

青藏高原腹地第四纪地质环境演化的地球动力学机制

胡东生^{1,2}, 张华京³, 徐冰⁴, 温景春⁵, 田新红², 张国伟²

(1. 湖南师范大学资源环境科学学院,长沙 410081; 2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室,西安 710056;

3. 湖南师范大学化学化工学院,长沙 410081; 4. 中国海洋大学海洋地球科学学院,山东青岛 226071;

5. 中国科学探险协会,北京 100083)

[摘要] 根据古季风变化与生物生产总量之间的耦合关系,结合区域地质演变和地球卫星遥感影像解译成果,对引起高原内部古气候环境变化发展过程的启动激发因素和相互耦合机制及其驱动传递效应进行探索研究,这个方向目前仍然属于高原地质环境演变及全球变化的前沿领域。

[关键词] 第四纪地质环境演化;地质构造事件响应;地球场效动力传递链;青藏高原腹地

[中图分类号] P56.558; P56.541 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2011)01-0081-08

1 前言

青藏高原以其特有的自然环境、丰富的自然资源和对周边地区气候与环境的深刻影响,一直成为科技界瞩目的热点^[1];且青藏高原的独特地表景观、多样性的生物物种和对全球气候与环境的启动效应,成为学术界长期研究的前沿方向。前沿方向研究中地质记录的证据是至关重要的,其地质载体在中、小尺度的分辨率中以冰川岩芯、湖泊岩芯等方面的记录最为重要,在大尺度的分辨率中则要注意地球陆面过程整体事件的发生、发展及演化,记载方式在区域上具有多样性的特点。根据青藏高原腹地可可西里地区湖泊沉积记录古气候、古环境的变化,第四纪晚冰期以来高原内部的气候环境一直处于波动发展的状态,采用特定的替代性指标所反演的古季风活动也是处于波动变化的态势^[2]。

2 第四纪地质环境

青藏高原第四纪地质环境演化备受国际地球科学学术界的关注,也存在激烈交锋的学派争议和不同思想的学术观点,大冰盖有无之说就是其中热点之一,但在第四纪冰期划分和发展阶段的认识上意见基本一致。根据区域地质的长期调查和深入研究,中国第四纪地层与亚洲地区同类地质环境可以相互对比,充分说明中国环境是东亚地区及全球变化的一部分。据最近的研究,中国大陆确认存在第四纪3次至4次冰期活动,并且都是构造隆升和气候变化双重作用的影响结果。

根据喜马拉雅山地区、昆仑山地区、黄河源地区等调查研究资料,普遍认为青藏高原第四纪地质历史演化中发生了3或4次冰期活动^[3],两者之间并不存在实质性的差别和异议,为了便于区域对比将其统一归纳为4次冰期活动,这4次冰期活动相互

[收稿日期] 2008-01-02

[基金项目] 中国可可西里地区国家重点科学考察项目(D2000204);湖南省重点学科建设项目(D2007001);西北大学大陆动力学国家重点实验室开放基金项目(DL2006001)

[作者简介] 胡东生(1951—),男,甘肃天水市人,教授,主要从事资源环境和遥感地质学与地球动力学及全球变化等方面的研究;
E-mail: hudsh@hunn. edu. cn

伴随着其间发育的间冰期气候环境。长期调查的结果表明,青藏高原的第四纪冰期活动与全球气候变化规律是相一致的。根据高原边缘新生代沉积盆地(柴达木盆地)内缘断陷堆积地层与高原面隆升的互动及反馈关系,盆地边缘(南缘)发育的4级叠垒式冲积扇群就清楚地表明青藏高原第四纪以来发生了4次强烈的抬升阶段及其环境变化过程^[4]。

2.1 早更新世

青藏高原这一时期平均海拔为 $2\ 000 \pm \text{m}$,山地高度在海拔 $3\ 000 \text{ m}$ 以上^[5];根据地体中心地理位置的综合演算^[6],高原范围纬度为北纬 $23^\circ \sim 35^\circ \text{N}$;以亚热带半湿润一半干旱气候类型为主,由于高原隆升伊始内部高差较小,区域气候型表现特征为平原型气候环境^[6]。草原—森林植被发育^[5],雨量较充沛,地表径流多被圈闭积滞成湖,是高原上的大湖时期^[6]。早更新世晚期,随着高原的进一步抬升、高原环流的转型以及全球气候的变冷,青藏高原第四纪第1次冰川活动——希夏邦马冰期($1\ 170 \sim 800 \text{ ka. B. P.}$)发育^[3],发现的冰川遗迹表明主要以山岳冰川类型为特征,是否后来发育成为遍布高原的大冰盖^[7],目前在学术界争议较大,有待更深入的调查和持续研究。早更新世末期出现了短暂的间冰期气候环境,发育了红土堆积^[5]以及溶岩地貌^[7]等。

