

# 田洋玛珥湖中更新世以来磁化率特征及其环境意义\*

杨士雄<sup>1</sup>, 郑卓<sup>1</sup>, 宗永强<sup>2</sup>, 李杰<sup>1</sup>, 黄康有<sup>1</sup>

(1. 中山大学地球科学系, 广东广州 510275;

2. 香港大学地球科学系, 中国香港)

**摘要:** 对雷州半岛东南部的田洋玛珥湖 TYC 孔前 40 m 岩芯进行了研究, 结果表明, 磁化率与孢粉有很好的对应关系, 因而磁化率值的高低变化能够作为该区气候环境变化的替代指标。沉积物磁化率与气候变化的关系为: 磁化率的低值与气候暖湿对应; 磁化率的高值则与气候寒冷或温凉相对应。中更新世以来, 田洋玛珥湖气候环境演化经历了 9 个不同的阶段: 346 ~ 301.4 kaBP, 气候相对暖湿。301.4 ~ 248.8 kaBP, 气候寒冷干燥。248.8 ~ 188.8 kaBP, 气候相对暖湿。188.8 ~ 125.2 kaBP, 气候寒冷干燥。125.2 ~ 69.3 kaBP, 气候较为暖湿。69.3 ~ 40.43 kaBP, 气候偏凉。40.43 ~ 25.5 kaBP, 气候偏凉但较上阶段温度低, 此时玛珥湖呈现出沼泽化过渡阶段。25.5 ~ 10.8 kaBP, 气候寒冷干燥, 玛珥湖干枯成为干玛珥湖。10.8 kaBP 以来, 由于后期人类活动对玛珥湖的改造, 致使磁化率值不断升高。

**关键词:** 玛珥湖; 中更新世; 磁化率; 孢粉; 热带华南

**中图分类号:** P534.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2012)03-0121-07

## Characteristics and Environmental Significance of Magnetic Susceptibility of the Tianyang Maar Lake since Middle Pleistocene

YANG Shixiong<sup>1</sup>, ZHENG Zhuo<sup>1</sup>, ZONG Yongqiang<sup>2</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, HUANG Kangyou<sup>1</sup>

(1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Department of Earth Sciences, the University of Hong Kong, Hong Kong, China)

**Abstract:** The Tianyang Maar Lake is situated in the southeastern Leizhou Peninsula, the transitional climate zone between tropical and subtropical region of China. In this paper, a study was carried out on the upper 40 meters of core TYC collected from the Tianyang Maar Lake. The results suggest that magnetic susceptibility (MS) correlates well with pollen records. Thus, variations of MS can be used as an indicator for climate and environmental changes in the Tianyang Maar Lake. Generally, a low MS indicates a warm and humid environmental condition, while a high MS suggests a cold or cool environment. Results of the MS analysis suggest that the environmental history of the Tianyang Maar lake area since the Middle Pleistocene can be divided into 9 stages: 346 ~ 301.4 ka BP, the climate was relatively warm and humid. 301.4 ~ 248.8 ka BP, the climate became relatively cool and dry. 248.8 ~ 188.8 ka BP, the climate was warm and humid. 188.8 ~ 125.2 ka BP, it was cold and dry. 125.2 ~ 69.3 ka BP, the climate was relatively warm and humid. 69.3 ~ 40.43 ka BP, the climate was cool. 40.43 ~ 25.5 ka BP, the climate was cool and the temperature was lower than the former stage, with a swamping transitional environment in Tianyang Maar Lake. 25.5 ~ 10.8 ka BP, the climate got even colder and drier, the water of Tianyang Maar Lake almost dried up. During the last 10.8 ka BP, the existence of human activities has probably resulted in high MS values.

**Key words:** Maar lake; the middle Pleistocene; magnetic susceptibility; pollen; tropical South China

\* 收稿日期: 2011-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072128); 中山大学学校基本科研业务费专项基金资助项目(101gzd08)

作者简介: 杨士雄(1982年生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 郑卓; E-mail: eeszzhuo@mail.sysu.edu.cn

随着全球变化研究的不断深入,建立高分辨率的古气候、古环境指标,重建古气候、古环境记录,已成为日趋迫切的关键问题。在高分辨率的全球变化研究中,极地冰芯,洞穴石笋,陆地湖泊和海洋沉积物一直以来都是主要信息源。这其中,玛珥湖作为陆地湖泊的一种类型,其形成和保存高分辨率气候环境记录方面具有独特的优势,成为当今古气候、古环境研究中的亮点<sup>[1-2]</sup>。在中国,玛珥湖大量分布,可以提供丰富的环境变化信息,这对亚洲乃至全球的气候环境变化研究都具有重要意义。

在古气候记录中,沉积物磁化率作为恢复古气候、古环境状况的良好替代性指标,已经在不同类型沉积物如:黄土、冲积物、湖积物、风沙堆积和南方红土等古气候、古环境研究领域得到了广泛的应用<sup>[3-10]</sup>。但是由于湖泊沉积物磁化率在机制上的复杂性<sup>[11-15]</sup>,湖泊中的磁性矿物的富集、保存、自生成或反磁性矿物作用等均对磁化率会产生影响<sup>[16-17]</sup>,使得不同地域、类型和尺度的湖泊其沉积物磁化率形成机制亦不相同,进而对气候指示意义也有差别<sup>[18]</sup>。

