

末次盛冰期以来中国湖泊记录对环流系统及气候类型的响应

李 育, 刘 媛

(兰州大学西部教育部重点实验室 兰州大学资源环境学院
兰州大学干旱区水循环与水资源研究中心, 兰州 730000)

摘要: 为了探讨中国长时间尺度湖泊时空演变规律和潜在的驱动机制, 本文在柯本气候分区和中国季风—非季风区的划分基础上, 对中国34个有明确数据的典型湖泊运行CCSM 3.0气候模拟系统和水量能量平衡模型模拟其水位变化, 同时利用NCEP/NCAR再分析资料对中国按水汽输送划分的季风区进行验证。结果表明, 末次盛冰期以来中国湖泊演化主要受千年尺度大气环流的驱动影响, 在各个柯本气候区内没有明显的规律性。末次盛冰期以来, 在季风区中国湖泊演化主要有早中全新世湖泊水位相对较高以及末次盛冰期和早全新世湖泊水位均较高2种演变规律; 在东亚干旱区主要有中晚全新世期间湖泊水位相对较高以及末次盛冰期和中全新世湖泊水位均较高2种演变规律。本文为中国过去气候变化及湖泊演化机制研究提供新的证据, 同时为人类全面认识末次盛冰期以来湖泊水位变化提供了新的视角。

关键词: 湖泊; 末次盛冰期; 全新世; 环流系统; 气候区

DOI: 10.11821/dlxb201611003

1 引言

湖泊是陆地水圈的重要组成部分, 在一定的地质、地理背景下形成, 其水位的变化蕴含着丰富的环境信息, 是气候变化的良好指示器^[1-3]。末次盛冰期以来中国气候变化存在一定的复杂性, 不同区域湖泊水位变化过程也存在明显差异。为了探讨中国长时间尺度湖泊演化的规律和机制, 前人做了大量的研究。2000年, 于革等^[4]提出末次盛冰期时期, 中国西部地区高湖面与中东部地区的低湖面存在巨大反差, 并通过国际古气候模型进行模拟, 揭示西部地区高湖面主要是由于西风带位置的南移引起。薛滨等^[5]分析了30 ka BP、18 ka BP和6 ka BP等3个特征时期有效降水与大气环流的总体格局, 得出这3个特征时期湖泊水位的变化主要受控于大气环流的影响。Chen等^[6]和Li等^[7]分别选择了11个和8个湖泊来研究季风区和中亚干旱区内湖泊全新世演化历史, 认为在季风区或中亚干旱区内的湖泊演化具有相似的历史。这些研究均说明长时间尺度湖泊演化受控于千年尺度大气环流特征的影响。

由于中国地理地形复杂, 下垫面类型丰富, 影响气候的环流因素比较多, 使得气候类型非常的复杂^[8]。有研究表明^[9-10], 在不同的气候区内湖泊演化具有明显的分异性。本

收稿日期: 2016-05-17; 修订日期: 2016-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371009, 41571178); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2015-143) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41371009, No.41571178; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.lzujbky-2015-143]

作者简介: 李育(1981-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 中国地理学会会员(S110010213M), 主要研究方向为夏季风西北缘长尺度气候变化。E-mail: liyu@lzu.edu.cn

文基于柯本气候分类法，将中国气候划分为4个气候带、6个气候型和28种气候副型，根据NCEP/NCAR 0.5°×0.5° 1900-2015年的月降水数据集对中国传统季风—非季风区进行验证，同时在柯本气候分区和中国季风—非季风区的划分基础上，对中国34个具有可靠定年，湖泊水位变化记录从末次盛冰期到晚全新世具有一定连续性的湖泊运行CCSM 3.0气候模拟系统、能量平衡模型和水量平衡模型对其水位进行模拟，试图分析末次盛冰期以来中国湖泊水位演化及其潜在的驱动机制。

2 中国气候与环流

2.1 柯本分类法

柯本气候分类法由于其标准严格、界限明确、应用方便等特点，广泛的应用于全球，是世界上应用最广、影响最大的气候分类法之一^[11-13]。它以气温、降水和季节变化作为分类依据，以月平均气温和降水作为分类指标，参考植被分布的规律以确定气候类型之间的界线指标值^[14]，将全球划分为5种基本气候带，12种主要气候类型（表1）。

本文使用地面降水月值0.5°×0.5°格点数据集、中国地面气温月值0.5°×0.5°格点数据集，中国高程0.5°×0.5°格点数据，基于柯本气候分类法将中国气候划分为4个气候带、6个气候型和28种气候副型，中国大陆几乎没有热带气候分布，仅有很少的热带疏林草原

表1 柯本气候符号及定义标准
Tab. 1 Description of Köppen climate symbols and definition criteria

气候带	气候型	气候副型	特征
A 热带	Af 热带雨林气候		$T_{cold} \geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{dry} \geq 60\text{ mm}$
	Aw 热带疏林草原气候		$P_{dry} \leq 60\text{ mm}$ & $P_{dry} \geq (100 - \text{MAP}/25)\text{ mm}$
	Am 热带季风气候		$P_{dry} \leq 60\text{ mm}$ & $P_{dry} \leq (100 - \text{MAP}/25)\text{ mm}$
B 干带			$\text{MAP} < 10 P_{th}$
	Bs 草原气候		$\text{MAP} \geq 5 P_{th}$
	Bw 沙漠气候		$\text{MAP} < 5 P_{th}$
C 温暖带		h	$\text{MAT} \geq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$
		k	$\text{MAT} < 18\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Cs 夏干温暖气候		$T_{hot} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{cold} < 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{sdry} < 40\text{ mm}$ & $P_{sdry} < P_{swet}/3$
	Cw 冬干温暖气候		$P_{wdry} < P_{swet}/10$
	Cf 常湿温暖气候		既非Cw也非Cf
		a	$T_{hot} \geq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$
D 冷温带		b	$T_{hot} < 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $\text{count}(T_{mon} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 4$
		c	$T_{cold} \geq -38\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $\text{count}(T_{mon} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}) < 4$
			$T_{hot} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $T_{cold} \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Df 常湿冷温气候		$P_{wdry} \geq P_{swet}/10$
	Dw 冬干冷温气候		$P_{wdry} < P_{swet}/10$
		a	$T_{hot} \geq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$
E 极地带		b	$T_{hot} < 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $\text{count}(T_{mon} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 4$
		c	$T_{cold} \geq -38\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $\text{count}(T_{mon} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}) < 4$
		d	$T_{cold} < -38\text{ }^{\circ}\text{C}$
			$T_{hot} < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
	ET 苔原气候		$T_{hot} \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
	EF 冰原气候		$T_{hot} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
		G	$H \geq 2500\text{ m}$

气候和热带季风气候分布在海南南部；气候带有干带 (B)、温暖带 (C)、冷温带 (D) 和以高地气候为主的极地带 (E)，主要气候型有草原气候 (Bs)、沙漠气候 (Bw)、冬干温暖气候 (Cw)、常湿温暖气候 (Cf)、冬干冷温气候 (Dw)、苔原气候 (ET) (图 1)。

