晚渐新世以来青藏高原北部东昆仑山构造隆升对亚洲内陆干旱化的潜在影响

——基于现代地质观测证据

Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

李乐意[1,2)],常宏[1,3)],关冲[4,5)],陶亚玲[6)],沈俊杰[1,5)],
权春艳[1)],秦秀玲[1)],常小红[1)]

1)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,710061;
2)西安地球环境创新研究院,西安,710061;
3)中国科学院第四纪地质与全球变化卓越中心,西安,710061;
4)中国科学院青藏高原研究所,北京,100101;
5)中国科学院大学,北京,100049; 6)中国地震局地质研究所,北京,100029

内容提要:青藏高原的构造隆升—生长过程及其资源环境效应是地球系统科学研究中的一个重要命题。其中,新生代青藏高原构造隆升过程与亚洲内陆干旱化之间的联系是研究的一个热点和难点。本文基于青藏高原从那曲到格尔木沿109国道现代地理要素和景观变化的证据以及大量器测数据和模拟结果讨论了青藏高原具体区域对亚洲内陆干旱化形成演化的重要影响,结果指出东昆仑山对印度季风继续深入内陆具有明显的阻挡作用,是一个重要的水汽屏障。同时本文结合东昆仑山晚渐新世以来主要构造隆升事件与亚洲内陆干旱化关键时间点的高度契合,进一步指出东昆仑山晚渐新世以来的构造隆升对亚洲内陆或者至少柴达木盆地的干旱化事件具有重要的影响,但是~3.6 Ma之后,北半球冰期对内陆盆地的干旱化的影响更大。

关键词:青藏高原;亚洲内陆干旱化;东昆仑;构造隆升

青藏高原的构造隆升—生长过程及其资源环境效应是地球系统科学研究中的一个重要命题。其中在青藏高原的隆升与亚洲内陆干旱化的形成和演化等方面不同学科或交叉学科背景的学者开展了大量的研究工作(Guo Zhengtang et al., 2002; Sun Xiangjun et al., 2005; Sun Jimin et al., 2008, 2017; Qiang Xiaoke et al., 2011; An Zhisheng, 2014; Zheng Hongbo et al., 2015; Chang Hong et al., 2017; Heermance et al., 2018; Liu Xiaodong et al., 2019)。在黄土高原地区,因为黄土的形成离不开物源区,它的形成在某种程度上指示了西北内陆物源区存在真正意义上、范围较广的荒漠或者戈壁(Qiang Xiaoke et al., 2011; 郭正堂等,2017);其黄土—古土壤序列和红粘土保存着丰富的古气候信息(刘东生等,1985),同时也是亚洲内陆干旱荒漠化形成开始时间的见证者。通过地质证据分析,塔克拉玛干沙漠被认为诞生于~7 Ma,随后在~5.3 Ma干旱化进一步加剧(Sun Jimin et al., 2008; Chang Hong et al., 2012),最近,在塔克拉玛干沙漠南边,671 m高分辨率的风尘沉积钻孔为3.6 Ma以来亚洲内陆干旱化过程提供了新的证据,结果显示至少在3.6 Ma内陆已经干旱化,沙漠已经存在,随后该区域又经历了~2.7 Ma,1.1 Ma和0.5 Ma三个阶段的干旱化(Fang Xiaomin et al., 2020)。后来在阿尔塔什和柯柯亚两个剖面中的西域组里发现了火山灰,$^{40}Ar/^{39}Ar$和U-Pb测年表明年龄在~11 Ma,基于此,对新测的阿尔塔什磁性地层年代进行了限定,同时重新解释了之前柯柯亚和玛杂塔格(Zheng Hongbo et al., 2000; Sun Jimin et al., 2009)的古地磁结果,新的年代学结果指出塔克拉玛干沙漠在晚

注:本文为第二次青藏科考项目(编号:2019QZKK0707)和黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金支持(编号:SKLLQG2030、SKLLQGPY1804)的成果。
收稿日期:2020-08-09;改回日期:2021-02-22;网络首发:2021-03-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.03.041
作者简介:李乐意,男,1989年生,博士,助理研究员,主要从事青藏高原新生代构造隆升过程和环境效应研究;Email:lily@ieecas.cn。通讯作者:常宏,男,1970年生,博士,研究员,主要从事新生代地层年代学和古环境研究;Email:changh@loess.llqg.ac.cn。

渐新世—早中新世就已经形成（Zheng Hongbo et al.，2015）；北边的准噶尔盆地中最早的风尘沉积开始于~24 Ma（Sun Jimin et al.，2010）。六盘山以西的红粘土庄浪钻孔和秦安剖面的研究显示风尘红粘土开始沉积的年代是 25~22 Ma（Guo Zhengtang et al.，2002；Qiang Xiaoke et al.，2011），明显早于东部的红粘土沉积（李乐意和常宏，2015），说明亚洲内陆干旱化至少开始于晚渐新世—早中新世。根据不同时期植物化石和其他具有古环境意义的证据，类似于现在的干旱—湿润格局在晚渐新世到早中新世已经开始形成（刘东生等，1998；Sun Xiangjun et al.，2005）。而在上述的亚洲内陆干旱演化的过程中，青藏高原也发生了相对应时间段明显的构造隆升活动，如伦坡拉盆地~23 Ma 开始沉积速率突然增加（Fang Xiaomin et al.，2020），可可西里盆地早中新世五道梁组与下伏地层不整合接触（Wang Chengshan et al.，2002；李乐意，2015），柴达木盆地在~15 Ma 的沉积速率增加（Chang Hong et al.，2015），不整合接触、砾石组份以及沉积速率等表明高原东北部在 3.6 Ma、2.5 Ma、1.1 Ma 和 0.8 Ma 等发生了明显的构造活动（Zhang Weilin et al.，2013）等。上述研究基本说明青藏高原新生代的构造隆升改变大气环流是亚洲内陆干旱化形成的一个重要原因。

数值模拟的开展进一步促进了在高原隆升与亚洲季风和内陆干旱化之间关系方面的研究。An Zhisheng 等（2001）在模拟中通过改变青藏高原的高度和范围等，揭示出青藏高原由南向北的生长过程中（HT1~HT4），中亚内陆平均每天的降雨量大幅减少，干旱化加剧；Zhang Zhongshi 等（2007）通过 5 组不同高原情况等的数值模拟研究指出在我国晚渐新世—早中新世类似于现代季风主控型的气候格局形成过程中，青藏高原的隆升具有关键性的作用；Liu Xiaodong 等（2002）研究也显示青藏高原对东亚季风的影响大于南亚季风，最新的气候模拟明确的指出中纬度地区亚洲内陆干旱化的形成离不开青藏高原的隆升（Liu Xiaodong et al.，2019）。随后对青藏高原资源环境效应的数值模拟进行了改进和发展，先前的模拟基本都把青藏高原作为一个整体去模拟研究；从目前青藏高原的构造隆升研究来看，不同山地应有不同的隆升历史，把高原看作一个整体来开展模拟与相关地质证据非常不妥，所以有必要对青藏高原开展分块模拟研究。分区域模拟研究显示青藏高原北部隆升对东亚季风影响显著（Zhang Ran et al.，2012），即使北部仅发生有限幅度的隆升，也能对亚洲内陆干旱化造成可观的影响（Liu Xiaodong et al.，2013）。但是，目前缺乏比较高原北部和整个高原对亚洲内陆干旱化作用谁占主导等这方面的地质证据，而且这种具有明确比较意义的地质证据难以获取，因为在新生代时期高原的隆升具有明显的不等时性和差异性，想找到一个契合点且同时需要排除其他因素的可能影响（如全球气候变化）较为困难。另外，模拟研究显示高原北部对内陆干旱化的影响较大，那么具体又是北部哪块区域？通过寻找地质时期的证据来讨论以上问题比较难，因此，本文拟利用青藏高原的现代地理要素证据以及大量器测观测数据和模拟结果来讨论以上问题。

1 研究区域、材料与方法

青藏高原是自古生代以来由不同块体拼接形成的，从南向北依次可以划分为喜马拉雅地体、拉萨地体、羌塘地体、松潘甘孜—可可西里地体和昆仑—柴达木地体，它们之间分别由雅鲁藏布江缝合带、班公湖—怒江缝合带、金沙江缝合带和昆仑—慕孜塔格缝合带所分开（李廷栋等，2013）。其中位于东昆仑山南界的昆仑断裂为一左行走滑断裂，部分吸收和调节了印度板块与欧亚板块汇聚过程中的构造变形，其北界为柴达木盆地（陈宣华等，2011）。目前柴达木盆地和塔里木盆地等西北内陆干旱区主要受西风大气环流控制，虽然如此，柴达木盆地现在的降水受强烈的夏季风影响仍然集中在夏季（Chen Fahu et al.，2016）。

