

全新世湖泊沉积物 TOC、C/N 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 对千年尺度气候变化的响应

周雪花 李 育 张成琦 王 岳

(兰州大学资源环境学院, 干旱区水循环与水资源研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 湖泊沉积物有机地化指标在古气候解释中具有复杂性和多解性。TOC、C/N 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 作为 3 种常用的有机地化指标, 现已广泛运用于东、中亚全新世气候变化研究中。以这 3 种指标为例综述了东、中亚全新世湖泊沉积有机地化指标的变化机制及影响因素。根据数据的综合分析对比, 大部分湖泊全新世沉积物 TOC 百分含量较高时, C/N 比值也较高, 这与沉积物有机质的来源有关, 因两者 TOC 和 C/N 作用机制不同, 也存在少数湖泊, 其两者对应关系不明显; 同一湖泊 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 C/N 对应关系相似; 由于不同区域影响有机地化指标的因素不同, TOC、C/N 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 间的关系存在区域差异, 据此可将研究区分为中纬度地区、青藏高原区和低纬度季风区。上述区域规律存在于研究中所选的大部分湖泊, 由于有机地化指标作用机理的复杂性, 也存在不符合这种规律的湖泊, 因而上述结论有待于进一步讨论。

关键词: 湖泊沉积; 全新世; 有机地球化学指标; 气候变化; 东、中亚

中图分类号: P534.63

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2013)04-0001-09

1 引言

湖泊沉积物有机地球化学记录现已广泛运用于全新世气候变化研究中^[1-3]。TOC、C/N 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 是古气候研究常用的有机地化指标, 是古气候、古生态信息的良好载体^[4-5], 可以反映流域初级生产力以及沉积环境对有机质的保存能力^[6-7], 也可指示古植被类型和沉积物有机质的来源^[8-10]。

湖泊沉积物有机地化指标受控于有机质的来源、运移路径、沉积过程、成岩作用以及保存能力^[11], 反映的信息丰富, 在古气候解释中也存在复杂性和多解性^[12-14]。TOC、C/N 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 多用于流域性的古气候重建, 虽然在已有研究中也提出了上述复杂性, 但仍然没有从区域上对比 3 者

变化机制及规律。因此, 我们有必要详细了解各环境代用指标的变化机制及影响因素, 从区域上对比指标间的关系及对环境变化的响应, 为过去全球变化研究提供有益参考。

东、中亚地区是全新世环境变化研究的热点区域^[15-17], 且湖泊沉积物有机地化指标作为重要的研究手段现已广泛应用于该区域^[18-19], 我们收集了该区域 21 个湖泊的 TOC、C/N、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 数据作为研究材料展开上述研究(如图 1 和表 1)。

2 研究区

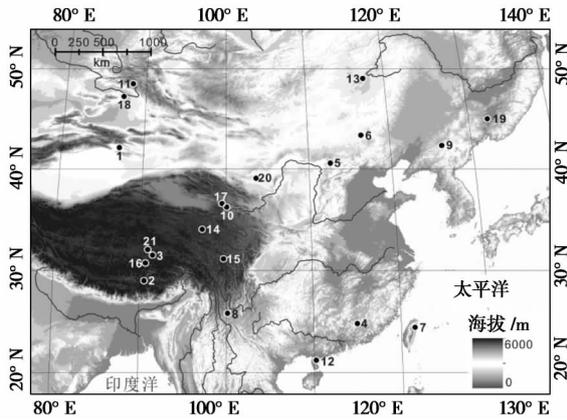
东、中亚地区地形复杂, 平原、高原、山地、丘陵、盆地纵横展布。植被水平地带性分布与垂直地带性分布交错。因受季风、西风带不同

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2013-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371009 #1001116); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(LZUJBK-2013-127) 共同资助

作者简介: 周雪花(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为古湖泊演化与古气候。Email: zhouxh85@126.com。

通信作者: 李 育。Email: liyu@lzu.edu.cn。



黑点为所选湖泊的位置(湖泊名称见表 1)

图 1 研究区示意图

Fig. 1 Map of East and Central Asia

性质环流控制,再加上青藏高原的作用,气候类型复杂多样,主要包括典型的大陆性半干旱—干旱气候、季风气候和高原气候,因地形、纬度、海陆分布等因素影响,这些气候区内部又存在差异。干旱、半干旱气候区内,水分是植被生长的主要限制性因素,大部分地区年降水量小于 200 mm。高原气候区南部年平均气温在 5℃

以上,年降水量 350 mm 以上,最大可达到约 4 500 mm。高原气候区北部,年均温小于 5℃,年降水量小于 350 mm,最小可达到 15 mm。在中国秦淮线以南季风气候区,年均温大于 14℃,年降水量 800~2 000 mm;秦淮以北,年均温小于 14℃,最小可达到 -5℃以下,年降水量 400~750 mm。

3 数据与方法

选择东、中亚全新世湖泊记录时采取了以下标准。1) 选择较为常用的有机地化指标——TOC、C/N 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 作为代表;2) 所选湖泊必须包含至少两种指标数据(表 1);3) 所选指标数据都有相应的年代序列,为了统一对比,研究中的年代数据都是已校正过或用 Calib 6.1 软件重新校正后的日历年代序列,且每个湖泊记录的年代序列都在全新世阶段;5) 所选湖泊都位于东、中亚地区。基于上述标准,我们最终选择了东、中亚地区 21 个湖泊的相关数据进行分析(表 1)。

