

杭州湘湖剖面全新世沉积物的地球化学记录 及其地质意义

顾明光^{1,2} 陈忠大² 汪庆华² 覃兆松² 张素君² 梁 河² 彭振宇²

(1.中国地质大学地球科学学院,湖北 武汉 430074;2.浙江省地质调查院,浙江 杭州 311203)

摘要:对杭州湘湖剖面高密度连续采集的样品,分析了 Fe_2O_3 、 FeO 、 TiO_2 、 CaCO_3 、 Al_2O_3 及 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值的高分辨记录,发现它们对全新世的重要地层界面都有较清晰的反映,同时揭示了不同沉积环境下地球化学背景值存在显著的差异。运用 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 与年平均温度的关系式推算了各样品点的古温度值,并结合多种地球化学指标、 ^{14}C 测年结果以及岩性岩相组合特征,将湘湖地区全新世早、中期(10~3 ka B.P.)初步划分为 4 个气候发展阶段,并指出 7.5~5.1 ka B.P. 之间为本区的全新世气候适宜期。

关键词:全新世;地球化学记录;地层界面;古气候环境;湘湖剖面

中图分类号: P534.63*2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)01-0070-05

杭州湘湖地区位于钱塘江南畔,滨临东海,属于以亚热带季风气候为主要特征的南方温暖潮湿型地区,第四纪沉积物以海陆交互为主,因而有别于北方的黄土地区。笔者在该区选择了全新世代表性剖面——湘湖剖面作为主要研究对象,通过对沉积物地球化学高分辨记录的提取和综合分析,试图为全新世地层的划分提供佐证,并尝试对湘湖地区全新世早、中期的古气候演变进行探索性研究。

1 研究剖面简介

湘湖剖面位于钱塘江南岸萧山湘湖之滨的跨湖桥(古桥)南西侧(东经 $120^\circ 12' 58''$,北纬 $30^\circ 08' 36''$),距跨湖桥遗址发掘点不足 100 m(图 1)。剖面控制的全新统地层总厚约 4.7 m,自下而上划分为河姆渡组(Qhh)与镇海组(Qhzh)。其中河姆渡组以湖沼相沉积为主,下部为灰色亚粘土,中上部为深灰—灰黑色粘土或淤泥质粘土,顶部为厚约 0.4 m 的“跨湖桥文化层”,底部以一层黄褐色铁质风化壳与更新统宁波组(Qpn)分开,界线清晰;镇海组基本上由灰—深灰色粘土与粉质粘土组成的多个韵律层构成,常发育水平微细层理、脉状、波状、透镜状层理,属潮坪相堆积。剖面顶部因人工剥土而遭破坏。

该剖面除一般的地质沉积地层之外,还保存有内涵更丰富的文化堆积地层(即跨湖桥文化层),彼此间叠压关系清

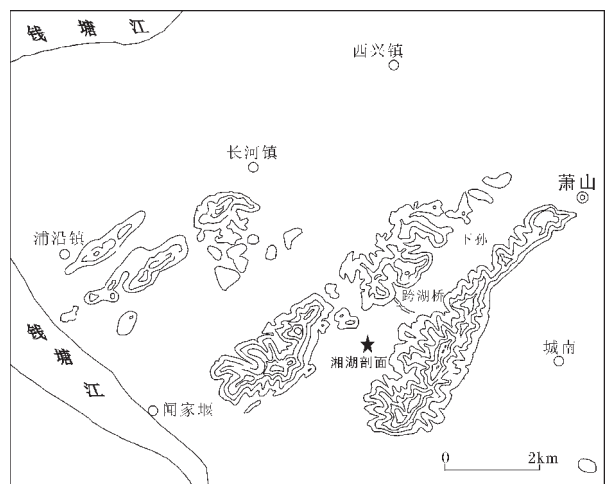


图 1 研究区位置略图

Fig.1 Location map of the study area

楚。将全新世沉积地层和新石器时代以来古文化的堆积地层结合起来研究,可以为地质学和考古学中的地层研究开拓新的途径,近年来已成为中国全新统研究的重要方向之一^[1]。湘湖全新统地层剖面由新至老分述如下:

收稿日期:2004-02-23;改回日期:2004-08-26

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(200113000031)资助。

作者简介:顾明光,男,1968年生,硕士生,工程师,从事区域地质及环境地质调查研究;E-mail:lightgu@sina.com。

未 见 顶

——突变接触——

- 全新统镇海组 厚度>199.5 cm
- 26.褐灰色粘质粉土,呈透镜状、团块状。产钙质超微化石:
Gephyrocapsa oceanica, Helicosphaera carteri 20 cm
- 25.黑褐色粘土,局部见水平层理。产钙质超微化石:
Gephyrocapsa oceanica, Helicosphaera carteri 33 cm
- 24.灰质粉质粘土,局部见微细水平层理。产钙质超微化石:
Gephyrocapsa oceanica, Helicosphaera carteri 10 cm
- 23.褐灰色粉质粘土,发育变形层理。产钙质超微化石:
Gephyrocapsa oceanica, Helicosphaera carteri 10 cm
- 22.灰—褐灰色极薄层状淤泥质粘土与微层状粉质亚粘土互层,微细水平层理发育,并可见脉状、透镜状、波状层理或斜层理。产钙质超微化石:*Gephyrocapsa oceanica, Helicosphaera carteri* 22 cm
- 21.灰色粉质粘土,发育微细水平层理。产钙质超微化石:
Gephyrocapsa oceanica, Helicosphaera carteri 15 cm
- 20.深灰色粘土,发育微细水平层理。上部见钙质超微化石:
Gephyrocapsa oceanica, Helicosphaera carteri 40 cm
- 19.褐灰—浅灰色粘质粉土 1.5 cm
- 18.褐灰色含粉粒或粉质粘土。上部含钙质超微化石:
Gephyrocapsa oceanica, Helicosphaera carteri 18 cm
- 17.灰—深灰色粘土,软塑 30 cm

- 跨湖桥文化层 总厚度 36 cm
- 16.主要岩性为黑褐色亚粘土,扰动迹象明显。有陶片、炭化木以及菱角、松果等野果,并见大量石器、骨器和脊椎动物化石 36 cm
- 突变接触——
- 全新统河姆渡组 总厚度 232 cm
- 15.深灰色粘土,含少量粉粒,粘性好,见少量炭化木及植物根 36 cm
- 14.灰褐色粘土、含粉粒粘土,粘度中等,见树根 41 cm
- 13.深灰—灰黑色粘土、淤泥质粘土,塑性高,见少量炭化木及植物根 60 cm
- 12.深灰—灰黑色含粉粒粘土,软塑,含少量炭化木 30 cm
- 11.灰—蓝灰色亚粘土,粘性一般,硬塑 30 cm
- 10.灰色亚粘土,硬塑 35 cm