2.2 季风区的划分

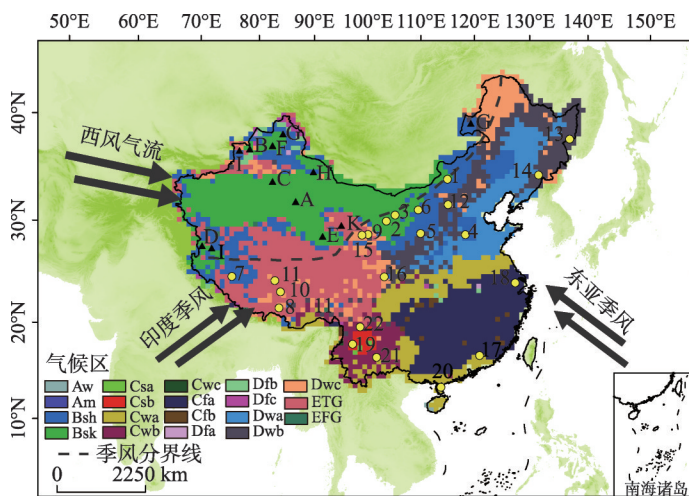
由于年际太阳辐射的变化，季风会随着时间的变化在全球范围内发生变化^[15]，因此季风区的定义非常的复杂。2006 年，Wang 等^[16]认为年夏季降水量与冬季降水量的差值大于 180 mm，同时夏季降水量超过年降水量 35% 的地区是季风区；Wang 等^[17]在 2008 年时将季风区定义为，年夏季降水量与冬季降水量差值大于 300 mm，同时季风降水指数超过 0.5 的区域；Liu 等^[18]和 Wang 等^[19]认为夏季与冬季降水之差超过 2 mm/天，并且夏季降水超过年降水量 55% 的地区是季风区，其中夏季指每年的 5-9 月，冬季指每年的 11-3 月；Chen 等^[6]和 Li 等^[7]依据水汽输送场对季风区进行划分。

本文利用 NCEP/NCAR $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 1900-2015 年的月降水数据集，参考 Liu 等^[18]和 Wang 等^[19]季风区定义对中国的季风区进行模拟，同时对 Chen 等^[6]和 Li 等^[7]按水汽输送场划分的主要受夏季季风环流影响的季风区和受西风控制的中亚干旱区进行验证 (图 2)，可以看出两种方法所划分的季风区具有明显的相似性，但由于水汽输送场综合考虑水汽、风场和高度场等资料^[20]，因此两种定义方法存在一些误差。本文引用 Chen 等^[6]和 Li 等^[7]季风区定义方法做后续研究。

3 方法

3.1 中国湖泊记录

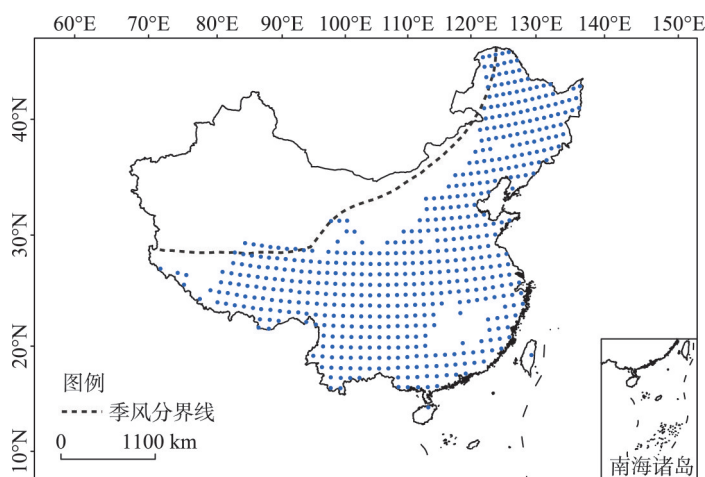
湖泊的形成没有明显的规律性，可以分布在任何海拔高度，从 5000 m 以上 (青藏高原湖泊) 到海平面以下 155 m



注：中国的气候系统包括西风气流、印度季风以及东亚季风，A~L 共 12 个湖泊位于中亚干旱区，1~22 共 22 个湖泊位于亚洲季风区，虚线代表亚洲季风在中国的边界。

图 1 中国气候系统图示和各气候区所选湖泊分布

Fig. 1 Map showing the dominant circulation systems and the lake sites selected in this study for different climate zones



注：蓝色点代表据 1900-2015 年降水月值数据集所模拟的中国季风区域，虚线是按水汽输送定义的亚洲季风在中国的边界。

图 2 根据 1900-2015 年降水月值数据集所模拟中国季风分布

Fig. 2 Monsoon area obtained from monthly precipitation dataset for the period 1900-2015

(艾丁湖),也可以分布在任何一个气候区内^[21]。根据柯本气候分类法划分结果,在每个气候区内选择具有代表的典型湖泊(图1,表2),其中A~L共12个湖泊位于中亚干旱区,其余湖泊位于亚洲季风区。这些湖泊都具有可靠的定年,湖泊水位变化的记录从末次盛冰期到晚全新世具有一定的连续性,运用了孢粉、硅藻、沉积物岩性、湖泊岸堤定年和地球化学指标等指标,有效的显示湖泊水位变化。

3.2 CCSM气候模拟系统

通用气候系统模式(Community Climate System Model, CCSM 3.0)是美国NSF、能源部、NASA、NCAR和NOAA共同开发的完全耦合的全球气候模式。CCSM 3.0有别于传统的大气环流模式(General Circulation Models, GCMs),是一个大气、海洋、陆地和海冰完全耦合模式,并且可以在3种不同的模式分辨率下运行,得到了非常广泛的应用^[75],本文根据气候系统模式模拟了中国末次盛冰期以来的气候变化。系统中,海洋和海冰模型水平分辨率为 1° ,大洋系统40个垂直分层,大气和陆地板块部分的水平分辨率为 2.8° ,大气环流模型板块垂直26层,陆地模型板块土壤分为10层。

本文选取模拟的时间段分别为21 ka BP、8.5 ka BP、6 ka BP和PI(Pre-Industrial, 1800AD)。21 ka BP(末次盛冰期)是2万年来距人类环境最近、与现代反差最大的气候时期;8.5 ka BP是早全新世的代表时段,处于“8.2 ka BP全球性冷事件”之前,不受这一全球性冷事件的影响;6.0 ka BP是中全新世的代表时段;PI处于工业革命之前,受人类活动影响较弱。表3中列出4个时间段的边界条件,包括轨道参数^[15]、大气中微量气体含量^[76-78]、大陆冰盖^[79]以及植被组成。

3.3 湖泊能量平衡模型

本文运用Hostetler等^[80]研究的湖泊能量平衡模型,对全国的湖泊进行能量平衡计算。在这个平衡模型中,湖泊表层的能量平衡由湖泊表层的蒸发量控制,普遍假设湖泊深度为1 m,湖泊水垂直方面之间并不混合。如下:

$$c_w \rho_w z \frac{\partial T}{\partial t} = \varphi_s + \varphi_{ld} - \varphi_{lu} \pm Q_e \pm Q_h \quad (1)$$

式中: c_w 为水比热($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); ρ_w 为水体密度(kg m^{-3}); z 为湖泊深度(m); T 为湖泊表层温度(K); t 为时间(s); φ_s 、 φ_{ld} 分别为被水体吸收的短波和长波辐射; φ_{lu} 为湖泊发出的长波的长波辐射; Q_e 为潜在热通量; Q_h 为感热通量。