田洋玛珥湖位于我国雷琼地区雷州半岛东南部,其连续 220 多 m 厚的第四系沉积物为研究华南热带地区古气候、古环境演化提供了最佳研究材料。前人对田洋玛珥湖的研究,主要是磁性地层学<sup>[19]</sup>、沉积学<sup>[20-21]</sup>、年代学<sup>[22-23]</sup>、孢粉和微体古生物学<sup>[23-26]</sup>。上述研究为认识长时间序列的热带环境演变过程积累了大量资料。然而,由于 20 世纪 80-90 年代的研究结果无论在测年技术上,还是研究的分辨率精度相对较低,特别是对上部几十米的沉积物研究分辨率很低,使得对该区进行再研究成为必要。2008 年,作者再次对田洋玛珥湖进行了钻探取样,拟重点对上部 40 m 岩芯进行高分辨率古环境与古气候研究。本文以精确定年为基础,通过磁化率分析,结合孢粉指标,探讨该区中更新世以来的气候环境演变,为热带以及中国华南地区全球变化研究提供新的参考依据。

## 2 研究区概况

田洋玛珥湖位于中国广东省雷州半岛的东南部徐闻县曲界区田洋村(20°31.194'N, 110°18.052'E),现是一个洼地状旱玛珥湖。盆地呈 SE-NW 向伸展,平面上近椭圆形,长约 4 100 m,宽约 3 100 m,面积约 8.11 km<sup>2</sup>。四周为火山喷发物形成的低平台地所环抱,其火山碎屑主要由玄武质火山角砾

岩、凝灰岩组成,还含有少量早更新世湛江组砂页岩块,盆地基底为玄武岩<sup>[27]</sup>。湖盆海拔 90 m,附近丘陵山地海拔 250 m 以下。该区是热带季风性气候,主要受东亚季风控制。东亚季风的变迁,即暖湿的西太平洋东南季风和印度洋西南夏季风、冷干的西伯利亚-蒙古冬季风的演变,控制着区内的气温、降水、及湖泊、植被等的演化过程。该区气候炎热湿润,属亚热带海洋性气候,年平均温度 23.3℃。7 月均温为 29~38℃,1 月均温 14~18℃,最低温度记载为 3.8℃,基本上无霜冻<sup>[28]</sup>。年降雨量 1 500~1 700 mm 之间,年蒸发量为 1 700~1 800 mm 之间。雨季(5-10 月)占全年降水的 89%,干湿季较分明,每年 6-9 月为台风季节,多雷阵雨和暴雨,日最大降雨量为 231.9 mm<sup>[29]</sup>。雷州半岛南部的现代植被属南亚热带季风含季雨林的常绿阔叶林,原始森林保存较少。本区现以人工植被为主,地带性植被为半常绿季雨林。在旱地或山坡上,伴随着禾本科和蕨类植物如:芒萁繁盛的开放森林和热带草地发育,而一些半自然林植物树种有:*Ficus*, *Ficus. altissima*, *Antiaris toxicaria*, *Syzygium hancei*, *Elaeocarpus japonicus*, *Artocarpus tonkinensis*, *Antidesma bunius*, *Endospermum chinense* 等<sup>[24-25]</sup>。

## 3 材料与实验方法

2008 年 1 月由中山大学和英国杜伦大学联合在湖心(图 1)完成了 120 m 岩芯取样工作(TYC 孔),并对全部岩芯进行了冷冻保藏。取芯率平均高达 98.7%,整个岩芯颜色变化为:0~6.94 m 黄褐色粘土;6.94~8 m:黑色粘土,含大量植物碎屑;8~19 m:青灰色粘土,含黄褐色火山角砾,及植物碎屑;19~31 m:灰黑色粘土,含黄褐色火山角砾,及少量植物碎屑;31~42 m:深灰色粘土,含少量植物碎屑;42~120 m:青灰硅藻土,部分略带褐色。本文研究对象为岩芯上部 40 m。磁化率样品分析按间隔 5 cm 取样,然后装入 8 mL 无磁性立方体形样品测量盒内,压实,称重,共获取磁化率样品 746 个。之后,在广州大学孢粉实验室利用捷克 AGICO 公司生产的系列卡帕桥(MFK1)磁化率仪对沉积物样品进行低频质量磁化率与高频质量磁化率测量。为了保证测试精度,高、低频质量磁化率均重复测试 3 次,并求其算术平均值。最后计算得频率磁化率。