本文基于从格尔木到拉萨的 109 国道的地理景观事实以及器测台站等温度降水数据（主要分布在羌塘地体、松潘甘孜可可西里地体以及昆仑—柴达木地体）来分析讨论研究现在青藏高原及其北部对亚洲内陆干旱化的影响，判定具体区域对内陆干旱化的影响，然后尝试讨论晚渐新世以来高原北部东昆仑山隆升与内陆干旱化是否具有时间上的耦合性。本文具体的研究路线段是从格尔木到那曲，沿着东北—西南方向考察沿途地理景观要素的变化（图 1）。

2 结果与分析

2.1 地理要素变化

从拉萨到格尔木沿线的主要城镇的降水主要集中在夏季，其年均降水量主要受控于夏季降水量（图 2）。为了讨论分析青藏高原或者高原北部等具

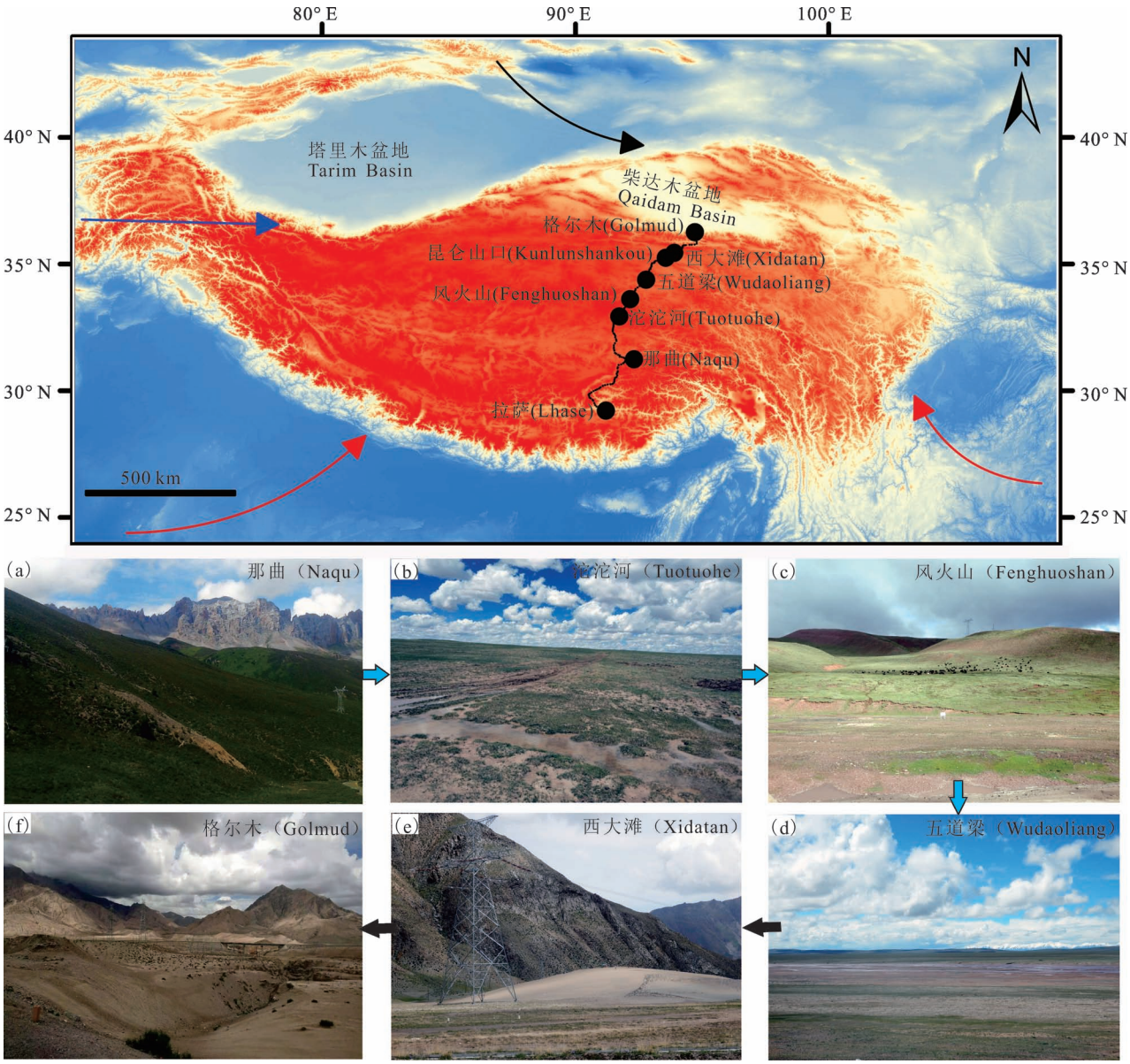


图 1 青藏高原 109 国道那曲到格尔木段植被景观变化(a—f)

Fig. 1 Vegetation landscape change from Naqu to Golmud along the 109 National Road (a—f)

其中红色箭头表示东亚夏季风和印度季风,黑色箭头表示东亚冬季风,蓝色箭头表示西风

Red arrow indicates east Asian summer monsoon and Indian monsoon, black arrow represents east Asian winter monsoon and blue arrow represents westerlies

体哪个区域对亚洲内陆干旱化具有重要的影响,本文统一选择夏季时观察讨论 109 国道沿线(从南向北)植被、河流量等地理要素的变化,观察是否具有明显的突变点。本文以最近的一次野外工作(2019 年 7 月)从格尔木出发到沱沱河为基础,并结合同时期更南地点的证据等来寻找沿线地理要素变化的“异常点”。

结果如图 1(a—f)所示,从那曲到格尔木,反映植被景观和河流量的照片(统一拍摄于 2019 年 7 月)具有明显的一个特点:那曲植被相比较于沱沱河、风火山和五道梁等地区更加繁盛,沱沱河、风火山和五道梁以青绿的高山草地草甸为主,地表积水和附近河流径流量较大,如五道梁附近的楚玛尔河。总体来看,从那曲到五道梁地区,植被和河流径流量显示其降水量相对较多。在昆仑山垭口地区,发育玉珠峰冰川,在西侧的布喀达板峰,也发育大量的冰川。但是到西大滩和格尔木等地区,西大滩开始出现风尘沙丘。继续往北至格尔木地区,地表景观则

