

江汉平原 12.76 cal. ka B.P.以来环境 干湿变化的高分辨率研究

李 枫¹, 吴 立¹, 朱 诚¹, 孙 伟¹, 王晓翠¹, 孟华平², 刘 辉², 齐士峥³,
龚琪岚³, 朱光耀⁴, 周凤琴⁵, 李溯源⁶, 欧阳杰⁷

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093; 2. 湖北省文物考古研究所, 湖北 武汉 430077;
3. 高雄师范大学地理学系, 台湾 高雄 80201; 4. 蚌埠学院人文社会科学部, 安徽 蚌埠 233000;
5. 长江水利委员会荆江水文水资源勘测局, 湖北 荆州 434002; 6. 南京大学历史学系,
江苏 南京 210093; 7. 广东广播电视大学文法系, 广东 广州 510091)

摘要: 选择位于江汉平原的JZ-2010湖相沉积剖面为研究对象, 利用AMS¹⁴C测年建立江汉平原12.76 cal. ka B.P.以来环境演变的时间序列。对湖相沉积物中元素Rb和Sr的差异分布、Rb/Sr值、Ti元素含量以及磁化率等多项环境代用指标的综合分析表明: 江汉平原12.76 cal. ka B.P.以来环境干湿变化经历了晚冰期由偏干转向偏湿波动、全新世开始湿度增强、全新世中期偏湿到湿润再至干湿波动, 全新世晚期至现代偏湿到偏干的过程。磁化率波动与江汉平原新石器时代各文化类型出现或转型相关。江汉平原环境干湿变化体现东亚季风环流影响, 驱动机制主要是北半球夏季太阳辐射变化; 还受到东北、北、西三面环山而东南面向夏季风倾斜开放的地势影响。

关键词: 江汉平原; Ti元素含量; Rb/Sr; 磁化率; 干湿变化

中图分类号: X144 **文章标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2012)07-0878-07

对沉积物中特定化学元素性质和环境磁学特征的分析有助于揭示过去气候变化的信息^[1-4]。近年来以沉积物中元素Ti、Rb、Sr的含量分布及Rb/Sr值变化为替代指标重建古气候^[5-8], 结合磁化率指标, 探讨区域环境演变及其驱动因素取得进展^[9-11]。学者们也发现这些环境替代指标在气候地层学研究中的广泛应用仍存在不确定因素^[5, 6, 8-10, 12]。江汉平原是典型的河间洼地组成的洪泛平原, 其沉积物来源、水动力条件、河湖微地貌塑造、气候及沉积环境变化复杂; 考古研究证实江汉平原新石器时代以来即有广泛的人类活动, 很大程度上影响江汉平原环境变迁^[13, 14]。从1990年代的洪湖钻孔到利用孢粉、粒度、有机碳同位素、磁化率等多种替代指标分析, 一些研究关注到江汉平原气候波动、环境变化和湖群演化及其与人类活动的关系^[15-22], 对全

面了解江汉平原仍显不足。本研究尝试以沉积剖面中连续提取的Ti、Rb、Sr含量和磁化率测定数据, 在AMS¹⁴C测年建立的地层年代基础上, 通过元素分布、Rb/Sr值及磁化率变化曲线的对比分析, 探讨江汉平原12.76 cal. ka B.P.以来的气候波动和沉积环境变化, 深入理解地球化学元素分布和环境磁学替代指标在环境变化研究中应用特点。这也是在江汉平原首次利用Ti、Rb、Sr元素分布和高分辨率Rb/Sr值、磁化率替代指标重建古气候、古环境, 对江汉平原河湖生态系统演变、洪涝灾害评估与防治乃至研究区域经济社会可持续发展, 有重要的科学价值和现实意义。

1 材料与方法

本文选取荆州市江陵区江北农场一处人工地

收稿日期: 2011-07-22; **修订日期:** 2011-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971115)、教育部“985工程”专项南京大学研究生科研创新基金项目(2011CL11)、国家科技支撑计划项目(2010BAK67B02)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090091110036)、中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLGG0817)、江苏高校优势学科建设工程基金项目资助。

作者简介: 李 枫(1969-), 女, 广西陆川人, 博士研究生, 主要从事全球变化与第四纪环境考古研究。E-mail: fion12395@hotmail.com