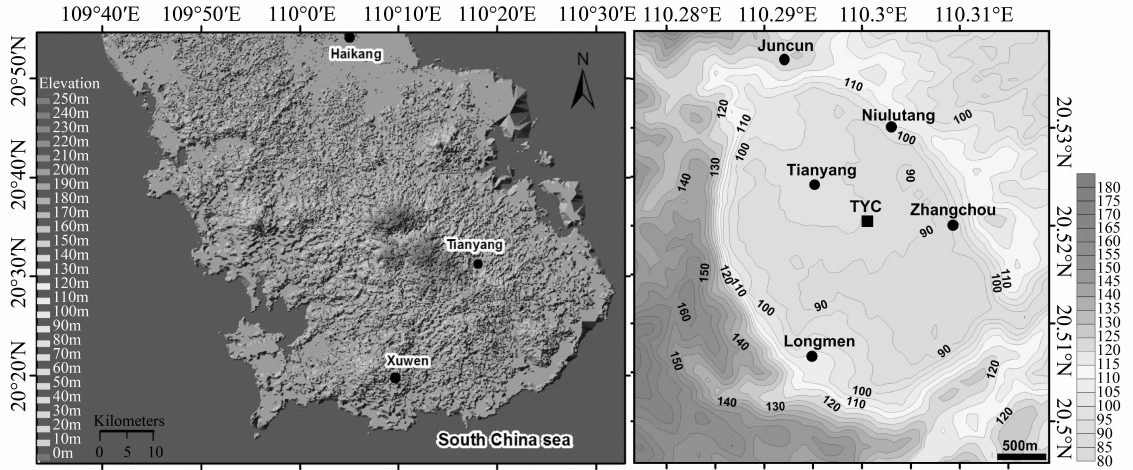


图 1 田洋玛珥湖 TYC 孔地理和位置图

Fig. 1 Location of core TYC in the Tianyang Maar Lake

本文共测定了 7 个 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄和 3 个光释光年龄，测年材料及结果见表 1。所有  $^{14}\text{C}$  年龄数据均采用国际通用的 Calpal\_A 年龄校正软件 Calpal 2007 Hulu 曲线进行校正<sup>[30]</sup>。GZ  $^{14}\text{C}$  年代数据由中国科学院广州地球化学研究所 AMS -  $^{14}\text{C}$  制样实验室和北京大学核物理与核技术国家重点实验室联合完成；BETA  $^{14}\text{C}$  年代数据由美国迈阿密 BETA 实验室完成；SUERC  $^{14}\text{C}$  年代数据由苏格兰大学 SUERC 实验室完成；光释光年龄数据由香港大学光释光实验室完成。由于第四纪测年范围、材料和技术的限制，基于 AMS  $^{14}\text{C}$  和光释光测年数据，将 TYC 孔地层花粉百分含量曲线与 SPECMAP 氧同位素曲线<sup>[31]</sup>进行拟合，建立该孔年代框架（图 2）。根据木本花粉含量与 SPECMAP 氧同位素曲线冰期与间冰期具有很好的一致性变化以及绝对测年数据的指导，我们建立了一系列年龄控制点，控制点年龄之间以线性插值及外推估算其各深度年龄，建立了该钻孔岩芯前 40 m 346 kaBP 约 MIS 9 阶段以来的湖泊沉积序列。

表 1 田洋玛珥湖 TYC 孔剖面年代数据

Table 1 Chronology date for the profile of core TYC in Tianyang maar lake

实验室编号	深度 cm	测年 材料	测年方法	AMS $^{14}\text{C}$ 年龄	校正年龄
				aBP	aBP
SUERC30578	116	炭屑	$^{14}\text{C}$ AMS	11 538 ± 49	13 440 ± 80
SUERC30579	268	炭屑	$^{14}\text{C}$ AMS	23 962 ± 189	28 860 ± 380
GZ26653	587	黑色泥炭	$^{14}\text{C}$ AMS	27 670 ± 116	32 180 ± 160
BETA281924	692	炭屑	$^{14}\text{C}$ AMS	29 180 ± 140	33 640 ± 280
SUERC30580	693	炭屑	$^{14}\text{C}$ AMS	31 470 ± 482	35 400 ± 490
GZ2666 - 5	746	黑色泥炭	$^{14}\text{C}$ AMS	35 148 ± 136	40 250 ± 850
BETA281925	1 310	植物碎屑	$^{14}\text{C}$ AMS	> 43 500	-
TYC017Q	1 630	细粉砂	OSL	-	129 000 ± 19 000
TYC017F	1 630	细粉砂	OSL	-	132 000 ± 20 000
TYC023Q	2 250	细粉砂	OSL	-	176 000 ± 21 000

