

洞庭盆地第四纪气候演变的沉积物地球化学记录

柏道远¹, 李长安², 陈渡平¹, 周柯军¹, 黄文义¹

(1. 湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410004; 2. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:对洞庭盆地安乡凹陷东南部两护村 ZKC1 孔上新世末—第四纪沉积物的主量、微量和稀土元素以及粒度进行了分析,进而探讨洞庭盆地第四纪气候演变。曲线协变性及相关系数表明,ZKC1 孔沉积物化学蚀变指数(CIA)与 Cr、Ga、V、Nb、Be、Li、Sc、Th 等微量元素含量呈明显的正相关。从陆相沉积物 CIA 及微量元素含量与温度和湿度正相关的概念出发,结合其他资料,重塑洞庭盆地第四纪气候演变过程:早更新世为冷干→暖湿→冷干→暖湿,中更新世为冷干→暖湿→冷干—温湿→暖湿,晚更新世为寒冷→温湿→寒冷,全新世总体为温湿—暖湿。这一结论与 ZKC1 孔孢粉组合特征反映的气候演变过程及中国东部第四纪气候演化基本吻合,说明沉积物 CIA 和微量元素含量较好地记录了第四纪气候演变信息。相关性分析表明洞庭盆地沉积物粒度对 CIA 无明显影响;CIA 与沉积物粘土含量呈弱的正相关关系,应与湿热气候条件下有更强烈的风化和更多粘土矿物形成有关。

关键词:化学蚀变指数;微量元素;沉积物粒度;第四纪;气候演变;洞庭盆地

中图分类号:P532

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)02-0001-09

Geochemical Recording of Sediments Responding to the Quaternary Climatic Evolution in Dongting Basin

BAI Daoyuan¹, LI Changan², CHEN Duping¹, ZHOU Kejun¹, HUANG Wenyi¹

(1. Hunan Institute of Geology Survey, Changsha, Hunan 410011, China;

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences; Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The major elements, trace elements, rare earth elements (REE) and particle size of the sediments from the core of the ZKC1 borehole at Lianghucun in southeastern Anxiang sag were analyzed systematically. On the basis of the analyses, the authors probed into the Quaternary climate evolution of the Dongting basin. The covariance and correlation coefficients of curves show that the chemical index of alteration (CIA) of the sediments from ZKC1 borehole has evident positive correlation with trace elements such as Cr, Ga, V, Nb, Be, Li, Sc, Th, etc. According to the idea that the chemical alteration index and contents of trace elements of terrestrial sediment have positive correlation with temperature and humidity, combined with other materials, the curves of CIA and contents of trace elements indicated the Quaternary climatic evolution of the Dongting basin as follows: from early to late, the climatic variations during Early Pleistocene are cool and dry → tropical and humid → cool and dry → tropical and humid, during Middle Pleistocene are cool and dry → tropical and humid → cool and dry-warm and humid → tropical and humid, during Late Pleistocene are cool → warm and humid → cool, and during Holocene are warm and humid-tropical and humid as a whole. This climatic evolution process coincides basically with climatic change indicated by sporopollen assemblages of the core from the ZKC1 borehole, and with Quaternary climatic variations of eastern China, which suggested that the CIA and trace elements of the sediments provided good constraints on the Quaternary climate evolution. Correla-

收稿日期:2011-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(40771213);中国地质调查局地质大调查项目(1212010610706);中国地质构造区划综合研究与区域地质志修编项目(1212010811032)

作者简介:柏道远(1967—),男,湖南澧县人,高级工程师,主要从事第四纪地质学、构造学方面的研究。

E-mail: daoyuanbai@sina.com

tion analyses show that the particle size of the sediments hadn't evident influence on CIA; CIA has weak positive correlation with the contents of clay, which suggested that there existed violent weathering and more clay minerals were formed in tropical and humid environments.

Key words: chemical index of alteration(CIA); trace element; particle size of sediment; Quaternary; climatic evolution; Dongting basin

洞庭盆地是叠加在早中生代陆内挤压造山带(江南造山带北缘)之上,经白垩纪—古近纪伸展断陷和第四纪早期断陷、晚期拗陷^[1-4]所形成的大型内陆盆地。前人对洞庭盆地第四纪地质研究由来已久^[5-17],其中,第四纪气候演化是主要内容之一,但不同研究者关于洞庭盆地第四纪气候变化期划分存在明显差异。景存义^[7]提出早更新世气候先后为冷湿和暖湿,中更新世早期为冷湿、晚期为暖湿,晚更新世凉干,全新世早期温湿、中期暖湿、晚期温湿;蔡述明等^[8]认为早更新世早期湿热并向冷干变化、晚期为温性气候,中更新世早期寒温、晚期逐渐变暖,晚更新世逐渐由温暖趋向湿热,晚更新世晚期至全新世由暖湿逐渐趋向湿热;杨达源等^[9]研究提出早更新世早期温湿、晚期凉湿,中更新世早期偏凉、晚期湿热,晚更新世早期温和、晚期冷偏湿,全新世总体为暖湿。张人权等^[10]认为:洞庭湖区更新世气候组合为暖湿(温湿)与冷干,且变化剧烈;全新世气候转为温凉,主要气候组合为温湿与凉干。鉴于上述分歧,洞庭盆地第四纪气候有待进一步研究^[18]。