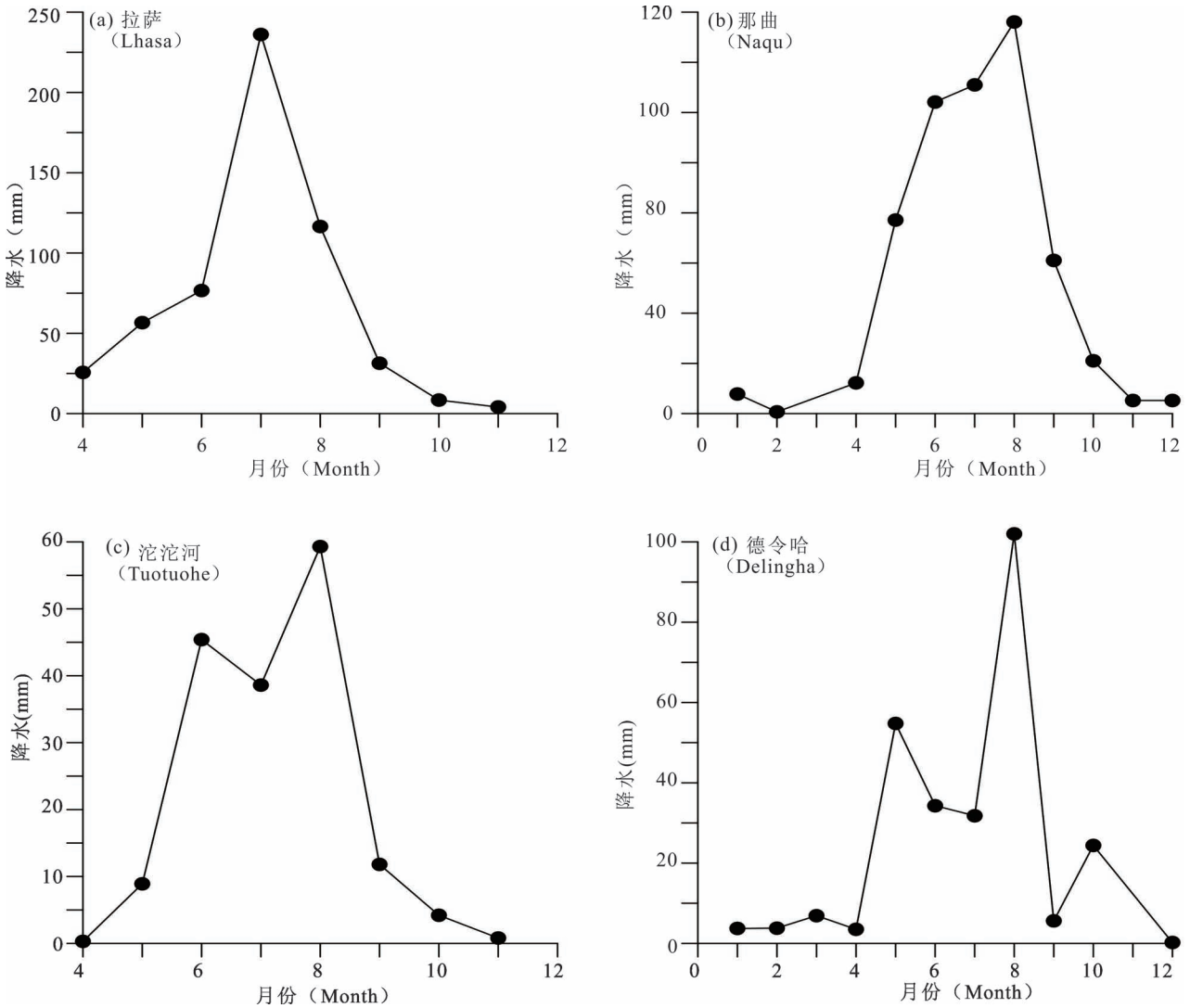


图 2 2004 年青藏高原拉萨、那曲、沱沱河和德令哈降水量分布(数据来源于 Yao Tandong et al. , 2013)

Fig. 2 Precipitation distribution of the Lhasa, Naqu, Tuotuo River and Delingha on the Xizang(Tibetan) Plateau in year 2004 (data are from Yao Tandong et al. , 2013)

变成干旱的准戈壁荒漠。从南边的那曲到格尔木,很明显的一个特点就是从西大滩开始,年平均降水量开始明显减少,气候变得逐渐相对干旱;考虑到沿线地区降水类型主要是夏季主控型(图 2),说明夏季降水量向北逐渐减少。上述从那曲到格尔木地理要素以东昆仑山为界由相对湿润到干旱的变化,在一定程度上说明了昆仑山对南来水汽的阻挡作用。

2.2 氧同位素($\delta^{18}O$)指示的环流降水空间变化

基于青藏高原面上 24 个站点的 10 年降水$\delta^{18}O$观测结果, 并结合高分辨率的稳定同位素模型和气象台站的数据,研究者将青藏高原面上降水$\delta^{18}O$ 的变化划分为三个模态,即印度季风模态、西风模态和过度模态 (Yao Tandong et al. , 2013)。

如图 3 所示,在 6 月~9 月,青藏高原 30°N 以南的地区,主要盛行南风和西南风,然后在 30° N ~ 35°N逐渐减弱,最后在 35° N 以北西风盛行(图 3a),印度季风带来的南部海洋水汽由南向北逐渐减少。在 12 月~次年 2 月时,主要盛行西风,西风控制着整个青藏高原的水汽传输和降水(图 3b)。图 3a 显示,夏季沱沱河(~34°N)地区仍然受印度季风的影响,而超过 35°N 的地区则基本没有印度季风带来的水汽,35°N 地区与东昆仑山位置基本重合。我国西部长时间平均的 850 hPa 风速和湿度图也支持上述结论,同时还看出东亚夏季风携带的水汽很难或者很弱的能够到达 35°N 以北地区(Tian Lide et al. , 2007),从另外一个角度说明东昆仑山

对现在青藏高原面上降水分布的影响,这与上面基于地理要素变化得到的结论基本相同。

同说明印度季风带来的降水已影响不到(或者非常弱)东昆仑山腹地,进一步说明东昆仑山对青藏高

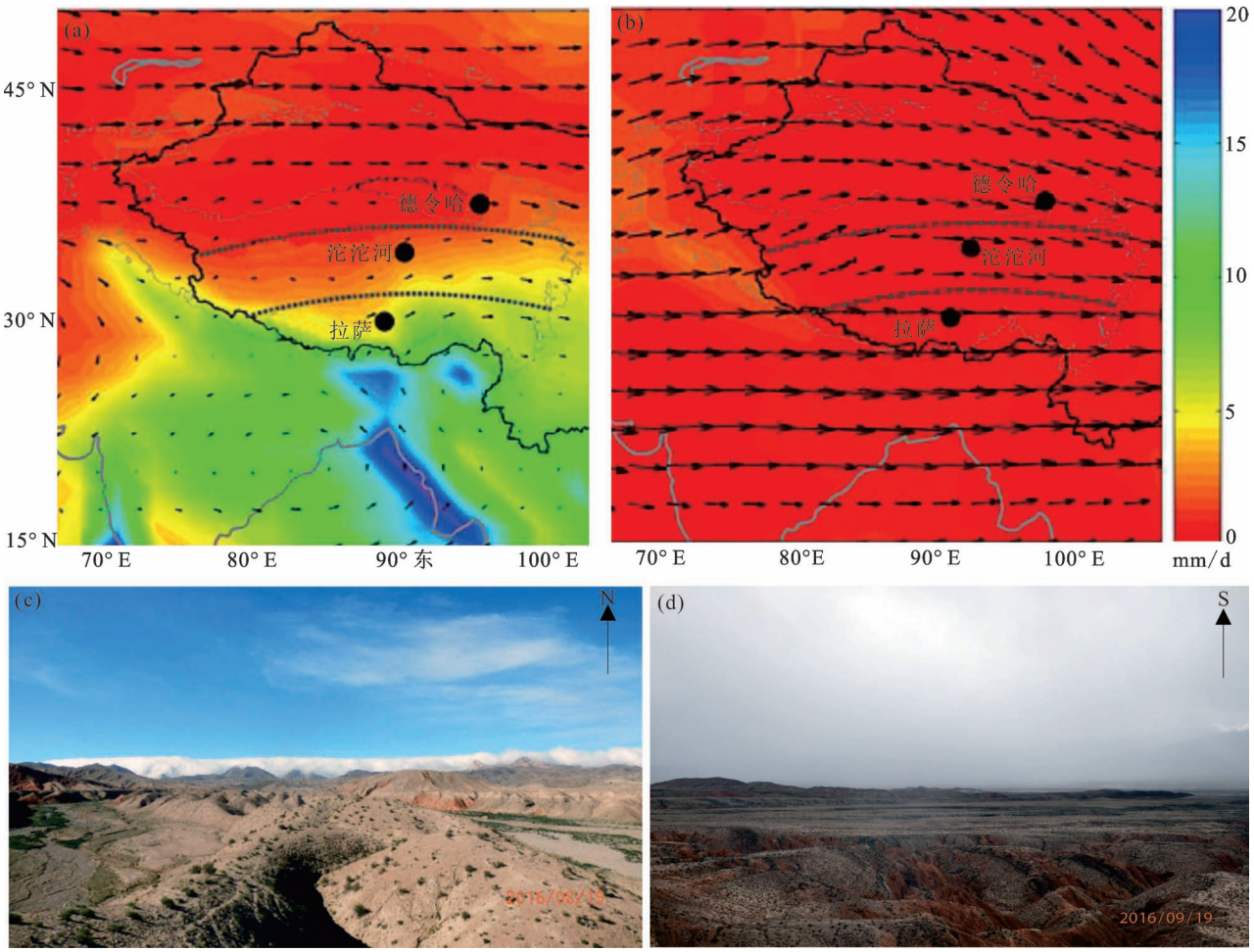


图 3 青藏高原降水氧同位素($\delta^{18}O$)指示的环流降水空间变化(图 a,b;Yao Tandong et al. , 2013)以及东昆仑夏季野外水汽来源照片(图 c,d)

Fig. 3 Spatial variation of the circulation precipitation indicated by the oxygen isotope ($\delta^{18}O$) of precipitation on the Xizang (Tibetan) Plateau(a, b;Yao et al. , 2013) and the source of water vapor in the field in summer in the East Kunlun Mountains(c, d)

作者曾经夏季在东昆仑山腹地连续工作 1.5 个月以上,发现夏季工作地点的降水主要是来自于北边的水汽(图 3c),而南边水汽带来的降水频率非常小(图 3d)。因地形雨存在一个最大降水高度,超过这个最大海拔高度,水汽含量降低伴随着降雨量的减少,在秦岭地区,南坡 7 月份的最大降水高度在~1500 m(傅抱璞,1992),而东昆仑腹地工作地点海拔高度~4200 m,两边山地海拔>5000 m,因此,本文认为地形雨对区域的降水影响很小。还有一个明显的特点,驻扎地北边的山脉存有一定量的积雪和冰川,而南边的山脉则没有,因两边海拔都已至少超过 5000 m,所以水汽的来源成了主控因素。这两点共