2.2 中更新世

青藏高原这一时期平均海拔为 $3\ 000 \pm \text{m}$,山地高度在海拔 $4\ 000 \sim 4\ 500 \text{ m}$ 以上^[3],根据地理位置计算高原范围纬度为北纬 $24^\circ \sim 36^\circ \text{N}$ 或 $25^\circ \sim 37^\circ \text{N}$,以亚热带—温带半干旱气候类型为主,发育草原—疏林植被,受高原内部山体的加积作用和流水侵蚀作用等影响,区域气候型表现特征为山地型气候环境^[6]。

中更新世初期发生了青藏高原第四纪第2次冰川活动——聂聂雄拉冰期($720 \sim 500 \text{ ka. B. P.}$)^[3],区域调查资料认为这次冰期作用范围较大,喜马拉雅山、冈底斯山、唐古拉山、昆仑山、巴颜喀拉山和稻城海子山都有冰期出现,在若尔盖盆地也有相应的冰期气候^[3]出现。继后出现间冰期气候,发育了红色古土壤及河湖相沉积,这个时期也是高原上的湖泊萎缩期^[6],大气降水明显减少,整体气候比较干燥;但在高原边缘柴达木盆地湖泊的水位面普遍较高^[4],这与间冰期气温较高和冰雪消融水量增大存在密切的关系。

中更新世晚期发生了青藏高原第四纪第3次冰川活动——古乡冰期($300 \sim 130 \text{ ka. B. P.}$)^[3],调查资料显示这个时期多以山谷冰川或网状冰川^[3]为特征,局部有冰盖出现^[3,5,8],冰流运动指数表明其冷性降水较多,其冰川覆盖范围有扩展的趋势。

2.3 晚更新世

青藏高原这一时期平均海拔为 $4\ 000 \pm \text{m}$ ^[6]或 $4\ 000 \sim 5\ 000 \text{ m}$ ^[5],山地高度在海拔 $5\ 000 \text{ m}$ 以上,高原纬度范围为北纬 $26^\circ \sim 38^\circ \text{N}$ 或 $27^\circ \sim 39^\circ \text{N}$,高原环境以温带干旱—半干旱气候为特征,发育草原—灌丛植被,由于高原侵蚀作用的加强和地貌发展旋回进入壮年期,区域气候型表现特征为盆地型气候环境^[6]。随着中更新世晚期冰川(古乡冰川)的退缩而进入晚更新世,其早期出现的间冰期气候,发育了黄色古土壤及黄土状堆积,局部产生了红色土^[3];受高原气候逐渐干化的影响,这个时期是高原湖泊发展演化过程中的分离期^[5],普遍发生水体分割与湖泊变小的情况。晚更新世晚期发生了青藏高原第四纪第4次冰川活动——白玉冰期($70 \sim 10 \text{ ka. B. P.}$)^[3],冰川遗迹调查表明多以山谷冰川为主要特征。

2.4 全新世

青藏高原这一时期平均海拔为 $5\ 000 \pm \text{m}$,山地高度在海拔 $6\ 000 \text{ m}$ 以上,高原纬度范围约为北纬 $28^\circ \sim 40^\circ \text{N}$,受气候地带性及垂直分异的影响,高原环境以温带—寒带干旱气候为特征,区域气候型表现特征为高原型气候环境^[6]。第四纪末次冰期冰消期以后进入全新世,高原气温普遍回升转暖,受高原效应的影响其整体气候的总体趋势维持向干旱化发展,但仍有波动变化的特征^[9],这个时期是高原湖泊的干化期^[6],高原物理风化侵蚀强烈,化学蒸发盐类沉积十分发育。

3 气候变化事件

在青藏高原腹地湖相沉积剖面的综合研究中,查清了三万余年以来湖泊环境演化序列^[10],重建了湖泊沉积序列与古气候变化的响应过程,检出了湖泊沉积记录的“仙女木期”古气候颤动事件,破译了湖泊沉积记录的古季风变化特征,并发现高原腹地冰后期气候适宜期存在早跳现象或早搏现象^[2]。这些研究进展均表明高原的内部效应和边缘效应具有不同的表现形式^[6],这在青藏高原和中国东部与东亚以及全球变化的环境链响应机制的分析研究中

是十分重要的。在青藏高原与周边地区的地球表面过程影响中,依次链接着冰川、湖泊、沙漠、黄土等陆表景观现象,它们在景观地质学和地球动力学及其全球变化响应上的表现存在不同的特型表征形式,其间可能的耦合机制就是地球场效关系的影响及其

演化过程。

根据层序地层学和气候地层学及年代地层学的综合分析(见图1),距今三万余年以来青藏高原腹地湖相剖面记录的地质环境演变与全球第四纪末次冰期以来气候变化对比分析的时间序列响应如下所示。

