

# 40 kaBP 来亚非季风演化趋势 及青藏高原泛湖期

贾玉连<sup>1</sup>, 施雅风<sup>2</sup>, 马春梅<sup>1</sup>, 申洪源<sup>1</sup>, 吴敬禄<sup>2</sup>

(1. 南京大学城市与资源学系 / 区域环境演变研究所, 南京 210093;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**摘要:** 基于 18 个黄土 / 古土壤序列 (黄土高原与青藏高原) 与 27 个湖泊沉积序列 (青藏高原、新疆、云南与赤道非洲及其以北的非洲季风区) 对比分析了东亚季风区、印度季风区与非洲季风区 40 ka 以来的区域环境演变特征。结果显示: 上述区域在对应岁差周期的高太阳辐射阶段, 也就是 40~24 kaBP 与 14~4 kaBP 分别经历了一次环境湿润期, 而在末次冰期最盛期, 除中国云南、青藏高原及新疆部分地区外, 其他地区则较为干燥。青藏高原及其北侧的新疆区, 40~24 kaBP 比 14~4 kaBP 气候更为湿润, 湖泊呈现 40 ka 以来的最高最大湖面, 高原进入一次泛湖期。而非洲区及黄土高原, 则与此相反; 14~4 kaBP 气候比 40~24 kaBP 更为湿润、适宜, 湖面更高, 成壤作用更强。40~24 kaBP, 印度季风强盛, 加强了对高原的水汽与潜热输送, 同时, 由于北方冰盖的存在, 西风气流则相对南移, 增加了对高原的影响, 两种气流交互作用引起的强降水, 可能是造成湖泊显著扩张的主要原因。

**关键词:** 亚非大陆; 青藏高原; 封闭湖泊流域; 夏季风; 西风气流; 泛湖期

## 1 引言

关于青藏高原在末次冰期大间冰阶或深海氧同位素 MIS3 阶段后期, 即约在 40-28 kaBP 出现特殊湿润气候事件, 已分别有文论述其所依据的地质记录<sup>[1, 2]</sup>, 所指示的夏季风强度<sup>[1, 2]</sup>, 所造成的湖泊扩涨的规模与泛湖期事件<sup>[3]</sup>, 以及基于青海湖与高原西部封闭湖泊流域的古降水量重建<sup>[4-5]</sup>与大降水对高原内部水系和源出高原的河流发育的影响<sup>[6]</sup>。本文拟基于青藏高原及其北侧的中国新疆, 东北部的黄土高原, 东南部的中国云南以及赤道非洲及其北部非洲季风区 (依照 C. П. 赫罗莫夫的季风定义, 上述区域, 季风角变换为 120~180°, 1、7 月盛行风频率大于 40%<sup>[7]</sup>) 环境地质记录 (黄土高原的全部记录与青藏高原的部分记录为黄土 / 古土壤沉积序列, 其余为湖泊沉积序列), 比较东亚季风, 印度季风, 非洲季风区 40 ka 以来的区域环境演化的异同, 从而在对三支季风演化趋势的差异性特征与青藏高原 40 kaBP 以来的气候演化的动力背景进行系统分析基础上, 探讨高原泛湖期存在的气候环境机制。

## 2 研究方法与资料处理

### 2.1 研究方法

统计了青藏高原及其邻近的中国新疆、云南、赤道非洲及其北非季风区 27 个封闭流

收稿日期: 2004-05-19; 修订日期: 2004-08-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (CXNIGLAS-A01-2; KZCX2-SW-118) [Foundation: Knowledge Innovation Project of CAS, No.CXNIGLAS-A01-2; No.KZCX2-SW-118]

作者简介: 贾玉连 (1971-), 男, 山西人, 博士, 主要从事区域生态演变研究。E-mail: northforest@sohu.com

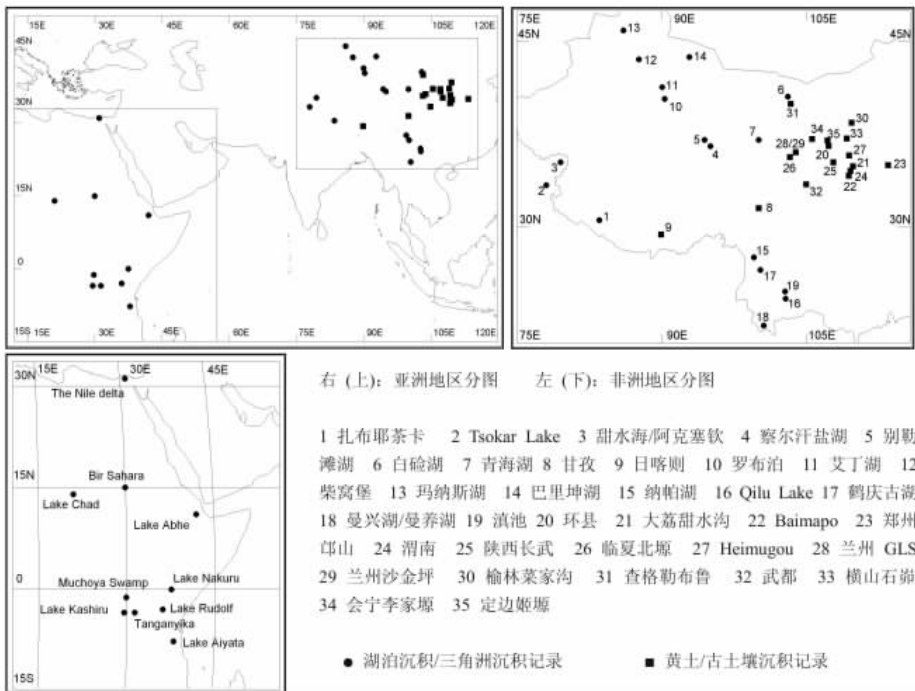


图 1 与本研究有关的地质记录的地理位置

Fig. 1 Geographical position of the geological records in this paper

域湖泊沉积记录与黄土高原、青藏高原 18 个黄土 / 古土壤沉积记录 (图 1); 这些序列均具有 40~30 kaBP 以来的气候环境演化的连续的指标记录。基于相关指标记录, 定量反演环境演化记录, 按照 2000 年的时间间隔, 将环境演化记录进行定量划分。划分的方式遵循  $3 \times X$  ( $X = 1, 3, \dots$ ) 的原则, 即对于年代分辨率一般的环境演化记录, 只进行均匀三分, 分别记为 A、B、C, 各占此记录在其时间序列内最大变化幅度的 33.3%; 对于年代分辨率与指标的环境分辨率较高的气候序列, 可把上述初分的各项再进行均匀三分, 如将 A 分为 Aa、Ab、Ac, 再分的各项占环境变幅的 11.1%。

这是一套弹性很强的环境质量演化定量划分标准, 为的是既适合于高分辨率气候地层记录, 又满足于较低分辨率气候记录; 并且由于它对环境质量演化采用均分的原则, 不会造成统计上的变形。这种方法原则上不同于正在建设中全球湖泊数据库 (GLSAB), 欧洲湖泊数据库 (ELSDB), 原苏联及蒙古地区湖泊数据库 (FSUDB), 非洲湖泊数据库 (ALSDB), 及中国湖泊数据库 (CLLDB) 等湖泊数据库中通常所采用的划分方式<sup>[8-12]</sup>。