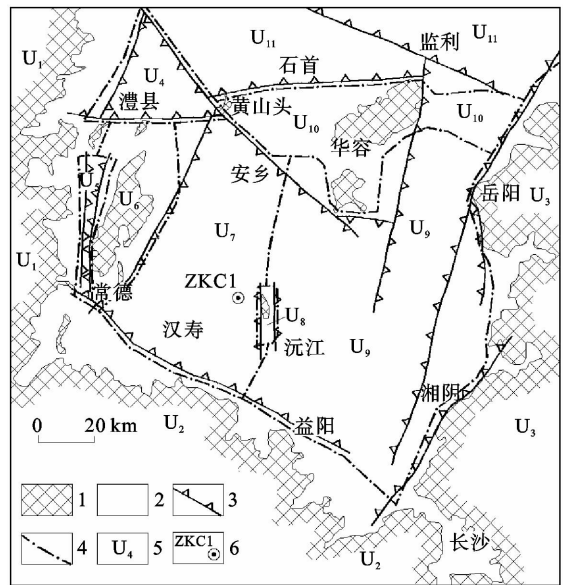
传统古气候研究主要以地层学、沉积学和古生物学为研究手段,而近三十年来古气候研究更多的是利用各种古气候替代指标,如化学蚀变指数 CIA(chemical index of alteration)^[19-25]等。尤其是在第四纪古气候研究方面,沉积物地球化学方法被广泛应用,如过去二十多年来研究者提出了多种基于黄土—古土壤的古气候地球化学代用指标^[26-28]。

近年来作者在位于洞庭盆地中南部的汉寿县偏坡镇两护村施工了一个第四纪综合研究钻孔(ZKC1 孔),并进行了系统的沉积年龄^[29]、孢粉^[30]、地球化学、粒度等样品的分析和研究。本文基于 ZKC1 孔沉积物的主量和微量元素含量变化探讨洞庭盆地第四纪气候演变过程。

1 地质背景

第四纪洞庭盆地西、南、东三面分别为武陵隆起、雪峰隆起和幕阜山隆起;北为江汉盆地,二者在西段相接,东段以华容(次级)隆起相隔(图 1)。受第四纪正断裂控制^[3-4],盆地内部由多个次级隆起和凹陷组成,形成较复杂的隆-凹构造格局(图 1)。隆起区多为低山丘陵与岗状平原,第四纪期间以抬升为主,因此多为基岩出露,第四系厚度较小并组成多级阶地。凹陷区多为波状与低平原,第四纪期间有较大幅度沉降,不同时代沉积上下叠置,沉积厚度较大。

两护村 ZKC1 孔位于安乡凹陷的东南部、赤山隆起的西侧(图 1),中晚新生代沉积总厚 294.26 m,下伏地层为新元古代马底驿组。ZKC1 孔中晚新生代堆积自下而上划分为上新世—早更新世华田组(NQht),早更新世汨罗组(Qp_{1m}),中更新世洞庭湖组(Qp_{2d}),晚更新世坡头组(Qp_{3p}),全新世湖