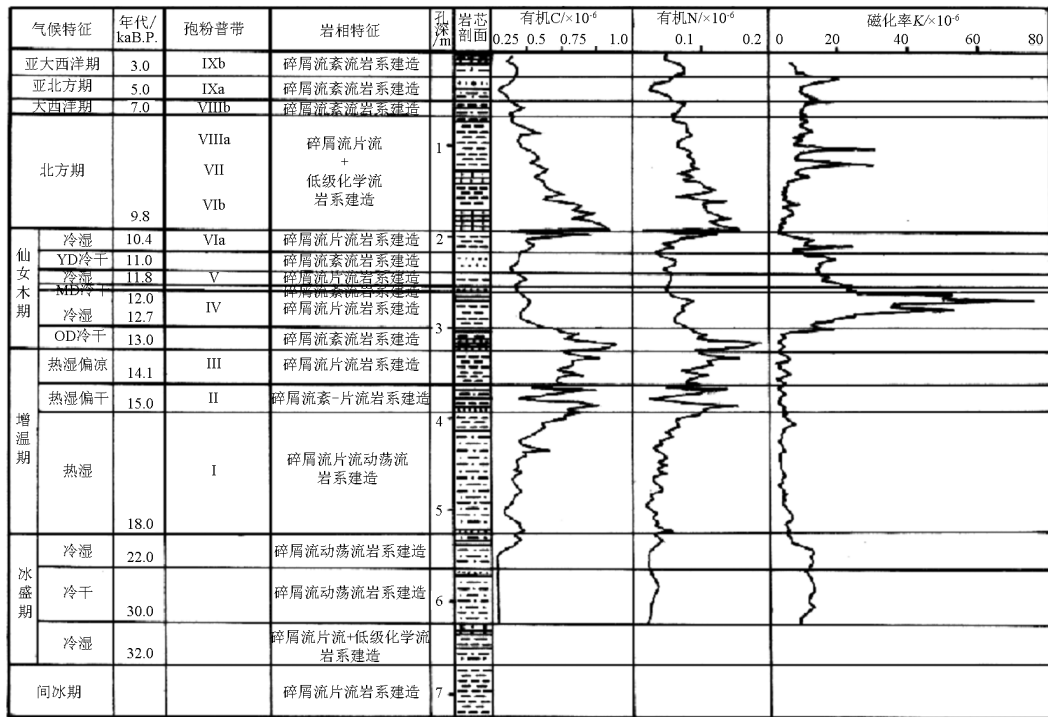


图1 青藏高原腹地苟弄措湖泊沉积柱综合演化图

Fig. 1 The synthesis evolvement map of lake's sedimentary pillar of the Goulucuo Lake in the hinterland of Qinghai - Xizang (Tibet) plateau

间冰期气候:时间域为 32 ka. B. P. 以前,这一时期施雅风曾称之为第四纪末次冰期中的大间冰阶,并相当于海洋沉积岩芯的同位素第 3 阶段的晚期(MIS 3a),同时也认为是个高温降水时期^[11],也称之为高原大湖期或大水湖时期^[12],又称之为区域性的大水期;这些名称及时间域所反映的环境事件,都与第四纪早期地质历史发展中的高原边缘盆地盐湖演化的泛湖阶段(Q₁)及高原内部抬升面(高原面)湖泊演化的大湖期(Q₁)^[13]是完全不同的,它们在时间尺度和表征的事件序列上也不能等同。这一时期沉积物 δ¹⁸O 的丰度为 -0.378%,沉积物 δ¹³C 的丰度为 -0.057%,表明这一时期的气温较高、年降水量也较大,湖泊水面处于高位置;区域湖相地层岩性沉积结构和生物沉积总量的分析也表明,这一时期高原整体气候以冷干偏湿为特征。

冰盛期气候:时间域为 32 ~ 18 ka. B. P.,处于

第四纪末次冰期的最后一个冰进阶段,这一时期沉积物 δ¹⁸O 的丰度变化从 -0.378% 下降到 -0.874%,沉积物 δ¹³C 的丰度变化从 -0.057% 上升到 0.971%,表明气温下降到本区沉积物记录到的最低水平,但年降水量的波动变化较大;这一时期高原季风强度表现较为微弱,冷性环流与暖性环流的相对强度之比约为 1:0.5,生物生产总量也随之处于最低水平。气候层序事件变化表明,整个冰盛期期间也存在相对的冷湿(32 ~ 30 ka. B. P.)—冷干(30 ~ 22 ka. B. P.)—冷湿(22 ~ 18 ka. B. P.)的波动变化,盐类沉积与冰盛期的冷干阶段相对应,这个时期也是青藏高原重要的成盐时期^[13]。高原东北部柴达木盆地察尔汗盐湖演化中盐系建造^[4]的分析及研究表明,第四纪晚更新世以来的成盐旋回中 S₁(25 ~ 21.8 ka. B. P.)、S₂(19.7 ~ 19 ka. B. P.)、S₃(18 ~ 16.5 ka. B. P.)^[14]或经重测修校后则为 S₁(31

~25.8 ka. B. P.)、S₂ (23.3 ~20 ka. B. P.)、S₃ (19 ~16.5 ka. B. P.)^[15],在这些沉积旋回层中石盐析出时段也主要发生在这一时期。