对于封闭湖泊流域, 是利用湖相碎屑沉积物的粒度指标、孢粉、硅藻等生物指标, 蒸发岩、自生碳酸盐含量等化学指标及湖滨古湖泊遗迹的分布, 综合判断湖泊的深度、湖水矿化度与古湖面高低或流域降水量, 从而判断流域环境的干燥与湿润状况, 即有效降水 (降水量减陆地蒸发量)。这种环境质量演变的定量划分是对古气候干湿状况的定量描述, A、B、C 分别对应古环境的湿润、半湿润、干燥状况; 或对应于古湖泊的高湖面、中 (次) 高湖面、低湖面状况。

在黄土高原, 磁化率对成壤程度反映较为敏感, 是一种广泛应用的夏季风气候的替代性指标<sup>[13-15]</sup>。在一定程度上反映了夏季风强度。因此对于黄土—古土壤沉积序列, 按照磁化率指标序列进行划分。这样 A、B、C 分别对应古气候的湿润、半湿润、干燥状况。

## 2.2 资料来源及处理

本研究涉及的所有记录均来自公开发表的与地学有关的诸多杂志与相关论著。对所

表 1 各地质记录相关信息

Tab. 1 Some information of the geological records in this paper

地点	位置(N°, E°)*	沉积类型	测年方式	测年数量	参考文献
非洲区湖泊沉积序列					
Lake Aiyata	-7.7 37.9	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	11	19
Tanganyika	-3.5 31.33	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	7	20
Lake Kashiru	-3.48 29.52	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	14	21-23
Lake Rudolf	-3 36	湖泊沉积/阶地	<sup>14</sup> C	21	24
Muchoya Swamp	-1.26 29.8	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	19	25
Lake Nakuru	0 37.5	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	5	26
Lake Abhe	11 42	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	25	19
Lake Chad	14 21	湖泊沉积/阶地	<sup>14</sup> C	>20	27
Bir Sahara	15 30	湖泊沉积/风沙堆积	<sup>14</sup> C	10	28
The Nile delta	31 31	三角洲沉积(东非气候记录)	<sup>14</sup> C	8	29
青藏高原及北侧祁连山山地湖泊沉积序列					
扎布耶卡卡	30.5 83.5	湖泊沉积/阶地	<sup>14</sup> C	12	30-34
Tsokar Lake	33.34 78	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	4	33
甜水海/阿克塞钦	35.2 79.5	湖泊沉积/阶地	<sup>14</sup> C, U-Th	8	34
察尔汗盐湖	36.5 95	湖泊沉积/贝壳堤	<sup>14</sup> C, U-Th	12	35-37
别勒滩湖	37 94.4	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	12	37/38
白硷湖	40.5 103	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	17	39
青海湖	37 100	湖泊沉积/阶地	<sup>14</sup> C, U-Th	9/3	40-43
青藏高原黄土-古土壤序列					
甘孜	31.5 100	黄土-古土壤	<sup>14</sup> C/TL	3/2	44
日喀则	29.35 89.9	黄土-古土壤	TL	3	45
中国新疆湖泊沉积序列					
罗布泊	40.3 90.26	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	3	46
艾丁湖	41.25 90	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	4	47
柴窝堡	43.5 87.6	湖泊沉积/阶地	<sup>14</sup> C	5	48
玛纳斯湖	45.83 86	湖泊沉积/阶地	<sup>14</sup> C	10	49/50
巴里坤湖	43.7 92.8	湖泊沉积/阶地	<sup>14</sup> C	43	51/52
中国云南湖泊沉积序列					
纳帕海	27.5 99.5	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	3	53
Qilu Lake	24.17 102.78	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	6	54
鹤庆古湖	26.50 100.17	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	3	55-57
曼兴湖/曼养湖	22 100.5	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	10	58
滇池	102.7 24.76	湖泊沉积	<sup>14</sup> C	4	59
黄土高原黄土-古土壤沉积序列					
环县	36.5 107.2	黄土/古土壤	模式年龄		60
大荔甜水沟	34.86 109.73	黄土/古土壤	模式年龄		61
Baimapo	34.1 109.3	黄土/古土壤	TL	4	62
郑州邙山	34.96 113.36	黄土/古土壤	OSL/模式年代	2	63
渭南	34.5 109.5	黄土/古土壤	<sup>14</sup> C/ TL	12	17
陕西长武	35.2 107.7	黄土/古土壤	模式年代		18
临夏北塬	35.6 103.2	黄土/古土壤	模式年代		62/64
Heimugou	35.75 109.34	黄土/古土壤	TL	5	62
兰州 GLS	36 103.83	黄土/古土壤	<sup>14</sup> C	3	65
兰州沙金坪	36 103.83	黄土/古土壤	<sup>14</sup> C	6	66
榆林菜家沟	38.4 109.6	黄土/古土壤	TL	2	67/68
查格勒布鲁	39.9 103.3	黄土/古土壤	<sup>14</sup> C	13	69
武都	33.4 104.90	黄土/古土壤	<sup>14</sup> C	3	70
横山石笋	37.12 109.10	黄土/古土壤	模式年代		68
会宁李家塬	37.05 105.5	黄土/古土壤	模式年代		68
定边姬塬	36.96 107.10	黄土/古土壤	模式年代		68

\*负值表示南半球

表 2 各地质记录定量划分结果

Tab. 2 Symbol denotation of geological record sequences in this paper

地点/年龄(kaBP)	40	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0
非洲季风区湖泊沉积序列																					
Lake Aiyata					B	B	A	A	A	B	A	A	B	C	C	C	B	B	B	B	C
Tanganyika		B	B	B	B	A	A	B	B	B	C	C	C	C	A	A	B	B	B	B	B
Lake Kashiru		B	B	B	B	B	C	C	C	C	B	C	C	C	B	A	A	A	B	B	B
Lake Rudolf		A	A	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	B	A	C	A	B	C
Muchoya Swamp		C	C	C	B	B	A	A	A	B	C	C	C	C	B	A	A	A	A	B	B
Lake Nakuru		C	C	C	C	B	A	B	C	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A	A	B
Lake Abhe		A	A	A	A	B	B	A	A	A	A	B	C	C	B	B	A	B	B	C	B
Lake Chad		B	C	C	C	C	C	C	A	A	A	C	C	C	B	B	B	B	B	B	B
Bir Sahara		A	A	B	C	A	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	B	C
TheNilelta		A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	C	C	B	A	A	A	B	B	C
青藏高原及其北侧祁连山地湖泊沉积序列																					
扎布耶茶卡				A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	B	A	B	B	C
Tsokar Lake				C	C	B	A	B	B	B	C	B	C	B	B	B	B	C	C	C	C
甜水海/阿克塞坎		B	A	A	B	B	A	A	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
察尔汗盐湖		B	A	A	B	C	A	A	B	B	B	C	B	B	C	C	C	C	C	C	C
别勒滩湖					A	A	A	A	B	C	B	B	C	C	C	C	B	C	C	C	C
白碛湖		Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Ac	Ba	Ba	Ba	Bb	C	Bc	C	Bc	Ca	Ca	Ca	Cb	Cc	Cc
青海湖		A	A	A	A	A	A	B	A	A	B	C	C	C	C	B	B	A	A	B	C
青藏高原黄土-古土壤序列																					
甘孜		B	A	A	A	A	A	A	A	B	B	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A
日喀则		A	A	A	A	B	B	B	C	C	C	C	C	B	B	B	B	A	A	A	A
新疆湖泊沉积序列																					
罗布泊		B	B	A	A	B	B	B	C	B	B	B	B	C	C	B	B	B	C	C	C
艾丁湖		Ac	Ab	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Ac	Ac	Bc	Bc	Bc	Ba	Bc	Bb	C	C	C	C	C
柴窝堡		B	B	B	B	B	B	B	B	Bc	C	C	Bc	B	A	B	C	B	C	Bc	C
玛纳斯湖			A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	A	B	B	C	B	C
巴里坤湖			C	C	B	A	B	A	B	A	B	C	C	A	A	B	C	C	B	A	C
中国云南湖泊沉积序列																					
纳帕海		B	C	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A	B	C	C	C	C	C	C	C
Qilu Lake		A	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	C	C	C	B	A
鹤庆古湖		C	C	C	B	A	A	A	A	B	C	C	C	C	B	A	A	B	B	C	C
曼兴湖/曼养湖		A	A	A	A	B	B	C	B	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	C
滇池		A	A	A	A	B	B	B	A	A	A	A	B	B	B	C	C	C	C	C	C
黄土高原区																					
环县		B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A
大荔甜水沟		B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A
Baimapo		B	A	A	A	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A	B	C
邛山赵下峪		C	B	C	B	A	A	A	A	B	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A
渭南		A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	C	C	C	C	B	A	A	A	B	B
陕西长武		A	A	A	A	B	B	B	B	B	C	C	B	B	B	B	B	B	A	A	A
临夏北塬		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A	A	B
Heimugou		B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A	B	B	B
兰州沙金坪		B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	B	A	A	A
兰州 GLS		B	C	C	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A	A
菜家沟		B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	A	A	B	C	C
查格勒布鲁		A	C	A	C	A	B	C	A	C	C	C	C	A	B	C	B	C	B	A	C
武都		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A	B	A
横山石峁		B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A	B	C
会宁李家塬		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A	B	B	B
定边姬塬		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A