原面上降水分布的影响。

2.3　大气跨境污染物指示的环流空间变化

青藏高原面上的污染排放非常有限,但是在高原的周边地区分布着人口聚集、污染物排放量大的国家和地区,在西风环流和印度季风的影响下,周边国家和地区所排放的污染物会被大气环流输送到青藏高原腹地。基于在我国西部 7 条冰川采集的冰尘样品分析(图 4),显示印度季风主控影响冰川区的冰尘汞浓度水平普遍高于西风主导冰川区,大约以 35°N 为界(与东昆仑纬度基本一致; Huang Jie et al. , 2019)。5 年的大气持久性有机污染物监测网络观测显示青藏高原大气的持久性有机污染物分布

总体趋势为南高北低、东高西低,即青藏高原南部受印度季风影响的区域大气中持久性有机污染物的含量明显高于北部的西风区(Wang Xiaoping et al., 2016)。通过对喜玛拉雅"西南—东北"断面(主要集中在 35°N 以南)表层冻土样品中汞含量的分析,结果显示冻土样品中汞浓度呈现出由南向北的递减趋势,越接近南亚污染密集区其土壤的汞浓度越高(Huang Jie et al., 2020)。对青藏高原五道梁地区气溶胶的来源分析表明五道梁地区夏季出现的气溶胶主要来源于孟加拉湾和阿拉伯海等地区(沈志宝等,1997)。上述证据说明了东昆仑对印度季风携带污染物的阻挡作用。

综上所述,可以得到以下 3 点关键信息:①至少青藏高原面上各地点降水主要集中在夏季;②印度季风的影响范围可以扩展到 35°N;③东昆仑的阻挡作用使得东昆仑腹地及以北降水明显减少,不受印度季风的影响。

3 讨论

3.1 亚洲内陆干旱化演化阶段

地质证据显示亚洲内陆干旱化演化具有阶段性的过程。研究者利用在西域组里面发现的火山灰,对以前塔里木盆地中部分磁性地层的结果进行了重新的解释,认为塔克拉玛干沙漠于晚渐新世—早中新世形成,具体时间为 ~ 26.7 ~ 22.6 Ma(Zheng Hongbo et al., 2015)。在准噶尔盆地,风成沉积开始于 24 Ma(Sun Jimin et al., 2010);庄浪钻孔岩芯显示风成红粘土出现于 25 Ma,说明亚洲内陆干旱化在晚渐新世—早中新世已经开始(Qiang Xiaoke et al., 2011)。最新的孢粉研究结果同样显示西北内陆的永久干旱环境形成于 22 Ma(Jia Yunxia et al., 2020)。通过塔里木盆地西北部新的厚约 3800 m 的地层剖面磁性地层学研究,结果显示风成砂于 12.2 Ma 出现,意味着古塔克拉玛干沙漠已经出现

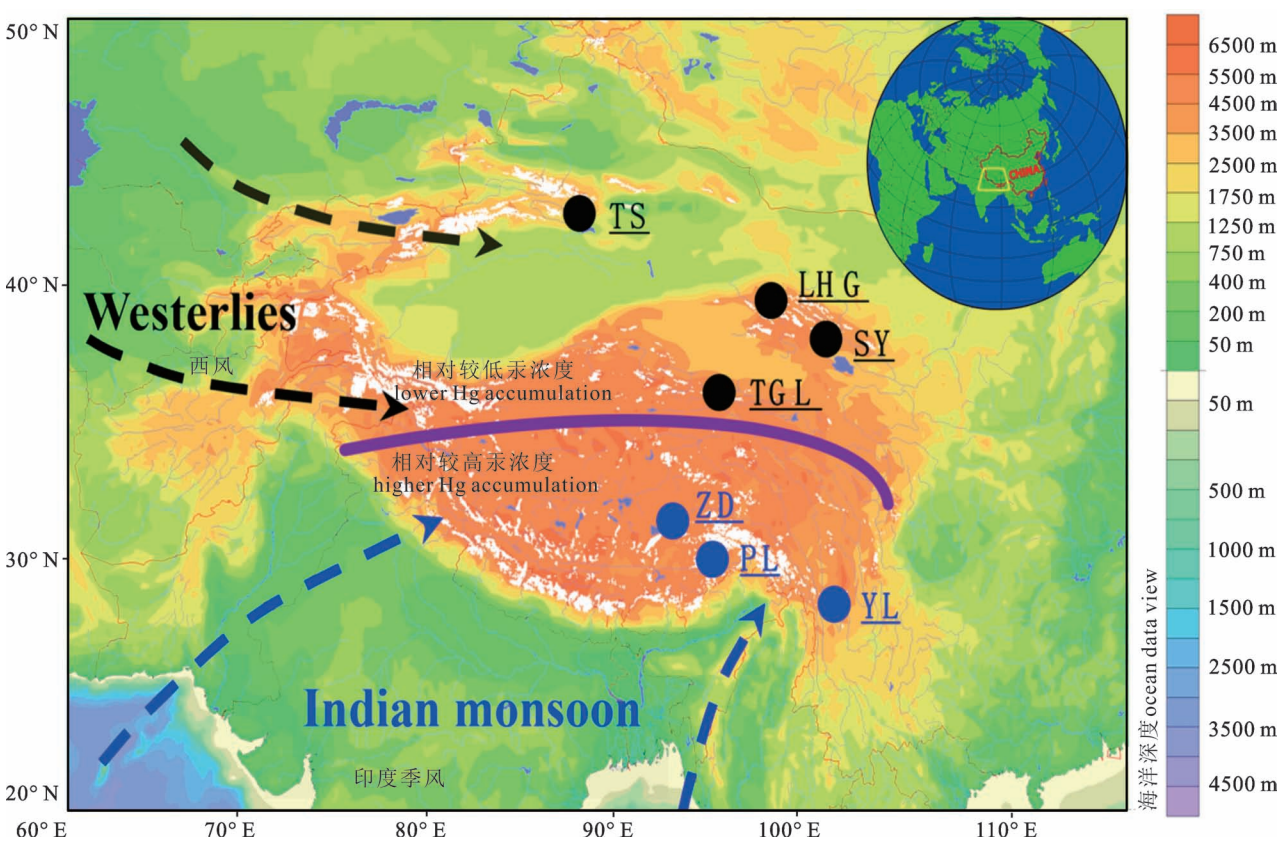


图 4 青藏高原采集冰尘样品的冰川位置以及 Hg 浓度分布界线图(修改自 Huang Jie et al., 2019)

Fig. 4 Locations of the glaciers in Xizang(Tibetan) Plateau where cryoconite samples were collected and Hg accumulation distribution boundary (modified after Huang Jie et al., 2019)

TS—乌鲁木齐 1 号冰川;LHG—老虎沟 12 号冰川;SY—十一冰川;TGL—冬克玛底冰川;ZD—扎当冰川;PL—帕隆冰川;YL—玉龙冰川 TS—Urumqi No. 1 Glacier; LHG—Laohugou No. 12 Glacier; SY—Shiyi Glacier; TGL—Dongkemadi Glacier; ZD—Zhadong Glacier; PL—Parlung No. 4 Glacier; YL—Yulong Glacier

(Heermance et al., 2018)。在东索尔库里盆地,88.4 m 厚的新近记风成沉积研究揭示亚洲内陆干旱化在~11.5 Ma 存在一次加强 (Li Jianxing et al., 2014)。在塔克拉玛干沙漠中部地区,1071 m 厚夹有风成沉积的新近记地层研究显示沙漠开始于 7 Ma(Sun Jimin et al., 2009)。最新的孢粉研究成果也指示西北内陆干旱环境于 8~7 Ma 存在一期加强事件(Jia Yunxia et al., 2020)。在塔里木盆地东部的罗布泊钻孔 Ls2 研究结果显示塔里木盆地在 5.3 Ma 存在一次干旱化事件(Chang Hong et al., 2012; Sun Jimin et al., 2015),后续结合塔里木盆地中部玛杂塔格(Mazartag)剖面的记录揭示出~5.3 Ma 干旱化事件在塔里木盆地东西部同时存在(Sun Jimin et al., 2017)。在天山以南北卡拉玉儿衮(Kalayuergun)背斜剖面研究表明也存在 5.3 Ma 干旱化事件,结合上述研究说明 5.3 Ma 干旱化事件在整个塔里木盆地都存在(Zhang Zhiliang et al., 2019)。最近在塔克拉玛干南边一项 671 m 高分辨率的风尘沉积钻孔研究揭示出塔里木盆地至少在 3.6 Ma 内陆已经干旱化,沙漠已经存在,随后又经历了~2.7,1.1 和 0.5 Ma 三个阶段的干旱化(Fang Xiaomin et al., 2020)。从上述的地质证据可以看出亚洲内陆中晚新生代干旱化具有以下几个重要时间节点,分别是 27~23 Ma、~12 Ma、5.3 Ma、3.6 Ma、2.7 Ma、1.1 Ma、0.5 Ma。