3.4 湖泊水量平衡模型

本文假设CCSM 3.0系统中,全国每一个陆面的网格单元为一个单独的湖泊,每个湖泊处于水文平衡态,同时也不存在气候变化过程不稳定的情况。因此稳定条件下的湖泊水量平衡公式如下:

$$V = A_B R + A_L (P_L - E_L) \quad (2)$$

式中: V 为湖泊水量的变化(m^3/year); A_B 、 A_L 分别为流域面积(m^2)、湖泊面积(m^2); R 为流域径流量(m/year); P_L 为降水量(m/year); E_L 为湖泊表面蒸发量(m/year)。由于方程(2)对于假想的湖泊需要 A_B 、 A_L 确定的数值,因此不能很好的计算湖泊水量变化过程。这是由于 $P_L - E_L \geq 0$ 网格单元代表的湖泊是开放的湖泊,无论湖泊水量是如何变化,开放的湖泊都会通过湖水的排放来调节水量平衡,而 $P_L - E_L < 0$ 的网格单元代表的湖泊水净损失需要径流来弥补。因此,将方程(2)进行简化如下:

$$\frac{A_L}{A_B} = \frac{R}{(E_L - P_L)} \quad (3)$$

根据方程(2)、(3)可以模拟末次盛冰期以来每个单独网络的湖泊水位变化情况。

表2 中国所选择的34个湖泊末次盛冰期以来湖泊资料

Tab. 2 The data of selected lakes in China since the Last Glacial Maximum

序号	湖泊名	纬度	经度	21-8.5 ka	21-6 ka	21 ka-PI	8.5-6 ka	8.5 ka-PI	6 ka-PI	气候带	气候型	气候副型	环流气候区	参考文献
A	罗布泊	40.29	90.8	高	高	高	低	低	高	干带	沙漠气候	k	中亚干旱区	Chao等 ^[23] , Yan等 ^[32]
B	艾比湖	44.9	82.7	高	高	高	低	低	高	干带	沙漠气候	k	中亚干旱区	Wu等 ^[24] , 靳等 ^[25]
C	博斯腾湖	42	87	低	低	低	低	低	高	干带	沙漠气候	k	中亚干旱区	Wu ^[26] , Huang等 ^[27]
D	班公错	33.7	79.42	高	不变	高	高	高	高	干带	沙漠气候	k	中亚干旱区	Fontes等 ^[28] , 李元芳等 ^[29]
E	青海达布逊湖	36.97	95.11	低	低	低	低	低	高	干带	沙漠气候	k	中亚干旱区	江德昕等 ^[30]
F	玛纳斯湖	45.75	86	低	低	低	低	低	低	干带	沙漠气候	k	中亚干旱区	Rhodes等 ^[31]
G	乌伦古湖	47.2	87.29	低	低	低	低	低	高	干带	草原气候	k	中亚干旱区	Mischke等 ^[32] , 安成邦等 ^[33]
H	巴里坤湖	43.66	92.8	高	高	高	低	低	高	干带	草原气候	k	中亚干旱区	Ma等 ^[35] , Lu等 ^[36]
I	台错	33.72	80.7	低	高	高	高	高	高	干带	草原气候	k	中亚干旱区	Zheng等 ^[37]
J	呼伦湖	48.9	117.4	低	低	低	高	高	低	干带	草原气候	k	中亚干旱区	王苏民等 ^[38] , Zhai ^[39]
K	哈拉湖	38.28	97.58	低	低	低	低	低	低	极地	草原气候	G	中亚干旱区	Yan等 ^[40]
L	赛里木湖	44.5	81.2	低	低	低	低	低	高	冷温带	草原气候	c	中亚干旱区	Jiang等 ^[41] , 陈明勇等 ^[42]
1	查干淖尔湖	43.27	112.9	高	高	高	不变	不变	高	干带	沙漠气候	k	季风区	江德昕等 ^[43]
2	猪野泽	39.05	103.85	低	高	高	高	高	不变	干带	沙漠气候	k	季风区	Zhang等 ^[44] , Pachur等 ^[45]
3	吉兰泰盐湖	39.7	105.09	低	低	低	高	高	低	干带	沙漠气候	k	季风区	Jia等 ^[46] , Geng等 ^[47]
4	宁晋泊	37.25	114.75	低	低	高	低	高	高	干带	草原气候	k	季风区	Zhang等 ^[48]
5	萨拉乌苏古湖	37.7	108.6	低	低	高	不变	高	高	干带	草原气候	k	季风区	Zhang等 ^[49]
6	盐海子湖	40.2	108.4	高	高	高	高	高	不变	干带	草原气候	k	季风区	Chen等 ^[50] , 钱作华等 ^[51]
7	扎布耶盐湖	31.35	84.07	高	高	高	低	高	高	干带	草原气候	k	季风区	Wang等 ^[52] , 刘俊英等 ^[53]
8	沉错	28.93	90.6	高	高	高	高	高	高	极地	草原气候	G	季风区	Zhu等 ^[54]
9	乱海子湖	37.58	101.33	低	低	低	高	高	高	极地	草原气候	G	季风区	Herzschuh等 ^[55]
10	班戈错	31.75	89.57	不变	高	高	高	高	不变	极地	草原气候	G	季风区	赵希涛等 ^[56]
11	纳木错	30.65	90.5	低	低	低	低	低	高	极地	草原气候	G	季风区	Mügge等 ^[57] , Witt等 ^[58]
12	岱海	40.58	112.7	低	低	低	低	低	高	冷温带	草原气候	b	季风区	王苏民等 ^[59] , Wang等 ^[60]
13	兴凯湖	45.2	132.2	低	低	低	低	低	高	冷温带	草原气候	b	季风区	吴健等 ^[61]
14	二龙湾玛珥湖	42.3	126.37	低	低	低	低	低	不变	冷温带	草原气候	b	季风区	刘玉英等 ^[62]
15	青海湖	37.5	100.5	低	低	低	高	高	不变	冷温带	草原气候	c	季风区	Madsen等 ^[63] , Colman等 ^[64] ,
16	若尔盖湖	33.13	103.65	低	低	低	不变	高	高	冷温带	草原气候	c	季风区	Zhou等 ^[65] , 唐领余等 ^[66]
17	大湖	24.25	115.033	低	低	低	不变	高	高	温暖带	常湿温暖气候	a	季风区	Xiao等 ^[67]
18	太湖	31.5	120.5	低	低	低	不变	高	高	温暖带	常湿温暖气候	a	季风区	薛滨等 ^[68] , 王建等 ^[69]
19	洱海	25.84	99.98	高	高	高	不变	高	高	温暖带	夏干温暖气候	b	季风区	Madsen等 ^[70]
20	湖光岩玛尔湖	21.15	110.28	低	低	低	高	高	高	温暖带	冬干温暖气候	a	季风区	Mingram等 ^[71]
21	星云湖	24.5	102.88	低	低	低	不变	高	高	温暖带	冬干温暖气候	b	季风区	Hodell等 ^[72]
22	泸沽湖	27.72	100.79	低	低	高	低	低	高	温暖带	冬干温暖气候	b	季风区	Wang等 ^[73] , Xiao等 ^[74]