有地质记录,也均采用原文献年代序列,包括 $^{14}\text{C}$ 与 $^{230}\text{Th}$ 、TL(热释光)、OSL(光释光)及模式年代(黄土高原黄土/古土壤沉积序列)。对中国北方农牧交错带及阿拉伯半岛等季风作用的尾闾地区,因40 kaBP以来连续的环境地质信息记录较少,因此信息记录不参与定量划分,而仅做一般论述。同时,对一些年代控制点较少,或地层年代在原文

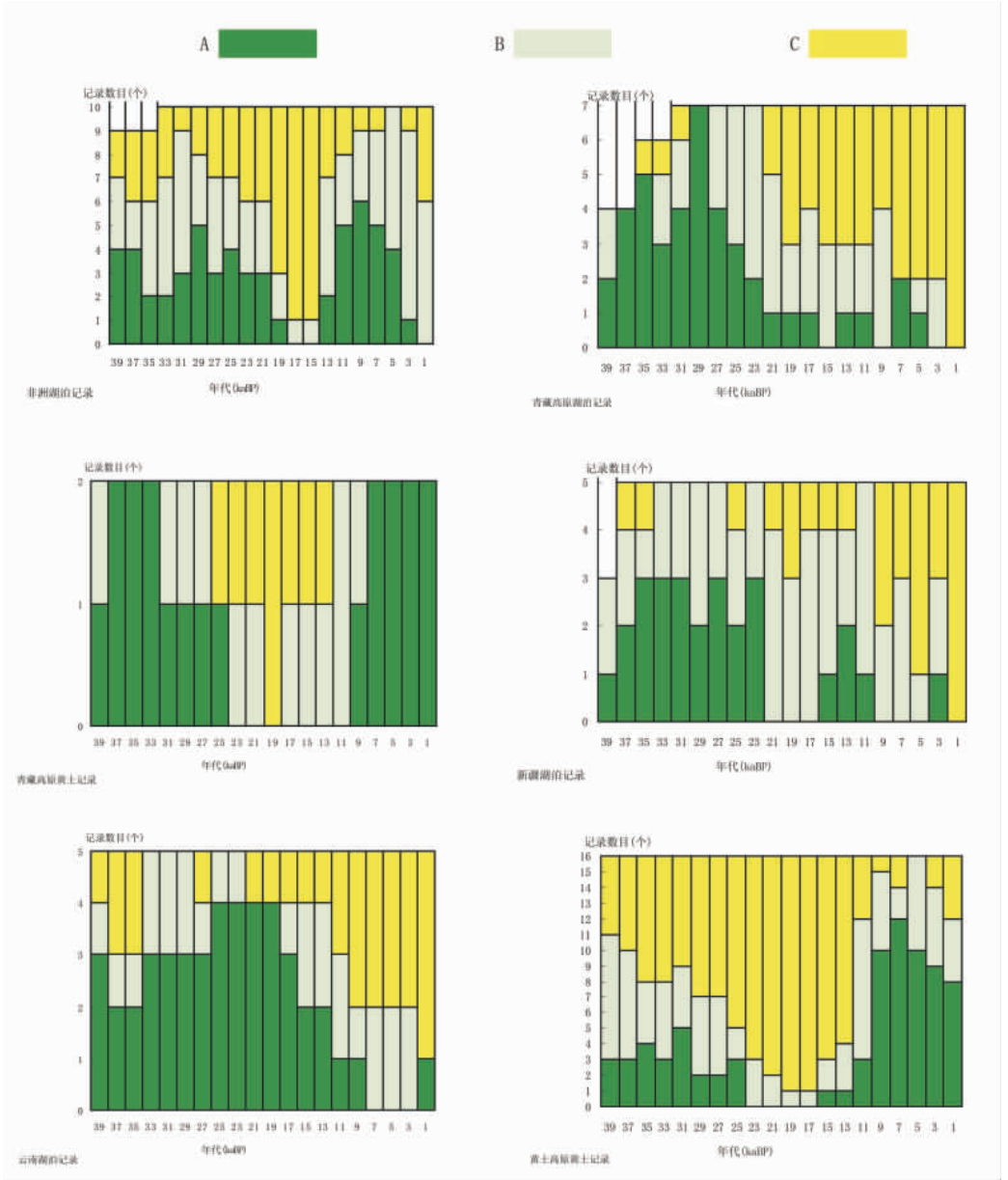


图 2 非洲季风区、青藏高原及其邻近季风区 4 万年以来气候环境时空演变  
 Fig. 2 Temporal and spatial changes of monsoon climate in Asia and Africa

献中不能清晰读取的记录, 及中、晚全新世记录为空白的序列<sup>[16-18]</sup>也做如是处理 (表 1)。

### 3 研究结果

青藏高原及北侧新疆区 40 kaBP 来湖泊演化序列揭示, 诸多湖泊的高湖面是从 40 kaBP 以前便开始存在的, 持续约到 24 kaBP 前后, 时代同低纬度岁差周期的夏季高太阳辐射阶段相吻合, 之后, 随着太阳辐射降低与末次冰盛期的来临, 进入显著的低湖面时期, 最低湖面出现于 20~15 kaBP, 不过, 由于冰期低温低蒸散和冰融水的作用, 部分流域还保持较高湖面<sup>[3]</sup>。这之后, 在下一个高太阳辐射阶段, 又进入一次显著的湖泊扩涨

期,最高湖面出现在 10.0~6.0 kaBP 期间;而在 14~10 kaBP 期间,一些湖泊存在冰融水与降水增加共同作用而形成的较高湖面<sup>[3]</sup>。湖泊演化整体显示出同太阳辐射所驱动的夏季风强弱演化存在密切关系,具有准 20 ka 旋回演化特征<sup>[9]</sup>。

另外,本区湖泊演化尚有另一个显著特征:叠加在准 20 ka 周期演化趋势之上,湖泊呈现整体的萎缩趋势,从 40 kaBP 以来,保持高湖面的湖泊逐渐减少,而维持低湖面的湖泊逐渐增加,表明区域气候整体趋向干旱化。40~24 kaBP 与 14~4 kaBP 两个湖泊扩张期,比较而言,后者较为干燥。