柴达木盆地孢粉结果显示旱生植物(Xerophytes)在 28~26 Ma 所占的比例几乎达到 50%,在~13.5 Ma 比例超过 50%,指示了气候相对干旱(Wang Jian et al., 1999)。在柴达木盆地西部的 KC-1 钻孔,菌孢子浓度指标指示柴达木盆地从 18 Ma 以来具有逐渐变干的趋势,且在 13~12 Ma 和~5.5 Ma 两个时间段(点)具有明显的干旱化加强趋势(苗运法等,2018)。在怀头塔拉剖面,通过沉积物碳酸钙、硫酸根和氯离子含量的研究,同时结合生物化石和周边地区的研究结果,盆地干旱化可能从~13 Ma 开始,这与氧同位素的正偏(~12 Ma),化学风化减弱时间,磁化率的突变一致(Zhuang Guangsheng et al., 2011; Bao Jing et al., 2019; Zhang Tao et al., 2020),而真正意义上的干旱化开始于 6.6 Ma(应红等,2016),~13 Ma 的干旱化事件也与大红沟剖面、KC-1 剖面、花土沟剖面等的研究结果基本一致 (Miao Yunfa et al., 2011; Li Lin et al., 2016; Song Bowen et al., 2017)。红沟子剖面的研究指示柴达木盆地在 11.1 Ma 存在一次明显的干旱化事件 (Song Chunhui et al., 2014; Zhang Tao et al., 2020)。另外,柴达木盆地西边 SG-1b 钻孔粒度指标显示 3.6~3.3 Ma 钻孔所在地由深湖变成了浅湖,存在短暂的干旱(Lu Yin et al., 2015); SG-3 钻孔孢粉记录表明柴达木盆地从 2.6 Ma 开始逐渐干旱化,另外存在 1.2 Ma,0.9 Ma,0.6 Ma 三次干旱事件(Cai Maotang et al., 2012)。综合上述证据来看,柴达木盆地晚渐新世以来干旱化具有以下几个重要时间节点,分别是 28~26 Ma、~13 Ma、7~5 Ma、3.6~3.3 Ma、2.6 Ma、1.2 Ma 、0.9 Ma 和 0.6 Ma。

3.2　晚渐新世以来东昆仑构造隆升过程

在东大滩南侧沿逆冲断层发育的绿泥石糜棱片岩的^{39}Ar-^{40}Ar 坪年龄为 26.5±2.7 Ma,说明东昆仑南部逆冲推覆构造系统在此时发生了明显的构造运动(吴珍汉等,2011)。柴达木盆地红沟剖面的磁性地层学和碎屑锆石研究结果也支持东昆仑山在 25.5 Ma 发生了构造变形且盆地物源来源于南边的东昆仑山(Wang Weitao et al., 2017)。同样,东昆仑山附近低温热年代学、地震反射剖面以及重矿物分析等结果显示晚渐新世—早中新世的隆升剥蚀速率迅速增加(Yin An et al., 2007; Clark et al., 2010; Dai Jingeng et al., 2013; McRivette et al., 2019)。这个时间段柴达木盆地西南部的古高度约~2000 m(Li Linlin et al., 2016),所以东昆仑山晚渐新世—早中新世的海拔高度至少在 2000 m 以上。在东昆仑西段野马泉地区,磷灰石裂变径迹热历史分析结果显示 14 Ma 开始发生了快速隆升(朱传宝等,2018),东昆仑中段锆石裂变径迹结果也支持这个结果(Tian Pengfei et al., 2020)。对格尔木附近东昆仑山花岗岩类侵入岩体开展锆石和磷灰石的裂变径迹定年和热历史的模拟,发现东昆仑山具有多阶段隆升和冷却的演化历史,其中磷灰石裂变径迹热历史模拟指出东昆仑山存在 16.3~10.0 Ma 以及 5.1~0.9 Ma 两期冷却历史,反映了东昆仑逆冲断层的发育(陈宣华等,2011)。野外地质证据和对遥感地貌影像的解读结果表明东昆仑在 10±2 Ma 开始发生左旋走滑运动(Fu Bihong and Awata, 2007);低温热年代学显示东昆仑地区在 8~5 Ma 或者~10 Ma 开始发生了快速的隆升剥蚀(Duvall et al., 2013; McRivette et al., 2019;Wu Chen et al., 2020))。昆仑山垭口盆地的高密度磁性地层学定年表明剖面沉积的年龄在 3.6~0.5 Ma,地层的沉积记录显示东昆仑上新世以来经历了~3.6 Ma,2.69~2.58 Ma,1.77

Ma,1.2 Ma,0.87 Ma 和 0.78 Ma 几期构造隆升（宋春晖等,2005）。综合所有证据来看,东昆仑山中晚新生代以来构造隆升事件具有以下几个时间点,分别是晚渐新世—早中新世（26.5±2.7 Ma）,~14 Ma,10~5 Ma,~3.6 Ma,2.69~2.58 Ma,1.77 Ma,1.2 Ma,0.87 Ma 和 0.78 Ma 几期构造隆升。

3.3 晚渐新世以来东昆仑隆升对亚洲内陆干旱化的潜在影响

基于以上地质证据和观测数据,一个重要的结论就是东昆仑山是阻挡现在印度季风携带的水汽继续向北深入渗透的重要屏障。假设类似于现在的印度季风在新生代已经形成,那么我们是否可以尝试着探索东昆仑在新生代时期的构造隆升对亚洲内陆干旱化形成演化的影响。

综合大洋钻探计划马尔代夫钻孔揭示出类似于现在的印度季风在~25 Ma 已经开始形成（Betzler et al.,2016）,与类似于现在东亚季风开始的时间基本同时（Guo Zhengtang et al.,2002; Qiang Xiaoke et al.,2011）。所以下面尝试着讨论~25 Ma 以来东昆仑山的构造隆升活动与亚洲内陆干旱化形成发展的潜在关系。

现在地质证据和观测数据显示东昆仑山是阻挡现在印度季风携带水汽继续向北深入的重要屏障。在内陆干旱演化的过程中,塔里木盆地、准噶尔盆地和柴达木盆地等地质证据都共同表明其干旱化存在27~23 Ma,13~12 Ma 和 7~5 Ma 几个重要节点。如果东昆仑山对塔里木盆地以及准噶尔盆地,或者至少柴达木盆地的干旱化存在明显的影响,那么至少需要找到基本同时间的构造隆升证据。

虽然模拟研究已经显示出东昆仑山中晚新生代的构造隆升对塔里木盆地或者准噶尔盆地等的干旱化可能存在较大的影响（An Zhisheng et al.,2001）,但是这一模拟结果需要地质证据的支持。所以如果在东昆仑山紧靠北边的柴达木盆地中能找到相关的干旱记录且与塔里木和准噶尔盆地等地的干旱演化时间点基本一致,则在一定程度上可以说明东昆仑山的构造隆升活动至少对柴达木盆地的干旱化存在影响,甚至也可能影响其他盆地的干旱演化。

东昆仑山中晚新生代的构造隆升是否能够较大程度的影响亚洲内陆干旱化可能存在争议,但是目前一些研究（Jolivet et al.,2001; Cao Kai et al.,2015）揭示出西昆仑山与东昆仑山具有一些相似的隆升时间节点,如~15 Ma,在某种程度上说明至少整个昆仑山的构造活动与内陆干旱化存在一定的联系。另外,塔里木盆地 5.3 Ma 的干旱化事件可能主要受帕米尔高原与天山的碰撞闭合影响（Sun Jimin et al.,2015）,东昆仑山的构造活动可能主要影响27~23 Ma 以及~14 Ma 的内陆干旱化。

深海氧同位素显示全球在 27.5 Ma、26.4 Ma 存在 Oi-2a 和 Oi-2b 降温事件,同样在~16 Ma 和~14 Ma 也存在 Mi-2 和 Mi-3 两期（Zachos et al.,2001）,与内陆干旱化的时间点契合,再次出现构造与气候对区域影响程度无法分辨的难题,但考虑到昆仑山与柴达木盆地、塔里木盆地的盆山耦合关系,其对区域的干旱化应该仍然存在较大的影响。

另外,塔里木盆地、柴达木盆地干旱化与东昆仑山的构造隆升还存在~3.6 Ma、~2.6 Ma、1.1~1.2 Ma、0.9~0.6 Ma 等几个高度吻合事件节点,暗示着盆地的干旱化与隆升存在着联系,但是考虑到东昆仑山在~3 Ma 已经隆升到接近现在的海拔高度（张弥曼和 Miao Desui,2016）,其对水汽的阻挡作用已经完全形成,后续的构造活动对盆地的干旱化影响已经不及之前,更重要的是~3.6 Ma 北半球冰期已经开始（Mudelsee and Raymo,2005）,所以本文认为~3.6 Ma 以后内陆盆地的干旱化事件更多的是由北半球冰期寒冷事件所控制,构造活动的贡献度相对减少。