——平行不整合——

下伏地层:更新统宁波组为黄褐色铁质风化壳,原岩可能为亚粘土

2 地球化学高分辨率记录及其地质意义

以往的地球化学研究由于采样密度较稀,分辨率不高。鉴于此,本次工作在全新世地层中进行了高密度取样,采样间

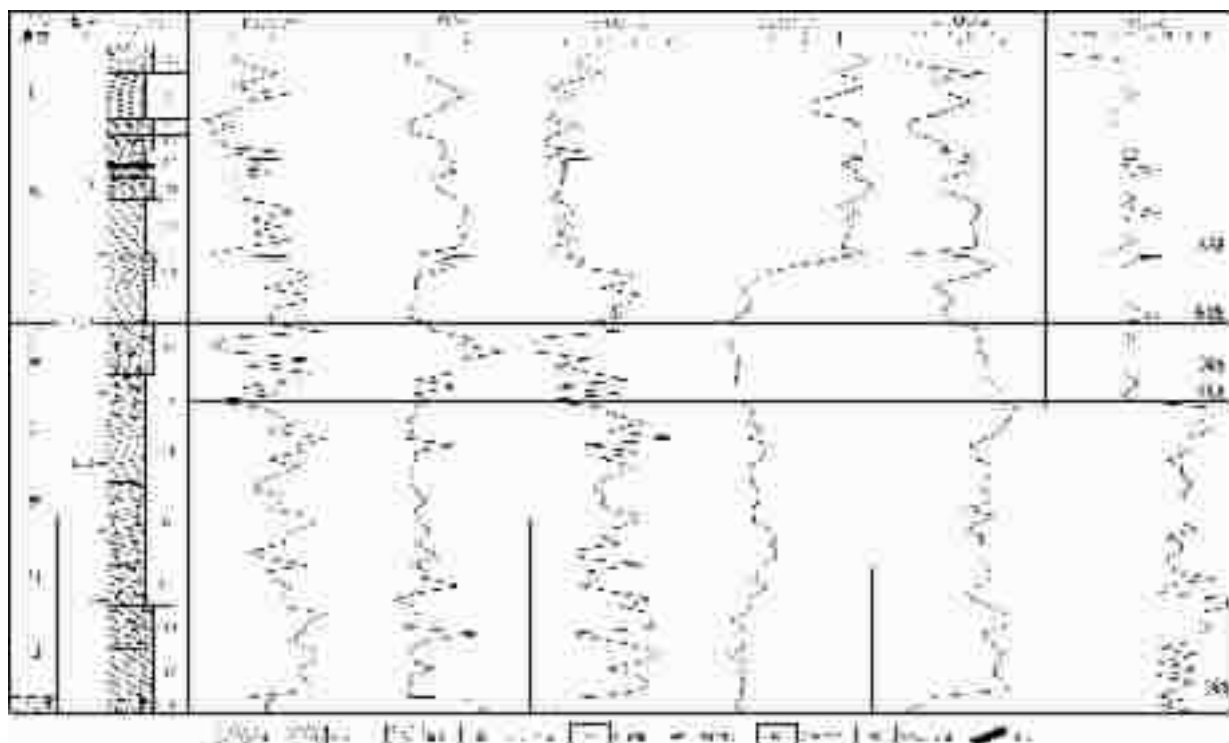


图 2 湘湖剖面主要地球化学指标的垂向变化曲线

Fig.2 Vertical change curve of major geochemical indices of the Xianghu section

距一般控制在 3~5 cm, 特殊情况下按微层实际厚度采样。用连续刻槽方法采集了 104 件样品(其中全新世 100 件, 晚更新世 4 件), 共测定 Fe_2O_3 、 FeO 、 TiO_2 、 CaCO_3 、 Al_2O_3 等 5 种氧化物含量, 测试工作由江西省地质科学研究所实验室完成。各指标随深度的变化曲线如图 2 所示。

2.1 化学成分的总体特征

从 TiO_2 、 CaCO_3 、 Al_2O_3 含量的分布曲线来看, 总体上均可分为两段(图 2)。其中稳定组分 TiO_2 大致以文化层为界, 上部层位含量普遍偏低, 下部层位则明显偏高。 CaCO_3 、 Al_2O_3 都以剖面第 19 层与 20 层之间的界面为界, 分为上下两段, 上段 CaCO_3 、 Al_2O_3 平均值各为 4.32% 和 14.53%, 下段则分别为 1.49% 和 16.16%。这些特征表明(图 2), 文化层之上的镇海组与文化层之下的河姆渡组沉积环境有显著差异, 前者以海相沉积为主(含钙质超微化石), 后者反映内陆相沉积环境的特征(不含钙质超微化石)。 CaCO_3 、 Al_2O_3 的突变相对于 TiO_2 明显滞后, 这种现象尚难以解释, 有待于今后的深入研究。