来自青藏高原的两个黄土-古土壤序列,西藏日喀则剖面与四川甘孜剖面,磁化率的变化与湖泊演化相似,同样具有 20 ka 旋回;40~24 kaBP 与 14~4 kaBP 的磁化率较高,其间的末次盛冰期,磁化率最低。并且,40~24 kaBP 与 14~4 kaBP 相比,前者磁化率略高<sup>[44, 45]</sup>,甘孜剖面,40~24 kaBP 发育一套同 14~4 kaBP 土壤成熟度相似的古土壤,这在黄土高原是没有的。这与高原湖泊演化序列共同揭示了这样一个事实:青藏高原,40~24 kaBP 比 14~4 kaBP 的气候可能更加湿润。

黄土高原与非洲季风区气候演化,同样表现出了准 20 kaBP 旋回趋势;也就是说,在两次高太阳辐射阶段,气候湿润,土壤发育,呈现高湖面,而在低太阳辐射的末次盛冰期前后,则与此相反。在非洲区,14~4 kaBP 高湖面略比 40~24 kaBP 高湖面显著一些,具体表现为保持高、中高湖面的湖泊数量较多。与此相仿,在黄土高原,14~4 kaBP 气候略比 40~24 kaBP 气候湿润,或者说,夏季风略微强盛,降水略多,具体表现为,14~4 kaBP 为一套发育成熟的黑垆土型古土壤,土壤磁化率值较高,而 40~24 kaBP 一般由两层弱发育古土壤<sup>[71-73]</sup>组成,磁化率值较低。

另外,来自非洲西岸南大西洋的几个深海记录<sup>[74-77]</sup>,也都证实:40~24 kaBP 与 14~4 kaBP,特别是后期,非洲北部 Sahara 与 Sahel 地区植被覆盖远比现在广阔,热带森林、Savanna 稀树草原显著向北扩展。这两个区域气候演化区别于青藏高原的一个特征是:14~4 kaBP 远比 40~24 kaBP 湿润与适宜。

中国云南,40 kaBP 以来的最高最大湖面是出现在末次盛冰期前后,在 14~4.0 kaBP,湖面回落,湖泊萎缩。不过,这个地区降水较大,湖盆堆积旺盛,湖盆形状变化较快,且湖泊均为吞吐湖;这使基于多指标综合判断湖面升降,从而推断流域有效降水(P-E)的方法可能存在一些无法预料的偏差,在此,暂不作深入探讨。

总体而言,亚非季风区 40 kaBP 以来的气候环境演化格局,是同岁差周期的太阳辐射变化所驱动的夏季风的强弱从而造成的季风降水的多寡存在密切关系,高湖面对应于高太阳辐射的暖湿期,低湖面对应于低太阳辐射的末次冰盛期冷干阶段。

在青藏高原,40~24 kaBP 比 14~4 kaBP,气候更为湿润,湖面更为宽广,高原存在一次泛湖期<sup>[1-3, 30]</sup>,这是区别于其他亚非季风区的显著特征。已经有文详细论述过其时高原的湖泊与河流记录<sup>[1-3]</sup>及植被与温度状况<sup>[2]</sup>,揭示这是一个比全新世大暖期更为湿润的气候期,夏季风特别强盛,高原存在大降水<sup>[6]</sup>。

简言之,如果以降水多寡衡量夏季风强度,40~24 kaBP 比之 14~4 kaBP,高原夏季风可能更为强盛。不过,目前无论是来自阿拉伯海与夏季风强弱存在密切关系的上升流指标<sup>[78, 79]</sup>,还是植被指标<sup>[80]</sup>与海洋生物生产力指标<sup>[81]</sup>,亦或是印度洋<sup>[82, 83]</sup>的记录,都没有提供印度季风在 40~24 kaBP 比之 14~4 kaBP 要强盛的证据,相反,是比较弱的;这同印度季风的驱动之一的太阳辐射强度的变化<sup>[2]</sup>是相吻合的。

另外,东亚季风尾闾区的岱海<sup>[84]</sup>与阿拉伯半岛的 Mundafan 湖<sup>[85]</sup>,也都记录了这两次暖湿期,其间是干冷的末次盛冰期。岱海,不管是介形类、孢粉与有机质含量还是沉积组合,都指示 40~24 kaBP 不及 14~4 kaBP 暖湿,湖面也较低。而 Mundafan 湖,从目前我们所获得资料,尚无法对比上述两个时期湖泊扩张的规模。

### 3 讨论

同为低纬度季风区, 青藏高原与非洲季风区、黄土高原等区域气候演化序列上的这种反差, 是各区域在相同强度季风影响下, 由于地理位置与海拔高度不同造成的环境差异, 还是不同强度季风影响下的一种气候与环境的区域表现?

至少 1.0 MaBP 以来, 非洲季风的主导周期服从 100 ka 的典型的高纬度冰盖变化周期, 高纬度气候变化对非洲大陆具有控制作用, 并且这种作用是通过高纬度冰盖影响北大西洋的海面温度而影响非洲大陆的<sup>[74]</sup>。黄土高原黄土-古土壤序列的频谱分析表明, 东亚季风至少在 0.8 MaBP 以来的演化以 100 ka 为其主导周期<sup>[86, 87]</sup>。来自南中国海的海洋记录也表明, 东亚季风约在 0.6 MaBP 以来主要服从于这个周期旋回<sup>[88]</sup>。而印度季风, 至少 0.6 MaBP 以来的主导周期以 23 ka 与 41 ka 为特点, 并以前者最显著<sup>[82, 89]</sup>, 而这种周期, 正是低纬度太阳辐射变化的岁差周期与地轴倾斜度周期<sup>[90]</sup>, 这显示出印度季风区别于非洲季风与东亚季风的特点: 受高纬度地区气候演化影响较小, 因而更具有低纬度演化的特点。古里雅冰芯末次间冰期以来的氧同位素序列就揭示了印度季风的这种演化特点<sup>[91]</sup>。

印度季风的这种低纬度特色, 可能同青藏高原的隆升而形成的阻挡作用有关, 高原隆升减弱了高纬度气候对印度季风发育的影响。具体来说, 就是高原隆升阻挡冬季亚洲内陆高压系统对印度次大陆的影响, 相对来说, 从而使印度季风比非洲季风与东亚季风少了一个显著的控制因素而单纯在低纬度太阳辐射作用下演化。现代的气象观测表明, 印度次大陆冬季风较弱, 并更具有信风性质。Flohn 早就指出过, 青藏高原的阻挡作用, 在印度热低压的形成中起了极其重要的作用<sup>[92]</sup>。

明确了上述三支季风的演化旋回不同, 也就不难理解 40 kaBP 以来各区域气候环境的差异的原因。在非洲与东亚季风区域, 40~24 kaBP 比 14~4.0 kaBP 期间的高湖面略低, 夏季风势力较弱, 降水较少。这是同两地所处的气候演化阶段相适应: 40~24 kaBP 是冰期中的暖期, 具有间冰阶的气候特点, 夏季风受高纬度冰盖的影响, 没有充分发育。14~4 kaBP 为高纬度冰盖显著消融的间冰期, 同时也是全球 100 ka 周期旋回中的最暖期, 高纬度冰盖大大消融, 受高太阳辐射驱动, 夏季风具有充分发育的空间、时间与动力驱动。

而印度季风, 40~24 kaBP 与 14~4.0 kaBP 同是其 23 ka 演化旋回的一个鼎盛期, 尽管 40~24 kaBP 比 14~4.0 kaBP 弱一些, 但并不像东亚季风与非洲季风(特别是东亚季风)那样, 40~24 kaBP 远比 14~4.0 kaBP 弱的多。也就是说, 印度季风在 40~24 kaBP 还是比较强大的, 不过其势力尚没有 14~4.0 kaBP 强盛。

这就引出下一个问题: 同为岁差周期的夏季高太阳辐射所驱动的印度夏季风, 且 40~24 kaBP 期的强度尚不及 14~4.0 kaBP 期, 然而, 在青藏高原, 前期却造成比后期更为强烈的降水, 造成这种反差的动力机制是什么?