冰后期增温期气候:时间域为18~13 ka. B. P. ,这一时期沉积物 δ¹⁸O 的丰度变化为 -0.127 % ~ -0.136 % ,沉积物 δ¹³C 的丰度变化为 0.713 % ~ 0.639 % ,冷性环流与暖性环流的相对强度之比约为 1:2~3,表明这一时期温度较高、降水幅度较大其波动也较为平稳,沉积物记录的生物生产总量呈持续上升趋势,湖泊水位普遍处于高位面,其间有较小幅度的波动变化,青藏高原冰川普遍出现退缩现象^[3],高原整体气候以热湿为主要特征。

仙女木期气候颤动期:时间域为13~9.8 ka. B. P. ,这个气候颤动期在高原腹地中心钻孔岩芯高分辨率分析中清楚地检出3个明显的降温(冷干)事件^[2]即:
a. 老仙女木事件(OD)时间域为13~12.7 ka. B. P. 并延续了300 a,其后出现了延续700 a (12.7~12 ka. B. P.)的冷湿时段;
b. 中仙女木事件(MD)时间域为12~11.8 ka. B. P. 并延续了200 a,其后出现延续800 a (11.8~11 ka. B. P.)的冷湿时段;
c. 新仙女木事件(YD)时间域为11~10.4 ka. B. P. 并延续了600 a,其后出现延续600 a (10.4~9.8 ka. B. P.)的冷湿时段。在高原腹地区域湖相地层的综合分析中仅清楚地检出了新仙女木事件^[2],其相应的时间域为11~9.8 ka. B. P. ,这种情况与沉积剖面的分辨率及取样密度有关系。新仙女木事件在青藏高原及其周边地区都被清楚的检出^[16],但完整确切可靠的仙女木期气候颤动事件的研究报道在中国并不多见,可能与沉积物记录的时间尺度以及年代检测的精度有很大关系。这个时期生物生产总量急剧下降,沉积物 δ¹⁸O 的丰度变化为 -0.184 % ~ -0.198 % ~ -0.804 % ~ -0.114 % ,沉积物 δ¹³C 的丰度变化为 0.54 % ~ 0.804 % ~ -0.29 % ~ 0.305 % ,冷性环流与暖性环流的相对强度之比约为 5~7:1,高原环境是以寒冷为主的伴有干-湿波动变化的气候特征,其中新仙女木事件所表现的冷干现象非常显著,新仙女木期其温度下降了 10.3~11.5 °C 之多。柴达木盆地察尔汗盐湖晚第四纪盐系建造^[4]中,成盐旋回 S₄ (15~8 ka. B. P.)^[14]或修校后 S₄ (15~8 ka. B. P.)^[15]也是这个时期的同期产物,成盐旋回的沉积事件与仙女木期气候降温时间基本吻合。高原内部的坑探作业在卓乃湖南岸阶地剖面中出现冰碛岩砾^[2,6,10],其上覆湖相细碎屑沉积物的年龄为 10 ka.

B. P. (10.124 ± 0.228 ka. B. P.),反映当时高原冰川活动的范围是比较广泛的,也意味着末次冰期气候的影响最终退出。

北方期气候:时间域为9.8~7 ka. B. P. ,这一时期沉积物 δ¹⁸O 的丰度变化为 -0.104 % ~ -0.145 % ,沉积物 δ¹³C 的丰度变化为 0.305 % ~ 0.195 % ,冷性环流与暖性环流的相对强度之比约为 1:4~5,生物生产总量出现急速上升其相对数量达到仙女木期前的起始阶段,意味着这一时段的气候环境是生物生长的最适宜时期。中国大部分地区全新世气候适宜期的时间域为 7 500 ~ 3 000 a. B. P. ^[17],青藏高原周边山地在这一时段的时间为 7 500 ~ 5 000 a. B. P. ^[3],在高原腹地同一时期的时间则提前了约 2 000 ± a,形成高原气候发展过程中的“早搏”或“早跳”现象^[2,4]。青藏高原全新世气候适宜期的“早搏”或“早跳”现象^[2,4]应特别值得注意,这种从青藏高原(腹地—边缘)—中国东部—东亚—全球的依次影响和连续反应的气候演化过程,可以表征为气候环境动力系统的链反应过程^[18]。

大西洋期气候:时间域为7~5 ka. B. P. ,这一时期沉积物 δ¹⁸O 的丰度变化为 -0.145 % ~ -0.453 % ~ -0.649 % ,沉积物 δ¹³C 的丰度变化为 0.195 % ~ 0.09 % ~ 0.01 % ,冷性环流与暖性环流的相对强度之比约为 1:1,生物生产总量比北方期稍低^[2],高原整体气候以冷干偏湿为特征。这一时段约在 5 500 a. B. P. 前后出现明显的降温颤动现象,温度降温幅度约在 3.3~8.4 °C 之间,但降水变化不明显,这一降温事件也许就是高原新冰期的开始。高原周边山地新冰期的发生时间为 3 000 ± a. B. P. ^[19],值得注意的是高原腹地新冰期的发生时间同样比周边地区提早了约 2 000 ± a。