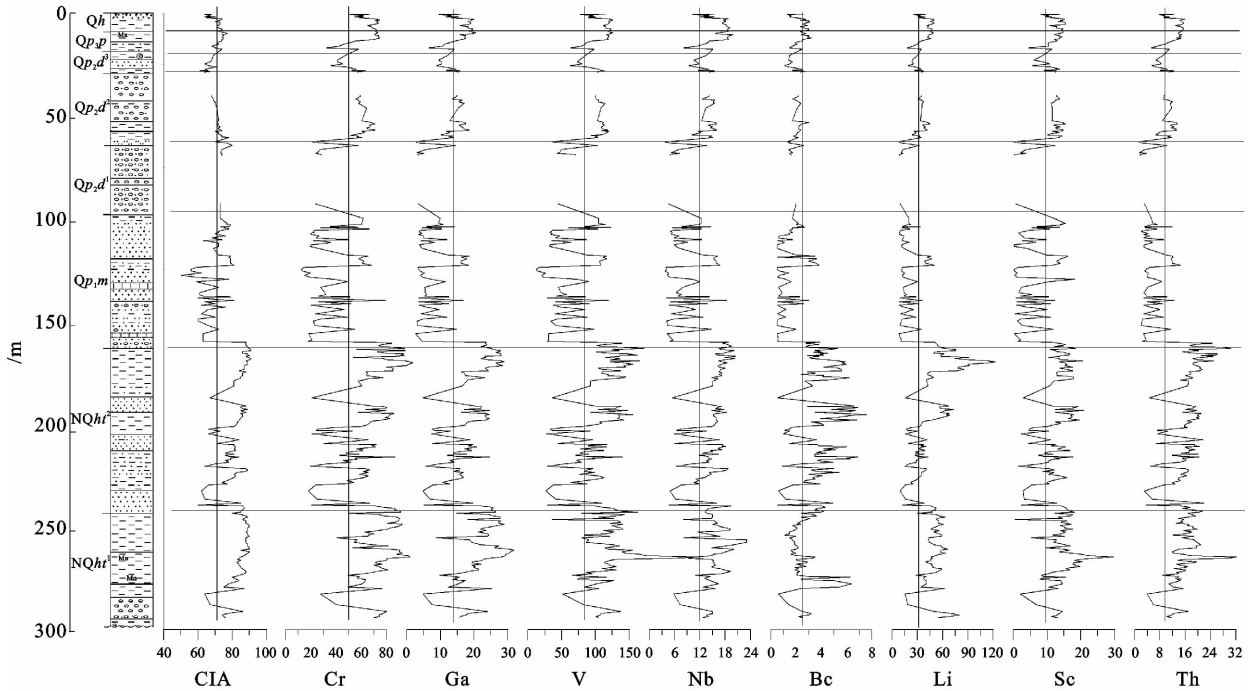


1—前第四纪地层出露区;2—第四纪地层出露区;3—第四纪正断裂,齿向示下降盘;4—构造单元分界线;5—构造单元代号;6—两护村 ZKC1 孔位置
构造单元名称:U₁—武陵隆起;U₂—雪峰隆起;U₃—幕阜山隆起;U₄—澧县凹陷;U₅—临澧凹陷;U₆—太阳山隆起;U₇—安乡凹陷;U₈—赤山隆起;U₉—沅江凹陷;U₁₀—华容隆起;U₁₁—江汉盆地

图 1 第四纪洞庭盆地构造格局图^[29]

Fig. 1 Map of tectonic framework of Quaternary Dongting Basin

冲积(Qh^{ht})等5个地层单位(图2)。地层时代已获得 ESR、OSL 年龄数据^[29-30]及孢粉-气候资料^[30]的支撑,此处不赘述。



NQht¹—上新世—早更新世华田组下段;NQht²—华田组上段;Qp₁m—早更新世汨罗组;Qp₂d¹—中更新世洞庭湖组下段;
Qp₂d²—洞庭湖组中段;Qp₂d³—洞庭湖组上段;Qp₃p—晚更新世坡头组;Qh—全新统

图2 ZKC1孔化学蚀变指数(CIA)和微量元素含量(wt/10⁻⁶)曲线图

Fig. 2 Curves of CIA and contents of trace elements(wt/10⁻⁶) of ZKC1 borehole

华田组可分为上下两段。下段下部为一套砾石层、砂砾层,中上部总体为一套杂色粘土夹粉砂层。上段由砂—粉砂—(含粉砂质)杂色粘土组成4个下粗上细的韵律。汨罗组主要为是一套细-粗砂层、含砾砂层夹(含)粉砂质粘土、粘土,下部少量砂砾石层。洞庭湖组可分为三段,下段为一套砂砾层、砾石层,上部夹少量偶含砾的粘土层;中段由砾石层、砂砾层、不等粒砂层、砂质粘土、粉砂质粘土、泥炭层等组成;上段为粘土、粉砂质粘土、粉砂层、泥炭层、瘀泥层,夹少量砂砾层。坡头组主体为一套土黄、褐黄、灰黄、浅黄色粘土,结构致密,多含较多铁锰质结核。全新统主要为粘土,少量粉砂和粉砂质粘土。上述堆积形成于河流和湖泊环境。

需要指出的是,洞庭盆地在中更新世晚期发生过整体抬升并遭受剥蚀^[1-4,29,31-35],因此ZKC1孔洞庭湖组形成于中更新世早期和中期,缺失中更新世晚期沉积。

2 样品采集与分析

取自ZKC1孔岩芯的地球化学分析样品共311件,主要岩性为粘土、粉砂质粘土及粘土质粉砂,少部分为砂层;取样间距0.5~1m(不包括砂砾层段)。未进行粒度分离,均为全样分析。样品送国土资源部长沙矿产资源监督检测中心,分别进行主量元素(氧化物)、微量元素和稀土分量分析。其中主量元素包括SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、FeO、MgO、CaO、K₂O、Na₂O、TiO₂、MnO等共10项,样品用KOH熔融,SiO₂采用重量法测定,分离SiO₂之后的滤液用等离子发射光电直读光谱仪(全谱仪)测定组分含量。微量元素包括Mo、Zn、Pb、Co、Ni、Ba、Cr、Ga、V、Nb、Be、Cu、Sr、Li、Sc、Zr、Th、Rb、B等共19项,其中Li采用等离子体发射光电直读光谱仪,Be、B、Mo采用二米光栅摄谱仪之发射光谱法,其他元素采用X荧光光谱法测试。稀土分量包括La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Y、Lu、Y等15项,采用等离子体质谱仪分析方法。

为分析沉积环境,探讨沉积物粒度与地球化学特征之间的关系,还于 ZKC1 孔岩芯中采集了粒度分析样品共 361 件,其中 311 件与地球化学样品对应同源,其他 50 件为加密样品。样品送南京师范大学地理系采用英国 Malvern 公司的 Mastersize2000 激光粒度分析仪分析,粒度测量范围为 0.02~2 000 μm ,重复测量误差小于 2%。

3 沉积物地球化学特征及其气候意义

3.1 基于 CIA 及微量元素含量变化曲线的古气候重建

表壳岩石的风化通常造成含 Na、K、Ca 硅酸盐被淋滤,并被新发育的富 Al 粘土矿物取代,从而造成风化产物中 Al_2O_3 与 $(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 的比值增加。因此,风化程度可用化学蚀变指数 $(\text{CIA}=[(\text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})]\times 100)^{[19]}$ 定量表示。由于气温和湿度越高越有利于表壳岩石的风化,因此风化沉积产物 CIA 值的高、低,一般分别对应于温暖湿润和寒冷干燥的气候条件。