现代青藏高原的降水研究表明, 夏季风较弱, 高原上部没有足够的水汽来源, 不会造成丰沛的降水; 夏季风强盛, 西风气流对高原的影响微弱, 夏季风成为过境季风, 也不会造成丰沛的降水。只有在低纬度季风频繁影响高原, 同时西风气流以各种方式扰动高原上空, 两种不同性质的气流相互作用时, 才能形成高原大范围的降水过程。高原东南部 Rongbuk 冰芯 200 年来的记录就曾揭示: 强烈的夏季风, 也就是印度低压加深与更多的夏季降水, 是同亚洲中部 30~45°N 区域冬春季的风力增强有关<sup>[93]</sup>。

40~24 kaBP, 由于欧亚北方冰盖(ice sheet of Northern Eurasia)<sup>[94]</sup>与劳伦泰的冰盖(ice sheet of Laurentide)<sup>[95]</sup>的存在(当时北方冰盖的体积相当于末次冰盛期的 50%左右<sup>[96]</sup>), 夏季西风带比全新世期间相对南移, 从而加强对高原上空的影响, 它与强盛的夏季风相互作用, 使高原形成充沛降水成为可能。这就是说, 高原存在大降水的区域气候背景: 低纬度印度季风强盛, 高纬度冰盖具有一定规模的存在时期, 也就是传统意义上所指的冰

期中的相对暖湿期：间冰阶。同时，在低纬印度洋，40~24 kaBP 比 14~4.0 kaBP 具有更为强烈的太阳辐射<sup>[90]</sup>，有资料表明，在西印度洋 (15°S, 60°E)，RC17-98 孔的代用指标估算 40~24 kaBP 比 14~4.0 kaBP 洋面温度要高 1~2°C<sup>[93]</sup>。强烈的太阳辐射与较高的温度条件，造成更强烈的洋面蒸发，从而可能对陆地季风区具有更多的水汽与潜热输送，这或许是青藏高原在 40~24 kaBP 保持高降水与较高温度<sup>[2]</sup>的一个因素。

在全新世，也就是现代间冰期，高纬度冰盖大幅度消融，夏季，西风带相对北移，对高原扰动减弱，并不利于大范围的降水过程的形成。

当然，也应该看到，本文所涉及的青藏高原与新疆区的湖泊，严格来说，都是山地湖泊，流域内山地高出湖泊多在 1 000 m 以上，并且或多或少都有一定规模的冰川存在。由于山地与湖盆降水形式存在差异，这使山地湖泊与非山地湖泊的湖泊扩涨存在明显差异。因此，高原各个时期湖泊扩涨与这次泛湖期动力机制的诸多细节，还需要进一步的探索，特别是对于高原山地湖泊与非山地湖泊扩涨的差异性的研究尚待展开。

## 4 结论

(1) 40 kaBP 以来，对应两次夏季高太阳辐射期 (即：40~24 kaBP 与 14~4.0 kaBP)，非洲季风、印度季风、东亚季风势力加强，不过其强度对比有所不同，造成了各区域陆地环境演化趋势产生明显的差异。黄土高原与非洲区，14~4.0 kaBP 比 40~24 kaBP 更加湿润，而青藏高原则相反；40~24 kaBP，青藏高原存在泛湖期。

(2) 高原泛湖期，可能是间冰阶区域大环境的特殊产物。其时，印度季风强盛，同时由于北方冰盖的存在，西风气流相对南移，增加了对高原的影响，两种气流交互作用引起的强降水，可能是造成泛湖期的直接原因。

## 参考文献 (References)

- [1] Li Bingyuan. The large lake period in the Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 174-181. [李炳元. 青藏高原大湖期. *地理学报*, 2000, 55(2): 174-181.]
- [2] Shi Yafeng, Yu Ge, Liu Xiaodong et al. Reconstruction of the 40-30 kaBP enhanced India Monsoon climate based on geological records from the Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 169 (2): 69-83.
- [3] Jia Yulian, Shi Yafeng, Wang Sumin et al. Lake expanding events in the Tibetan Plateau since 40 kaBP. *Science in China*, 2001, 44(suppl.): 301-315.
- [4] Jia Yulian, Shi Yafeng, Fan Yunqi. Water balance of paleo-lake Qinghai and its precipitation estimation at three high lake-level stages since 40 kaBP. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(3): 211-218. [贾玉连, 施雅风, 范云崎. 四万年以来青海湖的三期高湖面及其降水量研究. *湖泊科学*, 2000, 12(3): 211-218.]
- [5] Jia Yulian, Shi Yafeng, Fan Yunqi et al. The precipitation of the interior lakes in the south-western Tibetan Plateau 40~30 kaBP. *Advances in Earth Sciences*, 2001, 6(4): 346-351. [贾玉连, 施雅风, 曹建廷 等. 40-30kaBP 期间高湖面稳定存在时期青藏高原西南部封闭流域的古降水量重建. *地球科学进展*, 2001, 6(4): 346-351.]
- [6] Shi Yafeng, Jia Yulian, Ge Yu et al. Features, impacts and causes of the high temperature and large precipitation event in the Tibetan Plateau and its adjacent area during 40-30 kaBP. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(1): 1-11. [施雅风, 贾玉连, 于革 等. 40-30kaBP 青藏高原及邻区高温大降水事件的特征、影响及原因探讨. *湖泊科学*, 2002, 14(1): 1-11.]
- [7] Gao Youxi. *Several Issues about Eastern Asia Monsoon*. Beijing: Science Press, 1962. 27-35.
- [8] Street F A. Global maps of lake-level fluctuations since 30,000 yr BP. *Quaternary Research*, 1979, 12(1): 83-118.
- [9] Harrison S P. Late Quaternary lake-level record from Northern Eurasia. *Quaternary Research*, 1996, 45 (2): 138-159.
- [10] Street F A, Grove A T. Environmental and climatic implications of the late Quaternary lake level fluctuations in Africa. *Nature*, 1976, 261: 385-390.
- [11] Yu Ge. Studies of global late Quaternary lake-level data bases. *Journal of Lake Sciences*, 1997, 9(3): 193-202. [于革. 全球晚第四纪湖泊数据库的研究. *湖泊科学*, 1997, 9(3): 193-202.]
- [12] Tarasov P E, Harrison S P, Saarse L et al. Lake status records from the former Soviet Union and Mongolia. NOAA Paleoclimatology Publications Series Report, 1994, 2: 1-274.
- [13] An Z S, Kukla G J, Porter S C et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of



