4.4 Ma 期间 C_4 型植被由此前的 40% 增加到 70%^[35]。全球其他地方也有类似的记录,如南巴基斯坦大约在 8 Ma 之后,植被由 C_3 型转变为 C_4 型,5.3~3.0 Ma 期间气候进一步干旱化^[36];约 5 Ma 左右地中海发生盐度危机,形成厚达 2 000~3 000 m 的海域深盆蒸发岩^[37]。

4 侵蚀速率的主要影响因素

利用盆山耦合原理,通过盆地沉积物沉积速率的分析来反推源区的侵蚀速率^[38~41],即盆地沉积速率高的阶段,对应源区快速侵蚀的阶段。我们在计算剖面各个时段的沉积速率时,注意相同气候特征时段应在一起计算,如该段岩性突变,则分别单独计算。沉积速率由沉积物厚度除以沉积时间获得(图 2 和表 1)结果表明沉积速率(侵蚀速率)在 17~16.5 Ma 之间最高,与该段粗碎屑的砾石沉积岩性吻合,但该段是两种不同气候环境下的产物,即 17~16.7 Ma 气候相对干旱,16.7~16.5 Ma 气候相对较湿。而 16.7~14.7 Ma 在相同气候环境下,却有 16.7~16.5 Ma 的快速沉积和 16.5~14.7 Ma 的较慢沉积。14.7~7.4 Ma 是一个持续渐进的干旱化过程,但沉积速率(侵蚀速率)较低(除 12.3~11.8 Ma 突然增加)。7.4~6.3 Ma 和 6~5.1 Ma 气候相对湿润,但是沉积速率(侵蚀速率)相差很大,而 7.4~6.3 Ma 和 6.3~

6 Ma 气候相差很大,但沉积速率(侵蚀速率)却基本一致。可见该区沉积速率(侵蚀速率)在湿润阶段较低或无明显增加,所以气候变化不是影响该区沉积速率(侵蚀速率)的关键因素。此外,物源区岩性变化也可以造成侵蚀速率的变化,但张涛等^[22]的结果表明,该区物源为阿尔金山,母岩以变质岩和石英岩(脉)为主,故岩性变化不是影响该区沉积速率(侵蚀速率)的关键因素;冰川作用也可能使沉积速率(侵蚀速率)增大,但在整个剖面没有发现冰川作用的痕迹,故冰川作用也不是影响该区沉积速率(侵蚀速率)的关键因素。

红沟子剖面下油砂山组(约 17~16.5 Ma)主要为大套砾岩与侏罗系呈角度不整合接触,说明该区 17 Ma 左右发生了构造活动,这与 Rieser^[42]认为 18~16 Ma 阿尔金山发生了一次隆升相一致;高度重建结果表明高原南部和中部在 15 Ma 之前已经达到现今高度或者已经超过现今高度^[43~47];拜永山等^[44]据祁漫塔格一带磷灰石裂变径迹测年数据,得出祁漫塔格山在 22~17 Ma 发生了一次隆升;高军平等^[45]利用磷灰石裂变径迹测年数据,得出了柴西地区经历了 16 Ma 的构造事件;阿尔金山断裂在 16 Ma 左右活动加强^[50,51];以及较强的火山活动^[55,53]等一致。红沟子剖面下油砂山组(约 17~16.5 Ma)沉积(侵蚀)速率最高(达 500 m/Ma)(图 2 和表 1)与这次区域构造活动很好的匹配。

红沟子剖面 16.5~9.8 Ma 侵蚀速率较低(图 2 和表 1),其中 12.3~11.8 Ma 沉积(侵蚀)速率增加可能是由一次区域构造活动有关。高军平等^[45]利用磷灰石裂变径迹测年数据,得出了柴西地区存在 12 Ma 的构造事件;Lu^[54]结合古地磁和磁化率数据表明柴达木盆地大红沟地区在 12 Ma 左右发生了构造抬升;王晓明等^[51]在对肃北盆地的生物地层研究中认为,党河南山在 12 Ma 左右有一次比较强烈的抬升运动;此外在 13 Ma 左右火山活动也比较强烈^[56,57]。