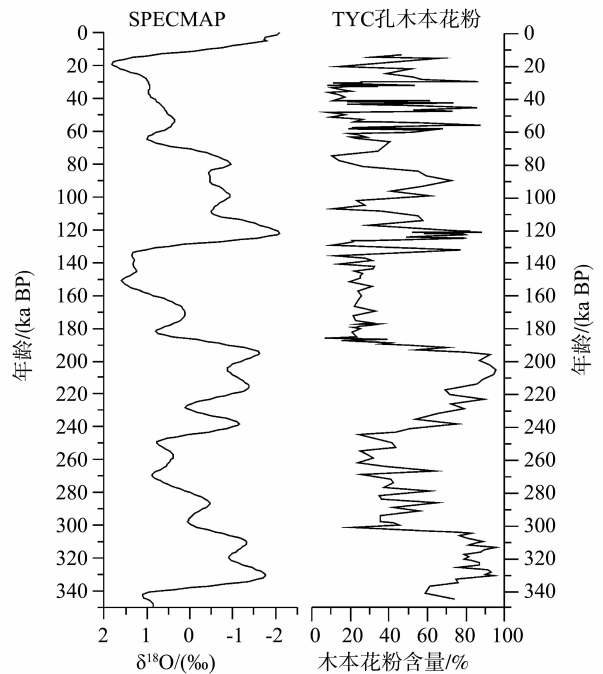


图 2 田洋 TYC 孔上部 40 m 木本植物花粉含量与 SPECMAP 氧同位素曲线年代拟合图

Fig. 2 Chronological correlation between the arboreal pollen percentage of the upper 40 meters of core TYC in Tianyang and the oxygen isotope curve of SPECMAP<sup>[31]</sup>.

## 4 结果与讨论

### 4.1 磁化率环境意义

在陆相湖泊中，沉积物磁化率对环境变化的响应一直处于讨论阶段。由于湖泊所处地理位置、当地地质地貌条件和气候系统的不同，其古环境指示意义却不尽相同。首先，物质来源是湖泊沉积物磁化率变化的主导因素<sup>[32]</sup>。在气候温暖湿润期，大

量降水带来大量的碎屑物质在湖泊沉积, 导致磁化率升高; 反之在气候寒冷干早期, 碎屑来源减少磁化率较低。其次, 湖泊周围地表植被覆盖也会对磁化率影响<sup>[33]</sup>。在物源相对稳定的地区, 植被覆盖度较低时, 水动力对地表的侵蚀强烈, 带入大量碎屑物质到湖中沉积, 沉积物的磁化率较高; 反之, 当物源区植被覆盖度较高时, 水动力对地表的侵蚀减弱, 湖泊中碎屑物沉积减少, 沉积物的磁化率较低。再次, 在气候温暖湿润期, 湖泊生产率较高, 湖中的生物活动和细菌作用导致有机质分解并消耗大量氧, 形成稳定的还原环境, 软磁性细颗粒的磁铁矿会被分解, 湖内沉积物中细颗粒亚铁磁性矿物的含量减少, 磁化率降低; 反之在气候寒冷干燥期, 湖泊较小, 生产率较低, 对磁性矿物影响较小<sup>[34-35]</sup>。然而, 玛珥湖的封闭性沉积实际上反映了当地的气候特别是降雨量的变化以及湖盆植被覆盖状况。田洋玛珥湖剖面磁化率表现出与孢粉有很好的对应关系 (图 3)。在气候温暖湿润时期, 湖面较高, 湖盆出露少, 湖盆上植被覆盖较好, 通过降水带入湖泊中沉积的碎屑物质含量较低, 导致磁性矿物 (磁铁矿等) 减少, 磁化率较小; 另一方面, 在寒冷干燥的气候环境时期, 大气降水较少, 湖面降低, 湖盆大面积出露, 湖盆上植被覆盖较

差, 即使是相对较小的降水, 也能将湖盆上的大量碎屑物质带入湖中沉积, 导致该时期磁化率值较高。据此, 磁化率增高主要受控于外源磁铁矿输入量增加, 其高值主要反映降水减少, 湖面的下降, 降水对湖盆冲刷将其大量的磁性矿物带入湖中心沉积, 同时也叠加降温的信号<sup>[36]</sup>; 反之, 气候温暖湿润, 降水增加, 磁化率值较低。相邻地区的湖光岩玛珥湖磁化率结果也以此相互印证<sup>[37]</sup>。

#### 4.2 田洋玛珥湖中更新世以来的古环境演化

田洋玛珥湖 TYC 孔上部 40 m 岩芯剖面磁化率变化特征显著, 由于样品中细颗粒磁性矿物对高频磁场的滞后所致<sup>[38]</sup>, 高频质量磁化率的值较低频质量磁化率值略低。低频质量磁化率在  $(0.10 \sim 128.45) \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  之间变化, 平均值为  $31.66 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。高频质量磁化率在  $(0.10 \sim 123.81) \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  之间变化, 其平均值为  $30.52 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。高频和低频质量磁化率这两个参量的变化趋势是一致的。因此, 下面仅讨论低频质量磁化率 (简称磁化率)。考虑到湖泊中磁化率的形成机制的复杂性, 结合孢粉指标<sup>[39]</sup>对湖泊磁化率所反映的古气候与古环境进行探讨。根据孢粉以及磁化率的变化规律, 将田洋玛珥湖地区中更新世以来的古环境演化划分为 9 个阶段 (表 2)。

表 2 田洋玛珥湖 TYC 孔各阶段磁化率特征

Table 2 Characteristics of magnetic susceptibility each stage of the core TYC in Tianyang maar lake  $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$