通讯作者: 朱 诚, 教授, 博士生导师。E-mail: zhuchengnj@yahoo.com.cn

层露头(JZ-2010),地表高程42.32 m (a.s.l),地理坐标 $30^{\circ}11'01''\text{N}$, $112^{\circ}22'02''\text{E}$ (图1)。2010年3月经开挖清理取得总深度为637 cm的新鲜剖面,下部厚度约303 cm为灰棕、黄棕与棕黑色淤泥互层,夹杂碳屑和植物残体,富含有机质并伴有明显呈锈斑状的铁锰聚集;中部为约103 cm的黑色泥炭;上部约183 cm为暗棕、红棕、灰红色淤泥互层,发育良好水平层理,层理厚约3~5 mm至10~20 cm不等;顶部约48 cm为粘土质粉砂和表土层。整个剖面根据沉积结构、颜色和粒径形态分为7个层位(图2)。在不同层位采集6个AMS¹⁴C测年样品,自下而上7~5层以2 cm间距,4~1层以不等间距共采集样品259个,各装入密封袋以防止样品污染。

AMS¹⁴C测年由中国科学院广州地球化学研究所AMS¹⁴C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。测试元素Rb、Sr、Ti含量样品经自然风干,人工研磨至200目后压制成圆片,用南京大学现代分析中心ARL-9800型X射线荧光光谱仪(XRF)进行,经国家地球化学标准样(GSS1和GSD9)分析,误差 $\pm 1\%$ (10^{-6})。磁化率以自然风干样品在南京大学区域环境演变研究所采用KLY-3型卡帕桥磁化率仪测试完成。

2 分析结果

2.1 年代确立和磁化率曲线变化

AMS¹⁴C测年数据经CALIB 6.0树轮校正和内插外推^[23-25],建立了JZ-2010剖面沉积年代序列(表1),年代数据结果与深度也呈现很好的线性关系

($R^2 = 0.970\ 9$)。根据剖面各层位的AMS¹⁴C年代推算其平均沉积速率,5层以下约为0.352 mm/a(最底部第7层仅为0.276 mm/a),5层以上则约为1.895 mm/a。对比磁化率值5层以下平均为26.20,标准偏差42.60,磁化率曲线基本平稳(图2),只分别在7.0~6.6 cal. ka B.P.、4.4~3.8 cal. ka B.P.和3.0 cal. ka B.P.出现异常高值;而5层以上平均值增加为197.92,标准偏差60.03,两者均比5层以下为高,磁化率曲线形态也呈现高频大幅波动并出现峰值。Thompson等指出磁化率值越高反映流域内原生磁性矿物的输入量越大^[3];也有研究通过磁化率测量获取人类活动引起的沉积速率和流域土地利用类型变化的信息,认为磁化率值升高反映了流域内由于耕作和森林砍伐而导致基岩侵蚀加剧^[26, 27]。JZ-2010剖面的沉积速率和磁化率特征,显示磁化率值异常体现了沉积环境变化,响应着江汉平原新石器时代不同文化类型的演替,特别是1.2 cal. ka B.P.以来人类活动的效应显著增强。

2.2 Ti元素含量及表生环境中的Ti

表2中,整个剖面中Ti、Rb和Sr元素分布变幅都不大,但始终波动频繁,说明该3种元素在表生地层中的含量分布对沉积环境变化的响应较为敏感。其中,Ti取值范围为 $(3\ 983.41\sim 7\ 998.2)\times 10^{-6}$,平均值为 $5\ 827.76\times 10^{-6}$,标准偏差693.39,变异系数12%。JZ-2010剖面中Ti元素总体含量较高(元素Ti的地壳平均丰度 $5\ 700\times 10^{-6}$)^[28],分析其原因,一方面是Ti本身是自然界丰度较高且化学性质稳定的元素,在风化壳内部通常由于其它元素于风