- central China during the last 130,000 years. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36.
- [14] Lv Houyuan, Han Jiamao, Wu Naiqin et al. Modern Soil Magnetic susceptibility in China and its paleoclimatic implications. *Science in China (B)*, 1994, 24(12): 1290-1297. [吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义. *中国科学 (B)*, 1994, 24(12): 1290-1297]
- [15] Maher B A, Thompson R, Zhou L P. Spatial and temporal reconstruction of changes in the Asian Monsoon: a new mineral magnetic approach. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1994, 125(4): 461-471.
- [16] Ding Zhongli, Ren Jianzhang, Liu Dongsheng et al. Millennial-scale irregular change of monsoon-desert system during late Pleistocene and its causes. *Science in China (D)*, 1996, 26(5): 385-391. [丁仲礼, 任剑璋, 刘东生 等. 晚更新世季风—沙漠系统千年尺度的不规则变化及其机制问题. *中国科学(D)*, 1996, 26(5): 385-391.]
- [17] Nie Gaozhong, Liu Jiaqi, Guo Zhengtang. The important stratum boundaries since 150 kaBP in Weinan loess profile, and their climate events: chronological proofs. *Quaternary Sciences*, 1996, 3: 202-210. [聂高众, 刘嘉麒, 郭正堂. 渭南黄土剖面十五万年以来的主要地层界线和气候事件. *第四纪研究*, 1996, 3: 202-210.]
- [18] Guo Zhengtang, Pen Shuzhen, Wei Lanying et al. Millennial-scale oscillations of eastern summer monsoon over the last 0.22Ma. *Quaternary Sciences*, 1999, (4): 299-305. [郭正堂, 彭淑贞, 魏兰英 等. 二十二万年以来东亚夏季风的千年尺度变化及其在不同时期的差异. *第四纪研究*, 1999, (4): 299-305.]
- [19] Gasse F. Evolution of lake Abhe (Ethiopia and TFAI) from 70,000 aBP. *Nature*, 1977, 265: 42-45.
- [20] Gasse F, Ledee V, Massault M et al. Water-level fluctuations of lake Tanganyika in phase with oceanic changes during the last glaciation and deglaciation. *Nature*, 1989, 342: 57-59.
- [21] Bonnefile R, Riollot G. The Kashiru pollen sequence (Burundi), paleoclimatic implications for the last 40,000 yr BP in tropical Africa. *Quaternary Research*, 1988, 30(1): 19-35.
- [22] Bonnefile R, Roeland J C, Guiot J. Temperature and rainfall estimates for the past 40,000 yr BP in Equatorial East Africa. *Nature*, 1990, 346: 347-349.
- [23] Aucour A M, Hillaire-Marcel C, Bonnefile R. Late Quaternary biomass changes from  $^{13}\text{C}$  measurements in a highland peatbog from Equatorial Africa (Burundi). *Quaternary Research*, 1994, 41(2): 225-233.
- [24] Taylor M D. Late Quaternary pollen records from two Ugandan mires: evidence for environmental change in the Rukiga highlands of southwest Uganda. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1990, 80(2): 283-300.
- [25] Butzer K W, Isaac G L. Radiocarbon dating of East African lake levels. *Science*, 1972, 175: 1069-1076.
- [26] Richardson J L. Palaeolimnological records from rift lakes in central Kenya. *Palaeoecology of Africa*, 1972, 11(4): 131-138.
- [27] Durand A. Oscillations of lake Chad over the past 50,000 years: new data and new hypothesis. *Palaeogeography*, 1982, 39(1): 37-53.
- [28] Wendorf F. The members of the Combined Prehistoric Expedition. Late Pleistocene and recent climatic changes in the Egyptian Sahara. *Geographical Journal*, 1977, 143(2): 211-234.
- [29] Foucault A, Stanley D J. Late Quaternary palaeoclimatic oscillations in East Africa recorded by heavy minerals in the Nile delta. *Nature*, 1989, 339: 44-46.
- [30] Zheng Mianping, Xiang Jun. *Salt Lakes in the Tibetan Plateau*. Beijing: Geology Press, 1989. 1-353.
- [31] Qi Wen, Zheng Mianping. Sedimentary features and climate evolution from ZK91-2 core in Zhabyer Caka, in the Tibetan Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 1995, 7(2): 133-140. [齐文, 郑绵平. 西藏扎布耶湖 ZK91-2 钻孔沉积特征与气候演化. *湖泊科学*, 1995, 7(2): 133-140.]
- [32] Xiao Jiayi, Wu Yushu, Zheng Mianping. Preliminary studies of late Quaternary pollen flora in Zhabyer Caka, in the Tibetan Plateau. *Acta Micropaleontologica Sinica*, 1996, 13(4): 395-399. [萧家仪, 吴玉书, 郑绵平. 西藏扎布耶湖晚第四纪孢粉植物群的初步研究. *微体古生物学报*, 1996, 13(4): 395-399.]
- [33] Bhattacharyya A. Vegetation and climate during the last 30,000 years in Ladakh. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, 73(1): 25-38.
- [34] Li Shijie, Li Bingyuan, Zhu Zhaoyu et al. Lake sediment records of Tianshuihai core. In: Shi Yafeng, Li Jijun, Li Bingyuan (eds.), *Late Quaternary Uplifting and Environmental Evolution in the Tibetan Plateau*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998. 215-246.
- [35] Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, Wenluositan T K et al. Causes of Formation of the Paleopotansium Salt and Paleotranspiration Salt: A Case Study of Salt Lake in Qaidam Basin. Beijing: Science Press, 1993. 84-99.
- [36] Chen Kezao, Bowler J M, Kelts K. Climate change in the Tibetan Plateau since 40 kaBP. *Quaternary Sciences*, 1990, 10 (1): 21-31. [陈克造, Bowler J M, Kelts K. 四万年来青藏高原的气候变迁. *第四纪研究*, 1990, 10(1): 21-31.]
- [37] Huang Qi. Dating of several salt lake ages and their sediment cycles. *Chinese Science Bulletin*, 1980, 25(21): 990-994. [黄麒. 盐湖年龄的测定——青藏高原几个盐湖的  $^{14}\text{C}$  年龄及其沉积旋回. *科学通报*, 1980, 25(21): 990-994.]
- [38] Huang Qi. Model of paleoclimate change in dry area reconstructed by organic geochemistry method. *Oceanologia end Limnologia Sinica*, 1991, 22(3): 547-553. [黄麒. 干旱地区古气候变化特征. *海洋与湖沼*, 1991, 22(3): 547-553.]