已有研究^[36]表明,表生环境中多数微量元素以吸附态搬运而在粘土中富集。鉴于高的气温和湿度有利于表壳岩石的风化,而岩石的风化意味着更多新生粘土矿物的形成,故可推断风化沉积产物中微量元素越高则意味着气温和湿度越高。因此,理论上沉积物的 CIA 与微量元素含量之间应呈正相关关系。

两护村 ZKC1 孔岩芯的 CIA 和部分微量元素含量曲线如图 2 所示(为便于作图,在不影响阶段性气候变化特征分析的前提下,微量元素含量的个别极高奇异值未投影在图中)。如理论分析一样,图 2 显示的 CIA 曲线和 Cr、Ga、V、Nb、Be、Li、Sc、Th 等微量元素含量曲线之间,以及不同微量元素曲线之间均呈现出显著正相关的协同变化。自下而上(从早至晚)各曲线呈现出明显的波状起伏,反映出研究区第四纪古气候呈现出暖湿与冷干的交替变化。顺便指出,CIA 计算式中的 CaO 是赋存在硅酸盐矿物中的 CaO,碳酸盐和磷酸盐中的 CaO 除外。考虑到 ZKC1 孔中沉积物基本由硅酸盐矿物组成,本文 CIA 计算时取全岩 CaO 含量应近似等于硅酸盐矿物中含量,且不影响气候环境问题的探讨。

从 CIA 值和微量元素含量一般与气候暖湿程度正相关出发,图 2 中地球化学曲线大体反映自下而上不同层位沉积,对应气候信息如下:上新世一早更新世华田组下段形成于暖湿气候,华田组上段下部形成于冷干气候,华田组上段上部形成于暖湿气候;早更新世汨罗组下部形成于冷干气候,上部形成于暖湿气候;中更新世洞庭湖组中部形成于暖湿气候(下部砂砾层无样品),上部形成于冷干—温湿气候;晚更新世坡头组形成于温湿气候;全新世湖冲积对应气候变化较复杂,总体为温湿—暖湿气候。

以上是基于钻孔中具体沉积层位及取样所进行的分时期气候分析,尚不能代表从早至晚连续的气候演变过程。结合洞庭湖组下部(下段)大套砂砾层(干冷气候下的低水位沉积^[30])无样品控制;中更新世晚期因构造抬升缺失沉积^[29-30,37],且先期沉积因湿热化作用而形成网纹红土^[1-4,29,31-35];晚更新世早期洞庭盆地仍缺乏沉积;晚更新世末寒冷事件使区域海(湖)平面下降而导致沉积缺失^[30,37]等气候信息记录不连续因素,及其区域气候演化背景资料^[38]等考虑,则可在 CIA 和微量元素含量曲线特征的气候意义基础上,重建洞庭盆地第四纪期间连续的气候演变过程如表 1 所示:早更新世为冷干→暖湿→冷干→暖湿,中更新世为冷干→暖湿→冷干—温湿→暖湿,晚更新世为寒冷→温湿→寒冷,全新世总体为温湿—暖湿。上述过程与 ZKC1 孔孢粉组合特征反映的气候演变^[30]基本吻合,也与杨怀仁等^[38]关于中国东部第四纪气候演化的认识一致(表 1),证明孔中沉积物的 CIA 和微量元素含量确实明显受气候变化控制,对第四纪气候演变具有较好的响应。

补充指出,除图 2 中有关微量元素含量与 CIA 曲线呈显著正相关外,Mo、Zn、Pb、Co、Ni、Ba、Cu、Sr、Zr、Rb、B 等其他元素变化曲线也与 CIA 曲线具协变性,只是协变显著性稍低。

3.2 相关性分析及其成因意义

应用 SPSS 软件对两护村钻孔中 CIA 及元素含量等进行相关性分析(表 2)。为使结果更具代表性或更合理可信,在表 2 相关系数计算时,剔除了部分微量元素的个别极高奇异值。

CIA 与微量元素含量间相关系数反映的信息(表 2)与图 2 变化曲线反映的各项目的协变性一致:CIA 与微量元素呈明显或较明显的正相关关系,其中与 Cr、Ga、V、Nb、Be、Li、Sc、Th 的相关系数分别达 0.74, 0.80, 0.66, 0.67, 0.58, 0.73, 0.65, 0.77。显然,这种正相关性与表生环境中多数微量元素趋向于被粘土吸

附富集^[36],而 CIA 直接取决于粘土暨 Al₂O₃ 含量有关。

表 1 两护村 ZKC1 孔岩芯化学蚀变指数(CIA)和微量元素含量反映的第四纪古气候信息表

Tab. 1 Quaternary Palaeoclimatic variations indicated by chemical alteration index(CIA)and contents of trace elements of ZKC1 borehole in Lianghucun