表 1 所选东、中亚湖泊位置及湖泊沉积物指标类型

Table 1 List of lakes from East and Central Asia used in this review

序号	湖泊名称	地理位置	海拔 /m	指标类型	数据来源
1	博斯腾湖	42°05'N, 87°03'E	1 048	TOC, C/N	Zhang ^[20] <i>et al.</i> 2010.
2	沉错	28°56'N, 90°35'E	4 420	TOC, C/N	Zhu ^[21] <i>et al.</i> 2009.
3	错鄂湖	31°28'N, 91°30'E	4 532	TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$	Wu ^[22] <i>et al.</i> 2006.
4	大湖	24°45.5'N, 115°02.2'E	246	C/N, $\delta^{13}\text{C}$	Zhong ^[23] <i>et al.</i> 2010.
5	岱海	40°33'N, 112°39'E	1 220	TOC, C/N	Xiao ^[24] <i>et al.</i> 2006.
6	达里湖	43°15'N, 116°37'E	1 226	TOC, C/N	Xiao ^[25] <i>et al.</i> 2008.
7	翠峰湖	24°31.9'N, 121°36.2'E	1 850	TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$	Selvaraj ^[26] <i>et al.</i> 2012.
8	洱海	25°47'N, 100°12'E	1 974	TOC, $\delta^{13}\text{C}$	Shen ^[27] <i>et al.</i> 2005.
9	二龙湾玛珥湖	42°18'N, 126°22'E	722	TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$	You ^[28] <i>et al.</i> 2012.
10	更尕海	36°11'N, 100°06'E	3 000	TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$	Song ^[29] <i>et al.</i> 2012.
11	Hoton - Nur	48°38'N, 88°17'E	2 083	TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$	Rudaya ^[30] <i>et al.</i> 2012.
12	湖光岩玛珥湖	21°09'N, 110°17'E	87.6	TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$	Liu ^[31] <i>et al.</i> 2005.
13	呼伦湖	49°0'N, 117°25'E	545	TOC, $\delta^{13}\text{C}$	Hu ^[32] <i>et al.</i> 2000.
14	寇查湖	34°0'N, 97°12'E	4 540	TOC, $\delta^{13}\text{C}$	Aichner ^[33] <i>et al.</i> 2010.
15	纳楞湖	31°06'N, 99°45'E	4 200	TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$	Kramer ^[34] <i>et al.</i> 2010.
16	纳木错	30°42'N, 90°40'E	4 718	TOC, C/N	Zhu ^[35] <i>et al.</i> 2008.
17	青海湖	36°32'N, 99°36'E	3 200	TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$	Shen ^[18] <i>et al.</i> 2005.
18	乌伦古湖	47°12'N, 87°17'E	479	TOC, $\delta^{13}\text{C}$	Jiang ^[36] <i>et al.</i> 2007.
19	兴凯湖	44°57'N, 132°25'E	69	TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$	吴健 ^[37] 等. 2010.
20	猪野泽	39°03'N, 103°40'E	1 309	TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}$	Li ^[38] <i>et al.</i> 2012.
21	兹格塘错	32°04'N, 90°50'E	4 560	TOC, $\delta^{13}\text{C}$	Wu ^[39] <i>et al.</i> 2007.

在研究中 我们重新提取了这 21 个湖泊的有机地化记录 绘制了每个湖泊沉积物有机地化指标在全新世阶段内的变化曲线(图 2、图 3) 分析每个指标在全新世阶段内的整体变化趋势 对比了 TOC 与 C/N、TOC 与 $\delta^{13}C_{org}$ 、C/N 与 $\delta^{13}C_{org}$ 在全新世阶段内的对应关系。根据对比结果将东、中亚地区分为不同的区域进行指标变化机制探讨和影响因素分析(图 4)。

4 结 果

通过对东、中亚 21 个湖泊有机地化指标数据的综合分析和对比发现 该区域湖泊沉积物 TOC、C/N、 $\delta^{13}C_{org}$ 间存在不同的对应关系 主要表现在 $\delta^{13}C_{org}$ 与 TOC 和 C/N 间的关系上 如表 2 所示。

表 2 东、中亚湖泊沉积物 TOC、C/N、 $\delta^{13}C_{org}$ 间的关系

Table 1 Relationship between TOC, C/N and $\delta^{13}C_{org}$

湖 泊	1	2	5	6	16	3	4	10	12	14	17	7	8	9	11	13	15	18	19	20	21
TOC & C/N	+	+	+	+	+	+	\	+	+	\	+	+	\	+	+	\	+	+	+	+	\
TOC & $\delta^{13}C$	\	\	\	\	\		+	\	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C/N & $\delta^{13}C$	\	\	\	\	\	+	+	+	+	\	+	-	\	-	-	\	-	\	-	-	\

注 “+”表示变化趋势相似,“-”表示变化相反,“\”表示无相应数据

研究区这 21 个湖泊全新世沉积物中 当 TOC 百分含量较高时 C/N 比值也较高 TOC 较低时 C/N 亦较低 如图 2 和表 2 所示。这可能与湖泊有机质来源以及不同植被生物量的差异有关。同一湖泊沉积物 TOC 和 $\delta^{13}C_{org}$ 、C/N 和 $\delta^{13}C_{org}$ 两组对应关系相似 但在不同区域湖泊间存在差异。其中沉积物 $\delta^{13}C$ 值偏正时 TOC 百分含量和 C/N 比值都较高 $\delta^{13}C$ 值偏负时 TOC