红沟子剖面 8.7~6 Ma 侵蚀速率逐步升高(图 2 和表 1),其中由于地层缺失,我们没法计算 9.8~8.7 Ma 之间的沉积(侵蚀)速率。张涛等^[22]和高军平等^[20]分别利用磁化率和磁组构特征证明了 9.8 Ma 左右阿尔金山发生过一次强烈构造运动。此段高的沉积速率与青藏高原在 8 Ma 左右的强烈构造抬升相一致:西昆仑^[58]、东昆仑^[59]、阿尔金山^[60~63]以及高原南部^[64]均发生强烈抬升。6.0 Ma 以后沉积速率也较高,可能表明处于持续活动阶段,保持持续隆升

的态势(表1)。

综上所述,构造活动强烈时期对应该区沉积(侵蚀)速率高的时期,因此该区沉积(侵蚀)速率主要受构造活动控制。由于构造活动造成岩石破碎,而破碎的岩石比完整的岩石更容易受到侵蚀和搬运,同时由构造活动造成的沉积盆地和山体之间的高差,为沉积物搬运提供了动力^[65]。

5 结论

通过对柴达木盆地西部红沟子剖面沉积物氯离子、硫酸根和碳酸盐含量的分析,表明17~16.7 Ma气候干旱;16.7~7.4 Ma相对前期气候湿润,但气候具持续干旱特征(分别在14.7 Ma和10.7 Ma干旱加剧,8.7~7.4 Ma干湿波动加大);7.4~5.1 Ma相对湿润,干湿波动大,其间包含一个(6.3~6 Ma)的短暂干旱阶段;5.1 Ma以后是整个剖面最干旱的阶段。

柴达木盆地西部红沟子剖面沉积速率(侵蚀速率)在湿润阶段较低或无明显增加,而在构造活动阶段较高或突然增加,所以构造活动是控制红沟子地区侵蚀速率的首要主要因素。

致谢 感谢兰州大学地质科学与矿产资源学院张洒、杨积伟、牛刚和兰州大学西部重点实验室滕小华的实验帮助。

参考文献(References)

- Amanda C Henck, Katharine W Huntington, John O Stone, *et al.* Spatial controls on erosion in the Three Rivers Region, southeastern Tibet and southwestern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 303: 71-83
- Burbank D W, Blythe A E, Putkonen J, *et al.* Decoupling of erosion and precipitation in the Himalayas [J]. *Nature*, 2003, 426(6967): 652-655
- Binnie S A, Phillips W M, Summerfield M A, *et al.* Tectonic uplift, threshold hillslopes, and denudation rates in a developing mountain range [J]. *Geology*, 2007, 35: 743-746
- Binnie S A, Phillips W M, Summerfield M A, *et al.* Patterns of denudation through time in the San Bernardino Mountains, California: implications for early-stage orogenesis [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 276: 62-72
- Finnegan N J, Hallet B, Montgomery D R, *et al.* Coupling of rock uplift and river incision in the Namche Barwa-Gyala Peri massif, Tibet [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120(1-2): 142-155
- Ouimet W B, Whipple K X, Granger D E. Beyond threshold hillslopes: channel adjustment to base-level fall in tectonically active mountain ranges [J]. *Geology*, 2009, 37(7): 579-582
- Kong P, Na C G, Fink D, *et al.* Erosion in northwest Tibet from in-situ-produced cosmogenic Be-10 and Al-26 in bedrock [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(1): 116-125
- Reiners P W, Ehlers T A, Mitchell S G, *et al.* Coupled spatial variations in precipitation and long-term erosion rates across the Washington Cascades [J]. *Nature*, 2003, 426(6967): 645-647
- Thiede R C, Bookhagen B, Arrowsmith J R, *et al.* Climatic control on rapid exhumation along the Southern Himalayan [J]. *Frontier Earth Planetary Science Letter*, 2004, 222: 791-806
- Huntington K W, Blythe A E, Hodges K V. Climate change and Late Pliocene acceleration of erosion in the Himalaya [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 252(1-2): 107-118
- Demoulin A, Hallot E, Rixhon G. Amount and controls of the Quaternary denudation in the Ardennes massif (western Europe) [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, (11): 1487-1496
- Dixon J L, Heimsath A M, Amundson R. The critical role of climate and saprolite weathering in landscape evolution [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(11): 1507-1521
- Warren J K. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits [J]. *Earth Science Reviews*, 2010, 98(3-4): 217-268, doi: 10.1016/j.earscirev.2009.11.004.
- Wasson R J, Smith G I, Agrawal D P. Late quaternary sediments, minerals, and inferred geochemical history of Didwana Lake, Thar Desert, India [J]. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 1984, 46(4): 345-372, doi: 10.1016/j.earscirev.2009.11.004.
- Sinha R, Raymahashay B C. Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Thar Desert, Rajasthan, India [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 166: 59-71.
- 方小敏, 奚晓霞, 李吉均, 等. 中国西部晚中新世气候变干事件的发现及其意义 [J]. *科学通报*, 1997, 42(23): 2521-2524 [Fang Xiaomin, Xi Xiaoxia, Li Jijun, *et al.* Late Miocene drying of Western China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(23): 2521-2524]
- 李容全, 乔建国, 邱维理等. 泥河湾层内易溶盐沉积及其环境意义 [J]. *中国科学: D辑*, 2000, 30(2): 148-158 [Li Rongquan, Qiao Jianguo, Qiu Weili, *et al.* Soluble salt deposit in the Nihewan beds and its environmental significance [J]. *Science in China: Series D*, 2000, 43(5): 464-479]
- 郑绵平, 赵元艺, 刘俊英. 第四纪盐湖沉积与古气候 [J]. *第四纪研究*, 1998, (4): 297-307 [Zheng Mianping, Zhao Yuanyi, Liu Junying. Quaternary saline lake deposition and paleoclimate [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, (4): 297-307]
- 顾兆炎, 赵惠敏, 王振海, 等. 末次间冰期以来新疆巴里坤湖蒸发盐的沉积环境记录 [J]. *第四纪研究*, 1998, (4): 328-334 [Gu Zhaoyan, Zhao Huimin, Wang Zhenhai, *et al.* Evaporation salt records of environmental response to climate change in Barkol Lake basin, Northwestern China [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, (4): 328-334]
- 高军平, 刘胜昌, 方小敏, 等. 柴西红沟子地区晚新生界磁组构的特征和意义 [J]. *世界地质*, 2007, 26(2): 180-188 [Gao Junping, Liu Shengchang, Fang Xiaomin *et al.* Characteristics of Late