时代	层位	CIA 和微量元素含量 反映气候信息	孢粉反映气候信息 (孢粉带) ^[30]	杨怀仁等 ^[38]
全新世	全新统湖冲积	复杂,总体的温湿—暖湿	暖稍干(X VI)暖稍湿(X V)	冷干→温干→暖湿 →温干→凉湿
晚更新世	晚期	(缺失沉积)	寒冷	严寒偏干
	中期	坡头组	温湿	湿温
	早期	(缺失沉积)	寒冷	寒冷
中更新世	晚期	(缺失沉积)	暖湿	湿热
	中期	洞庭湖组上部	冷干—温湿	暖稍湿(X III)
	早期	洞庭湖组中部	暖湿	(无样品,冷干与低水位)
早更新世	晚期	汨罗组上部	暖湿	湿暖
	早期	汨罗组下部	冷干	冷
	早期	华田组上段中、上部	暖湿	较冷干间温湿(VIII-X)
上新世	早期	华田组上段下部	冷干	温暖
	末期	华田组下段	暖湿	凉干(III, IV)
			暖干(I, II)	冷

注:孢粉带划分及特征见文献^[30]。

此外,计算粒度小于 0.004 mm 的粘土含量与 CIA 之间的相关系数为 0.244,粘土含量与中值粒径之间的相关系数为-0.372,CIA 与中值粒径之间的相关系数仅为-0.06。考虑到 CIA 值与粘土矿物含量直接相关,CIA 与粘土含量之间仅为 0.244 的相关系数似乎偏低,与粒度(中值粒径)之间基本不相关也似不合理。本研究认为其成因可能与部分长石等碎屑矿物风化后仍表现为“砂粒”(粘土集合体)形态有关。

在具体研究中,“粘土”至少有 2 种截然不同的含义,一是指长石等碎屑矿物风化后形成的粘土矿物,二是指沉积物粒度结构中粒径小于 0.063 mm 的微细颗粒。本文中控制 CIA 值(或 Al₂O₃ 含量)与微量元素含量的“粘土”应属第一种情况,即指粘土矿物。客观上,先期碎屑风化转化为粘土矿物后往往并未裂解为粘土级颗粒,而是以粘土矿物集合体的粒态被搬运和沉积,从而以“砂”而不是“泥”或“粘土”的形态保存。鉴于风化形成的粘土矿物的含量主要受气候的湿热程度所控制,可以认为 CIA 值和微量元素含量主要受控于气候条件,而沉积物粒度暨砂质含量及可能与之相关的盆地构造活动等对 CIA 值和微量元素含量的影响可能不大。CIA 与中值粒径之间基本不相关显然佐证了这一推断。此外,选取含粉砂质粘土—粘土样品绘制 CIA 值和微量元素含量曲线图,曲线形态特征与图 2 基本一致,也说明沉积物粒度影响不显著。

值得指出的是,物性软弱、松散的粘土矿物集合体较其他岩石碎屑更容易被磨蚀而细化,因此 CIA 与泥质含量呈弱的正相关,可能并不指示沉积物粒度本身对 CIA 具控制作用,而是暗示湿热气候条件下更强烈的风化和更多粘土矿物的形成。

一般认为沉积物中的地球化学特征普遍存在粒度效应,某些特定研究(如黄土物源追踪^[28])需要将全样品进行粒度分级以测定不同粒级组分的地球化学特征。不过本研究表明,通过陆相河、湖沉积中粘土、粉砂质粘土及粘土质粉砂等全岩样品的化学蚀变指数和微量元素含量变化,仍能明确提供第四纪气候演变的有用信息。这对陆相盆地第四纪气候演变研究具有重要参考价值。

表 2 微量元素含量及 CIA 值间相关系数表

Tab. 2 The correlation coefficients between contents of trace elements and CIA

项目	Zn	Pb	Co	Ni	Ba	Cr	Ga	V	Nb	Be	Cu	Sr	Li	Sc	Zr	Th	Rb	B
CIA	0.21	0.51	0.06	0.32	-0.02	0.74	0.80	0.66	0.67	0.58	0.37	0.52	0.73	0.65	0.40	0.77	0.44	0.28
Mo	0.38	0.21	0.19	0.43	0.24	0.59	0.62	0.70	0.39	0.50	0.43	0.33	0.52	0.65	0.13	0.53	0.47	0.12
Zn	1.00	0.33	0.58	0.74	0.51	0.56	0.49	0.60	0.48	0.39	0.58	0.45	0.42	0.64	0.37	0.40	0.40	0.32
Pb	0.33	1.00	0.16	0.34	0.20	0.53	0.57	0.44	0.55	0.40	0.33	0.46	0.55	0.47	0.35	0.60	0.40	0.35
Co	0.58	0.16	1.00	0.75	0.40	0.34	0.22	0.37	0.36	0.29	0.31	0.11	0.25	0.38	0.23	0.20	0.25	0.29
Ni	0.74	0.34	0.75	1.00	0.56	0.66	0.56	0.65	0.62	0.62	0.57	0.28	0.62	0.65	0.40	0.54	0.61	0.47
Ba	0.51	0.20	0.40	0.56	1.00	0.42	0.32	0.45	0.51	0.29	0.36	0.23	0.28	0.50	0.49	0.33	0.48	0.53
Cr	0.56	0.53	0.34	0.66	0.42	1.00	0.94	0.93	0.84	0.60	0.59	0.68	0.85	0.90	0.50	0.83	0.60	0.40
Ga	0.49	0.57	0.22	0.56	0.32	0.94	1.00	0.87	0.82	0.59	0.54	0.69	0.87	0.85	0.46	0.86	0.63	0.37
V	0.60	0.44	0.37	0.65	0.45	0.93	0.87	1.00	0.76	0.57	0.58	0.64	0.75	0.93	0.45	0.79	0.53	0.36
Nb	0.48	0.55	0.36	0.62	0.51	0.84	0.82	0.76	1.00	0.56	0.47	0.54	0.75	0.78	0.73	0.78	0.58	0.61
Be	0.39	0.40	0.29	0.62	0.29	0.60	0.59	0.57	0.56	1.00	0.51	0.20	0.60	0.60	0.38	0.69	0.77	0.45
Cu	0.58	0.33	0.31	0.57	0.36	0.59	0.54	0.58	0.47	0.51	1.00	0.29	0.46	0.56	0.34	0.56	0.54	0.29
Sr	0.45	0.46	0.11	0.28	0.23	0.68	0.69	0.64	0.54	0.20	0.29	1.00	0.61	0.66	0.33	0.57	0.26	0.19
Li	0.42	0.55	0.25	0.62	0.28	0.85	0.87	0.75	0.75	0.60	0.46	0.61	1.00	0.71	0.37	0.78	0.59	0.40
Sc	0.64	0.47	0.38	0.65	0.50	0.90	0.85	0.93	0.78	0.60	0.56	0.66	0.71	1.00	0.56	0.79	0.62	0.43
Zr	0.37	0.35	0.23	0.40	0.49	0.50	0.46	0.45	0.73	0.38	0.34	0.33	0.37	0.56	1.00	0.58	0.47	0.70
Th	0.40	0.60	0.20	0.54	0.33	0.83	0.86	0.79	0.78	0.69	0.56	0.57	0.78	0.79	0.58	1.00	0.73	0.52
Rb	0.40	0.40	0.25	0.61	0.48	0.60	0.63	0.53	0.58	0.77	0.54	0.26	0.59	0.62	0.47	0.73	1.00	0.55
B	0.32	0.35	0.29	0.47	0.53	0.40	0.37	0.36	0.61	0.45	0.29	0.19	0.40	0.43	0.70	0.52	0.55	1.00