表3 21 ka BP、8.5 ka BP、6.0 ka BP和PI 4个时段的模拟边界值

Tab. 3 Boundary conditions used for CCSM 3 model experiments at 21 ka BP, 8.5 ka BP, 6 ka BP and PI

	Pre-Industrial	6 ka	8.5 ka	21 ka
离心率	0.016724	0.018682	0.019199	0.018994
倾角(°)	23.45	24.1	24.22	22.949
近日点经度(°)	102.04	0.87	319.5	114.42
CO ₂ (ppm)	280	280	260	185
CH ₄ (ppb)	760	650	660	350
N ₂ O (ppb)	270	270	260	200
大陆冰川	Peltier (2004) 0 ka	Peltier (2004) 0 ka	Peltier (2004) 8.5 ka	Peltier (2004) 21 ka
植被组成	同现代	同现代	同现代	同现代

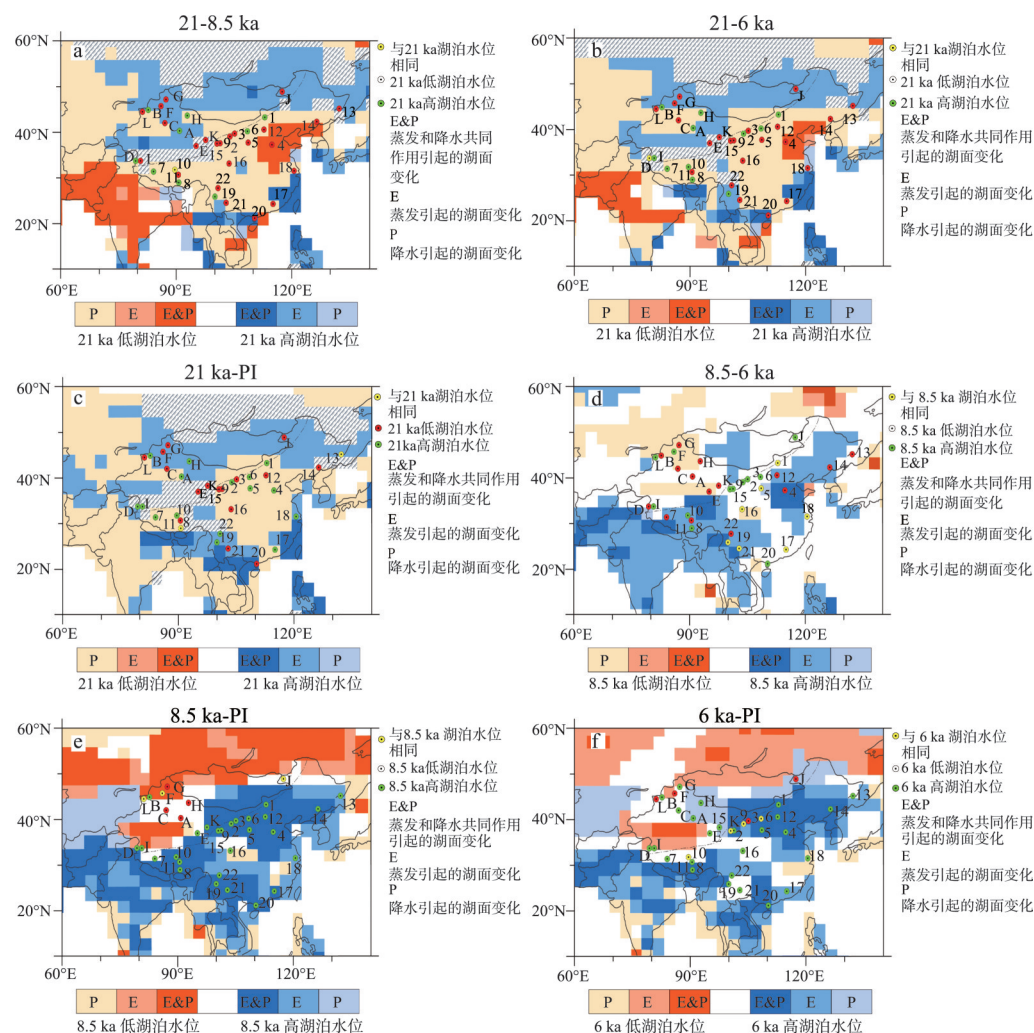
4 湖泊演化规律及驱动机制的探讨

4.1 湖泊水量能量平衡模拟结果与湖泊记录对比

根据水量能量平衡模型模拟中国湖泊自末次盛冰期以来21 ka BP、8.5 ka BP、6.0 ka BP和PI 4个时段湖泊水位高低的变化以及引起湖泊水位变化的原因（图3）。末次盛冰期时期中国大部分地区湖泊水位与全新世相比处于低水位状态，而高水位主要位于中国西北内陆干旱区西部地区。全新世湖泊水位模拟结果显示季风区湖泊水位在早全新世（8.5 ka BP）时期达到峰值（图3d、3e、3f），中全新世（6.0 ka）水位次之，PI期间水位最低。这与季风区所选择的23个湖泊全新世演化资料显示的演化记录具有很好的一致性。在中亚干旱区，PI期间湖泊水位高于8.5 ka BP和6.0 ka BP，中全新世6.0 ka BP的湖泊水位高于早全新世8.5 ka BP。该区域的湖泊演化资料显示，早全新世湖泊水位较低，中全新世期间湖泊水位达到峰值，这与模拟结果非常匹配，但是湖泊演化记录显示，晚全新世期间湖泊水位出现下降的趋势，这与模拟结果不同，模拟结果显示晚全新世期间中亚干旱区湖泊水位持续上升。虽然大部分的湖泊在晚全新世期间显示湖泊水位比较低，但是个别的湖泊显示高湖面^[31, 38-39, 41-42]，这一差异可能是由于人类活动以及模型误差引起的。