分带	深度/m	年龄/kaBP	样品数	最小值	最大值	平均值	MIS 阶段
A	40 ~ 35	346 ~ 301.4	100	0.44	41.50	10.79	~ MIS 9
B	35 ~ 30.5	301.4 ~ 248.8	88	20.71	43.00	28.89	~ MIS 8
C	30.5 ~ 26	248.8 ~ 188.8	87	8.64	47.96	20.01	~ MIS 7
D	26 ~ 18	188.8 ~ 125.2	150	14.30	128.45	54.18	~ MIS 6
E	18 ~ 13.05	125.2 ~ 69.3	95	5.66	68.33	26.02	~ MIS 5
F	13.05 ~ 7.5	69.3 ~ 40.43	104	0.18	50.07	32.42	~ MIS 4 + 早 MIS 3
G	7.5 ~ 2.35	40.43 ~ 25.5	95	0.1	67.68	31.91	~ MIS 3 (中 + 晚)
H	2.35 ~ 0.9	25.5 ~ 10.8	19	20.66	74.18	31.79	~ MIS 2
I	0.9 ~ 0	10.8 ~ 0	8	54.72	76.96	65.18	~ MIS 1

346 ~ 301.4 kaBP, 磁化率为低值区。孢粉中木本植物含量较高, 草本植物含量较低, 喜阴湿的蕨类植物较不发育。木本植物以-热带亚热带栎属、栲属、无患子科、五加科、山茶科、蕈树属等含量为主, 具有热带中低海拔雨林的生态, 气候温暖湿润。南海海面表层水温平均约为  $27.31^\circ\text{C}$ <sup>[40]</sup>; 而全球海平面高度与现在相当<sup>[41]</sup>; 在欧洲希腊 Tenaghi Philippon 地区, 植被也呈现出木本植物相对发育<sup>[42]</sup>。此时期, 田洋地区降水较为丰沛, 湖泊较深, 湖中心接受的沉积物质主要来源于降水对湖盆

的冲刷, 此时湖面较广, 湖盆出露少, 湖盆上植被覆盖好, 致使进入湖中心沉积的外源物质少, 磁化率较低。

301.4 ~ 248.8 kaBP, 磁化率较上阶段值高。草本植物含量平均高达 60%, 取代木本植物成为优势植物, 蕨类植物含量也较高, 气候寒冷干燥。该时期灌木类植物如榛木属、杜鹃花科、杨梅属等较上阶段含量增高, 植被可能为热带稀树草地的景观。南海海面表层水温约为  $23.18^\circ\text{C}$ <sup>[40]</sup>, 全球海平面高度约为  $-85 \text{ m}$ <sup>[41]</sup>, 欧洲希腊 Tenaghi Philippon

地区，此时木本植物较不发育<sup>[42]</sup>。此时期温度相对较低，降水较为减少，导致湖面高度下降，湖盆大面积出露，大量的陆源碎屑物质从湖盆上进入湖中心沉积，磁性矿物增多，磁化率升高。

248.8 ~ 188.8 kaBP，磁化率又转为低值区。木本植物孢粉繁盛，草本植物极不发育，蕨类植物含量也有所降低。南亚热带低山常绿阔叶树种栎属、栲属、冬青属、木兰属，无患子科等植物含量迅速增加，热带低地雨林植物如桃金娘科、大戟科等含量也升高，山地针叶植物显著减少，植被类型可能热带中低海拔雨林景观，湖面升高，草本植物、蕨类植物被湖水淹没，孢粉主要来之于周围山地森林。此时，湖中心磁性矿物质来源相对减少，磁化率降低。南海海面表层水温升高至 26.27℃<sup>[40]</sup>，较上阶段有所回升，全球海平面也呈现升高趋势，平均为 -20 m<sup>[41]</sup>。欧洲希腊地区的研究也表明此时期木本植物繁盛<sup>[42]</sup>。

188.8 ~ 125.2 kaBP，磁化率含量急剧升高，达到整个剖面的最大值。孢粉表现出草本植物繁盛，木本、蕨类植物极不发育。喜暖的植物主份如蕈树属、冬青属、无患子科基本上消失。只有栎属、栲属等适应范围较广的种类存活下来。取而代之是草本植物大量繁盛，平均含量高达 74%，如禾本科、蒿属、莎草含量较高。由于蕨类植物一般喜阴湿环境生长<sup>[43]</sup>，表明此时期气候寒冷干燥，

不利于蕨类植物的发育，湖面有大幅度下降，暴露的湖盆上生长着大量草本植物。热带疏林草地的扩大和喜阴湿环境的蕨类减少表明气候相对偏冷干。南海海面表层水温也急剧降低至 23.35℃<sup>[40]</sup>，全球海平面下降最低可达 -120 m<sup>[41]</sup>。欧洲地区气候寒冷，木本植物极不发育<sup>[42]</sup>。此时期，田洋湖面大幅度降低，湖盆大面积出露，湖中磁性矿物沉积剧增，磁化率达到最大值。

125.2 ~ 69.3 kaBP，磁化率为低值区。此时期气候又转变为湿热，主要表现为植被以木本植物占优势，如低地雨林植物桃金娘科、大戟科等含量较高，山地针叶植物如陆均松属、杉科等有较高含量。蕨类植物也相当发育，草本植物含量相对较低，气候较为温暖湿润。湖面上升，导致磁性矿物来源相对减少，磁化率降低。而在南海，海平面表层水温也呈现相对高值，约为 27.29℃<sup>[40]</sup>，全球海平面升至约 -40 m<sup>[41]</sup>。高纬度地区，气候也较为温暖，木本植物繁盛<sup>[42]</sup>。