- [39] Pachur H J, Wunnemann B, Zhang H C. Lake evolution in the Tengger desert, northwestern China, during the last 40,000 years. *Quaternary Research*, 1995, 44(2): 171-180.
- [40] Yuan Baoyin, Chen Kezao, Bowler J M et al. Formation and evolution of Qinghai Lake. *Quaternary Sciences*, 1990, 10(3): 233-243. [袁宝印, 陈克造, Bowler J M 等. 青海湖的形成与演化趋势. 第四纪研究, 1990, 10(3): 233-243.]
- [41] Shan Fashou, Du Naiqiu, Kong Zhaochen. Vegetable evolution and environmental change in Qinghai Lake basin at the last 350 kaBP. *Journal of Lake Sciences*, 1993, 5(1): 9-17. [山发寿, 杜乃秋, 孔昭宸. 青海湖盆地 35 万年来植被演化与环境变迁. 湖泊科学, 1993, 5(1): 9-17.]
- [42] Lister G S, Kelts K, Zao C K et al. Lake Qinghai, China: closed-basin lake levels and the oxygen isotope record for ostracoda since the latest Pleistocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1991, 84(1): 141-162.
- [43] Lanzhou Subacademy of Chinese Academy of Sciences, Research Center of Western Resource and Environment of Chinese Academy of Sciences. *Evolution of Recent Environment of Qinghai Lake and Prognostication for the Future*. Beijing: Science Press, 1994. 1-79.
- [44] Pan Baotian, Wang Jianmin. Loess record of Qingzang Plateau monsoon variations in the eastern part of Qingzang Plateau since in the last interglacial. *Quaternary Sciences*, 1999, 19(4): 330-334. [潘保田, 王建民. 末次间冰期以来青藏高原东部季风演化的黄土沉积记录. 第四纪研究, 1999, 19(4): 330-334.]
- [45] Le Heling, Dong Guangrong, Gao Shangyu et al. Environmental and south-western monsoon variations in central Tibetan Plateau since 300 kaBP. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(3): 234-236. [靳鹤龄, 董光荣, 高尚玉 等. 距今 30 万年来西藏中部地区环境变化与西南季风变迁. 中国沙漠, 2000, 20(3): 234-236.]
- [46] Yan Shun, Mu Guijin et al. Quaternary environmental evolution of the Lop Nur region, China. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(4): 332-340. [闫顺, 穆桂金 等. 新疆罗布泊地区第四纪环境演变. 地理学报, 1998, 53(4): 332-340.]
- [47] Li Bingyuan, Cai Biqin. Sedimentary feature of Aiding Lake in Tulufan Basin. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34(8): 608-610. [李秉孝, 蔡碧琴. 吐鲁番盆地艾丁湖沉积特征. 科学通报, 1989, 34(8): 608-610.]
- [48] Shi Yafeng, Wen Qizhong. Quaternary climate change and hydrogeological change in Caiwobao Lake, Xinjiang. Beijing: Science Press, 1990. 147-157.
- [49] Rhodes T E, Gasse F, Lin R F et al. A late Pleistocene-Holocene lacustrine record from Lake Manas, Zunggar (northern Xinjiang, western China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 120: 105-125.
- [50] Lin Ruifen. Paleoclimatic and paleoenvironmental change from Manasi Lake core, Xinjiang. *J. of Geochemistry*, 1996, 25(1): 63-71. [林瑞芬. 新疆玛纳斯湖沉积柱样的古气候古环境研究. 地球化学, 1996, 25(1): 63-71.]
- [51] Han Shutu, Yuan Yujiang. The sequence of paleoclimatic variation of Balikun Lake of Xinjiang in the past 35000 years. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(3): 350-362. [韩淑婷, 袁玉江. 新疆巴里坤湖 35000 年来古气候变化序列. 地理学报, 1990, 45(3): 350-362.]
- [52] Yuan Baoyin. Paleohydrological evolution of Balikun Lake, Xinjiang, since 150 kaBP. *Quaternary Sciences*, 1998, (4): 319-327. [袁宝印. 新疆巴里坤湖十五万年来古水文演化序列. 第四纪研究, 1998, (4): 319-327.]
- [53] Yin Yong, Fang Nianqiao. Lacustrine records of environment change during the last 57ka in Panahai lake, in northwestern of Yunnan, China. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2002, 22(4): 99-105. [殷勇, 方念乔. 云南中甸纳帕海湖泊沉积记录指示的 57ka 环境变化. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 99-105.]
- [54] Hodell D A, Brenner M, Kanfoush S L et al. Paleoclimate of southwestern China for the past 50,000 yr inferred from lake sediment records. *Quaternary Research*, 1999, 52(3): 369-380.
- [55] Shi Ying, Tong Guobang, Wang Sumin et al. Late Quaternary diatom community and environment changes in Heqing Basin, Yunnan. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1998, 18(4): 79-85. [石英, 童国榜, 王苏民 等. 云南鹤庆盆地晚第四纪硅藻植物群与环境. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(4): 79-85.]
- [56] Peng Jinlan. Ostracodes of the Heqing Basin, Yunnan and environmental changes during the last 150000 yr. *J. of Lake Sciences*, 2003, 15(1): 1-10. [彭金兰. 云南鹤庆盆地 15 万年以来的介形类及环境演变. 湖泊科学, 2003, 15(1): 1-10.]
- [57] Yang Xidong, Wang Sumin, Tong Guobang et al. Late Pleistocene pollen records and paleoclimate implications in Heqing Paleolake, Yunnan. *Quaternary Sciences*, 1998, 18(4): 335-341. [羊向东, 王苏民, 童国榜 等. 云南鹤庆古湖晚更新世的孢粉记录及其古气候意义. 第四纪研究, 1998, 18(4): 335-341.]
- [58] Tang Lingyu. Vegetation history and their paleoclimatic implication since 40kaBP, in Menghai region, Yunnan. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1992, 9(4): 433-455. [唐领余. 云南勐海地区四万年以来植被史与古气候意义. 微体古生物学报, 1992, 9(4): 433-455.]
- [59] Xiao Jiayi. Paleovegetational and paleoenvironmental changes in Kunming region, Yunnan. *Journal of Southeastern Culture*, 1992, (4): 56-62. [萧家仪. 云南昆明地区 5 万年以来的古植被与古环境演变. 东南文化, 1992, (4): 56-62.]
- [60] Sun Donghui, Zhou Jie, Jiang Fuchu et al. Preliminary studies on Chinese Loess Plateau summer monsoon change during the last interglacial. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 40(20): 1873-1875. [孙东怀, 周杰, 蒋复出 等. 末次间冰期黄土高原夏季气候的初步研究. 科学通报, 1996, 40(20): 1873-1875.]
- [61] Li Yumei, Liu Dongsheng, Wu Wenxiang et al. Warm and moist paleoclimate during MIS3 recorded by Malan Loess