从上述证据整体来看,塔里木盆地和准噶尔盆地中晚新生代以来的干旱化时间节点与柴达木盆地的干旱化时间点基本一致,而且与东昆仑山的构造隆升事件时间点也非常契合,考虑到东昆仑在晚渐新世—早中新世的海拔高度已经达到>2000 m 以及现在东昆仑山对印度季风的阻挡作用,本文认为东昆仑山对晚渐新世以来亚洲内陆或者至少柴达木盆地的干旱化事件具有重要的影响,但是~3.6 Ma 之后,北半球冰期对内陆盆地的干旱化的影响更大。

4 结论

（1）基于现在的地理要素证据以及大量观测和模拟结果,东昆仑对印度季风继续深入内陆具有明显的阻挡作用,是一个重要的水汽屏障;

（2）塔里木盆地、准噶尔盆地以及柴达木盆地等地质记录都揭示出中新生代以来存在 27~23 Ma、~14 Ma、10~5 Ma、~3.6 Ma、~2.6 Ma、1.1~1.2 Ma、0.9~0.6 Ma 等七期重要的干旱化事件,且与东昆仑山的构造隆升时间点高度契合,结合现在的地理要素和观测证据暗示着东昆仑山晚渐新世以来的构造隆升对亚洲内陆或者至少柴达木盆地的干旱化

事件具有重要的影响,但是~3.6 Ma 之后,北半球冰期对内陆盆地的干旱化的影响更大。

致谢:感谢评审专家提出的宝贵建议,使得本文更加完善。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈宣华 Mcrivette M W, 李丽, 尹安, 蒋荣宝, 万景林, 李会军. 2011. 东昆仑造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.

傅抱璞. 1992. 地形和海拔高度对降水的影响. 地理学报, 47(4): 302~314.

郭正堂. 2017. 黄土高原见证季风和荒漠的由来. 中国科学: 地球科学, 47(4): 421~437.

李乐意, 常宏. 2015. 六盘山东西两侧红粘土沉积起源年代差异原因初探. 地质论评, 61(4): 861~872.

李乐意. 2015. 青藏高原古近纪沱沱河盆地磁性地层及其古环境演变. 硕士论文. 导师: 常宏. 中国科学院研究生院(地球环境研究所).

李廷栋, 潘桂堂, 肖序常, 陈炳蔚. 2013. 青藏高原隆升的地质记录及机制. 广州: 广东科技出版社.

刘东生等. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社.

刘东生, 郑棉平, 郭正堂. 1998. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性. 第四纪研究, (3): 194~204.

苗运法, 吴福莉, 方小敏, 王梓莎. 2018. 青藏高原北部柴达木盆地中新世菌孢子变化及其意义初探. 第四纪研究, 38(1): 67~75.

沈志宝, 张小曳, 柳海燕. 1997. 青藏高原五道梁低层大气气溶胶来源的初步分析Ⅱ: 源地和输送. 高原气象, 16 (4): 345~352.

宋春晖, 高东林, 方小敏, 崔之久, 李吉均, 杨胜利, 金洪波, Douglas B, Joseph L K. 2005. 青藏高原昆仑山垭口盆地晚新生代高精度磁性地层及其意义. 科学通报, 50(19): 99~108.

吴珍汉, 赵立国, 叶培盛, 胡道功, 周春景. 2011. 青藏高原中段渐新世逆冲推覆构造. 中国地质, 38(3): 522~536.

应红, 宋春晖, 鲍晶, 冯盈, 胡春华. 2016. 柴达木盆地东北缘中中新世以来古气候变化. 第四纪研究, 36(4): 847~858.

张弥曼, Miao Desui. 2016. 青藏高原的新生代鱼化石及其古环境意义. 科学通报, 61(9): 981~995.

朱传宝, 孙非非, 袁万明, 张爱奎, 张大明, 马忠元, 周青禄, 王生明, 赵梦琪, 刘光莲. 2018. 东昆仑野马泉地区磷灰石裂变径迹热年代学及构造意义. 地球科学, 43(6): 207~216.

An Zhisheng. 2014. Late Cenozoic Climate Change in Asia: Loess, Monsoon and Monsoon—arid Environment Evolution. Springer Netherlands.

An Zhisheng, Kutzbach J E, Prell W L, Steven C P. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya Tibetan plateau since Late Miocene times. Nature, 411: 62~66.

Bao Jing, Song Chunhui, Yang Yibo, Fang Xiaomin, Meng Qingquan, Feng Ying, He Pengju. 2019. Reduced chemical weathering intensity in the Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau) during the Late Cenozoic. Journal of Asian Earth Sciences, 170: 155~165.

Betzler C, Eberli G P, Kroon D, Wright J D, Swart P K, Nath B N, Alvarez-Zarikian C A, Alonso-Garcia M, Bialik O M, Blattler C L, Guo J A, Haffen S, Horozal S, Inoue M, Jovane L, Lanci L, Laya J C, Mee A L, Ludmann T, Nakakuni M, Niino K, Petruny L M, Pratiwi S D, Reijmer J J, Reolid J, Slagle AL, Sloss C R, Su X, Yao Z, Young J R. 2016. The abrupt onset of the modern South Asian Monsoon winds. Scientific Reports, 6(1): 1~10.

Cai Maotang, Fang Xiaomin, Wu Fuli, Miao Yunfa, Erwin A. 2012. Pliocene—Pleistocene stepwise drying of Central Asia: evidence from paleomagnetism and sporopollen record of the deep borehole SG-3 in the western Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau. Global and Planetary Change, 94~95: 72~81.

Cao Kai, Wang Guocan, Bernet M, van der Bee P, Zhang Kexin. 2015. Exhumation history of the West Kunlun Mountains, northwestern Tibet: Evidence for a long-lived, rejuvenated orogen. Earth and Planetary Science Letters, 432: 391~403.

Chang Hong, An Zhisheng, Liu Weiguo, Qiang Xiaoke, Song Yougui, Ao Hong. 2012. Magnetostratigraphic and paleoenvironmental records for a Late Cenozoic sedimentary sequence drilled from Lop Nor in the eastern Tarim Basin. Global and Planetary Change, 80: 113~122.

Chang Hong, An Zhisheng, Wu Feng, Song Yougui, Qiang Xiaoke, Li Leyi. 2017. Late Miocene — early Pleistocene climate change in the mid-latitude westerlies and their influence on Asian monsoon as constrained by the K/Al ratio record from drill core Ls2 in the Tarim Basin. Catena, 153: 75~82.

Chang Hong, Li Leyi, Qiang Xiaoke, Garzione C N, Pullen A, An Zhisheng. 2015. Magnetostratigraphy of Cenozoic deposits in the western Qaidam Basin and its implication for the surface uplift of the northeastern margin of the Tibetan Plateau. Earth and Planetary Science Letters, 430: 271~283.

Chen Fahu, Jia Jia, Chen Jianhui, Li Guoqiang, Zhang Xiaojian, Xie Haichao, Xia Dunsheng, Huang Wei, An Chengbang. 2016. A persistent Holocene wetting trend in arid central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi~proxy analyses of loess—paleosol sequences in Xinjiang, China. Quaternary Science Reviews, 146: 134~146.

Chen Xuanhua, Mcrivette M W, Li Li, Yin An, Jiang Rongbao, Wan Jinglin, Li Huijun. 2011&. Thermochronological evidence for multi-phase uplifting of the East Kunlun Mountains, northern Tibetan Plateau. Geological Bulletin of China, 30(11): 1647~1660.

Clark M K, Farley K A, Zheng D, Wang Z, Duvall A R. 2010. Early Cenozoic faulting of the northern Tibetan Plateau margin from apatite (U—Th)/He ages. Earth and Planetary Science Letters, 296: 78~88.

Dai Jingeng, Wang Chengshan, Hourigan J, Santosh M. 2013. Multi-stage tectono-magmatic events of the Eastern Kunlun Range, northern Tibet: Insights from U-Pb geochronology and (U—Th)/He thermochronology. Tectonophysics, 599: 97~106.

Duvall A R, Clark M K, Kirby E, Farley K A, Craddock W H, Li C, Yuan D Y. 2013. Low-temperature thermochronometry along the Kunlun and Haiyuan Faults, NE Tibetan Plateau: Evidence for kinematic change during late-stage orogenesis. Tectonics, 32: 1190~1211.

Fang Xiaomin, An Zhisheng, Clemens S C, Zan Jinbo, Shi Zhengguo, Yang Shengli, HanWenxia. 2020. The 3. 6-Ma aridity and westerlies history over midlatitude Asia linked with global climatic cooling. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117

(40): 24729~24734.