百分含量和 C/N 比值都较低的湖泊有错鄂湖、湖光岩玛珥湖、寇查湖、青海湖、大湖、更尔海; $\delta^{13}C$ 值偏正时 TOC 百分含量和 C/N 比值都较低 $\delta^{13}C$ 值偏负时 TOC 百分含量和 C/N 比值都较高的湖泊有翠峰湖、洱海、二龙湾玛珥湖、Hoton - Nur、呼伦湖、纳楞错、乌伦古湖、兴凯湖、猪野泽; 博斯腾湖、沉错、岱海、纳木错、达里湖、兹格塘错无明显对应关系或缺少数据。如图 3 和表 2 所示。

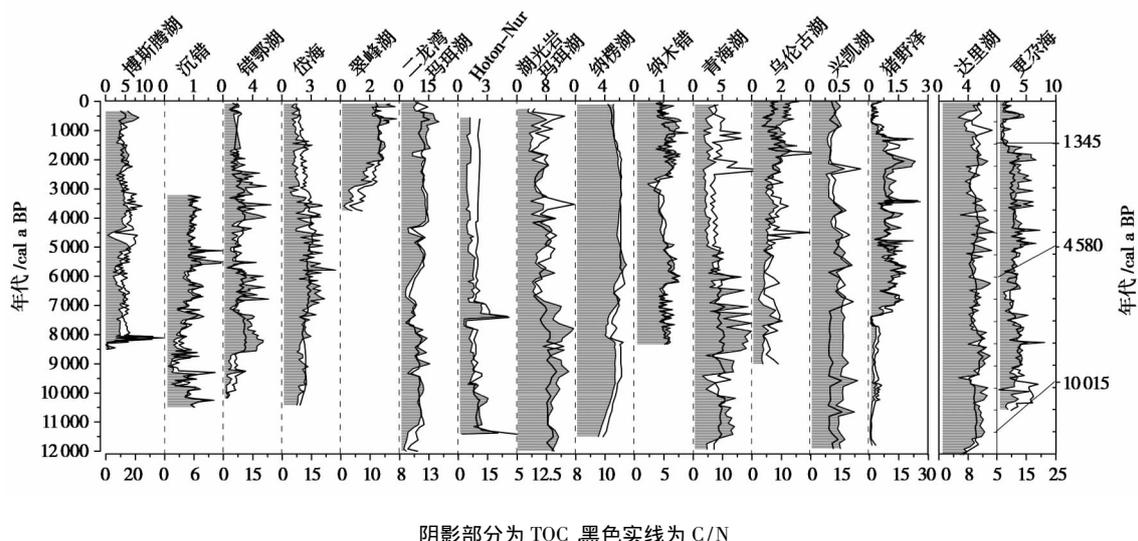


图 2 东、中亚全新世湖泊沉积物 TOC 与 C/N 变化趋势及关系
Fig. 2 Relationship between Total Organic Carbon (TOC) and C/N

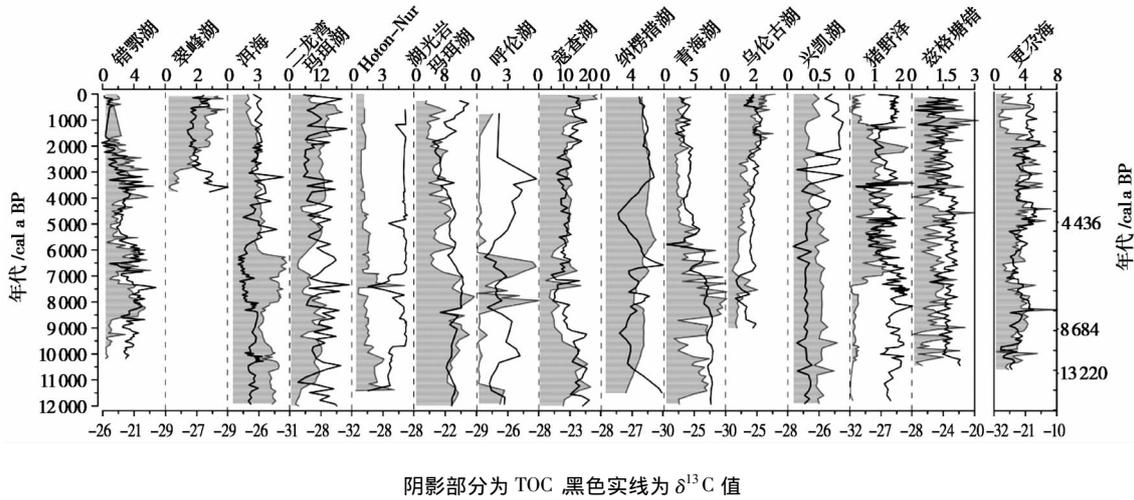


图 3 东、中亚全新世湖泊沉积物 TOC 与 $\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势及关系

Fig. 3 Relationship between TOC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$