注:为了计算结果更具代表性,微量元素含量分析中的个别极高奇异值未参与计算。参与计算样本数 303 个,置信度多数达 99%,少数达 95%。

4 结论

1) 两护村 ZKC1 孔内沉积物主量(CIA)和微量元素特征指示洞庭盆地第四纪气候演变过程:早更新世为冷干→暖湿→冷干→暖湿,中更新世为冷干→暖湿→冷干—温湿→暖湿,晚更新世为寒冷→温湿→寒冷,全新世总体为温湿—暖湿。这一结论与 ZKC1 孔孢粉组合特征反映的气候演变过程及中国东部第四纪气候演化基本吻合,表明沉积物 CIA 和微量元素含量对第四纪气候演变具有较好的响应。

2) 洞庭盆地沉积物粒度对 CIA 无明显影响。CIA 与沉积物泥质含量呈弱的正相关,应与湿热气候条件下有更强烈的风化和更多粘土矿物形成有关。

参考文献:

- [1] 柏道远,李长安,王先辉,等. 第四纪洞庭盆地澧县凹陷构造活动特征及动力学机制探讨[J]. 地球学报,2010,31(1):43-55.
BAI Daoyuan, LI Changan, WANG Xianhui, et al. Tectonic activities and dynamic mechanisms of the Quaternary Lixian sag of Dongting basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(1): 43-55.
- [2] 柏道远,李长安,王先辉,等. 第四纪华容隆起构造活动、成因及动力机制[J]. 地质科学,2010,45(2):411-427.
BAI Daoyuan, LI Changan, WANG Xianhui, et al. Tectonic activities, genesis and dynamic mechanisms of Quaternary Huorong uplift[J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(2): 411-427.
- [3] 柏道远,李长安,王先辉,等. 第四纪洞庭盆地构造性质及动力机制探讨[J]. 大地构造与成矿学,2010,34(3):317-330.
BAI Daoyuan, LI Changan, WANG Xianhui, et al. Quaternary tectonic characteristics and dynamic mechanisms of the Dongting basin[J]. Geogectonica et Metallogenia, 2010, 34(3): 317-330.