4.2 中国末次盛冰期以来湖泊水位变化及可能性因素

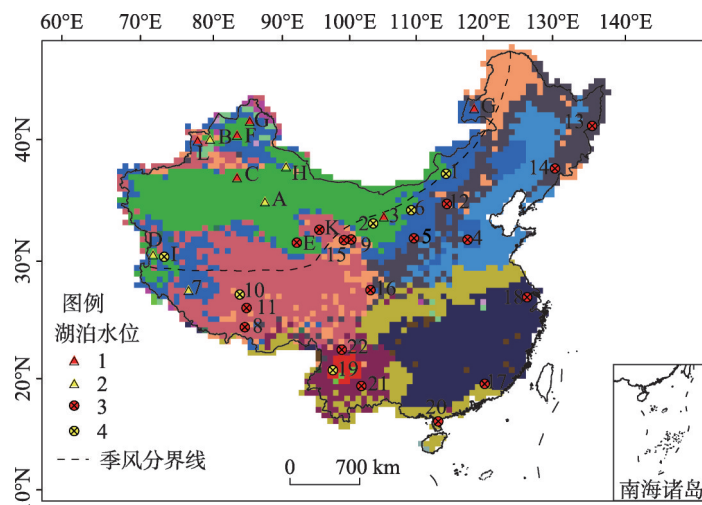
根据古湖泊记录，末次盛冰期以来湖泊水位的变化规律可以分为4类（图4）：① 中、晚全新世期间湖泊水位相对较高；② 末次盛冰期和中全新世湖泊水位均较高；③ 早、中全新世湖泊水位相对较高；④ 末次盛冰期和早全新世湖泊水位均较高。从图4可以看出，末次盛冰期以来中国湖泊水位的变化在各柯本气候区内没有明显的规律，而在季风区和西风带控制的中亚干旱区具有明显的空间分异性，说明中国长时间尺度的湖泊演化受控于千年尺度大气环流特征的影响。末次盛冰期以来，季风区中国湖泊演化规律主要有2种，早中全新世湖泊水位相对较高以及末次盛冰期和早全新世湖泊水位均较高，而在西风带控制的中亚干旱区湖泊演化规律主要有以下2种，中晚全新世期间湖泊水位相对较高以及末次盛冰期和中全新世湖泊水位均较高。其中青海达布逊湖、哈拉湖、台错和扎布耶盐湖这4个湖泊位于中亚西风带控制区与亚洲季风区的交汇过渡地带，气候受亚洲季风系统与西风带气流的共同影响^[81]，其气候演变可能并非遵循某一单一模式，而主要取决于两大气候系统在该区的相对强弱对比^[82]，因此末次盛冰期以来该区域湖泊演化和气候变化比较复杂，其中青海达布逊湖、哈拉湖、台错这3个湖泊显现出季风区湖泊演化特点，而扎布耶盐湖显现出中亚干旱区湖泊演化的特征。



注：浅蓝色、蓝色和深蓝色分别表示由降水增加，湖泊表面蒸发量降低以及降水和表面蒸发共同引起的湖泊水位上升；
粉色、橘色和深橘色分别表示由降水减少，湖泊表面蒸发量增加，降水和表面蒸发共同引起的湖泊水位下降；
白色表示没有水位变化。

图3 根据水量能量平衡模型模拟的中国自末次盛冰期以来湖泊水位高低的变化及其原因
Fig. 3 The results and reasons of lake-level changes based on the lake energy & water balance model and CCSM 3 since the Last Glacial Maximum

在季风区，从图3a、3b和3c可以看出末次盛冰期相对于全新世而言，低湖泊水位主要是由于降水量较少引起的，而高湖泊水位主要是由于降水和湖泊表面蒸发量共同作用引起的。Li等^[83]利用4个气候模拟系统对季风区和中亚干旱区末次盛冰期和晚全新世(PI)期间的湖泊水位变化进行模拟，认为末次盛冰期低湖泊水位主要由于降水量较少引起。Qin等^[84]认为冰期气候比较寒冷使得蒸发量显著减少，季风区的湖泊在降水减少的情况下显现出湖泊水位升高的特点。从图3d、3e和3f可以看出高降水和低湖泊表面蒸发量共同作用导致早中全新世湖泊水位比较高。这是由于北半球夏季太阳辐射增强，增加的太阳辐射加剧了海陆温差，使吹向陆地的偏南气流得以加强，带来了大量的降水，使得季风区早中全新世的湖面水位升高，中全新世以后夏季太阳辐射开始减弱，季风开始萎缩，湖泊水位开始下降^[7, 85-86]。



注：各数字代表湖泊演化类型：1.中晚全新世期间湖泊水位相对较高；2.末次盛冰期和中全新世湖泊水位均较高；3.早中全新世湖泊水位相对较高；4.末次盛冰期和早全新世湖泊水位均较高。

图4 末次盛冰期以来中国湖泊演化类型

Fig. 4 Types of lake evolution in China since the Last Glacial Maximum

在中亚干旱区，从水量平衡模拟结果（图3a、3b、3c）可看出，末次盛冰期湖泊低湖面主要是由于低降水量引起的，而高湖泊水面主要是由于低蒸发量引起的。于革等^[4]利用气候模式对末次盛冰期风场、降水和有效降水进行模拟，认为末次盛冰期时期北半球高纬度地区亚洲大陆西侧大陆冰流比较强盛，迫使西风带向南迁移，海陆温差缩小，东亚夏季风萎缩，可能诱使西风带全年强盛，同时冰期中的低温引起了蒸发量降低，可能导致湖水损失比较少，形成末次盛冰期的高湖面。中全新世湖泊水位高于末次盛冰期的湖泊水位，主要是由于末次盛冰期降雨量较少（图3d、3e、3f）。中亚干旱区的水汽输送主要来自西风带，该地区西风带的水汽源是大西洋、北冰洋、地中海以及黑海^[87]，该地区的冬季降水占全年降水的比例非常大。从全球范围来看，虽然北半球总太阳辐射量从早全新世到PI期间一直在减少，但是冬季太阳辐射量却从早全新世到PI期间一直增加^[15]，使得该地区的降雨量从早全新世到晚全新世一直增加。从图3d可以看出，在中亚干旱区，早全新世期间的低湖泊水位主要是由于降水量较少引起的，而中全新世的高湖面主要是由于降水的增加以及早全新世到晚全新世期间北半球冬季太阳辐射减少。

5 结论

本文基于柯本分类法将中国划分为4个气候带、6个气候型和28种气候副型，在每个气候型中选择具有清晰水位变化资料的湖泊，分析湖泊在21 ka BP、8.5 ka BP、6 ka BP和PI 4个特征时期演化过程。同时应用CCSM 3.0气候模拟模式、能量和水量平衡模型模拟末次盛冰期以来中国湖泊水位变化情况及其驱动机制。结果表明，末次盛冰期以来中国湖泊演变主要受千年尺度大气环流的驱动影响，在各个柯本气候区内没有明显的规律性。末次盛冰期以来，在季风主导的季风区中国湖泊演化主要有2种类型，包括早中全新世湖泊水位相对较高以及末次盛冰期和早全新世湖泊水位均较高；在西风带控制的中亚干旱区湖泊演化也有2种类型，包括中晚全新世期间湖泊水位相对较高以及末次盛冰期和中全新世湖泊水位均较高。

参考文献(References)