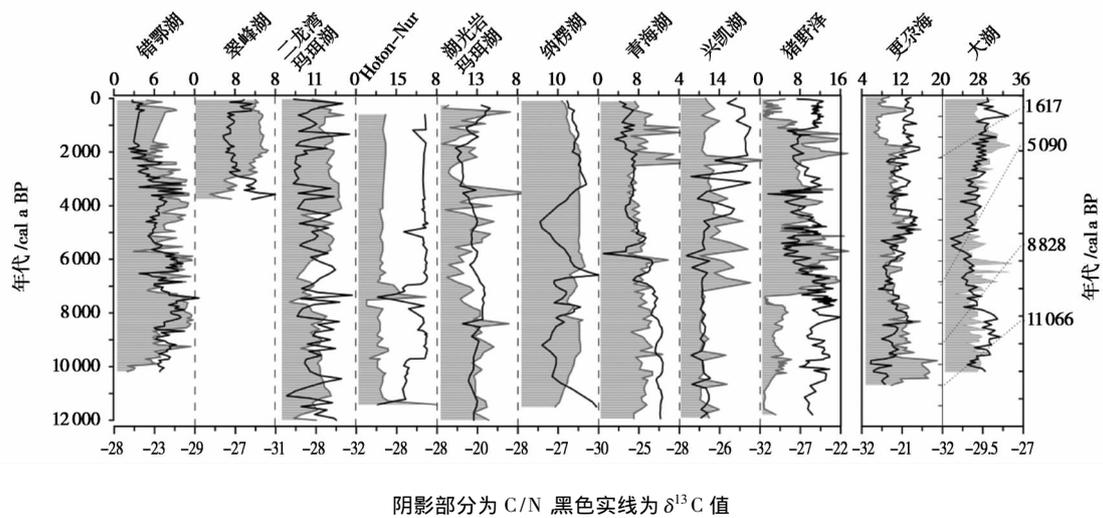


图 4 东、中亚全新世湖泊沉积物 C/N 与 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势及关系

Fig. 4 Relationship between C/N and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$

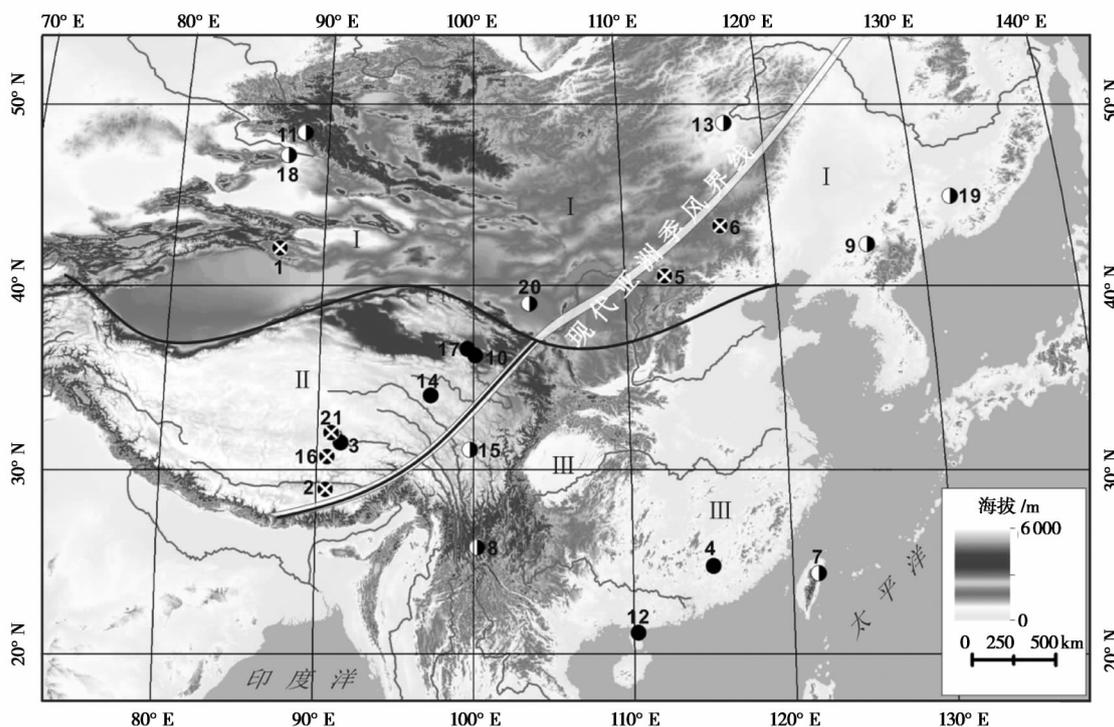
通过对分析结果的综合对比,我们可以将研究区分为: I. 中纬度地区、II. 青藏高原区、III. 低纬度季风区(如图4)。

I. 中纬度地区 包括博斯腾湖、岱海、达里湖、二龙湾玛珥湖、Hoton-Nur、呼伦湖、乌伦古湖、兴凯湖、猪野泽等9个湖泊。全新世湖泊沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正时, TOC 百分含量和 C/N 比值都较低。

II. 青藏高原区 包括沉错、错鄂湖、更尔海、寇查湖、纳木错、青海湖、兹格塘错。该区域

全新世湖泊沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正时, TOC 百分含量和 C/N 比值也较高 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负时, TOC 百分含量和 C/N 比值较低。