Fang Xiaomin, Dupont-Nivet G, Wang Chengshan, Song Chunhui, Meng Qingquan, Zhang Weilin, Nie Junsheng, Zhang Tao, Mao Ziqiang, Chen Yu. 2020. Revised chronology of central Tibet uplift (Lunpola Basin). Science Advances, 6(50): eaba7298.

Fu Baopu. 1992&. The effects of topography and elevation on precipitation. Acta Geographica Sinica, 47(4): 302~314.

Fu Bihong, Awata Y. 2007. Displacement and timing of left-lateral faulting in the Kunlun Fault Zone, northern Tibet, inferred from geologic and geomorphic features. Journal of Asian Earth Sciences, 29: 253~265.

Guo Zhengtang. 2017#. The Loess Plateau witnesses the origin of monsoon and desert. Scientia Sinica Terrae, 47(4): 421~437.

Guo Zhengtang, Ruddiman W F, Hao Qingzhen, Wu Haibin, Qiao Yansong, Zhu Rixiang, Peng Shuzhen, Wei J, Yuan Baoying, Liu Tungsheng. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. Nature, 416: 159~163.

Heermance R V, Pearson J, Moe A, Langtao L, Jianhong X, Jie C, Richter F, Garzione C N, Junsheng N, Bogue S. 2018. Erg deposition and development of the ancestral Taklimakan Desert (western China) between 12. 2 and 7. 0 Ma. Geology, 46(10): 919~922.

Huang Jie, Kang Shichang, Ma Ming, Guo Junming, Cong Zhiyuan, Dong Zhiweng, Yin Runsheng, Xu Jianzhong, Tripathee L, Ram K, Wang Feiyue. 2019. Accumulation of atmospheric mercury in glacier cryoconite over Western China. Environmental Science & Technology, 53: 6632~6639.

Huang Jie, Kang Shichang, Yin Runsheng, Guo Junming, Lepak R, Mika S, Tripathee L, Sun Shiwei. 2020. Mercury isotopes in frozen soils reveal transboundary atmospheric mercury deposition over the Himalayas and Tibetan Plateau. Environmental Pollution, 256: 113432.

Jia Yunxia, Wu Haibin, Zhu Shuya, Li Qin, Zhang Chunxia, Yu Yanyan, Sun Aizhi. 2020. Cenozoic aridification in Northwest China evidenced by paleovegetation evolution. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 557: 109907.

Jolivet M, Brunel M, Seward D, Xu Z, Yang J, Roger F, Tapponnier P, Malavieille J, Arnaud N, Wu C. 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan plateau: fission-track constraints. Tectonophysics, 343: 111~134.

Li Jianxing, Yue Leping, Pan Feng, Zhang Rui, Guo Lin, Xi Rengang, Guo Lei. 2014. Intensified aridity of the Asian interior recorded by the magnetism of red clay in Altun Shan, NE Tibetan Plateau. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 411: 30~41.

Li Leyi. 2015&. Magnetostratigraphy and the paleoenvironment evolution of the Tuotuohe basin, Tibetan Plateau. Master Degree. Supervisor: Chang Hong. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences(Institute of Earth Environment).

Li Leyi, Chang Hong. 2015&. Preliminary interpretation to diachroneity of the red clay in two flanks of the Liupan Mounain. Geological Review, 61(4): 861~872.

Li Linlin, Wu Chaodong, Fan Changfu, Li Jijun, Zhang Changhao. 2016. Carbon and oxygen isotopic constraints on paleoclimate and paleoelevation of the southwestern Qaidam basin, northern Tibetan Plateau. Geoscience Frontiers, 8: 1175~1186.

Li Lin, Garzione C N, Pullen A, Chang Hong. 2016. Early—middle Miocene topographic growth of the northern Tibetan Plateau: Stable isotope and sedimentation evidence from the southwestern Qaidam basin. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 461: 201~213.

Li Tingdong, Pan Guitang, Xiao Xuchang, Chen Bingwei. 2013&. Geological Records and Mechanism of the Uplift of the Qinghai—Tibet Plateau. Guang Zhou: Guangzhou Science and Technology Press.

Liu Dongsheng. 1985#. Loess and Environment. Beijing: Science Press.

Liu Dongsheng, Zheng Mianping, Guo Zhengtang. 1998&. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia. Quaternary Sciences, (3): 194~204.

Liu Xiaodong, Yin Zhiyong. 2002. Sensitivity of East Asian monsoon climate to the uplift of the Tibetan Plateau. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 183 (3~4): 223~245.

Liu Xiaodong, Dong Buwen. 2013. Influence of the Tibetan Plateau uplift on the Asian monsoon—arid environment evolution. Chinese Science Bulletin, 58(34): 4277~4291.

Liu Xiaodong, Dong Buwen, Yin Zhiyong, Smith R, Guo Qingchun, 2019. Continental drift, plateau uplift, and the evolutions of monsoon and arid regions in Asia, Africa, and Australia during the Cenozoic. Science China Earth Sciences, 62(7): 1053~1075.

Lu Yin, Fang Xiaomin, Erwin A, Wang Jiuyi, Christian Herb, Han Wenxia, Wu Fuli, Song Chunhui. 2015. A 7. 3~1. 6 Ma grain size record of interaction between anticline uplift and climate change in the western Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau. Sedimentary Geology, 319: 40~51.

McRivette M W, Yin A, Chen X, Gehrels G E. 2019. Cenozoic basin evolution of the central Tibetan plateau as constrained by U-Pb detrital zircon geochronology, sandstone petrology, and fission-track thermochronology. Tectonophysics, 751: 150~179.

Miao Yunfa, Fang Xiaomin, Herrmann M, Wu Fuli, Zhang Yuezhong, Liu Dongliang. 2011. Miocene pollen record of KC-1 core in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau and implications for evolution of the East Asian monsoon. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 299: 30~38.

Miao Yunfa, Wu Fuli, Fang Xiaomin, Wang Zisha. 2018&. Preliminary wxploration of the fungal spores in Qaidam Basin, Northern Tibetan Plateau during the Miocene period. Quaternary Sciences, 38(1): 67~75.

Mudelsee M, Raymo M E. 2005. Slow dynamics of the Northern Hemisphere glaciation. Paleoceanography, 20(4): 1~14.

Qiang Xiaoke, An Zhisheng, Song Yougui, Chang Hong, Sun Youbin, Liu Weiguo, Ao Hong, Dong Jibao, Fu Chaofeng, Wu Feng, Lu Fengyan, Cai Yanjun, Zhou Weijian, Cao Junji, Xu Xinwen, Ai Li. 2011. New eolian red clay sequence on the western Chinese Loess Plateau linked to onset of Asian desertification about 25 Ma ago. Science China Earth Sciences, 54(1): 136~144.

Shen Zhibao, Zhang Xiaoye, Liu Haiyan. 1997&. The sources of aerosol in the lower layer atmosphere at Wudaoliang over Qinghai—Xizang Plateau Ⅱ: Sources regions and transport. Plateau Meteorology, 16 (4): 345~352.

Song Bowen, Ji Junliang, Wang Chaowen, Xu Yadong, Zhang Kexin. 2017. Intensified aridity in the Qaidam Basin during the Middle Miocene: constraints from ostracod, stable isotope, and weathering records. Canadian Journal of Earth Sciences, 54(3): 242~256.

Song Chunhui, Gao Donglin, Fang Xiaomin, Cui Zhijiu, Li Jijun, Yang Shengli, Jin Hongbo, Douglas B, Joseph L K. 2005#. High resolution magnetostratigraphy of the Kunlun Mountain Pass Basin in

the Qinghai—Tibet Plateau and its significance. Chinese Science Bulletin, 50(19): 99~108.

Song Chunhui, Hu Sihu, Han Wenxia, Zhang Tao, Fang Xiaomin, Gao Junping, Wu Fuli. 2014. Middle Miocene to earliest Pliocene sedimentological and geochemical records of climate change in the western Qaidam Basin on the NE Tibetan Plateau. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 395: 67~76.

Sun Jimin, Gong Zhijun, Tian Zhonghua, Jia Yingying, Windley B. 2015. Late Miocene stepwise aridification in the Asian interior and the interplay between tectonics and climate. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 421: 48~59.

Sun Jimin, Liu Weiguo, Liu Zhonghui, Deng Tao, Windley B F, Fu Bihong. 2017. Extreme aridification since the beginning of the Pliocene in the Tarim Basin, western China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 485: 189~200.

Sun Jimin, Ye Jie, Wu Wenyu, Ni Xijun, Bi Shundong, Zhang Zhenqing, Liu Weiming, Meng Jin. 2010. Late Oligocene—Miocene mid-latitude aridification and wind patterns in the Asian interior. Geology, 38(6): 515~518.

Sun Jimin, Zhang Liyuan, Deng Chenglong, Zhu Rixiang. 2008. Evidence for enhanced aridity in the Tarim Basin of China since 5.3 Ma. Quaternary Science Reviews, 27(9~10): 1012~1023.