- [1] Harrison S P. Late Quaternary lake-level changes and climates of Australia. *Quaternary Science Reviews*, 1993, 12(4): 211-231.
- [2] Chen G J, Feng Z D, Li B, et al. Late Quaternary palaeolake levels in Tengger Desert, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 211(1): 45-58.
- [3] Shi Yafeng. Glacier recession and lake shrinkage indicating climatic warming and drying trend in central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(1): 1-13. [施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望. *地理学报*, 1990, 45(1): 1-13.]
- [4] Yu Ge, Xue Bin, Wang Sumin, et al. Chinese lakes records and the climate significance during Last Glacial Maximum. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 250-255. [于革, 薛滨, 王苏民, 等. 末次盛冰期中国湖泊记录及其气候意义. *科学通报*, 2000, 45(3): 250-255.]
- [5] Xue Bin, Yu Ge. Ancient lake-level records and changes in atmospheric circulation since the last interstadial in China. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(4): 379-380. [薛滨, 于革. 中国古湖泊水位记录及末次间冰阶以来大气环流变化. *地质学报*, 2000, 74(4): 379-380.]
- [6] Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3/4): 351-364.
- [7] Li Y, Morrill C. Multiple factors causing Holocene lake-level change in monsoonal and arid central Asia as identified by model experiments. *Climate Dynamics*, 2010, 35(6): 1119-1132.
- [8] Zheng Jingyun, Yin Yunhe, Li Bingyuan. A new scheme for climate regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 3-12. [郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. *地理学报*, 2010, 65(1): 3-12.]
- [9] Shen Ji. Spatiotemporal variations of Chinese lakes and their driving mechanisms since the Last Glacial Maximum: A review and synthesis of lacustrine sediment archives. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(34): 3228-3242. [沈吉. 末次盛冰期以来中国湖泊时空演变及驱动机制研究综述: 来自湖泊沉积的证据. *科学通报*, 2012, 57(34): 3228-3242.]
- [10] Wu Jinglu, Ma Long. Lake evolution and climatic and hydrological changes in arid zone of Xinjiang. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(2): 135-143. [吴敬禄, 马龙. 新疆干旱区湖泊演化及其气候水文特征. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(2): 135-143.]
- [11] Jiang Shizhong. *Meteorology and Climatology*. Beijing: Science Press, 2010. [姜世中. *气象学与气候学*. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [12] Peel M C, Finlayson B L, McMahon T A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2007, 4(2): 439-473.
- [13] Kottek M, Markus J, Beck C, et al. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15(3): 259-263.
- [14] Trenberth K E, Stepaniak D P, Caron J M. The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation. *Journal of Climate*, 2000, 13(13): 3969-3993.
- [15] Berger A. Long-term variations of caloric insolation resulting from the earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 1978, 9(2): 139-167.
- [16] Wang B, Ding Q. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(6): 272-288.
- [17] Wang B, Ding Q. Global monsoon: Dominant mode of annual variation in the tropics. *Dynamics of Atmospheres & Oceans*, 2008, 44(3/4): 165-183.
- [18] Liu J, Kuang X Y, Wang B, et al. Centennial variations of the global monsoon precipitation in the Last Millennium: Results from ECHO-G Model. *Journal of Climate*, 2009, 22(22): 2356-2371.
- [19] Wang B, Liu J, Kim H J, et al. Recent change of the global monsoon precipitation (1979-2008). *Climate Dynamics*, 2011, 39(5): 1123-1135.
- [20] Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. Characteristics of the water vapor transport in East Asian Monsoon region and its difference from that in South Asian Monsoon region in summer. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 28(4): 460-469. [黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别. *大气科学*, 1998, 28(4): 460-469.]
- [21] Wang Sumin, Du Hongshen. *Lakes in China*. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. *中国湖泊志*. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [22] Chao L, Peng Z, Dong Y, et al. A lacustrine record from Lop Nur, Xinjiang, China: Implications for paleoclimate change

- during Late Pleistocene. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(1): 38-45.
- [23] Yan S, Qin X Y. Quaternary environmental evolution of the Lop Nur region, NW China. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2000, 17(2): 165-169.
- [24] Wu J L, Wang S M, Wu Y H. The Holocene sedimental characteristic and paleoclimatic evolution of Ebinur lake, xinjiang. *Chinese Geographical Science*, 1995, 6(1): 78-88.
- [25] Jin Jianhui, Cao Xiangdong, Li Zhizhong, et al. Record for climate revolution in aeolian deposit of nabkhas around the Ebinur Lake. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5): 1314-1323. [靳建辉, 曹相东, 李志忠, 等. 艾比湖周边灌丛沙堆风沙沉积记录的气候环境演化. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1314-1323.]
- [26] Wünnemann B, Mischke S, Chen F H. A Holocene sedimentary record from Bosten Lake, China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006, 234(2): 223-238.
- [27] Huang X Z, Chen F H, Fan Y X, et al. Dry late-glacial and early Holocene climate in arid central Asia indicated by lithological and palynological evidence from Bosten Lake, China. *Quaternary International*, 2009, 194(1/2): 19-27.
- [28] Fontes J C, Gasse F, Gibert E. Holocene environmental changes in Lake Bangong basin (Western Tibet). Part 1: Chronology and stable isotopes of carbonates of a Holocene lacustrine core. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1996, 120(1/2): 25-47.
- [29] Li Yuanfang, Zhang Qingsong, Li Bingyuan, et al. Ostracoda from Pangong Tso and its palaeogeographic significance since the Pleistocene. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1991, 8(1): 57-64. [李元芳, 张青松, 李炳元, 等. 西藏班公错地区晚更新世晚期介形类及其古地理意义. *微体古生物学报*, 1991, 8(1): 57-64.]
- [30] Jiang Dexin, Yang Huiqiu. Palynological evidence for climatic changes in Dabuxun Lake of Qinghai Province during the past 500, 000 years. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(1): 101-106. [江德昕, 杨惠秋. 青海达布逊湖 50 万年以来气候变化的孢粉学证据. *沉积学报*, 2001, 19(1): 101-106.]
- [31] Rhodes T E, Gasse F, Lin R, et al. A Late Pleistocene-Holocene lacustrine record from Lake Manas, Zunggar (northern Xinjiang, western China). *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1996, 120(1/2): 105-121.
- [32] Mischke S, Zhang C. Ostracod distribution in Ulungur Lake (Xinjiang, China) and a reassessed Holocene record. *Ecological Research*, 2011, 26(1): 133-145.
- [33] An Chengbang, Zhao Yongtao, Shi Chao. Lake records during the Last Glacial Maximum from Xinjiang, NW China and their climatic implications. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, 33(4): 87-91. [安成邦, 赵永涛, 施超. 末次盛冰期新疆的湖泊记录及其气候环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(4): 87-91.]
- [34] Ma Z, Wang Z, Liu J, et al. U-series chronology of sediments associated with Late Quaternary fluctuations, Balikun Lake, northwestern China. *Quaternary International*, 2004, 121(1): 89-98.
- [35] Lu Y, An C B, Zhao J. An isotopic study on water system of Lake Barkol and its implication for Holocene climate dynamics in arid central Asia. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(3): 1377-1383.
- [36] Zheng M P, Liu J Y, Ma Z B, et al. Carbon and oxygen stable isotope values and microfossils at 41.4-4.5 ka BP in Tai Co, Tibet, China, and their paleoclimatic significance. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(5): 1036-1056.
- [37] Wang Sumin, Ji Lei. Sedimentology of late Quaternary lacustrine deposits and history of lake level fluctuation in Hulun lake. *Journal of Lake Science*, 1995, 7(4): 297-306. [王苏民, 吉磊. 呼伦湖晚第四纪湖相地层沉积学及湖面波动历史. *湖泊科学*, 1995, 7(4): 297-306.]
- [38] Zhai D L, Xiao J L, Zhou L, et al. Holocene East Asian monsoon variation inferred from species assemblage and shell chemistry of the ostracodes from Hulun Lake, Inner Mongolia. *Quaternary Research*, 2011, 75(3): 512-522.
- [39] Yan D, Wünnemann B. Late Quaternary lake history of Hala Lake, Qinghai Province, China, Evidenced by ostracod assemblages and sediment properties in multiple sediment records//EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014, 16.
- [40] Jiang Q F, Ji J F, Ji S, et al. Holocene vegetational and climatic variation in westerly-dominated areas of Central Asia inferred from the Sayram Lake in northern Xinjiang, China. *Science China*, 2013, 56(3): 339-353.
- [41] Chen Mingyong, Xu Shengli, Wu Zhonghai, et al. The features and ages of lake beach rock around Sayram lake in western Tianshan and its signification of lake level fluctuation during the Last Interglacial Epoch MIS 3. *Journal of Geomechanics*, 2014, 20(2): 174-184. [陈明勇, 徐胜利, 吴中海, 等. 新疆赛里木湖的湖滩岩特征、时代及其对 MIS3 阶段湖面变化的指示意义. *地质力学学报*, 2014, 20(2): 174-184.]
- [42] Jiang Dexin, Wei Junchao. Late pleistocene to Holocene palynofloras and paleoclimate of Qagan Salt lake, Inner Mongolia. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997(Suppl. 12): 147-152. [江德昕, 魏俊超. 内蒙古查干诺尔盐湖晚更新世至全新世孢粉植物群与古气候. *沉积学报*, 1997(增刊 12): 147-152.]