Fe_2O_3 、 FeO 含量及 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 比值在主要的地层界面附近一般均呈跳跃式变化, 且与 CaCO_3 、 Al_2O_3 曲线具良好的对比性。总体而言, 整个剖面上 Fe_2O_3 、 FeO 含量的变化趋势可分为两种情况, 一种为同步反映, 即两者同时升高或降低, 镇海组地层的样品点普遍呈现此类变化迹象; 另一种为反向关系, 即 Fe_2O_3 、 FeO 含量的变化趋势刚好相反, 文化层及河姆渡组主要表现为这种变化特征。究其原因, 可能与沉积环境的差异有关, 其中镇海组形成于海相动荡环境, 沉积物的来源复杂多变, Fe 元素的总量变化相对于不同价态 Fe 的含量变化居主导地位, 从而主要表现为 Fe_2O_3 、 FeO 含量的同步变化; 相反, 文化层及河姆渡组形成于陆相环境, 沉积物的来源物质相对比较稳定, 搬运距离较短, 全铁总量变化较小, Fe_2O_3 、 FeO 的含量主要受制于氧化或还原作用的强度, 因而导致不同价态 Fe 氧化物的反向变化。

2.2 对重要地层界面的反映

地球化学成分对剖面中主要的地层界面都有清晰的反映。包括剖面第 19 层与 20 层的界面, 跨湖桥文化层的顶、底界面, 全新统与更新统的界面(也即河姆渡组与宁波组的界面)等。以上界面在图 2 中分别用 A 线、B 线、C 线和 D 线表示, 现简述如下:

(1) 剖面第 19 层与 20 层的界面岩石地层的研究结果表明, 在剖面第 19 层与 20 层之间有一个保存完好的自然界面, 它可能代表本区全新世的最大海侵面。该面的地球化学特征鲜明, 主要表现为各指标在界面处发生突变, 其中 Fe_2O_3 从 3.33% 突降至 1.51%, 然后又折返到 3.43%; FeO 从 3.00% 突降至 1.96%, 紧接着又回升至 2.96%, 也呈现出类似的同步反映; Al_2O_3 从原来的 15.54% 锐减至 12.31%, 后又返回到 15.97%; CaCO_3 从下部的 4.14% 升高到界面处的 4.75%, 然后又回落到上部的 4.03%; TiO_2 也有反映, 由 0.85% 降低到 0.78%, 然后又回升至 0.82%; 前已述及, CaCO_3 、 Al_2O_3 曲线恰

好以此面为界分为上、下两段, CaCO_3 上段的平均值(4.32%) 远大于下段(1.49%), 而 Al_2O_3 上段的平均值(14.53%) 则明显低于下段(16.16%)。

(2) 跨湖桥文化层顶界面。相当于剖面第 16 层与 17 层的界面。此面的地球化学指标表现为界面上、下的特定时间段内, 化学参数的变化趋势截然不同, 上段 Fe_2O_3 、 FeO 、 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 总体上变化不大, 仅呈小幅波动; 下段 Fe_2O_3 、 FeO 、 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 均呈现出醒目的高峰或低谷, 波动幅度远大于上段。而 CaCO_3 、 Al_2O_3 、 TiO_2 则恰恰相反, 下段振动幅度较小, 上段呈跳跃式变化或稳定上升趋势。

(3) 跨湖桥文化层底界面。该面大致相当于剖面第 15 与 16 层的分界处, 其地球化学总体特征与文化层顶界面基本类似, 只是界面上下波动轨迹的变化不如文化层顶面那么截然。值得注意的是, 在文化层底面之下约 20 cm 处也有一个地球化学界面(图 2—X 线), 此面所反映的化学特征更为显著, 这与岩石地层研究的结果有所出入, 导致这种情况的原因目前尚不明确, 一种可能的解释是野外分层有误差。

(4) 全新统与更新统的界面。该界面附近 Fe_2O_3 、 FeO 、 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 比值及 Al_2O_3 等参数均有清晰的反映, 主要表现在自下而上 Fe_2O_3 从 2.57% 突升为 3.74%, FeO 从 3.04% 突降至 1.77%, $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 比值从 1.01 突降至 0.47, Al_2O_3 从 14.12% 突增至 17.82%。 TiO_2 、 CaCO_3 都没有明显的反映。这