亚北方期气候:时间域为5~3 ka. B. P. ,这一时期冷性环流与暖性环流的相对强度之比约为 1:0.5,高原整体气候以冷干偏凉为特征。高原腹地中心钻孔剖面湖相地层沉积特征表明,在 4 000 a. B. P. 以前湖泊水位面维持高位面,在 4 000 a. B. P. 以后则出现低位面,反映了这一时期仍有干-湿波动变化,前期偏湿,后期偏干。

亚大西洋期气候:时间域为3 ka. B. P. 至今,这一时期冷性环流与暖性环流的相对强度之比约为 1:1,高原整体气候以冷干偏暖为特征。中心钻孔岩芯记录表明,在 3 000 ~ 1 500 a. B. P. 湖泊水位面维持高位面,1 500 ~ 1 000 a. B. P. 出现短暂的干冷

时段,在 1 000 ~ 800 a. B. P. 发生了明显的洪水事件^[20],800 a. B. P. 以后湖泊水位面维持低位面的状态。

4 构造事件及驱动过程

4.1 构造事件链

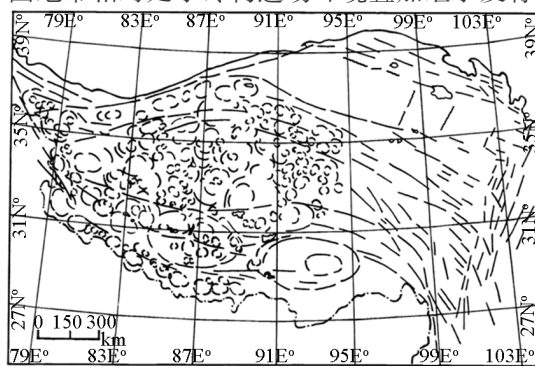
青藏高原的隆起是导致高原第四纪地质环境发生变化的最大动力作用,然而进入晚第四纪以来高原气候环境出现剧烈动荡变化和波动发展演化的态势,很难完全直接归因于大陆板块碰撞和高原隆起过程,地质调查资料表明地壳运动引起的板块碰撞所导致的壳内物质调整及其变化与响应过程才是其真正的动力来源。根据地质综合勘查资料的分析研究,青藏高原地体岩石圈结构表现为滑脱层、熔融层和韧性(或韧粘性)剪切层^[21],多层壳的岩石物质结构导致了地壳变形的复杂性和陆表演变过程的变异性;有证据证明高原中心深部存在地幔底辟作用及其熔浆对流体,导致形成壳幔层间接力传递式的多次叠覆式的特殊热结构现象,高原地表丰富的地热分布区和水热爆炸活动^[22]也证实了深部热储构造的存在,那么热事件的活动周期与地壳区域应力场就发生密切的关系^[23]。根据最近的研究,高原中心地带地壳深部存在地震波(横波)不能穿过的构造体,表明其结构差异和动力源范围及空间作用场的基本特征应属于熔融性岩体。利用地球 MAGSAT 卫星地磁总强度数据^[24]的分析材料,青藏高原中心区域的视磁化强度呈紧密圈闭体(0.05 A/m),预示着高原地壳深部存在一个周边界线清楚完整的构造体,其范围约为:31°~36°N、79°~95°E。这个视磁性构造体与地震波构造体及热储构造体中心的位置是基本相重叠的,这种构造体的核心部位可能就是地幔底辟形成的熔浆对流构造体。

这些构造事件链所表现的展布范围及空间位置为由边缘向中心:视磁性构造体—热储构造体—地震波构造体—熔浆对流构造体,反映在水平方向上不同结构的构造体由外向内、由大到小的逐级控制关系;其物质结构及相互作用过程表现为由深层向浅层:熔浆对流构造—地震波构造—热储构造—视磁化构造,反映在垂直方向上为不同属性的构造体由深向浅、由小到大的逐次控制关系。

4.2 构造系统驱动

根据 Landsat 地球卫星资料镶嵌的中国遥感影像的图解分析,精细解译了青藏高原区域大地构造

系统及其构造形式和展布范围(见图 2),其边部及东部普遍发育线形构造,其中心及西部则发育特殊的环形构造。环形构造的发育部位与高原区域视磁化构造体的中心位置相吻合,线性构造的发育部位与其视磁化构造体的外围位置相吻合,反映出高原深部结构与浅部构造在发展演化过程中的相关性和耦合性。根据综合地质调查资料,青藏高原中心地体的物质空间属性能够清楚表述,由深部向浅部(即垂直尺度)表征为地幔羽—地幔底辟—壳幔层间传递—视磁化构造—环形构造系统—线性构造系统,由中心向边缘(即水平尺度)表征为环形构造—线形构造和紧密圈闭体—宽缓发散体及热事件—冷事件系统^[21,22,24,25];其构造系统的转型过程及穿插关系表现为线形构造发育较早、环形构造发育较晚,反映了高原地体发育过程中的物质结构是由冷性向热性演变的,这种状况和大陆板块碰撞事件以及地体内部地幔羽的发育演化及其效应相吻合,综合资料表明环形构造系统的发育是在区域构造应力场之上叠加了热事件应力场共同作用形成。青藏高原实测热流数据^[22]表明地幔底辟作用在高原中心普遍存在,高原地体在前中生代为完全固化的冷地体特征^[26],自新生代以来主要表现为热地体特征。脱离地幔羽的地幔底辟作用形成一个特殊的热动力系统,由于其湍流作用扩散分裂成许多热点现象。这些热动力作用在区域构造应力背景条件下转变出现新的热构造场,导致热事件及其传动过程的发生,并对其影响范围内的地壳表层构造进行改造和控制,便出现围绕热构造场中心形成环状构造系统,并在外围地带相对处于冷构造场环境叠加继承发育线性