Sun Jimin, Zhang Zhenqing, Zhang Liyuan. 2009. New evidence on the age of the Taklimakan Desert. Geology, 37(2): 159~162.

Sun Xiangjun, Wang Pinxian. 2005. How old is the Asian monsoon system? —Palaeobotanical records from China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 222(3~4): 181~222.

Tian Lide, Yao Tandong, MacClune K, White J W C, Schilla A, Vaughn B, Vachon R, Ichiyanagi K. 2007. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112(D10).

Tian Pengfei, Yuan Wanming, Yang Xiaoyong, Feng Zirui, Chen Xue, Yuan Erjun. 2020. Multi-stage tectonic events of the Eastern Kunlun Mountains, Northern Tibetan Plateau constrained by fission track thermochronology. Journal of Asian Earth Sciences, 2020: 104428.

Wang Chengshan, Liu Zhifei, Yi Haisheng, Liu Shun, Zhao Xixi. 2002. Tertiary crustal shortening and peneplanation in the Hoh Xil region: implications for the tectonic history of the northern Tibetan Plateau. Journal of Asian Earth Sciences, 20(3): 211~223.

Wang Jian, Wang Yongjin J, Liu Zechun, Li Jianqing, Xi Ping. 1999. Cenozoic environmental evolution of the Qaidam Basin and its implications for the uplift of the Tibetan Plateau and the drying of central Asia. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 152(1~2): 37~47.

Wang Weitao, Zheng Wenjun, Zhang Peizhen, Li Qiang, Kirby E, Yuan Daoyang, Zheng Dewen, Liu Caicai, Wang Zhicai, Zhang Huiping, Pang Jianzhang. 2017. Expansion of the Tibetan Plateau during the Neogene. Nature Communications, 8(1): 1~12.

Wang Xiaoping, Ren Jiao, Gong Ping, Wang Chuanfei, Xue Yonggang, Yao Tandong, Lohmann R. 2016. Spatial distribution of the persistent organic pollutants across the Tibetan Plateau and its linkage with the climate systems: A 5-year air monitoring study. Atmospheric Chemistry and Physics, 16(11): 6901~6911.

Wu Chen, Li Jie, Zuza A V, Liu Changfeng, Liu Wencan, Chen Xuanhua, Jiang Tian, Li Bing. 2020. Cenozoic cooling history and fluvial terrace development of the western domain of the Eastern Kunlun Range, northern Tibet. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 560: 109971.

Wu Zhenhan, Zhao Liguo, Ye Peisheng, Hu Daogong, Zhou Chunjing. 2011&. Oligocene thrust systems in central Tibetan Plateau. Geology in China, 38(3): 522~536.

Yao Tandong, Masson-Delmotte V, Gao Jing, Yu Wusheng, Yang Xiaoxin, Risi C, Sturm C, Werner M, Zhao Huabiao, He You, Ren Wei, Tian Lide, Shi Chunming, Hou Shugui, 2013. A review of climatic controls on $\delta^{18}O$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations. Reviews of Geophysics, 51(4): 525~548.

Yin An, Dang Yuqi, Zhang Min, McRivette MnW, Burgess WnP, Chen Xuanhua. 2007. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam basin and its surrounding regions (part 2): wedge tectonics in southern Qaidam basin and the Eastern Kunlun Range. Geological Society of America Special Papers, 433: 369~390.

Ying Hong, Song Chunhui, Bao Jing, Feng Ying, Hu Chunhua. 2016&. Paleoclimate change since the middle Miocene in the northeastern Qaidam Basin. Quaternary Sciences, 36(4): 847~858.

Zachos J, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. Science, 292(5517): 686~693.

Zhang Miman, Miao Desui. 2016&. Review of the Cenozoic fossil fishes from the Tibetan Plateau and their bearings on paleoenvironment. Chinese Science Bulletin, 61(9): 981~995.

Zhang Ran, Jiang Dabang, Liu Xiaodong, Tian Zhiping. 2012. Modeling the climate effects of different subregional uplifts within the Himalaya—Tibetan Plateau on Asian summer monsoon evolution. Chinese Science Bulletin, 57(35): 4617~4626.

Zhang Weilin, Fang Xiaomin, Song Chunhui, Erwin A, Yan Maodu, Wang Yadong. 2013. Late Neogene magnetostratigraphy in the western Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau) and its constraints on active tectonic uplift and progressive evolution of growth strata. Tectonophysics, 599: 107~116.

Zhang Zhiliang, Sun Jimin, Tian Shengchen, Lü Lixin, Su Bai, Cao Mengmeng, Li Jiawei, Li Yousheng. 2019. Environmental magnetic evidence for enhanced aridification in the Tarim Basin since ~5.3 Ma, NW China. Journal of Asian Earth Sciences, 189: 104181.

Zhang Zhongshi, Wang Huijun, Guo Zhengtang, Jiang Dabang. 2007. What triggers the transition of palaeoenvironmental patterns in China, the Tibetan Plateau uplift or the Paratethys Sea retreat?. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 245(3~4): 317~331.

Zheng Hongbo, Powell C M A, An Zhisheng, Zhou Jie, Dong Guangrong. 2000. Pliocene uplift of the northern Tibetan Plateau. Geology, 28(8): 715~718.

Zheng Hongbo, Wei Xiaochun, Tada R, Clift P D, Wang Bin, Jourdan F, Wang Ping, He Mengying. 2015. Late Oligocene—early Miocene birth of the Taklimakan Desert. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112(25): 7662~7667.

Zhu Chuanbao, Sun Feifei, Yuan Wanming, Zhang Aikui, Zhang Daming, Ma Zhongyuan, Zhou Qinglu, Wang Shengming, Zhao Mengqi, Liu Guanglian. 2018&. Apatite Fission Track thermochronology and tectonic significance in Yemaquan area, East Kunlun. Earth Science, 43(6): 207~216.

Zhuang Guangsheng, Hourigan J K, Koch P L, Ritts B D, Kent-Corson M L. 2011. Isotopic constraints on intensified aridity in Central Asia

around 12 Ma. Earth and Planetary Science Letters, 312: 152 ~ 163.

Zhang Tao, Han Wenxia, Fang Xiaomin, Song Chunhui, Wang Yadong, Tian Qian, Zhang Weilin, Feng Zhantao, Tan Mengqi. 2020. Tectonic forcing of environmental transition in Central Asia at ~ 11 ~ 9 Ma. Gondwana Research, 89: 19 ~ 30.

Potential role of the late Oligocene tectonic uplift in the eastern Kunlun Mountains of the Xizang(Tibet) in the formation of inner Asia aridification
——Based on present geological observational evidence

LI Leyi [1,2], CHANG Hong [1,3], GUAN Chong [4,5], TAO Yalin [6], SHEN Junjie [1,5], QUAN Chunyan[1], QIN Xiuling[1], CHANG Xiaohong[1]

1) *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an*, 710061;

2) *Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research, Xi'an*, 710061;

3) *CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an*, 710061;

4) *Institute of Tibetan Plateau research, Beijing*, 100101; 5) *University of Chinese Academy, Beijing*, 100049;

6) *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing*, 100029

Objectives: The tectonic uplift and growth process of the Tibetan Plateau and its resource and environmental effects are an important proposition in the scientific research of the earth system. Especially the link between the Tibetan Plateau uplift and the inner Asia aridification during the Cenozoic still stays a dispute question. In this paper, we will try to discuss and discriminate which part of the Tibetan Plateau has the most significant effect on the inner Asia aridification.

Methods: Based on the present geographical and landscape change evidence from Naqu to Golmud along 109 national highway, the results of large-scale machine observations and simulations and present geological phenomenon in the east Kunlun Mountains to discuss the effects on the inner Asia aridification.

Results: The east Kunlun Mountains have a significant blocking effect on the Indian monsoon going inland furtherly and it is an important moisture barrier.

Conclusions: Combining the highly time consistent of the east Kunlun Mountains' tectonic uplift and the inland aridification as well as the present geographical and landscape change evidence from Naqu to Golmud, all indicate that tectonic uplift of the east Kunlun Mountains have an important impact on the inner Asia aridification or at least the Qaidam Basin aridification since the late Oligocene. However, the northern hemisphere glaciation since ~3.6 Ma contributes much more to the aridification of the inner basins than the tectonic activities of the east Kunlun Mountains.

First author: LI Leyi, male, research on the Cenozoic tectonic uplift history of the Tibetan Plateau and its climate effects. Email: lily@ieecas.cn

Corresponding author: CHANG Hong, male, mainly work on the Cenozoic tectonic deformation of the Tibetan Plateau and paleoclimate change; Email: changh@loess.llqg.ac.cn

Manuscript received on: 2020-08-09; Accepted on: 2021-02-22; Network published on: 2021-03-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.03.041 **Edited by**: LIU Zhiqiang