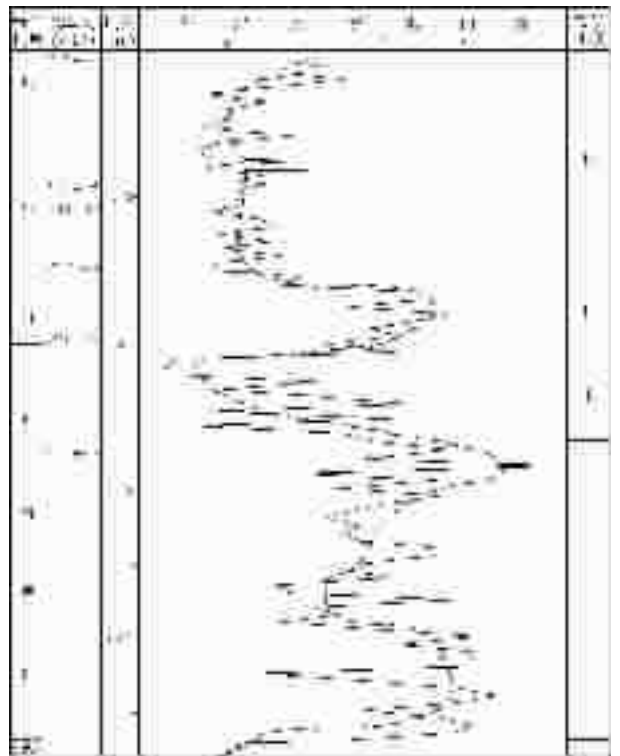


图 3 全新世早、中期古温度演化序列

Fig. 3 Evolutionary series of paleotemperatures

表 1 全新世早、中期气候阶段划分及主要参数平均值/%

Table 1 Early-mid Holocene climatic stages and average values of the main parameters

气候阶段	深度范围/m	Fe ₂ O ₃ /%	FeO/%	Fe ₂ O ₃ /FeO	(Fe ₂ O ₃ +FeO)/%	CaCO ₃ /%	Al ₂ O ₃ /%	TiO ₂ /%	推算的古年平均气温/°C
IV	0.00~1.50	2.45	2.48	0.99	4.93	4.32	14.53	0.80	11.4
III	1.50~2.00	3.15	2.09	1.55	5.24	2.11	14.74	0.81	17.8
II	2.00~2.65	2.78	2.62	1.14	5.40	0.97	16.78	0.82	13.1
I	2.65~4.68	3.43	1.95	1.81	5.37	1.53	16.76	0.89	20.7

预示着从更新世末期到全新世早期,气候条件发生了突变,而所处的构造背景或沉积环境似乎未曾出现根本性的转变。

2.3 对全新世早、中期古气候环境的反映

用地球化学指标重建古气候、古环境演化历史是古全球变化研究的重要组成部分^[4],反映气候变化较为敏感的指标有 CaCO₃、Al₂O₃、不同价态铁的氧化物含量及其比值等。

其中 CaCO₃ 含量的高低标志着它们所经受的风化作用的强弱,它主要由土壤的淋溶程度所控制,其总体背景值有时也受制于海水进退的影响。Al₂O₃ 能较好地表达表生作用过程中铝的地球化学行为及其反映的古气候变化,一般来说,Al₂O₃ 的含量随着气候温湿程度的加剧、风化程度的加深而增大。

地层中的铁元素是反映古气候变迁最为灵敏的元素之一,沉积物的赤铁矿矿化程度与古气候的冷暖变化呈线性关系,即赤铁矿的矿化程度越高,则气候越加湿热,相反,赤铁矿的矿化程度越低,则气候愈加干凉。因此,用高价铁对低价铁的比值可作为指示气温变化和氧化程度的替代性指标。参考周延兴的古温度值推算公式^[5],得出古温度随深度的变化曲线(图 3)。