- Cenozoic magnetic fabric in Honggouzi area of western Qaidam Basin and their significance [J]. *Global Geology*, 2007, 26(2): 180-188]
- 21 Birch G. The Karbonat-Bombe: a precise, rapid and cheap instrument for determining calcium carbonate in sediments and rocks [J]. *Transactions Geological Society of South Africa*, 1981, 84: 199-203
- 22 张涛. 柴西红沟子剖面沉积物记录的阿尔金山 9.8Ma 构造事件 [D]. 兰州: 兰州大学, 2011 [Zhangtao. Tectonic event of Altyn Tagh at 9.8Ma: Evidence from sedimentary records of Honggouzi section in the Western Qaidam Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011]
- 23 张洪, 靳鹤龄, 肖洪浪, 等. 东居延海易溶盐沉积与古气候环境变化 [J]. *中国沙漠*, 2004, 24(4): 409-415 [Zhang Hong, Jin Heling, Xiao Honglang, et al. Soluble salt sediment of East Juyan Lake and its indication on palaeoclimate environment changes [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(4): 409-415]
- 24 Williams M A J, Dunkerley D L, De Deckker P, et al. 刘东生等编译. 第四纪环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 11-304 [Williams M A J, Dunkerley D L, De Deckker P, et al. Translated by Liu Tungsheng, et al. *Quaternary Environments* [M]. Beijing: Science Press, 1997: 11-304]
- 25 Z T Guo, B Sun, Z S Zhang, et al. A major reorganization of Asian climate by the early Miocene [J]. *Climate Past*, 2008, 4: 153-174
- 26 Sun J M, Zhang Z Q. Palynological evidence for the Mid-Miocene Climatic Optimum recorded in Cenozoic sediments of the Tian Shan Range, northwestern China [J]. *Global Planetary Change*, 2008, 64: 53-68
- 27 Zhengchuang Hui, Jijun Li, Qinghai Xu, et al. Miocene vegetation and climatic changes reconstructed from a sporopollen record of the Tianshui Basin, NE Tibetan Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (2011), doi: 10.1016/j.palaeo.2011.05.043
- 28 Jiang H C, Ding Z L. A 20 Ma pollen record of East-Asian summer monsoon evolution from Guyuan, Ningxia, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 265: 30-38
- 29 Miao Y F, Fang X M, Herrmann M, et al. Miocene pollen record of KC-1 core in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau and implications for evolution of the East Asian monsoon [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (2010), doi: 10.1016/j.palaeo.2010.10.026
- 30 Wan S M, Li A C, Clift P D, et al. Development of the East Asian monsoon: mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254: 561-582.
- 31 Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift and cooling of the Northern Hemisphere [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13: 215-224
- 32 Rea D K, Leinen M, Janecek T R. Geologic approach to the long term history of atmospheric circulation [J]. *Science*, 1985, 227: 721-725
- 33 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 临夏盆地环境变迁与青藏高原隆起的世界影响 [C] // 青藏高原研究会编. 青藏高原与全球变化研讨会论文集. 北京: 气象出版社, 1995: 141-51 [Fang Xiaomin, Li Jijun, Zhu Junjie, et al. Environmental transition in Linxia Basin and influence of uplift of Tibetan Plateau in world [C] // The China Society on Tibet Plateau ed. *Symposium of Environment Change and Tibetan Plateau*. Beijing: Meteorologic Press, 1995: 41-51]
- 34 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 临夏盆地约 30Ma 以来 CaCO_3 含量变化与气候演变 [M] // 青藏项目专家委员会编. 青藏高原形成、演化、环境变迁与生态系统研究. 北京: 科学出版社, 1995: 155-65 [Fang Xiaomin, Li Jijun, Zhu Junjie, et al. A 30 million-year record of the Carbonate content of the Linxia Basin and its climatic implications [M] // Expert Committee of the Tibet Projected. *Studies of Evolution, Environmental Transition and Ecological System of Tibetan Plateau*. Beijing: Science Press, 1995: 155-65]
- 35 陈明扬, 赵惠敏. 713 ~ 119Ma 期间中国黄土高原碳同位素记录与古季风气候 [J]. *科学通报*, 1997, 42(2): 174-177 [Chen Mingyang, Zhao Huimin. Carbon isotope records and paleo-monsoon climate in the China Loess Plateau during period of 7.3 ~ 1.9Ma [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(2): 174-177]
- 36 Quade J, Cerling T E. Expansion of C_4 grasses in the Late Miocene of Northern Pakistan: Evidence from stable isotopes in paleosols [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1995, 115(1-4): 91-116
- 37 Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. *Science*, 2001, 292: 686-693
- 38 Molnar P. Late Cenozoic increase in accumulation rates of terrestrial sediment: how might climate change have affected erosion rates [J]? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, 32: 67-89
- 39 Reneau S L, Dietrich W E, Rubin M, et al. Analysis of hillslope erosion rates using dated colluvial deposits [J]. *Journal of Geology*, 1989, 97: 45-63
- 40 葛佳杰, 顾尚义, 吴攀, 等. 贵州威宁麻窝山地区近五万年来土壤侵蚀速率研究 [J]. *地球与环境*, 2011, 39(2): 156 - 160 [Ge Jiajie, Gu Shangyi, Wu Pan, et al. Soil erosion rates on the Guizhou Mawo Hill in the Past 50000 Years [J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 156-160]
- 41 孔凡翠, 杨瑞东, 林德基. 从威宁草海的演化分析 0.73Ma 来贵州威宁地区喀斯特环境的演变 [J]. *地球与环境*, 2010, 38(2): 138-144 [Kong Fancui, Yang Ruidong, Lin Shuji. Analysis of the evolution of karst environment of Weining Region, Guizhou Province, West China: A proof from the sediment evolution of Lake Caohai since about 0.73 Million Years [J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(2): 138-144]
- 42 Andrea B Rieser, Ana-Voica Bojar, Franz Neubauer, et al. Monitoring Cenozoic climate evolution of northeastern Tibet: stable isotope constraints from the western Qaidam Basin, China [J]. *International Journal of Earth Science Earth Sci (Geol Rundsch)* doi: 10.1007/s00531-008-0304-5
- 43 Garzione C N, Quade J, DeCelles P G, et al. Predicting paleoelevation of Tibet and the Himalaya from $\delta^{18}\text{O}$ vs. altitude gradients in meteoric water across the Nepal Himalaya [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 183: 215-229