69.3 ~ 40.43 kaBP，相对于上阶段 MIS 5 期，该阶段气候总体偏凉。南海海面表层水温约为 23.5℃<sup>[40]</sup>，较上阶段明显偏低；而全球海平面高度此时期也下降至约 -83 m<sup>[41]</sup>；而高纬度地区的欧洲，木本植物含量也较低，平均约为 30% 左右<sup>[42]</sup>，以上数据都表明此时期温度相对较低，降水相对较少。此时期田洋湖面下降，磁化率值较上阶段有所

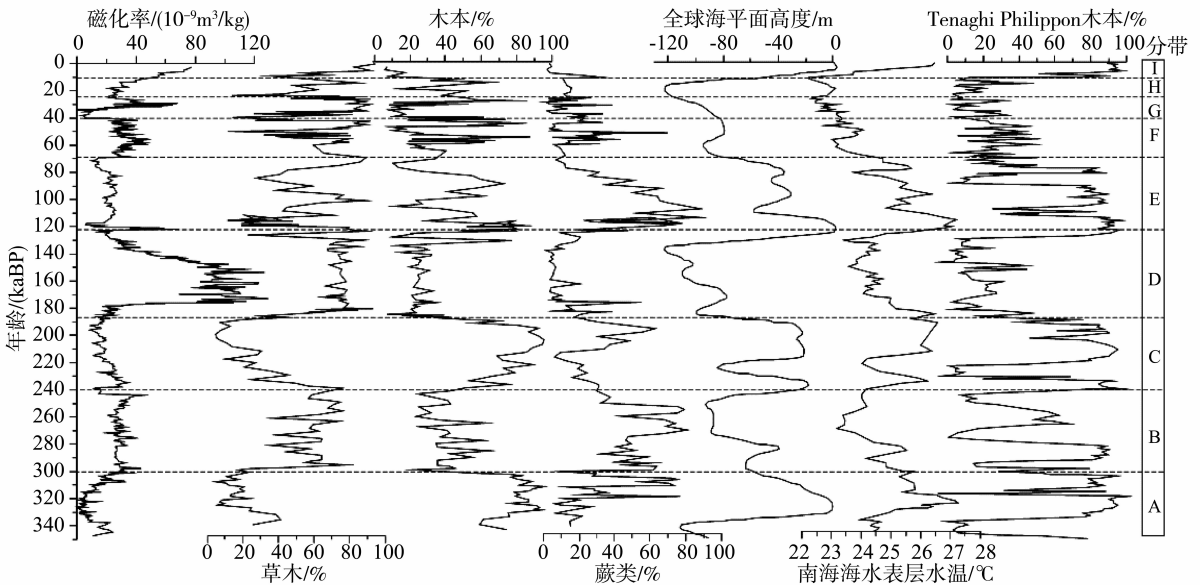


图 3 田洋玛珥湖 TYC 孔磁化率与木本、草本、蕨类植物孢粉与南海海面表层水温<sup>[40]</sup>，全球海平面高度<sup>[41]</sup>以及 Teneghi Philippon 木本植物花粉<sup>[42]</sup>对比图（花粉以陆生植物花粉为基数计算而蕨类植物以所有统计孢粉数为基数计算）  
Fig. 3 Comparison of magnetic susceptibility, trees, herbs and ferns plant pollen of the core TYC in Tianyang Maar lake, the sea surface temperature of the South China sea, the Relative sea-level height of Global and the trees from Teneghi Philippon, Greece (Percentage of pollen is calculated on the pollen sum excluding the fern spore, but the percentage of spores are based on sum of total pollen and spores)

升高。由于湖面的大幅下降, 暴露的湖盆边上大量的草本植物繁盛, 如禾本科、蒿属、菊科、莎草科等, 致使木本植物含量相对较低, 以栎属、榛木属为主, 推测植被类型可能为亚热带疏林草地, 气候呈现多次冷暖波动, 总体气候偏凉干。

40.43 ~ 25.5 kaBP。南海海面表层水温较上阶段有所下降, 约为  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[40]</sup>, 全球海平面下降至约  $-100\text{ m}$ <sup>[41]</sup>, 此时期高纬地区森林植被较不发育, 木本质物较上阶段低<sup>[42]</sup>。以上数据都表明此时期气候趋向于冷期过度阶段。而此时期田洋玛珥湖沼泽植被发育, 热带草地进一步扩大, 草本含量较上一阶段更高。森林植被稀疏, 林木类型显示出针叶-阔叶混交林特色, 如松属、罗汉松属、栎属、栲属、榛木属等。田洋湖盆水渐减少, 沼泽密布, 森林植被也逐渐分化, 沉积物主要为植物腐烂沉积为主, 致使该阶段的磁化率相对较低。