- [4] 柏道远, 王先辉, 李长安, 等. 洞庭盆地第四纪构造演化特征[J]. 地质论评, 2011, 57(2): 261-276.
BAI Daoyuan, WANG Xianhui, LI Changan, et al. Characteristics of Quaternary tectonic evolution in Dongting basin[J]. Geological Review, 2011, 57(2): 261-276.
- [5] 李长安, 张玉芬, 皮建高, 等. 洞庭湖古湖滨砾石层的发现及意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 491-492.
LI Changan, ZHANG Yufen, PI Jiangaao, et al. Discovery of the ancient lakefront gravels in Dongting lake and its significance [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(3): 491-492.
- [6] 林承坤. 洞庭湖的演变与治理: I 洞庭湖的沉积[J]. 地理学与国土研究, 1985, 1(4): 28-35.
LIN Chengkun. Evolution of the Dongting lake and the way of management: I Sediments of the Dongting lake[J]. Geography and Territorial Research, 1985, 1(4): 28-35.
- [7] 景存义. 洞庭湖的形成与演变[J]. 南京师院学报: 自然科学版, 1982(2): 52-60.
JIN Cunyi. Formation and evolution of the Dongting basin[J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition, 1982(2): 52-60.
- [8] 蔡述明, 官子和, 孔昭宸, 等. 从岩相特征和孢粉组合探讨洞庭盆地第四纪自然环境的变迁[J]. 海洋与湖沼, 1984, 15(6): 527-539.
CAI Shuming, GUAN Zhihe, KONG Zhaochen, et al. Natural environment as reflected in sedimentary Dongting basin in Quaternary[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1984, 15(6): 527-539.
- [9] 杨达源, 韩辉友, 吴新哲. 气候变化对荆江变迁的影响[C]//长江中游荆江变迁研究. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 159-177.
- [10] 张人权, 梁杏, 张国梁, 等. 洞庭湖区第四纪气候变化的初步探讨[J]. 地质科技情报, 2001, 20(2): 1-5.
ZHANG Renquan, LIANG Xing, ZHANG Guoliang, et al. A preliminary study of climatic change in Dongting lake area in the quaternary period[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(2): 1-5.
- [11] 杨达源. 洞庭湖的演变及其整治[J]. 地理研究, 1986, 5(3): 39-46.
YANG Dayuan. On the evolution of the Dongting lake during holocene and the way of management[J]. Geographical Research, 1986, 5(3): 39-46.
- [12] 皮建高, 张国梁, 梁杏, 等. 洞庭盆地第四纪沉积环境演变的初步分析[J]. 地质科技情报, 2001, 20(2): 6-10.
PI Jiangaao, ZHANG Guoliang, LIANG Xing, et al. Preliminary research on sedimentary environment evolution Dongting Basin in the Quaternary period[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(2): 6-10.
- [13] 杜耘, 殷鸿福. 洞庭湖历史时期环境研究[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(2): 214-218.
DU Yun, YIN Hongfu. Study on historical environment in Dongting lake area[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(2): 214-218.
- [14] 刘锁旺, 甘家思, 李蓉川, 等. 江汉洞庭盆地的非对称扩张与潜在地震危险性[J]. 地壳形变与地震, 1994, 14(2): 56-66.
LIU Suowang, GAN Jiasi, LI Rongchuan, et al. Asymmetric extension and hidden earthquake risk in Jianghan-Dongting basin(JDB)[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1994, 14(2): 56-66.
- [15] 薛宏交, 耿爱玲, 龚平. 江汉洞庭盆地水系展布特征与新构造运动[J]. 地壳形变与地震, 1996, 16(4): 58-65.
XUE Hongjiao, GEN Ailing, GONG Ping. Extension characteristics of river system and neotectonic movement in the Jianghan-Dongting basin[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1996, 16(4): 58-65.
- [16] 王道经, 黄怀勇. 洞庭湖现代构造与湖盆演变[J]. 湖南地质, 2000, 19(1): 30-36.
WANG Daojing, HUANG Huaiyong. Dongtinghu modern tectonics and its basin evolution[J]. Hunan Geology, 2000, 19(1): 30-36.
- [17] 张晓阳, 杜耘, 蔡述明. 洞庭湖演变趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 1995, 4(1): 64-69.
ZHANG Xiaoyang, DU Yun, CAI Shuming. An analysis on evolutionary tendency of Dongting lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Valley, 1995, 4(1): 64-69.
- [18] 柏道远, 李长安. 洞庭盆地第四纪地质研究现状[J]. 地质科技情报, 2010, 29(5): 1-8, 14.
BAI Daoyuan, LI Changan. Status of Quaternary geology research of Dongting basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(5): 1-8, 14.
- [19] NESBITT H W, YOUNG G M. Early proteozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982(299): 715-717.