本次工作还运用 ¹⁴C 测年方法在剖面深度 0.05 m、0.95 m、1.10 m、1.50 m、2.00 m、2.72 m 处获得有用年龄值 6 个,分别为:2 950±100 a B.P.、3 825±100 a B.P.、4 410±120a B.P.、5 070±150 a B.P.、6 330±190 a B.P.、7 740±350 a B.P.(由国家地震局地壳应力研究所碳十四实验室完成测试)。关于全新统的底界,国际上公认是 10 ka B.P.。因此,湘湖剖面控制的全新世沉积物,其时限大致为:10 000~2 900 a B.P.。

在上述研究基础上可将湘湖地区全新世早、中期初步划分为 4 个气候发展阶段(图 3 和表 1),各阶段的特点分述如下:

(1)第 I 阶段:在 10~7.5 ka B.P.时段,属全新世早期升温期,由图 3 可以看出,气温波动频繁,且变幅较大。在 8~7.5 ka B.P.时 Fe₂O₃/FeO 的比值达到剖面的最高峰,是全新世的最高温期在本地区的记录,但在此之前气温的变化经过了一个迂回曲折的过程;全铁(Fe₂O₃+FeO)及 TiO₂ 含量与其他阶段没有明显的区别,表明沉积物的来源物质相对比较稳定;CaCO₃ 含量(1.53%)远远高于河姆渡组的平均值(1.25%),可能反映了地表水作用较弱,指示当时的气候比较干燥。总的来说,本阶段具暖热干燥的气候特征,与深圳湾北岸新民孔的研究结果极为相似^[6]。该阶段还可细分为 3 个亚段。

(2)第 II 阶段:其时限范围大致为 7.5~6.3 ka B.P.,与第 I 阶段相比,Fe₂O₃/FeO 的比值、CaCO₃ 含量均显著下降,后者远低于河姆渡组的平均值,表明气温逐步降低,湿度反而有增大的趋势,反映了温暖—温凉且较为潮湿的气候特征。该阶段晚期有一次显著的降温事件。

(3)第 III 阶段:在 6.3~5.1ka B.P.时段内,地球化学总体特征反映为典型的暖湿气候特点,沉积物从河姆渡组的湖沼相过渡为镇海组的潮坪相堆积,推算的古年平均温度为 17.8°C,比现今当地的年均气温约高 2°C。图 2 表明,本阶段气温较为稳定,CaCO₃ 含量(2.11%)大大低于镇海组的平均值(3.22%),推测全新世大海侵可能发生在这一时期。第 II、III 阶段(7.5~5.1 ka B.P.)相当于与全球变化相一致的全新世中期气候适宜期。

(4)第 IV 阶段:在 5.1~2.9 ka B.P.时间范围内,气温急剧下降,空气湿度有所降低,处于温凉、半湿润的气候环境,因此也可称之为降温期。从图 2 的温度变化曲线不难发现,在本阶段末期气温又呈明显的上升趋势,从而向下一个气候阶段演替、发展。

3 讨论与结论

(1)湘湖剖面的高分辨率地球化学研究表明,Fe₂O₃、FeO、CaCO₃、Al₂O₃、TiO₂ 含量及 Fe₂O₃/FeO 比值对主要的地质界面都有较清晰的反映,不仅为晚第四纪地层的划分对比提供了重要依据,而且在一定程度上揭示了沉积物形成的地球化学环境。

(2)全新世沉积物的地球化学记录中,全铁(Fe₂O₃+FeO)含量相对比较稳定,而 Fe₂O₃/FeO、Fe₂O₃、FeO 对古气候变迁的反映十分灵敏,随着时间的推移呈现出有规律的波动现象。运用 Fe³⁺/Fe²⁺与年平均温度的关系式推算的古温度,更直观地反映了气候的周期性变化,结合其他地球化学指标以及岩性岩相组合特征,可将湘湖剖面全新世早、中期划分为 4 个气候发展阶段,其中各阶段又包含若干次一级的气候颤动。古温度变化曲线还显示:从末次冰期的盛冰期到全新世早期,气温的变化不是渐变式的,而是呈突变式演进,表现为短期内发生的快速升温事件;大约从 3 ka B.P.开始,本区又进入了一个升温阶段。