III. 低纬度季风区 该区域海拔1800 m 以上的高山湖泊, 如翠峰湖、洱海、纳楞湖全新世沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正时, TOC 百分含量和 C/N 比值都较低; 大湖、湖光岩玛珥湖等低海拔湖泊(海拔 < 300 m) $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正时, TOC 百分含量和 C/N 比值也较高 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负时, TOC 百分含量和 C/N 比值较低。



图中全色黑点代表 $\delta^{13}C$ 分别于 TOC 和 C/N 呈相似变化，
半色点代表呈相反变化，带叉圆点代表无明显对应关系或缺少数据

图 5 东、中亚地区分区图——根据湖泊沉积物有机地化指标间的关系

Fig. 5 Zoning map showing the distribution of lakes from East and Central Asia

5 讨论

东、中亚湖泊沉积物 TOC、C/N、TN 和 $\delta^{13}C_{org}$ 常被用于不同尺度的流域性的古气候研究^[23 27 33]。TOC、C/N 和 $\delta^{13}C_{org}$ 这 3 种有机地化指标在古气候解释中存在复杂性和多解性^[11-14 40]，国内湖泊 TN 数据在同一湖泊沉积中报道的数据呈数量级差异^[41]，相对于 TOC、C/N 和 $\delta^{13}C_{org}$ 这 3 种有机地化指标，TN 的变化相对不稳定，因而在本项研究中较少考虑到这 21 个湖泊的沉积物 TN 变化。已有学者对比了东、中亚不同区域全新世气候变化模式，发现该区内陆干旱区、季风区以及季风边缘区全新世气候变化模式存在差异^[1 42-43]，但该区还缺少对环境代用指标变化机制及影响因素的区域对比，这项工作将为古气候研究提供有益依据。

湖泊沉积物 TOC 反映湖泊及流域的初级生产力状况^[4-5]。C/N 反映湖泊有机质来源，

内源水生植物的 C/N 较低，一般小于 10，外源陆生植物的 C/N 可达到 14 ~ 20^[9 44]。不同光合作用途径植物的 $\delta^{13}C_{org}$ 值不同， C_3 植物 $\delta^{13}C_{org}$ 值在 -21‰ ~ -33‰ 之间， C_4 植物在 -9‰ ~ -21‰ 之间^[13]。CAM 植物对湖泊有机质贡献较小，本研究中不予考虑。Nakai^[12] 和 Pearson^[14] 曾对湖泊沉积物 $\delta^{13}C_{org}$ 的气候意义得出过相反的结论，也有学者发现高原表土和植物 $\delta^{13}C_{org}$ 值有随海拔变化的现象^[45-46]，这都说明 $\delta^{13}C_{org}$ 在气候解释中较为复杂。

东、中亚全新世湖泊沉积物 TOC 百分含量较高时，C/N 比值也较高，TOC 低值阶段对应 C/N 低值阶段(表 2, 图 2)。这可能是因为在气候适宜期，流域生产力较高，输入湖泊的外源有机质较多，且陆生植物有较高的生物量^[47-48]，因而 TOC 和 C/N 都较高；当流域生产力降低，TOC 含量降低，外源有机质比例减小，C/N 也降低。同一湖泊 TOC 和 $\delta^{13}C_{org}$ 的对应关系和 C/N 与 $\delta^{13}C_{org}$ 的对应关系相同，但在区

域间存在差异。如表 2、图 4 所示。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 TOC、C/N 的关系存在明显区域差异(图 4)。研究中所选的 21 个湖泊中,岱海、青海湖和达里湖沉积物 C/N 比值随着 TOC 的变化并不明显,这可能是因为在不同湖泊,作用两者的机理不同所致。

中纬度地区(图 4 中区域 I),大部分湖泊全新世沉积物 TOC 百分含量较高时,C/N 比值较高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值相对偏负,TOC、C/N 较低时, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏正。该区大部分区域分布于 40°N 以北,植被以 C_3 为主, C_4 类植物种数较少^[49-50]。在全新世气候湿润期,湖泊及流域生产力提高,TOC 上升,大量外源有机质入湖使得 C/N 值升高,因外源有机质主要为 C_3 植物($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏负)提供,因而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值却偏负。在气候相对干旱期,则出现相反效应,且植物在早期会为减少水分蒸发而关闭气孔,引起植物叶内 CO_2 浓度下降,光合作用产物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值升高^[51],也会使 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值升高。一年当中 C_3 类植物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值也有旱季较雨季明显偏重的现象^[52]。水分是制约干旱、半干旱区生态环境发展及植被生长的主要因子^[53-54],王国安等^[55]对北方(包括中纬季风区)植物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与温度相关性分析中得出,几种植物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 对年均温的平均变化仅有 0.3‰,因此,温度对中纬度地区有机地化指标的影响并不显著,水分可能为主要影响因素。

青藏高原区(区域 II)大部分湖泊全新世沉积物 TOC 较高时,C/N 比率也较高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏正。这可能是由温度变化导致的 CO_2 分压变化所致。在全新世暖期,高原初级生产力较高,TOC 上升,且湖泊沉积中外源有机质输入量增加,C/N 上升,但温度的上升导致大气压力降低,使植物叶片内、外 CO_2 分压比降低,大气 CO_2 进入叶内时碳同位素分馏值减少,造成同位素变重^[40]。在高原冷期则产生相反的效应。另外,青藏高原平均海拔 4 500 m,这一高度基本以 C_3 植物为主,随着气温升高, C_3 植物植物细胞气腔内的 CO_2 分压降低,促使植物呼吸速率减慢,也会导致光合作用产物的同位素偏重。兹格塘错沉积物 TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、C/N 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 无明显对应关系,可能受到了岩性、沉积过程或