- [20] FEDO C M, YOUNG G M. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: A greenhouse to icehouse transition[J]. *Precambrian Research*, 1997, 86: 201-223.
- [21] YOUNG G M, NESBITT H W. Paleoclimatology and provenance of the glaciogenic Gowganda formation (Paleoproterozoic), Ontario, Canada: A chemostratigraphic approach[J]. *GSA Bulletin*, 1999, 111: 264-274.
- [22] PANAH I A, YOUNG G M. A geochemical investigation into the provenance of the Neoproterozoic Port Askaig Tillite, Dalradian Supergroup, western Scotland[J]. *Precambrian Research*, 1997, 85: 81-96.
- [23] YOUNG G M. Geochemical investigation of a Neoproterozoic glacial unit: The mineral fork formation in the Wasatch range, Utah[J]. *GSA Bulletin*, 2002, 114: 387-399.
- [24] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. *地学前缘*, 2003, 10(4): 539-544.
FENG Lianjun, CHU Xuelei, ZHANG Qirui, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 539-544.
- [25] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 湘西北南华系溁水河组寒冷气候成因的新证据[J]. *科学通报*, 2004, 49(12): 1172-1178.
FENG Lianjun, CHU Xuelei, ZHANG Qirui, et al. New evidence for that Nanhuaian Xieshuihe formation in northwestern Hunan was formed in cold climate[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(12): 1172-1178.
- [26] CHEN J, AN Z S, HEAD J. Variation of Rb /Sr ratios in the loess-paleosol sequences of Central China during the last 130000 years and their implications for monsoon paleoclimatology. *Quaternary Research*, 1999, 51(3): 215-219.
- [27] YANG S L, DING F, DING Z L. Pleistocene chemical weathering history of Asian arid and semi-arid regions recorded in loess deposits of China and Tajikistan[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(7): 1695-1709.
- [28] 熊尚发, 朱国健, 周茹, 等. 白水黄土红粘土化学风化强度的剖面特征与粒度效应[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 812-821.
XIONG Shangfa, ZHU Yuanjian, ZHOU Ru, et al. Chemical weathering intensity and its grain-size dependence for the loess-red clay deposit of the Baishui section, Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 812-821.
- [29] 柏道远, 李长安, 周柯军, 等. 第四纪洞庭盆地赤山隆起与安乡凹陷升降运动的沉积记录[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 645-658.
BAI Daoyuan, LI Changan, ZHOU Kejun, et al. Geological characteristics and tectonic-sedimentary coupling relation of the Chishan uplift and Anxiang sag of Quaternary Dongting basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 645-658.
- [30] 柏道远, 李长安, 张文卿, 等. 洞庭盆地两护村孢粉组合及其气候与地层意义[J]. *地质科学*, 2010, 45(4): 1125-1138.
BAI Daoyuan, LI Changan, ZHANG Wenqing, et al. Sporopollen assemblages of the core from Lianghucun borehole in Dongting basin and their climatic and stratigraphic implications[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2010, 45(4): 1125-1138.
- [31] 柏道远, 吴能杰, 李长安, 等. 华容隆起及周缘第四纪构造-沉积特征与演化[J]. *中国地质*, 2010, 37(5): 1243-1256.
BAI Daoyuan, WU Nengjie, LI Changan, et al. Quaternary tectonic and sedimentary characteristics and geological evolution of the Huarong uplift and its adjacent areas[J]. *Geology in China*, 2010, 37(5): 1243-1256.
- [32] 柏道远, 李送文, 周柯军, 等. 1: 25万常德市幅构造-沉积地貌类型划分及其对江汉-洞庭盆地第四纪地质与环境研究的启示[J]. *中国地质*, 2010, 37(2): 280-297.
BAI Daoyuan, LI Songwen, ZHOU Kejun, et al. Tectonic-sedimentary landform classification of 1: 250000 Changde sheet and its implication for researches on Quaternary geology and environment of Jianghan-Dongting basin[J]. *Geology in China*, 2010, 37(2): 280-297.
- [33] 柏道远, 李建清, 马铁球, 等. 第四纪江汉-洞庭盆地东部中段构造-沉积地貌类型划分及特征[J]. *地理科学*, 2010, 30(2): 236-241.
BAI Daoyuan, LI Jianqing, MA Tieqiu, et al. Tectonic-sedimentary landforms classification of middle segment of east Quaternary Jianghan-Dongting basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2): 236-241.
- [34] 柏道远, 刘波, 李长安, 等. 第四纪洞庭盆地临澧凹陷构造-沉积特征与环境演化[J]. *山地学报*, 2010, 28(6): 641-652.
BAI Daoyuan, LIU Bo, LI Changan, et al. Quaternary tectonic-sedimentary characteristics and environmental evolution of Linli sag, Dongting basin[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(6): 641-652.
- [35] 柏道远, 李长安, 马铁球, 等. 第四纪洞庭盆地安乡凹陷及西缘构造-沉积特征与环境演化[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(2): 120-129.
BAI Daoyuan, LI Changan, MA Tieqiu, et al. Quaternary tectonic-sedimentary characteristics and environmental evolution of Anxiang sag of Dongting basin and its west periphery[J]. *Journal Earth Sciences and Environment*, 2010, 32(2): 120-

129.

[36] 杨守业, 李从先. 元素地球化学特征的多元统计方法研究: 长江与黄河沉积物元素地球化学研究[J]. 矿物岩石, 1999, 19(1): 63-67.

YANG Shouye, LI Congxian. Multiple statistic study of element geochemical characteristics: element geochemical study on the Changjiang and Huanghe sediments[J]. Journal Mineral Petrol, 1999, 19(1): 63-67.

[37] 柏道远, 李长安, 陈渡平, 等. 洞庭盆地两护村孔重矿物特征及其对第四纪构造活动与环境演变的响应[J]. 地质论评, 2010, 56(2): 246-260.

BAI Daoyuan, LI Changan, CHEN Duping, et al. Heavy minerals characteristics of sediments in Lianghucun borehole and their responses to the Quaternary tectonic movement and environmental evolutions of the Dongting basin[J]. Geological Review, 2010, 56(2): 246-260.

[38] 杨怀仁, 徐馨. 中国东部第四纪自然环境的演变[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1980(1): 121-144.

YANG Huairan, XU Xin. Quaternary environmental changes in eastern China[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 1980(1): 121-144.

“沉积·资源·环境”研究专栏征稿

征稿范围:

- ◇地质基本科学问题、应用及发展
- ◇全球环境变化与沉积作用
- ◇盆地分析与板块运动
- ◇盆地运动学的新理论
- ◇能源的勘探与开发
- ◇大地构造沉积学
- ◇层控矿床
- ◇岩相古地理
- ◇生物成矿作用
- ◇流域开发与环境保护
- ◇层序地层与事件地质
- ◇油气储集层的成岩作用

欢迎相关领域专家、学者和工程技术人员踊跃投稿, 来稿请注明“沉积·资源·环境”专栏。稿件经专家评审通过后优先发表, 并实行优稿优酬。

投稿平台: http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱: zkglhxx@163.com; zkzxcg@sdust.edu.cn

联系电话: 0532-86057859

山东科技大学学报(自然科学版) 编辑部