- 44 Rowley D B , Currie B S. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin , central Tibet [J]. *Nature* , 2006 , 439: 677-681
- 45 DeCelles P G , Quade J , Kapp P. High and dry in central Tibet during the Late Oligocene [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 2007 , 253: 389-401
- 46 Spicer R A , Harris N B W , Widdowson M , *et al.* Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years [J]. *Nature* , 2003 , 421: 622-624
- 47 Murphy M A , Saylor J E , Ding L. Late Miocene topographic inversion in southwest Tibet based on integrated paleoelevation reconstructions and structural history [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 2009 , 282: 1-9
- 48 拜永山 , 任二峰 , 范桂兰 , 等. 青藏高原西北缘祁漫塔格山中新生代快速抬升的磷灰石裂变径迹证据 [J]. *地质通报* , 2008 , 27: 1044-1048 [Bai Y S , Ren E F , Fan G L , *et al.* Apatite fission track evidence for the Miocene rapid uplift of the Qimantag Mountains on the northwestern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geological Bulletin of China* 2008 27(7) : 1044-1048]
- 49 高军平 , 方小敏 , 宋春晖 , 等. 青藏高原北部中-新生代构造-热事件: 来自柴西碎屑磷灰石裂变径迹的制约 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版* , 2011 , 41(5) : 1466-1474 [Gao Junping , Fang Xiaomin , Song Chunhui , *et al.* Tectonic-thermo events of northern Tibetan Plateau: Evidence from detrital apatite fission track data in western Qaidam Basin [J]. *Journal of Jinlin University: Earth Science Edition* , 2011 , 41(5) : 1466-1474]
- 50 王国灿 , 曹凯 , 张克信 , 等. 青藏高原新生代构造隆升阶段的时空格局 [J]. *中国科学: 地球科学* , 2011 , 41(3) : 332-349 [Wang Guocan , Cao Kai , Zhang Kexin , *et al.* Spatio-temporal framework of tectonic uplift stages of the Tibetan Plateau in Cenozoic [J]. *Science in China: Earth Science* , 2011 , 54: 29-44 , doi: 10. 1007/s11430-010-4110-0]
- 51 Yin A , Harrison T , Mryerson F J , *et al.* Tertiary structural evolution of Gangdeses thrust system , Southeastern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research* , 1994 , 99: 18175-18201
- 52 Williams H , Turner S , Kelley S , *et al.* Age and composition of dikes in Southern Tibet: new constraints on the timing of east west extension and its relationship to postcollisional volcanism [J]. *Geology* , 2001 , 29: 339-342
- 53 丁林 , 岳雅慧 , 蔡福龙 , 等. 西藏拉萨地块高镁超钾质火山岩及对南北向裂谷形成时间和切割深度的制约 [J]. *地质学报* , 2006 , 80(9) : 1252-1261 [Ding Lin , Yue Yahui , Cai Fu long , *et al.* ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology , geochemical and Sr-Nd-O isotopic characteristics of the high-Mg ultrapotassic rocks in Lhasa Block of Tibet: Implications in the onset time and depth of NS-striking rift system [J]. *Acta Geologica Sinica* , 2006 , 80(9) : 1252-1261]