25.5 ~ 10.8 kaBP, 气候寒冷干燥, 南海海平面表层水温降至最低值  $22.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[40]</sup>, 全球海平面下降最低达  $-120\text{ m}$ <sup>[41]</sup>。田洋湖呈现一个逐渐变干的过程。湖泊沉积物为黄褐色粘土, 说明湖盆上冲积物不断在湖泊中堆积, 湖泊变干。草本植物含量较高, 总体上植被表现为草地进一步扩大, 林地成片状分布。由于气候寒冷干燥, 湖泊变干, 湖盆中心接受的沉积物质来源几乎为零的状态, 致使磁化率一直保存在低值阶段。

10.8 ~ 0 kaBP, 由于后期人类对干玛珥湖改造变为耕地, 以伴人植物为主的植物花粉如水稻、甘蔗、伞形科等大量出现。磁化率由于受后期人类活动的影响使其值不断增高。此时期磁化率不具备气候替代指标的特性。

## 5 结 论

沉积物中磁化率值的高低主要是由磁性矿物的种类、含量和磁性颗粒的大小决定。陆相湖泊沉积物中它们受气候、物源、搬运介质、沉积环境等因素控制。因此, 湖泊沉积物中磁化率具复杂性。但当在物源和沉积环境一定时, 结合岩性、古生物、粒度及地球化学等资料, 湖泊磁化率可作为气候环境变化的代用指标。

通过分析, 田洋玛珥湖沉积物磁化率与孢粉有很好的对应关系, 其与气候变化的关系为: 磁化率的低值与气候暖湿对应, 降水相对较多; 磁化率的高值则与气候寒冷或温凉相对应, 降水强度较小。距今约 35 万年来, 田洋玛珥湖气候环境演化经历了 9 个不同的阶段: 346 ~ 301.4 kaBP, 气候相对

暖湿, 降水较为丰沛。301.4 ~ 248.8 kaBP, 气候寒冷干燥, 降水相对减少。248.8 ~ 188.8 kaBP, 气候相对暖湿, 降水相对增加。188.8 ~ 125.2 kaBP, 气候寒冷干燥。125.2 ~ 69.3 kaBP, 气候较为暖湿。69.3 ~ 40.43 kaBP, 气候偏凉。40.43 ~ 25.5 kaBP, 气候偏凉但较上阶段温度偏低, 此时玛珥湖呈现出沼泽化过渡阶段。25.5 ~ 10.8 kaBP, 气候寒冷干燥, 玛珥湖变干成为干玛珥湖。10.8 kaBP 以来, 由于后期人类活动对玛珥湖的改造, 磁化率值不断升高。

## 参考文献:

- [1] 刘东生, 刘嘉麒, 吕厚远, 等. 玛珥湖高分辨率古环境研究的新进展[J]. 第四纪研究, 1998(4): 289 - 296.
- [2] 王文远, 刘嘉麒. 玛珥湖与过去全球变化研究[J]. 地球科学进展, 2000, 15(5): 604 - 608.
- [3] LARRASOANA J C, ROBERTS A P, ROHLING E J. Magnetic susceptibility of eastern Mediterranean marine sediments as a proxy for Saharan dust supply [J]. Marine Geology, 2008, 254: 224 - 229.
- [4] BLAHA U, APPEL E, STANJEK H. Determination of anthropogenic boundary depth in industrially polluted soil and semi-quantification of heavy metal loads using magnetic susceptibility [J]. Environmental Pollution, 2008, 156(2): 278 - 289.
- [5] YIM W W-S, HUANG G, CHAN L S. Magnetic susceptibility study of Late Quaternary inner continental shelf sediments in the Hong Kong SAR, China [J]. Quaternary International, 2004, 117: 41 - 54.
- [6] MARK W, HOUNSLOW M W, MATHER B A. Source of the climate signal recorded by magnetic susceptibility variations in Indian Ocean sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 5047 - 5061.
- [7] 汤贤赞, 陈忠, 颜文, 等. 西太平洋暖池温区中心沉积物磁化率记录的 YD 和 Heinrich 冷事件 [J]. 科学通报, 2003, 48(5): 491 - 495.
- [8] 杨小强, 李华梅, 周永章. 南海南部 NS93 - 5 孔沉积物磁化率特征及其对全球气候变化的记录 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1): 31 - 36.
- [9] 葛淑兰, 石学法, 韩贻兵. 南黄海海底沉积物的磁化率特征 [J]. 科学通报, 2001, 46(Suppl): 34 - 39.
- [10] 候红明, 王保贵, 汤贤赞. 南海北部沉积物磁化率对古气候非线性变化的响应 [J]. 热带海洋, 1996, 15(3): 1 - 5.
- [11] LIU J, ZHU R, ROBERTS A P, et al. High-resolution analysis of early diagenetic effects on magnetic minerals in post-middle-Holocene continental shelf sediments from the Korea Strait [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: B03103.