(3)CaCO₃ 的含量变化在相同的沉积环境中一般与降水

量呈反比关系,但在不同的沉积环境下由于其地球化学总体背景值的差异,不能作为一种古气候的替代指标进行简单的对比分析。例如湘湖剖面镇海组以海相沉积为主,其 CaCO_3 的背景值与河姆渡组(湖沼相沉积为主)相差很大。

(4) 用 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 值推算第四纪古温度还有许多问题需要探索,但作为一种简要的方法还是可行的。为慎重起见,一般应取某一时段的平均值来考察古气候的周期性变化,并需结合多种地球化学指标以及岩石学、古生物学等方面的研究成果,进行综合判断,才能作出与事实更为接近的论断。

致谢: 在本文的撰写过程中,承蒙中国地质大学(武汉)第四纪地质与环境研究室李长安教授的热忱指导,在此表示最诚挚的谢意!

参考文献 (References):

- [1] 文启忠,刁桂仪,贾蓉芬,等.黄土剖面中古气候变化的地球化学记录[J].第四纪研究,1995,6(3):223~230.
Wen Qizhong, Diao Guiyi, Jia Rongfen. et al. Geochemical records of paleoclimate change in loess sections[J]. Quaternary Sciences, 1995,

6(3):223~230(in Chinese with English abstract).

- [2] 周昆叔.周原黄土及其与文化层的关系[J].第四纪研究,1995,6(2):174~179.
Zhou Kunshu. Zhouyuan loess and its relationships to cultural beds [J]. Quaternary Sciences, 1995, 6(2): 174~179(in Chinese with English abstract).
- [3] 周延兴.论沧州沿海地区第四纪沉积物的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 垂向变化周期性及其应用[J].海洋地质与第四纪地质,1984,14(2):103~110.
Zhou Yanxing. Vertical variation periodicity and its application of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ratio of Quaternary sediments in the Cangzhou area [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1984, 14 (2): 103~110(in Chinese with English abstract).
- [4] 余素华,张玉兰,杨晓强,等.深圳湾北岸新民孔岩心晚更新世以来的环境记录[J].海洋地质与第四纪地质,2003,23(2):9~18.
Yu Suhua, Zhang Yulan, Yang Xiaoqiang, et al. Environmental records in the Xinmin core since the Late Pleistocene in the northern coast of the Shenzhen bay [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(2): 9~18(in Chinese with English abstract).

Geochemical records of Holocene sediments in the Xianghu section, Hangzhou, and their geological significance

GU Ming-guang^{1,2}, CHEN Zhong-da², WANG Qing-hua²,
QIN Zhao-song², ZHANG Su-jun², LIANG He², PENG Zhen-yu²

(1. China University Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, Zhejiang, China)

Abstract: High-density consecutive sampling was undertaken from the Xianghu section, Hangzhou. For these samples the authors analyzed high-resolution records of Fe_2O_3 , FeO , TiO_2 , CaCO_3 , Al_2O_3 and $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ and found that they are very sensitive to some important Holocene stratigraphic boundaries and revealed that there are appreciable differences in geochemical background values in various sedimentary environments. The authors calculated paleotemperatures at different sampling sites by using the relation between $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ and average annual temperature. On that basis, combined with various geochemical indices, ^{14}C dating results and association characteristics of lithology and lithofacies, the early-mid Holocene (10–3 ka B.P.) in the Xianghu area is divided into four climatic evolution stages, and it is indicated that the stage of 7.5–5.1 ka BP is the Holocene “hypsithermal” in this area.

Key words: Holocene; geochemical records; stratigraphic interfaces; paleoclimatic environment; the Xianghu profile

About the first Author: GU Ming-guang, male, born in 1968, M. A. candidate, engineer, engages in regional geological and environmental geological surveys; E-mail: lightgu@sina.com.