- 54 Lu H J , Xiong S F. Magnetostratigraphy of the Dahonggou section , northern Qaidam Basin and its bearing on Cenozoic tectonic evolution of the Qilian Shan and Altyn Tagh Fault [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 2009 , 288: 539-550
- 55 Wang X M , Wang B Y , Qiu Z X , *et al.* Danghe area(western Gansu , China) biostratigraphy and implications for depositional history and tectonics of northern Tibetan Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 2003 , 208: 253-269
- 56 Turner S , Arnaud N , Liu J , *et al.* Post-collision Shoshonitic Volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts [J]. *Journal of Petrology* , 1996 , 37(1) : 45-71
- 57 Turner S , Hawkesworth C , Liu J , *et al.* Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks [J]. *Nature* , 1993 , 364: 50-54
- 58 Wang E , Wan J , Liu J. Late Cenozoic geological evolution of the foreland basin bordering the West Kunlun range in Pulu area: Constraints on timing of up lift of northern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research* , 2003 , 108(B8) : 2401 , doi: 10. 1029/2002 jb001877
- 59 袁万明 , 董金泉 , 王世成 , 等. 东昆仑南部带磷灰石裂变径迹分析的地质意义 [J]. *核技术* , 2005 , 28(9) : 707-711 [Yuan Wanning , Dong Jinquan , Wang Shicheng , *et al.* Apatite fission track analysis for revealing tectonic evolution of the South Block in Eastern Kunlun Mountains , Northern Qinghai Tibet Plateau [J]. *Nuclear Techniques* , 2005 , 28(9) : 707-711]
- 60 陈正乐 , 张岳桥 , 王小凤 , 等. 新生代阿尔金山脉隆升历史的裂变径迹证据 [J]. *地球学报* , 2001 , 22(5) : 413-418 [Chen Zhengle , Zhang Yueqiao , Wang Xiaofeng , *et al.* Fission track dating of apatite constraints on the Cenozoic uplift of the Altyn Tagh Mountain [J]. *Acta Geoscientia Sinica* , 2001 , 22(5) : 413-418]
- 61 陈正乐 , 万景林 , 王小凤 , 等. 阿尔金断裂带 8Ma 左右的快速走滑及其地质意义 [J]. *地球学报* , 2002 , 23(4) : 295-300 [Chen Zhengle , Wan Jinglin , Wang Xiaofeng , *et al.* Rapid strike-slip of the Altyn Tagh Fault at 8 Ma and its geological implications [J]. *Acta Geoscientia Sinica* , 2002 , 23(4) : 295-300]
- 62 Jolivet M , Roger F , Arnaud N , *et al.* Exhumation history of the Altyn shan with evidence for the timing of the subduction of the Tarim block beneath the Atlyn Tagh system , North Tibet [J]. *Earth & Planetary Sciences* , 1999 , 329: 749-755
- 63 万景林 , 王瑜 , 李齐 , 等. 阿尔金山北段晚新生代山体抬升的裂变径迹证据 [J]. *矿物岩石地球化学通报* , 2001 , 20(4) : 222-224 [Wan Jinglin , Wang Yu , Li Qi , *et al.* FT evidence of Northern Altyn uplift in Late-Cenozoic [J]. *Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry* , 2001 , 20(4) : 222-224]
- 64 Harrison T M , Copeland P , Kidd W S F , *et al.* Raising Tibet [J]. *Science* , 1992 , 255: 1663-1670
- 65 Molnar P , Anderson R S , Anderson S P. Tectonics , fracturing of rock , and erosion [J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface* , 2007 , 112(F3) . doi: 10. 1029/2005JF000433.