- in Chinese Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 69-76. [李玉梅, 刘东生, 吴文祥 等. 黄土高原马兰黄土记录的 MIS3 温湿气候. 第四纪研究, 2003, 23(1): 69-76.]
- [62] An Z S, KG J, Porter S C et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36.
- [63] Wu Xihao, Jiang Fuchu, Xiao Huaguo et al. Structure movement and climate change at the last 200 ka recorded by Mangshan loess at the central part of China. *Science in China (D)*, 1999, 29(1): 76-81. [吴锡浩, 蒋复初, 肖华国 等. 中原邱山黄土及最近 200ka 构造运动与气候变化(OSL). 中国科学(D), 1999, 29(1): 76-81.]
- [64] Li Jijun, Zhu Junjie, Kang Jiancheng et al. Comparison of the last glacial cycle recorded Lanzhou loess profile and ice core from Eastern Station of South Pole. *Science in China (B)*, 1990, 20(10): 1086-1094. [李吉均, 朱俊杰, 康建成 等. 末次冰期旋回兰州黄土剖面与南极东方站冰芯的对比. 中国科学(B), 1990, 20(10): 1086-1094.]
- [65] Chen F H, Bloemendal J, Wang J M et al. High-resolution multi-proxy climate records from Chinese loess: evidence for rapid climatic changes over the last 75kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 130: 323-335.
- [66] Fang Xiaomin, Pan Baotian, Guan Donghong et al. Millennial-scale instability studies of summer monsoon during ca 60 kaBP recorded Lanzhou loess profile. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(4): 436-439. [方小敏, 潘保田, 管东红 等. 兰州约 60kaBP 以来夏季风千年尺度不稳定性研究. 科学通报, 1999, 44(4): 436-439.]
- [67] Sun Jimin, Ding Zhongli, Liu Dongsheng et al. Environmental changes in the desert-loess transitional zone of north China since the beginning of the last interglacial. *Quaternary Sciences*, 1995, 15(2): 117-122. [孙继敏, 丁仲礼, 刘东生 等. 末次间冰期以来沙漠-黄土边界带的环境演变. 第四纪研究, 1995, 15(2): 117-122.]
- [68] Ding Zhouli, Sun Jimin. Paleoclimatic events in Chinese Loess Plateau during the last 130kaBP. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(6): 567-574. [仲礼, 孙继敏. 黄土高原过去 130ka 来古气候事件. 科学通报, 1998, 43(6): 567-574.]
- [69] Gao Quanzhou, Tao Zhen, Dong Guangrong et al. The characteristics of sediments geochemistry in Chagelebulu section in the Badain Jaran Desert. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(suppl.): 44-52. [高全洲, 陶贞, 董光荣 等. 巴丹吉林沙漠查格勒布鲁剖面沉积地球化学特征. 地理学报, 1998, 53(增刊): 44-52.]
- [70] Zhang Hucai. A study on loess sedimentation and environmental change since late Pleistocene in Wudu area. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1997, 33(1): 105-114. [张虎才. 武都黄土堆积及晚更新世以来环境变迁研究. 兰州大学学报, 1997, 33(1): 105-114.]
- [71] Lu Huayu. Climatic change during the last 130kaBP recorded by Xining loess profile. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 416-426. [鹿化煜. 西宁黄土堆积记录的最近 13 万年高原气候变化. 第四纪研究, 2001, 21(5): 416-426.]
- [72] Yue L P, Lei X Y, Que H J. A magnetostratigraphic study on the Jingyuan loess section, Gansu, China. *Quaternary Science Review*, 1991, 10(4): 349-353.
- [73] Sun Donghuai, An Zhisheng, Wu Xihao et al. Evolution of summer monsoon climatic pattern in Chinese Loess Plateau during the last 150kaBP. *Science in China (D)*, 1996, 26(5): 417-422. [孙东怀, 安芷生, 吴锡浩 等. 最近 150ka 黄土高原夏季风气候格局的演化. 中国科学 (D), 1996, 26(5): 417-422.]
- [74] DeMenocal P B. Plio-Pleistocene African climate. *Science*, 1995, 270: 53-59.
- [75] Jahns S, Huls M, Sarnthein M. Vegetation and climate history of west equatorial Africa based on a marine pollen record off Liberia covering the last 400,000 years. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1998, 102(2): 277-288.
- [76] Petit-Maire N, Fontugne M, Rouland C. Atmospheric methane ratio and environmental changes in the Sahara and Sahel during the last 130 kyrs. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1991, 86(2): 197-204.
- [77] Shi N, Dupont L M. Vegetational and climatic history of SW Africa: a marine palynological record of the last 300,000 years. *Veg Hist Archaeobot*, 1997, 34(6): 117-131.
- [78] Prell W L, Campo E V. Coherent response of Arabian Sea upwelling and pollen transport to late Quaternary monsoonal winds. *Nature*, 1986, 323: 526-528.
- [79] Emeis K C, Anderson D M, Doose H et al. Sea-surface temperatures and the history of monsoon upwelling in the Northwest Arabian Sea during the last 500,000 years. *Quaternary Research*, 1995, 43(3): 355-361.
- [80] Van Campo E, Duplessy J C, Rossignol-Strick M. Climatic conditions deduced from a 150-kyr oxygen isotope-pollen record from the Arabian Sea. *Nature*, 1982, 296: 56-59.
- [81] Schulz H, Rad von U, Erlenkeuser H. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110,000 years. *Nature*, 1998: 54-57.
- [82] Clemens S, Prell W, Murray D et al. Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon. *Nature*, 1991, 353: 721-725.
- [83] Prell W L. Monsoon variability over the past 150,000 years. *J. of Geophysical Research*, 1987, 92(D7): 8411-8425.
- [84] Wang Sumin, Feng Min. Relationship between environmental change of Daihai Lake, Inner Mongolia, and Southeast Monsoon. *Science in China (B)*, 1991, 21(7): 756-768. [王苏民, 冯敏. 内蒙古岱海湖泊环境变化与东南季风强弱的关系. 中国科学(B), 1991, 21(7): 756-768.]
- [85] McClure H A. Radiocarbon chronology of late Quaternary lakes in the Arabian Desert. *Nature*, 1976, 263: 755-756.
- [86] Ding Z L, Liu T S, Rutter N W et al. Ice-volume forcing of East Asian Winter Monsoon variations in the past 800,

- 000 years. *Quaternary Research*, 1995, 44(2): 149-159.
- [87] Ding Z L. Toward an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quaternary Science Review*, 1994, 13: 39-70.
- [88] Wang Pinxian, Tian Jun. Quaternary glacial cycle shifting recorded in South China Sea. *Science in China (D)*, 2001, 31(10): 793-799. [汪品先, 田军. 第四纪冰期旋回转型在南沙深海的记录. *中国科学(D)*, 2001, 31(10): 793-799.]
- [89] Clemens S, Prell W, Murray D et al. Nonstationary phase of Indian monsoon. *Science*, 1996, 274: 943-948.
- [90] Berger A. Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 1978, 9: 139-167.
- [91] Thompson L G, Yao T, Davis M E et al. Tropical climate instability: the last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, 1997, 276: 1821-1825.
- [92] Flohn H. Contributions to a Meyeorolgy of the Tibetan Highlands. *Atmos. Sci. Paper*, 1968, 130, Corolado State Univ. Ft. Collins.
- [93] Wake C P, Mayewski P A, Qin A H et al. Changes in atmospheric circulation over the south-eastern Tibetan Plateau over the last two centuries: a Himalayan ice core. *Pages News*, 2001, 99(3): 11-13.
- [94] Grosswald M G. Late Weichselian ice sheet of Northern Eurasia. *Quaternary Research*, 1980, 13(1): 1-32.
- [95] Loewe F. Considerations on the origin of the Quaternary ice sheet of North America. *Arctic and Alpine Research*, 1971, 3: 331-344.
- [96] Winograd I J. The magnitude and proximate cause ice sheet growth since 35,000 yr BP. *Quaternary Research*, 2001, 56: 299-307.

## Comparison of Palaeoclimatic Oscillations in Asian and African Monsoon Areas since 40 kaBP and Pan-lake Period of Tibetan Plateau

JIA Yulian, SHI Yafeng, MA Chunmei, SHEN Hongyuan, WU Jinglu

- (1. *Institute of Environmental Evolution of Urban and Resources Department of Nanjing University, Nanjing 210093, China;*  
2. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China*)

**Abstract:** Based on a literature survey of 22 lacustrine sediment records from the Tibetan Plateau, its northern adjacent region--Xinjiang, and equatorial Africa and northern African area, and 18 loess-palaeosoil profiles from the Loess Plateau and the Tibetan Plateau, the paper analyzes palaeoclimatic oscillations in Asian and African monsoon areas since 40 kaBP. The result indicates that lakes status records and loess-palaeosoil records showed regionally similar patterns of climate changes over the last 40 ka in Chinese monsoon areas and African monsoon area. These areas, at 40-24 kaBP and 12-4 kaBP respectively, corresponding with high insolation of precessional cycle at summer half year, experienced moist climate regime. In the Tibetan Plateau and its northern neighbor, Xinjiang area, at 40-24 kaBP, with highest lake level, the greatest lake area and several lakes groups came into being for lake water overflow between adjacent catchments over the last 40 ka, moister than 12-4 kaBP, which was called by many pioneer research workers of the Tibetan Plateau, the pan-lakes regime. However, in the Loess Plateau and African monsoon region, there occurred a converse evolution of climate change: it was wetter at 12-4.0 kaBP than 40-24 kaBP with the culmination of wetter condition appeared at 10-6.0 kaBP. 40-24 kaBP, a particular period for the Tibetan Plateau, for high insolation in summer over the Indian Ocean, the Indian monsoon was very strong and higher sea surface temperature occurred on the West Indian Ocean.

**Key words:** Asia and Africa; Tibetan Plateau; enclosed lake basin; summer monsoon; westerlies; pan-lake period