- 1—直线为线形构造系统(冷构造系统);
- 2—弧线为环形构造系统(热构造系统)

图 2 青藏高原构造系统分布略图

Fig. 2 Dispersed map of the structural system in Qinghai - Xizang(Tibet) plateau

构造系统。根据最近的研究表明,高原地体在第四纪中—晚期遭受区域南北向挤压应力场作用形成了庞大的地槽系^[27],这些地槽系都是追踪了环形构造系统的中心及边缘接合部位发展;而且地槽系的发育范围也都限制在环形构造系统展布的区域以内,环形构造系统发育的区域被外围大型线性构造系统所夹持及包络起来,反映晚近构造活动是继承性构造活动,受到区域构造应力场的控制。

区域地质及构造迹象的综合表明,青藏高原中心及西部的环形构造系统属于热构造系统,其外围及东部的线性构造系统属于冷构造系统。地球岩石圈动力学属性及动力驱动过程的分析表明,区域构造应力场的活动性激发和控制了地壳热动力作用的周期性。青藏高原在形成及隆起过程中,大陆板块碰撞的初期由于剧烈的动力作用出现线形构造和火山活动现象,在后期随着高原地体的加积和扩散作用发生动力转型出现隐性热事件及环形构造系统。这种隐性热事件及环形构造系统具有特殊的动力效应,除在地体表层形成特殊的圈闭或半圈闭的构造形迹之外,还可在地表及浅层形成一定范围的热扩散及热效率,这是高原地体独有的热力学特性,它在高原古气候演变中作为特殊的下垫面可以发挥重要的激变作用和诱发作用。

5 环境耦合机制

青藏高原 NCAR - CCM1 动力气候模型^[28]的试验结果显示,隆起“临界高度”^[29]是高原环境变化的重要转型时期;在此之前高原内部降水较多、气温下降 $-5 \sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、西南季风深入大陆西部;在此之后高原内部降水减少、气温下降 $-5 \sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、西南季风随之消失。“临界高度”是高原开始隆起至现代高度一半时期的高度,其海拔约为 $2\ 500 \sim 3\ 000\text{ m}$ 之间,处于第四纪早更新世晚期时期的高度范围,也对应于青藏高原第四纪第一次冰期希夏邦马冰期活动时期,标志着高原气候转型事件的开始。而且,青藏高原的大幅度隆起及大陆构造形变进一步导致了全球变冷^[30]。我国长期的气候观察^[31]和泥饼物理实验及物质流场分析^[2]的结果证明,夏季高原面上盛行气旋性环流,冬季高原面上盛行反气旋性环流。在我国第四纪晚冰期古气候数值模拟试验^[32]中,青藏高原夏季受气旋性环流的控制,冬季却受偏转西风环流的影响,这个结果是模型边界胁迫条件中对高原冷性指数估计不足所引起

的,实际上偏西风环流在高原面的方向也与反气旋性环流的方向基本一致。地球下垫面与气候存在互为反馈作用,气候反演中对冷性指数计算偏低,就会出现青藏高原温度效应不明显^[32]的现象。这种情景也反映出这样的环境变化迹象,青藏高原效应对全球气候的影响并不是线性发展的,这也引起研究者对高原冰期和冰盖范围及气候响应的反思及探讨。尽管如此,第四纪晚冰期古气候数值模拟试验^[32]还是反映出青藏高原的中心(中部及西部)地带存在明显的气温剧变区,这个区域位置特征与高原环形构造分布区是基本吻合和相对应的。

长期的地学观察和多种试验一致证明,青藏高原气候演变过程存在显著的阶段性:a. 早期阶段:高原开始隆起至“临界高度”主要受亚洲季风环流的影响;b. 盛期阶段:到达“临界高度”以后主要受高原季风环流的影响;c. 晚期阶段:自晚冰期以来主要受地壳温度场的影响。这种不同的变化阶段具有的空间尺度及其效应不尽相同,亚洲季风环流受全球地形气候带的控制,高原季风环流影响中国及东亚气候的变化,地壳温度场启动高原气候的变化。青藏高原形成演变过程中,气候环境变化总的趋势表现为持续变冷^[28,30,33],这个过程经历了亚洲季风的出现—高原季风的形成—晚冰期波动气候的发育,与其耦合的地球动力学机制及其响应条件也是各有特点。这种效应特征对应着地质环境演化过程中不同的形变阶段,早期阶段与亚洲海陆形变时期相适应,盛期阶段是青藏高原整体发生大规模形变时期,晚期阶段是高原处于内部地体形变时期。早期阶段古气候环境变化可能的机制仍然是受季风—冰盖—构造耦合关系的影响^[33],盛期阶段发生区域环境变化的机制主要是受高原—激变—构造耦合关系的影响^[34],晚期阶段出现气候波动变化的机制主要受地体—形变—温度场耦合关系的影响^[2,21,32,35]。