TOC 含量的影响。

低纬度季风区(区域 III)的低海拔湖泊和 高山湖泊,全新世沉积物 TOC、C/N 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的对应关系不同。低海拔湖泊沉积物 TOC 百分含量较高时,C/N 比值较高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值相对偏正。这可能与温度变化导致的植被类型变化有关。季风气候雨热同期,降水丰富时流域生产力较高,入湖外源有机质量多,TOC 和 C/N 升高,高温环境使得喜高温的 C_4 植物($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏正)占优势, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值升高。在气候冷期,植物生长受限,TOC、C/N 较低,湖泊绝对碳含量减少,有机碳相对亏损 ^{13}C ,有较轻的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值^[12],再加上喜低温的 C_3 植物增加,使得 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏负。南京固城湖($31^\circ16'\text{N}$, $118^\circ54'\text{E}$),海拔较低,其沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值与气温也成正比关系^[56],且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与有机碳含量也呈同步变化。高山湖泊全新世沉积物 TOC 百分含量较高时,C/N 比值较高,而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值相对偏负,TOC、C/N 较低时, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏正。这可能与海拔上升导致的热量条件变化有关。由于海拔较高,气温相对较低,以喜低温的 C_3 植物为主,在流域植被覆盖度较大时期,TOC、C/N 值较高, C_3 植物的有机质贡献量也较大,使得 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏负,在气候干冷时期,出现相反的效应。

综上所述,东、中亚不同区域湖泊沉积物 TOC、C/N、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 间之所以呈现出不同对应关系,主要是因为不同区域对 3 种指标的影响因素不同。值得注意的是,上述关系存在于所选的大部分湖泊中,但也存在不符合上述规律的湖泊,因为就整个东、中亚地区来讲,不论是气候条件还是地质要素都较为复杂,而且地质时期的环境变化只是通过各种自然指标的推理所得,指标的作用机制也较为复杂,所以上述规律还有待进一步证实和讨论。

6 结 论

东、中亚全新世湖泊沉积物 TOC、C/N 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 间的关系及其影响因素存在区域差异,根据它们间的关系可以将研究区分为中纬度地区、青藏高原区、低纬度季风区。

研究区大部分湖泊的数据显示,同一湖泊

全新世沉积物 TOC 百分含量较高时,C/N 比值也较高。这可能与湖泊有机质来源有关,气候适宜期,陆地植被覆盖度高,沉积物外源有机质输入量增加,TOC 和 C/N 上升,反之亦然。但因两者作用机制不同,也存在沉积物 C/N 随 TOC 的变化波动不明显的湖泊。

大部分中纬度地区和低纬度季风区的高山湖泊中,沉积物 TOC 含量和与 C/N 比值较高时 $\delta^{13}C_{org}$ 相对偏负,前两者值较低时 $\delta^{13}C_{org}$ 相对偏正。这是因为水分变化引起的 C_3 植物对沉积物有机质贡献量的变化,使得 $\delta^{13}C_{org}$ 相应变化。

在大部分青藏高原区和低纬度季风区低海拔的湖泊中,全新世沉积物 TOC 百分含量较高时,C/N 较高 $\delta^{13}C_{org}$ 偏正。青藏高原区主要是由于气候冷暖变化导致的 CO_2 分压变化,使得 $\delta^{13}C_{org}$ 值发生变化。低纬度季风区,温度变化引起的植被类型变化使得 $\delta^{13}C_{org}$ 值变化。

上述对应关系的规律性存在所选取的大部分湖泊,但是作用于这 3 种指标的机制较为复杂,这种规律性还需进一步讨论。

参考文献:

- [1] Zhang J W, Chen F H, Holmes J A *et al.* Holocene monsoon climate documented by oxygen and carbon isotopes from lake sediments and peat bogs in China: a review and synthesis [J]. *Quaternary Science Reviews* 2011, 30(15): 1973–1987.
- [2] Das O, Wang Y, Donoghue J *et al.* Reconstruction of paleostorms and paleoenvironment using geochemical proxies archived in the sediments of two coastal lakes in northwest Florida [J]. *Quaternary Science Reviews* 2013, 68: 142–153.
- [3] Lee S. H, Lee Y, Yoon H *et al.* East Asian monsoon variation and climate changes in Jeju Island, Korea, during the latest Pleistocene to early Holocene [J]. *Quaternary Research* 2008, 70(2): 265–274.
- [4] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic paleolimnologic and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry* 1997, 27(5–6): 213–250.
- [5] Meyers P A, Vergés E L. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates [J]. *Journal of Paleolimnology* 1999, 21(3): 345–372.
- [6] Meyers P A, Ishiwatari R. Organic Matter Accumulation Records in Lake Sediments [J]. *Physics and Chemistry of Lakes* 2008, 279–328.
- [7] Meyers P A. Organic geochemical proxies [C] // Gornitz V. ed. *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments* Dordrecht: Springer 2009: 659–663.
- [8] Meyers P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(2): 261–289.
- [9] Wagner B, Melles M, Hahne J *et al.* Holocene climate history of Geographical Society, East Greenland – evidence from lake sediments [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 2000, 160(1): 45–68.
- [10] Aravena R, Warner B G, MacDonald G M *et al.* Carbon isotope composition of lake sediments in relation to lake productivity and radiocarbon dating [J]. *Quaternary Research*, 1992, 37(3): 333–345.
- [11] 吴敬禄, 王苏民. 湖泊沉积物有机碳同位素特征及其古气候 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(2): 105–109.
- [12] Nakai N. Carbon isotopic variation and paleoclimatic of sediments from lake Biwa [J]. *Proceeding of the Japan Academy*, 1972, 48(7): 516–521.
- [13] Stuiver M, Yang I C, Denton G H. Climate versus changes in ^{13}C content of the organic component of lake sediments during the late quaternary [J]. *Quaternary Research*, 1975, 5(2): 251–262.
- [14] Pearson F J, Coplen T B. Stable isotope studies of lakes [J]. *Lakes: Chemistry, Geology, and Physics*. New York: Springer-Verlag, 1978: 325–339.
- [15] Xiao J, Chang Z, Wen R *et al.* Holocene weak monsoon intervals indicated by low lake levels at Hulun Lake in the monsoonal margin region of northeastern Inner Mongolia, China [J]. *The Holocene* 2009, 19(6): 899–908.
- [16] Zhao Y, Yu Z. Vegetation response to Holocene climate change in East Asian monsoon – margin region [J]. *Earth – Science Reviews* 2012, 113(1): 1–10.
- [17] Jiang Q F, Ji J F, Shen J, Matsumoto R, *et al.* Holocene vegetational and climatic variation in westerly – dominated areas of Central Asia inferred from the Sayram Lake in northern Xinjiang, China [J]. *Science China Earth Sciences* 2013, 56(3): 339–353.
- [18] Shen J, Liu X Q, Wang S M *et al.* Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years [J]. *Quaternary International* 2005, 136(1): 131–140.
- [19] Cao X, Ni J, Herzschuh U *et al.* A late Quaternary pollen dataset from eastern continental Asia for vegetation and climate reconstructions: Set up and evaluation [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology* 2013, 194: 21–37.
- [20] Zhang C J, Feng Z D, Yang Q L *et al.* Holocene environ-

- mental variations recorded by organic-related and carbonate-related proxies of the lacustrine sediments from Bosten Lake, northwestern China [J]. *The Holocene*, 2010, 20(3): 363–373.
- [21] Zhu L P, Zhen X L, Wang J B, *et al.* A ~30 000-year record of environmental changes inferred from Lake Chen Co., Southern Tibet [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2009, 42(3): 343–358.
- [22] Wu Y H, Lücke A L, Jin Z D, *et al.* Holocene climate development on the central Tibetan Plateau: A sedimentary record from Cuoe Lake [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 2006, 234(2): 328–340.
- [23] Zhong W, Xue J B, Cao J X, *et al.* Bulk organic carbon isotopic record of lacustrine sediments in Dahu Swamp, eastern Nanling Mountains in South China: Implication for catchment environmental and climatic changes in the last 16 000 years [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 38(3): 162–169.
- [24] Xiao J, Wu J, Si B, *et al.* Holocene climate changes in the monsoon/arid transition reflected by carbon concentration in Daihai Lake of Inner Mongolia [J]. *The Holocene*, 16(4): 551–560.
- [25] Xiao J, Si B, Zhai D, *et al.* Hydrology of Dali Lake in central-eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian monsoon variability [J]. *Journal of Paleolimnology* 2008, 40(1): 519–528.
- [26] Selvaraj K, Wei K Y, Liu K K, *et al.* Late Holocene monsoon climate of northeastern Taiwan inferred from elemental (C, N) and isotopic ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) data in lake sediments [J]. *Quaternary Science Reviews* 2012, 37: 48–60.
- [27] Shen J, Yang L Y, Yang X D, *et al.* Lake sediment records on climate change and human activities since the Holocene in Erhai catchment, Yunnan Province, China [J]. *Science China Ser. D Earth Sciences* 2005, 48(3): 353–363.
- [28] You H T, Liu J Q. High-resolution climate evolution derived from the sediment records of Erlongwan Maar Lake since 14 ka BP [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(27): 3610–3616.
- [29] Song L, Qiang M R, Lang L L, *et al.* Changes in palaeoproductivity of Genggahai Lake over the past 16 ka in the Gonghe Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin* 2012, 57(20): 2595–2605.
- [30] Rudaya N, Tarasov P, Dorofeyuk N, *et al.* Holocene environments and climate in the Mongolian Altai reconstructed from the Hoton-Nur pollen and diatom records: a step towards better understanding climate dynamics in Central Asia [J]. *Quaternary Science Reviews* 2009, 28(5): 540–554.
- [31] 刘强, 顾兆炎, 刘嘉麒, 等. 62 ka BP 以来湖光岩玛珉湖沉积物有机碳同位素记录及古气候环境意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质* 2005, 25(2): 115–126.
- [32] Hu S Y, Wang S M, Appel E, *et al.* Environmental mechanism of magnetic susceptibility changes of lacustrine sediments from Lake Hulun, China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences* 2000, 43(5): 534–540.
- [33] Aichner B, Wilkes H, Herzsuh U, *et al.* Biomarker and compound-specific $\delta^{13}\text{C}$ evidence for changing environmental conditions and carbon limitation at Lake Koucha, eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 43(4): 873–899.
- [34] Kramer A, Herzsuh U, Mischke S, *et al.* Late Quaternary environmental history of the south-eastern Tibetan Plateau inferred from the Lake Naleng non-pollen palynomorph record [J]. *Veget Hist Archaeobot* 2010, 19(5–6): 453–468.
- [35] Zhu L P, Wu Y H, Wang J B, *et al.* Environmental changes since 8.4 ka reflected in the lacustrine core sediments from Nam Co, central Tibetan Plateau, China [J]. *The Holocene*, 2008, 18(5): 831–839.
- [36] Jiang Q F, Shen J, Liu X Q, *et al.* A high-resolution climatic change since Holocene inferred from multi-proxy of lake sediment in westerly area of China [J]. *Chinese Science Bulletin* 2007, 52(14): 1970–1979.
- [37] 吴健, 沈吉. 兴凯湖沉积物有机碳和氮及其稳定同位素反映的 28kaBP 以来区域古气候环境变化 [J]. *沉积学报* 2010, 28(2): 365–372.
- [38] Li Y, Wang N A, Li Z L, *et al.* Reworking effects in the Holocene Zhuye Lake sediments: A case study by pollen concentrates AMS ^{14}C dating [J]. *Science China Earth Sciences* 2012, 55(10): 1669–1678.
- [39] Wu Y H, Andreas L, Bernd W, *et al.* Holocene climate change in the Central Tibetan Plateau inferred by lacustrine sediment geochemical records [J]. *Science China Series D: Earth Sciences* 2007, 50(10): 1548–1555.
- [40] 余俊清, 王小燕, 李军, 等. 湖泊沉积有机碳同位素与环境变化的研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2001, 13(1): 72–78.
- [41] 白钰. 哈尔滨信义沟沉积物中碳、氮、磷、硫分布特征及其相关性研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [42] Herzsuh U. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50 000 years [J]. *Quaternary Science Reviews* 2006, 25(1): 163–178.
- [43] 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 [J]. *Quaternary Science Reviews* 2008, 27(3): 351–364.
- [44] Krishnamurthy R V, Bhattacharya S K, Kusumgar S, *et al.* Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and C/N ratios of Karewa lake sediments [J]. *India. Nature*, 1986, 48: 150–152.
- [45] 李相博, 陈践发. 青藏高原(东北部)现代植物碳同位素