- [44] Chen G J, Feng Z D, Li B, et al. Late quaternary palaeolake levels in Tengger Desert, NW China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2004, 211(1): 45-58.
- [45] Pachur H J, Wünnemann B, Zhang H. Lake evolution in the Tengger Desert, Northwestern China, during the last 40, 000 years. *Quaternary Research*, 1995, 44(2): 171-180.
- [46] Jia W, Huang X, Fan Y, et al. Lake status and palaeoclimate in Jilantai Salt Lake area during the Last Glacial Maximum. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(3): 602-609.
- [47] Geng Kan, Cheng Yufeng. Formation, development and evolution of Jilantai Salt-lake, Inner Mongolia. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(3): 341-349. [耿侃, 陈育峰. 吉兰泰盐湖的形成、发育和演化. *地理学报*, 1990, 45(3): 341-349.]
- [48] Zhang Wenqing. Polynological assemblages and palaeoenvironmental changes in the Ningjinpo Lake area, south Hebei, since the late Pleistocene. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1999, 16(4): 431-438. [张文卿. 宁晋泊晚更新世孢粉组合及其古环境演变. *微体古生物学报*, 1999, 16(4): 431-438.]
- [49] Zhang Y H, Li Baosheng, Jin H L, et al. Grain-size cycles in Salawusu River valley since 150 ka BP. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 11(4): 81-92.
- [50] Chen C T A, Lan H C, Lou J Y, et al. The Dry Holocene Megathermal in Inner Mongolia. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2003, 193(2): 181-200.
- [51] Qian Zuohua, Xu Jinghua, Yuan Zun. Kataglacial age of Quaternary period and climatic characteristics of Holocene epoch: A record of carbon isotope from Yanhaizi $\text{Y}\text{a}\text{O}_2$ borehole in Yi League of Inner Mongolia. *Geology of Chemical Minerals*, 2002, 24(2): 96-100. [钱作华, 许靖华, 袁遵. 内蒙古伊盟盐海子 $\text{Y}\text{a}\text{O}_2$ 孔氧碳同位素记录的第四纪末次冰期及全新世气候特征. *化工矿产地质*, 2002, 24(2): 96-100.]
- [52] Wang R L, Scarpitta S C, Zhang S C, et al. Later Pleistocene/Holocene climate conditions of Qinghai-Xizhang Plateau (Tibet) based on carbon and oxygen stable isotopes of Zabuye Lake sediments. *Earth & Planetary Science Letters*, 2002, 203(1): 461-477.
- [53] Liu Junying, Zheng Mianping, Yuan Heran, et al. Sedimentary characteristics and paleoenvironmental records of Zabuye Salt Lake, Tibetan Plateau, since 128 ka BP. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(12): 1618-1635. [刘俊英, 郑绵平, 袁鹤然, 等. 西藏扎布耶湖区 128-1.4 ka BP 的微体古生物与环境气候变化. *地质学报*, 2007, 81(12): 1618-1635.]
- [54] Zhu L, Zhen X, Wang J, et al. A ~30, 000-year record of environmental changes inferred from Lake Chen Co, southern Tibet. *Journal of Paleolimnology*, 2009, 42(3): 343-358.
- [55] Herzschuh U, Zhang C, Mischke S, et al. A late Quaternary lake record from the Qilian Mountains (NW China): Evolution of the primary production and the water depth reconstructed from macrofossil, pollen, biomarker, and isotope data. *Global & Planetary Change*, 2005, 46(1/5): 361-379.
- [56] Zhao Xitao, Zhao Yuanyi, Zheng Mianping, et al. Late Quaternary lake development and denivellation of Bankog Co as well as lake evolution of southeastern North Tibetan Plateau during the Last Great Lake Period. *Acta Geoscientia Sinica*, 2011, 32(1): 13-26. [赵希涛, 赵元艺, 郑绵平, 等. 班戈错晚第四纪湖泊发育、湖面变化与藏北高原东南部末次大湖期湖泊演化. *地球学报*, 2011, 32(1): 13-26.]
- [57] Mügler I, Gleixner G, Günther F, et al. A multi-proxy approach to reconstruct hydrological changes and Holocene climate development of Nam Co, Central Tibet. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 43(4): 625-648.
- [58] Witt R, Günther F, Lauterbach S, et al. Biogeochemical evidence for freshwater periods during the Last Glacial Maximum recorded in lake sediments from Nam Co, south-central Tibetan Plateau. *Journal of Paleolimnology*, 2016, 55: 67-82.
- [59] Wang Sumin, Wu Ruijin, Jiang Xinhe. Environment evolution and paleoclimate of Daihai lake, Inner Mongolia since the Last Glaciation. *Quaternary Sciences*, 1990(3): 223-232. [王苏民, 吴瑞金, 蒋新禾. 内蒙古岱海末次冰期以来的环境变迁与古气候. *第四纪研究*, 1990(3): 223-232.]
- [60] Wang X, Xiao J, Cui L, et al. Holocene changes in fire frequency in the Daihai Lake region (north-central China): Indications and implications for an important role of human activity. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 59(2): 18-29.
- [61] Wu Jian, Shen Ji. Paleoclimate evolution since 27.7 ka BP reflected by grain size variation of a sediment core from lake Xingkai, northeastern Asia. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 110-118. [吴健, 沈吉. 兴凯湖沉积物粒度特征揭示的 27.7 ka BP 以来区域古气候演化. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 110-118.]
- [62] Liu Yuying, Zhang Shuqin, Liu Jiaqi, et al. Vegetation and environment history of Erlongwan Maar Lake during the Late Pleistocene on pollen record. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2008, 25(3): 274-280. [刘玉英, 张淑芹, 刘嘉麒, 等. 东北二龙湾玛珥湖晚更新世晚期植被与环境变化的孢粉记录. *微体古生物学报*, 2008, 25(3): 274-280.]