The Miocene Climate Changes in Honggouzi Area of Western Qaidam Basin and Dominating Factors on Erosion Rate

HU Si-hu¹ ZHANG Tao¹ GAO Jun-ping¹ SONG Chun-hui¹ FANG Xiao-min²

(1. School of Geosciences and Mineral Resources & Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education) Lanzhou University, Lanzhou 730000;

2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100085)

Abstract: Well-developed Neocene strata in the western Qaidam Basin were a detailed record of the deformation and uplift of the surrounding mountain, weathering and erosion of the provenance and the process of climate changes. Based on the measurement and analysis of the carbonate contents, chloride ion contents and sulfate radical contents of the Miocene sediment in the Honggouzi section of the western Qaidam Basin, the climate changes in this area can be divided into the following four stages: stage I (17 ~ 16.7 Ma) is a dry stage; stage II (16.7 ~ 7.4 Ma) this stage is wetter than stage I, but is characterized by continuous drought (the drought intensified in 14.7 Ma and 10.7 Ma, respectively and 8.7 ~ 7.4 Ma shows increased fluctuation); stage III (7.4 ~ 5.1 Ma) relatively humid with fluctuation; stage IV (5.1 ~ 4.8 Ma) is a dry stage. 17 ~ 16.5 Ma the erosion rate is the high; 16.5 ~ 9.8 Ma the erosion rate is relatively low and 8.7 ~ 6 Ma the erosion rate is high. The erosion rate of this area shows no obvious connection with climate, but is well consistent with tectonic activities, namely, the tectonic active period corresponds with the stages of the high erosion rate or the erosion rate increases dramatically. Thus, in Honggouzi area, the regional tectonic activity is the main factor to control the erosion rate.

Key words: Western Qaidam; erosion rate; climate change; Miocene