图1 江汉平原JZ-2010剖面区位

Fig.1 The site of JZ-2010 profile in Jianghan Plain

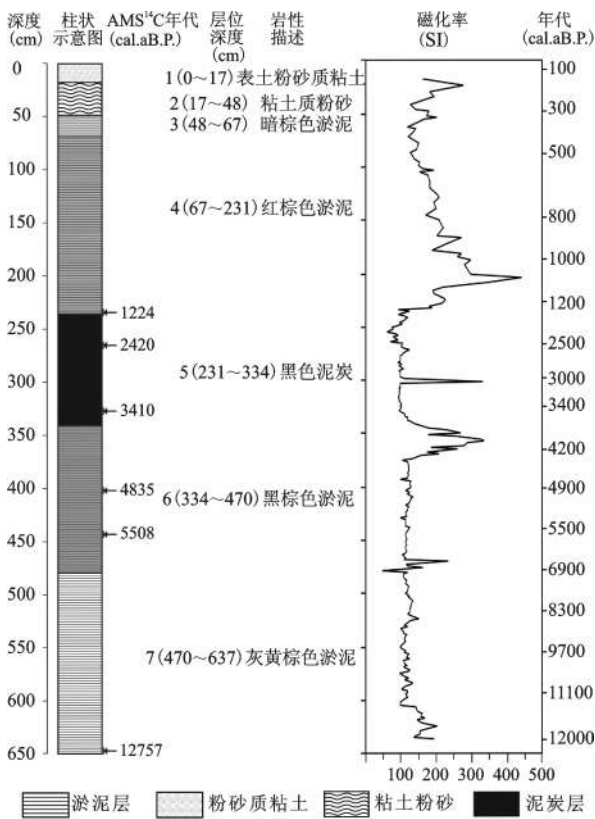


图2 JZ-2010剖面示意及磁化率
Fig.2 Lithology of JZ-2010 Profile and the variation
of Magnetic Susceptibility

化、水化过程中流失使Ti产生相对富集;另一方面受到白垩纪以来江汉平原持续沉降,且沉降量大于沉积量的区域条件影响^[29],使Ti元素在表生环境中不断累积而稳定增长。同时,腐殖质酸能够溶解部分Ti而导致其流失^[28],剖面Ti含量于7.9 cal. ka B.P.后转为波动下降,并于黑色泥炭发育良好的第5层达到谷值,表明腐殖质酸的溶解作用是重要因素。由此可见全新世早期以来江汉平原植被覆盖良好,地表侵蚀减弱而成壤作用强烈,腐殖质酸大量生成加强了对表生环境中Ti元素的溶解。剖面描述中7和6层多夹杂植物残体、碳屑和有铁锰聚集,而5层则发育泥炭的变化,也正体现Ti元素含量曲线波动的环境背景。这表明,江汉平原地区Ti元素含量受到多重因素影响。

2.3 Rb、Sr的差异分布和Rb/Sr值变化
JZ-2010剖面Rb取值范围(74.70~210.20)×10⁻⁶,平均值为145.99,标准偏差21.66,变异系数15%;Sr取值范围为(94.44~177.70)×10⁻⁶,平均值为116.72,标准偏差16.89,变异系数14%。Rb/Sr取值范围为0.46~1.76,平均值1.28,标准偏差0.28,变异系数22%。该Rb、Sr含量和Rb/Sr值与中国长江下游地区下蜀黄土剖面中的Rb值[(76~223)×10⁻⁶]、Sr值[(109~207)×10⁻⁶]和Rb/Sr值(0.41~1.20)^[9]相似。

表1 JZ-2010剖面AMS¹⁴C测年及校正数据
Table 1 AMS¹⁴C and calendar age of JZ-2010 profile

送样编号	样品性质	采样深度(cm)	测试编号	AMS ¹⁴ C年代(a B.P.)	2σ校正年代	日历年代(cal a B.P.)
JJ AMS ¹⁴ C-9	泥炭	231~232	GZ4100	1270±20	678AD(100%)775AD	1224
JJ AMS ¹⁴ C-8	泥炭	262~264	GZ4099	2405±20	539BC(98.1865%)401BC	2420
JJ AMS ¹⁴ C-6	泥炭	318~320	GZ4098	3185±20	1497BC(100%)1422BC	3410
JJ AMS ¹⁴ C-4	淤泥	395~397	GZ4096	4235±20	2903BC(85.9137%)2867BC	4835
JJ AMS ¹⁴ C-2	淤泥	435~437	GZ4095	4815±25	3588BC(67.242%)3528BC	5508
JJ AMS ¹⁴ C-1	淤泥	635~637	GZ4094	10870±35	10943BC(100%)10670BC	12757

表2 JZ-2010剖面Ti、Rb、Sr含量和Rb/Sr值分析统计
Table 2 Concentration and distribution of Ti, Rb, Sr and Rb/Sr ratio of JZ-2010 profile