- [63] Madsen D B, Ma H, Rhode D, et al. Age constraints on the late Quaternary evolution of Qinghai Lake, Tibetan Plateau. *Quaternary Research*, 2008, 69(2): 316-325.
- [64] Colman S M, Yu S Y, An Z, et al. Late Cenozoic climate changes in China's western interior: A review of research on Lake Qinghai and comparison with other records. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(17/18): 2281-2300.
- [65] Zhou W J, Lu X F, Wu Z K, et al. Peat record reflecting Holocene climatic change in the Zoige Plateau and AMS radiocarbon dating. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(1): 66-70.
- [66] Tang Lingyu, Shen Caiming, Li Chunhai, et al. Sporopollen records and its sedimentary environment in the Zoige basin since late Quaternary//Academic Symposium Abstracts of the Tibetan Plateau and Its Adjacent Area Geology and Resource Environment, 2003. [唐领余, 沈才明, 李春海, 等. 若尔盖盆地晚第四纪以来的孢粉记录及其沉积环境//青藏高原及邻区地质与资源环境学术讨论会论文摘要汇编, 2003.]
- [67] Xiao J Y, Lü H B, Zhou W J, et al. Evolution of vegetation and climate since the Last Glacial Maximum recorded at Dahu peat site, South China. *Science in China*, 2007, 50(8): 1209-1217.
- [68] Xue Bin, Qu Wenchuan. Sedimentological record of paleoenvironment of Taihu Lake in Late-Glacial to Holocene. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(2): 30-36. [薛滨, 瞿文川. 太湖晚冰期—全新世气候环境变化的沉积记录. 湖泊科学, 1998, 10(2): 30-36.]
- [69] Wang Jian, Jiang Shuijin, Liu Jinling. The evolution of the Taihu Lake sedimentary environment since 16000 years. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1996(2): 213-223. [王建, 江水进, 刘金陵. 太湖16000年来沉积环境的演变. 古生物学报, 1996(2): 213-223.]
- [70] Madsen D B, Ma H, Rhode D, et al. Age constraints on the late Quaternary evolution of Qinghai Lake, Tibetan Plateau. *Quaternary Research*, 2008, 69(2): 316-325.
- [71] Mingram J, Schettler G, Nowaczyk N, et al. The Huguang maar lake: A high-resolution record of palaeoenvironmental and palaeoclimatic changes over the last 78, 000 years from South China. *Quaternary International*, 2004, 122(1): 85-107.
- [72] 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*, 2010, 52(3): 369-380.
- [73] Wang Q, Yang X, Anderson N J, et al. Diatom response to climate forcing of a deep, alpine lake (Lugu Hu, Yunnan, SW China) during the Last Glacial Maximum and its implications for understanding regional monsoon variability. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 86(4): 1-12.
- [74] Xiao X, Haberle S G, Shen J, et al. Latest Pleistocene and Holocene vegetation and climate history inferred from an alpine lacustrine record, northwestern Yunnan Province, southwestern China. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 86(2): 35-48.
- [75] Collins W D, Bitz C M, Blackmon M L, et al. The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3). *Journal of Climate*, 2006, 19(11): 2122.
- [76] Flückiger J, Dallenbach A, Blunier T, et al. Variations in atmospheric N₂O concentration during abrupt climatic changes. *Science*, 1999, 285(5425): 227-230.
- [77] Flückiger J, Monnin E, Stauffer B, et al. High-resolution Holocene N₂O ice core record and its relationship with CH₄ and CO₂. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(1): 10-1-10-8.
- [78] Monnin E, Steig E J, Siegenthaler U, et al. Evidence for substantial accumulation rate variability in Antarctica during the Holocene, through synchronization of CO₂ in the Taylor Dome, Dome C and DML ice cores. *Earth & Planetary Science Letters*, 2004, 224(1/2): 45-54.
- [79] Peltier W R. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) model and Grace. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2004, 32(32): 111-149.
- [80] Hostetler S W, Bartlein P J. Simulation of lake evaporation with application to modeling lake level variations of Harney-Malheur Lake, Oregon. *Water Resources Research*, 1990, 26(10): 2603-2612.
- [81] Editorial Committee of China's Physical Geography, Chinese Academy of Sciences. The Physical Geographical Climate in China. Beijing: Science Press, 1984. [中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理气候. 北京: 科学出版社, 1984.]
- [82] Wu Haibin, Guo Zhengtang. Evolution and drought events in arid region of northern China since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(6): 548-558. [吴海斌, 郭正堂. 末次盛冰期以来中国北方干旱区演化及短尺度干旱事件. 第四纪研究, 2000, 20(6): 548-558.]
- [83] Li Y, Morrill C. Lake levels in Asia at the Last Glacial Maximum as indicators of hydrologic sensitivity to greenhouse

- gas concentrations. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 60(2): 1-12.
- [84] Qin B, Yu G. Implications of lake level variations at 6 ka and 18 ka in mainland Asia. *Global & Planetary Change*, 1998, 18(1/2): 59-72.
- [85] Members C. Climatic changes of the last 18,000 years: Observations and model simulations. *Science*, 1988, 241(4869): 1043-1052.
- [86] Qin Boqiang, Harrison S P, Yu Ge, et al. The geological evidence of the global moisture condition changes since the Last Glacial Maximum: The construction of global lake status data base and the synthesis in the large spatio-temporal scale. *Journal of Lake Sciences*, 1997, 9(3): 201-210. [秦伯强, Harrison S P, 于革, 等. 末次盛冰期以来全球湿润状况的地质证据: 全球古湖泊数据库及其湖水位变化的大尺度时空分析. *湖泊科学*, 1997, 9(3): 201-210.]
- [87] Li Wanli, Wang Keli, Fu Shenming, et al. The interrelationship between regional westerly index and the water vapor budget in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(1): 28-34. [李万莉, 王可丽, 傅慎明, 等. 区域西风指数对西北地区水汽输送及收支的指示. *冰川冻土*, 2008, 30(1): 28-34.]

The response of lake records to the circulation system and climate zones in China since the Last Glacial Maximum

LI Yu, LIU Yuan

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education),
College of Earth and Environmental Sciences, Center for Hydrologic Cycle and Water
Resources in Arid Region, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to investigate the spatial-temporal evolution pattern and potential driving mechanism of lakes on a long time-scale, based on the Köppen climate classification, we classify Chinese climate as 4 climate zones, 6 climatic types and select 34 lakes which have reliable dating, and its lake records have certain continuity since the Last Glacial Maximum. At the same time, NCEP/NCAR $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 1900-2015 grid data are used to verify our traditional monsoon region which is defined based on water vapor transportation field. Meanwhile, this study uses a series of models, i.e., the NCAR CCSM 3, a lake energy-balance and a lake water-balance model, to examine the lake-level evolution process and potential driving mechanism in monsoonal Asia and arid central Asia since the Last Glacial Maximum. Our results indicate that the evolution of lakes in China is mainly affected by millennial-scale atmospheric circulation, and lake-level changes in all climate zones have no obvious regularity. In the monsoon region, there are two kinds of evolution rules, a relatively high lake-level in the early and mid-Holocene and a relatively high lake-level in the Last Glacial Maximum and early Holocene. Meanwhile, in the arid region of East Asia controlled by westerlies, there are also two kinds of evolution rules. One is that the lake-level in mid- and late Holocene is relatively high, and the other is that the lake-level is relatively high in mid-Holocene and the Last Glacial Maximum. This study provides a large amount of new evidence, which reflects the past climate change and mechanism of lake evolution, as well as a new perspective to comprehensively understand lake-level changes since the Last Glacial Maximum.

Keywords: lake; the Last Glacial Maximum; Holocene; atmospheric circulation; climate zone