- 组成特征及其气候信息[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 325-329.
- [46] 吕厚远, 顾兆炎, 吴乃琴, 等. 海拔高度的变化对青藏高原表土 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的影响[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 399-406.
- [47] 袁力, 赵雨森, 聂远志. 大兴安岭森林-湿地交错带群落生物量的分布格局[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(2): 11-14.
- [48] 姜霞, 王书航, 钟立香, 等. 巢湖藻类生物量季节性变化特征[J]. 环境科学, 2010, 31(9): 2056-2062.
- [49] Ehleringer J R, Cerling T E, Helliker B R. C_4 photosynthesis, atmospheric CO_2 and climate[J]. Oecologia, 1997, 112(3): 285-299.
- [50] Ehleringer J, Björkman O. Quantum yields for CO_2 uptake in C_3 and C_4 plants: dependence on temperature, CO_2 and O_2 concentration[J]. Plant Physiology, 1977, 59(1): 86-90.
- [51] Tieszen L L, Boutton T W. Stable carbon isotopes in terrestrial ecosystem research[M]//Stable isotopes in ecological research. New York: Springer, 1989: 167-195.
- [52] 王国安, 韩家懋. C_3 植物碳同位素在旱季和雨季中的变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(4): 43-47.
- [53] 钱正安, 吴统文, 宋敏红, 等. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 28-35.
- [54] 程国栋, 赵传燕. 西北干旱区生态需水研究[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1101-1108.
- [55] 王国安. 中国北方草本植物及表土有机质碳同位素组成[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2001.
- [56] 沈吉, 王苏民. 湖泊沉积物中有机碳稳定同位素测定及其古气候环境意义[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(4): 400-404.

The Response of Organic Geochemical Proxies in Holocene Lake Sediments to Millennial-scale Climate Change

ZHOU Xue-hua, LI Yu, ZHANG Cheng-qi, WANG Yue

(College of Earth and Environmental Sciences, Center for Hydrologic Cycle and Water Resources in Arid Region, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: The explanation of organic geochemical proxies in lake sediments is complicated in reconstruction of paleoclimate. TOC, C/N and $\delta^{13}\text{C}$ are three frequently-used organic geochemical proxies, being used widely for studying Holocene climate change in East and Central Asia. This paper takes these three proxies for example to discuss the influencing factors and mechanisms of Holocene lacustrine geochemical processes in the study region. According to the results, TOC and C/N show simultaneous changes at a same lake, which is affected by sources of organic matter; relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and TOC is similar to that of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N, but there are some differences between different parts East and Central Asia, since the influencing factors of proxies are different. Based on the characteristics of the relationships between organic geochemical proxies, the study region can be divided into three sub-regions: the mid-latitudes, the Qinghai-Tibet Plateau and the low-latitude monsoon region. The influencing factors of organic geochemical proxies are different among the three sub-regions.

Key words: Lake sediments; Holocene; Organic geochemical proxies; Climate change; East and Central Asia