- [12] ZHENG Y, KISSEL C, ZHENG H B, et al. Sedimentation on the inner shelf of the East China Sea: magnetic properties, diagenesis and paleoclimate implications [J]. *Marine Geology*, 2010, 268: 34–42.
- [13] 潘永信, 朱日祥. 环境磁学研究现状和进展[J], *地球物理学进展*, 1996, 11(4): 87–99.
- [14] 邓成龙, 袁宝印, 朱日祥, 等. 陕西交道全新世黄土-黑垆土磁化率的 CBD 研究[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(4): 505–514.
- [15] 姜月华, 殷鸿福, 王润华. 环境磁学理论、方法和研究进展[J]. *地球学报*, 2004, 25(3): 357–362.
- [16] 胡守云, 王苏民, APPEL E, 等. 呼伦湖湖泊沉积物磁化率变化的环境磁学机制[J]. *中国科学 D 辑*, 1998, 28(4): 334–339.
- [17] 曹希强, 郑祥民, 周立昊, 等. 洪湖沉积物的磁性特征及其环境意义[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(3): 227–232.
- [18] 张俊辉, 杨太保, 李永国, 等. 柴达木盆地察尔汗盐湖 CH0310 钻孔沉积物磁化率及其影响因素分析[J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 790–797.
- [19] 陈俊仁. 雷州半岛田洋火山湖盆地磁性地层学的研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1988, 8(1): 73–85.
- [20] 陈俊仁, 杨达源. 广东田洋火山口湖的晚第四纪沉积特征与环境变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1989(1): 75–84.
- [21] 杨木壮, 谢献春, 陈俊仁. 雷州半岛田洋玛珥湖湿地沉积证据及古环境意义[J]. *海洋地质动态*, 2006, 22(7): 26–29.
- [22] 隋淑珍, 王文远. 广东田洋古玛珥湖 TY-2 孔基底岩心的年龄探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 1.
- [23] 陈俊仁, 姚伯初, 吴有能. 湛江田洋玛珥湖的形成与演化[J]. *广东地质*, 2002, 17(1): 12–18.
- [24] 郑卓, GUIOT JOEL. 我国热带地区 40 万年以来古气候的定量恢复[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 1999, 38(6): 94–98.
- [25] ZHENG Z, LEI Z. A 400,000 year record of vegetational and climatic changes from a volcanic basin, Leizhou Peninsula, southern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 144: 339–362.
- [26] 隋淑珍. 中国南方热带地区田洋玛珥湖 24 万年以来的气候变化及湖泊演变[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [27] 刘嘉麒, NEGENDANK J F W, 王文远, 等. 中国玛珥湖的时空分布与地质特征[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(1): 78–86.
- [28] 霍治国. 中国气候资源[M]. 北京: 科学普及出版社, 1993.
- [29] 陈俊仁, 黄成彦, 林茂福, 等. 广东田洋火山湖第四纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [30] WENINGER B, JÖRIS O. Glacial radiocarbon calibration. The CalPal Program[C]//Higham T et al. *Radiocarbon and Archaeology. Fourth International Symposium*, Oxford, 2002, 2004.
- [31] MARTINSON D, PISIAS N, HAYS J D. Age dating and orbital theory of the ice ages: Development of a high resolution 0~300,000 years chronostratigraphy[J]. *Quaternary Research*, 1987, 27: 1–29.
- [32] DEARING J A. Changing patterns of sediment accumulation in a small lake in Scania, southern Sweden [J]. *Hydrobiologia*, 1983, 103: 59–64.
- [33] WILLIAMSON D, JELINOWSKA A, KISSEL C, et al. Mineral-magnetic proxies of erosion/oxidation cycles in tropical maar-lake sediments (Lake Tritrivakely, Madagascar): paleoenvironmental implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 155: 205–219.
- [34] SNOWBALL I, ZILLEN L, SANDGREN P. Bacterial magnetite in Swedish varved lake-sediments: a potential bio-marker of environmental change [J]. *Quaternary International*, 2002, 88: 13–19.
- [35] SNOWBALL I F. Bacterial magnetite and the magnetic properties of sediments in a Swedish lake [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 126: 129–142.
- [36] 罗攀, 郑卓, 杨小强. 海南岛双池玛珥湖全新世磁化率及其环境意义[J]. *热带地理*, 2006, 26(3): 211–217.
- [37] 吴旭东, 沈吉, 汪勇. 广东湛江湖光岩玛珥湖全新世磁化率变化特征及其环境意义[J]. *热带地理*, 2011, 31(4): 346–352.
- [38] 刘秀铭, 刘东生, HELLER F, 等. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换[J]. *第四纪研究*, 1990(1): 42–49.
- [39] YANG S X, ZHENG Z, ZONG Y Q, et al. A 350 ka pollen record from Lake Tianyang, south China: palaeomonsoon and vegetation variability[R][s. n.], 2012.
- [40] LANG N, WOLFF E W. Interglacial and glacial variability from the last 800 ka in marine, ice and terrestrial archives [J]. *Climate of the Past*, 2011, 7: 361–380.
- [41] RICHARD B, RODERIK S W, JOHANNES O. Modelled atmospheric temperatures and global sea levels over the past million years [J]. *Nature*, 2005, 437: 125–128.
- [42] TZEDAKIS P C, HOOGHMESTRA H, AND PALIKE H. The last 1.35 million years at Tenaghi Philippon: revised chronostratigraphy and long-term vegetation trends [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25: 3416–3430.
- [43] 黎桦, 周厚高. 广西大明山蕨类植物的生态特点及垂直分布[J]. *广西农业大学学报*, 1993, 12(1): 18–22.