从高原地球动力学机制及作用强度效应分析,这种成生关系的建立在大陆板块碰撞的初期就已经出现,只不过它的表现形式是随着高原地体的不同形变阶段而具有不同的表现特征而已。在早期形变阶段,伴随着高原的急剧隆起曾发生过强烈的岩浆活动、火山喷发、地壳增厚变热和岩石圈减薄^[36];在盛期阶段,随着达到“临界高度”的高原突兀于地球陆表最高层,高原出现盆式结构^[37],地体外壳变冷、深源热流被圈闭、热力相变作用显著;在晚期形变阶段,高原地体内部岩浆上涌造成的巨大热储距地表较浅^[37],高

原面温度场效应显著。与高原整体形变阶段相对应,早期阶段是热构造系统的奠基时期和冷性构造系统的发育时期,盛期阶段是热构造系统的潜育时期和冷性构造系统的发展时期,晚期阶段是热构造系统的跃动时期和冷性构造系统的活动时期。

青藏高原腹地湖泊沉积记录的晚第四纪古气候环境变化^[2]资料表明,晚冰期以来高原生物生产总量与陆面热点效应密切相关。地球物理调查资料证实^[26],高原陆表热点现象是由地体构造事件及其驱动效应所引起的;地球卫星解译资料也证明,高原热事件形成了热构造系统及环形构造型式。地球岩石圈层传递作用表明,热构造事件及热点效应的活动周期受地幔底辟作用及地幔羽位置的控制^[21,25],其外围发育了大量的冷性构造系统及线性构造型式。这些综合材料表征的地质环境链特征为:古气候态势—生物活动—温度场—内部热构造系统及环形构造型式与周边冷性构造系统及线性构造型式—热构造事件与冷构造事件及其驱动效应—地幔底辟作用—地幔羽中心位置。

6 结语

综合研究成果证明地球岩石圈地体动力学演化过程及其效应对古气候环境变化的影响关系确实存在,但是高精度的对比分析就要依靠高分辨率的大尺度的连续沉积剖面记录,目前各种记录载体包括冰川、湖泊、沙漠、黄土、海洋及岩溶、树轮、植硅体、孢粉等证据都还存在着一定的局限性和扰动性以及不确定性,需要建立系统的包容性更广的科学理念来认识地球自然演化过程的规律性。青藏高原的隆起效应、内部效应、边缘效应、驱动效应、后效效应及反馈效应也是客观存在的,青藏高原—中国—东亚—全球的气候环境链就是地球场效关系的综合演化过程,全角度的集成研究与系统分析及综合方法是构建实时景观平台和历史演化情景过程的有效途径。

青藏高原晚冰期以来区域地质环境链可以表述为:古气候态势—生物活动—温度场—构造系统及动力条件(热构造系统及环形构造型式与冷性构造系统及线性构造型式)—热构造事件与冷构造事件及其驱动效应—地幔底辟作用—地幔羽中心位置,代表青藏高原距今几万年以来的地球场效耦合关系及其动力学机制态势。

最近长时间尺度的综合研究也表明,中新世以

来青藏高原与中国大陆及东亚地区气候环境的转型都伴随着显著的构造变形事件^[38]。从青藏高原科学考察野外现场材料的分析来看,目前还只能清晰地确认第四纪晚冰期以来的地质环境变化历程,第四纪各个时段的地质环境发展情景及精细演变过程还需要继续寻找高分辨率的地质记录。

参考文献

- [1] 孙鸿烈,郑 度.青藏高原形成演化与发展[M].广州:广东科技出版社,1998.
- [2] 胡东生,张华京,李炳元,等.青藏高原腹地湖泊沉积序列与古气候变化[J].地质学报,2000,74(4):363-370.
- [3] 郑本兴,施雅风.珠穆朗玛峰地区第四纪冰期探讨,珠穆朗玛峰地区科学考察报告(1966—1968)第四纪地质[M].北京:科学出版社,1975:29-62.
- [4] 胡东生.察尔汗盐湖研究[M].长沙:湖南师范大学出版社,2001.
- [5] 李吉钧,文世宣,张青松,等.青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨[J].中国科学,1979(6):608-616.
- [6] 胡东生.青藏高原第四纪湖泊地质环境演变[J].自然杂志,1995,17(5):257-261.
- [7] 韩同林.青藏大冰盖[M].北京:地质出版社,1991.
- [8] 朱建立.巴颜喀拉山地区第四纪冰期初步探讨[J].青海地质,1992(2):30-39.
- [9] 施雅风,李吉钧,李炳元,等.晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J].地理学报,1999,54(1):10-21.
- [10] 胡东生,陈克造,许志强.三万年来可可西里地区湖泊环境演化序列[J].地质科学,1994,29(4):329-338.
- [11] 施雅风,于 革.40~30 ka B.P.中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨[J].第四纪研究,2003,23(1):1-11.
- [12] 李炳元.青藏高原大湖期[J].地理学报,2000,55(2):174-181.
- [13] 郑绵平.盐湖资源环境与全球变化[M].北京:地质出版社,1996:6-20.
- [14] 陈克造,Bowler J M.柴达木盆地察尔汗盐湖沉积特征及其古气候演化的初步研究[J].中国科学(B),1985(5):463-472.
- [15] 沈振枢,程 果,乐昌硕,等.柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境[M].北京:地质出版社,1993.
- [16] 沈永平,刘光秀,施雅风,等.青藏高原新仙女木事件的气候环境[J].冰川冻土,1996,18(3):219-226.
- [17] 施雅风,孔照辰.中国全新世大暖期气候与环境[M].北京:海洋出版社,1992.
- [18] Pilling M J.反应动力学[M].北京:科学出版社,1980.
- [19] 郑本兴,沈永平,焦克勤.西夏邦马峰东南富曲河谷的冰川沉积和冰川构造[J].沉积学报,1994,12(4):1-9.
- [20] 胡东生.可可西里地区湖泊演化[J].干旱区地理,1995,18(1):60-67.
- [21] 许志琴,姜 枚,杨经绥.青藏高原北部隆升的深部构造物理作用[J].地质学报,1996,70(3):195-206.

- [22] 沈显杰,张义仁,张菊明,等. 青藏高原大地热流和高原南部的地体构造热演化模型研究[J]. 科学通报,1991(8):611-613.
- [23] Christiansen R L, McKee E H. Late Cenozoic volcanic and tectonic evolution of the Great Basin and Columbia Intermontane regions[J]. Geological Society of America Memoir, 1978,152:283-311.
- [24] 徐元芳,安振昌,黄宝春. 亚洲地区视磁化强度分布[J]. 中国科学(D),2000,30(8):388-392.
- [25] Morgan J W. Plate motions and deep mantle convection[J]. Geological Society of America Memoir, 1972,132:7-22.
- [26] 潘裕生,孔祥儒. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学[M]. 广州:广东科技出版社,1998:97-121.
- [27] 潘裕生,钟嘉猷,周勇. 青藏高原南北向地堑系的实验研究[M]. 地质科学,2003,38(2):172-178.
- [28] 陈隆勋,刘骥平,周秀骥,等. 青藏高原隆起及海陆分布变化对亚洲大陆气候的影响[J]. 第四纪研究,1999(4):314-328.
- [29] Kutzbach J E, Prell W L, Ruddiman W F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geology, 1993, 101:177-190.
- [30] 汪品先. 亚洲形变与全球变冷—探索气候与构造的关系[J]. 第四纪研究,1998(3):213-221.
- [31] 叶笃正,高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [32] 于革,赖格英,刘健,等. MIS3 晚期典型阶段气候模拟的初步研究[J]. 第四纪研究,2003,23(1):12-24.
- [33] 卢演涛,丁国瑜. 与亚洲古季风有关的中国及邻区新生代构造演化的几个问题[J]. 第四纪研究,1998(3):205-212.
- [34] 刘东生,郑绵平,郭正堂. 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[J]. 第四纪研究,1998(3):194-204.
- [35] Kutzbach J, Guetter P, Ruddiman W, et al. The sensitivity of climate to Late Cenozoic uplift in Southern Asia and the American West: Numerical experiments[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(5): 18393-18407.
- [36] 张一弗,郑祥身. 青海可可西里地区地质演化[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [37] 许志琴,侯立伟,王宗秀,等. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京:地质出版社,1992.
- [38] 安芷生,张培震,王二七,等. 中新世以来我国季风-干旱环境演化与青藏高原的生长[J]. 第四纪研究,2006,26(5):678-693.

The earth dynamical mechanism for the geological environmental evolution of quaternary period in the hinterland area of Qinghai - Xizang (Tibet) Plateau

Hu Dongsheng^{1,2}, Zhang Huajing³, Xu Bing⁴, Wen Jingchun⁵,
Tian Xinhong², Zhang Guowei²

- (1. College of Resources Environment Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;
2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710056, China;
3. College of Chemistry & Chemical Engineering, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;
4. College of Ocean Geosciences, Chinese Ocean University, Qingdao, Shandong 226071, China;
5. China Association for Scientific Expedition, Beijing 100083, China)

[Abstract] Based on the coupling relation between the ancient monsoon change and the biologic produce gross, combining with the develop process of region geologic evolvement and the disabuse products of earth satellite remote sensing images, the startup blaze factor and mutual coupling mechanism and its drive transfer effect that caused the ancient climatic environment change in the plateau internal area were researched, This direction now still belong to frontier field in the evolvement of plateau geologic environment and its global change.

[Key words] geological environment evolvement of Quaternary; respond of geologic structural events; motive deliver chain of the earth field effect; hinterland area of the Qinghai - Xizang (Tibet) Plateau