剖面 层号	深度 (cm)	样品 数	Ti(×10 ⁻⁶)		Rb(×10 ⁻⁶)		Sr(×10 ⁻⁶)		Rb/Sr	
			范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
1	0~17	1	5507.14	5507.14	137.79	137.79	134.86	134.86	1.02	1.02
2	17~48	7	3983.31~5542.61	4789.88	74.70~128.03	107.59	131.53~161.91	145.69	0.46~0.97	0.75
3	48~67	7	5410.70~5723.84	5529.43	122.57~141.22	135.85	139.08~153.72	145.68	0.81~1.00	0.93
4	67~231	38	4916.00~6679.17	5540.96	120.89~210.20	152.86	114.16~177.70	141.60	0.69~1.73	1.11
5	231~334	53	4111.02~5872.10	5144.86	127.67~178.10	160.58	98.72~113.82	108.79	1.15~1.62	1.48
6	334~470	69	5408.69~6722.68	5870.51	141.44~184.43	161.18	94.44~125.25	106.99	1.13~1.76	1.52
7	470~637	84	4856.58~7998.21	6468.43	98.78~151.88	125.34	95.91~130.63	113.43	0.76~1.52	1.12

研究表明,Rb、Sr离子半径等化学性质的不同使其在地表沉积过程中形成分布差异,即Rb趋向于赋存在粘土矿物中,Sr主要在砂和粉砂粒级中富集。JZ-2010剖面以淤泥为主,粒度分布偏细,5层以下Rb、Sr分别呈富集和流失趋势;4层以上随粒度稍粗至地表渐成粘土质粉砂,分布趋势呈Rb流失和Sr富集,与前人研究成果相符^[5,6,9,30,31]。

进一步分析可发现,JZ-2010剖面Rb、Sr的含量分布在5~7层和1~4层两部分有明显不同,特别是Sr在下部平均值(110.08)和变异系数(7%)均很低,至上部显著增高(平均值和变异系数分别为142.55和12%);相应的Rb/Sr平均值在下部较高(1.34)而上部较低(1.03),变异系数22%也明显高于单个元素的统计值,说明JZ-2010剖面Rb/Sr值的变化主要受Sr含量影响,且Rb/Sr值对沉积环境变化的响应较单个元素更敏感。

3 讨论

3.1 Ti元素的环境变化指示意义

JZ-2010剖面底部Ti元素含量为 $(5\ 700\sim6\ 200)\times 10^{-6}$,可视为江汉平原晚冰期偏干环境的初始值。晚冰期向全新世过渡时期,东亚季风区夏季风持续增强诱导的降水量增长^[31,32],有效改善了环境湿度条件,地表径流发育,流水侵蚀增强,陆源碎屑沉积通量的增加形成稳定元素Ti在表层沉积中的相对富集,表现在剖面Ti含量曲线自底部向上波动上升;此期间Ti含量的明显降低,则反映了气候变干降水减少导致的侵蚀减弱与沉积通量减少。8.0 cal.ka B.P.以来,赤道热带辐合带(ITCZ)逐渐南移导致东亚季风降水持续减弱^[32,33],剖面中Ti含量于7.9 cal. ka B.P.达到峰值后波动下降,降水减小影响地表径流发育,从而减弱流水侵蚀导致沉积量减少是原因之一。前文结果分析中已指出,大量腐殖质酸的溶解作用也是造成Ti含量下降的重要原因。则此过程中Ti含量的突然增加,如JZ-2010剖面中4.3~3.9 cal. ka B.P.的情形,则可能指示偏干环境导致腐殖质发育减缓或中断,腐殖质酸溶解作用减弱甚至停止;还可能伴有水分条件变差破坏原有良好的植被覆盖,导致基岩暴露侵蚀沉积增大。因此,沉积剖面中Ti含量变化受到多重因素影响,对于环境干湿程度转变的解释必须结合研究区域具体情况,并辅以其它环境替代指标。

3.2 Rb/Sr值的古环境意义

对中国黄土地层研究显示,Rb/Sr值变化本质上反映东亚季风系统的两个相互消长因子——冬季风和夏季风在轨道时间尺度上的循环交互^[5,6,31]。近年研究表明,Rb/Sr值的变化不仅受风化作用控制,还与沉积物源、粒度及赋存相态的影响有关^[30,31,34,35]。比洛川黄土剖面中Rb $[(76\sim133)\times 10^{-6}]$,平均值为 104×10^{-6} 、Sr $[(115\sim213)\times 10^{-6}]$,平均值 170×10^{-6} 的分析结果^[31],尽管JZ-2010剖面总体上Rb含量偏高而Sr含量偏低,但在各层中分布的差异性接近黄土剖面的古土壤层,不同于各期黄土层两者相对均匀分布的特征;更有意义的是JZ-2010剖面Rb/Sr值变化范围,与洛川黄土剖面中古土壤层的Rb/Sr值(0.45~1.20)也近乎一致。与此相对,内陆封闭湖泊沉积物的研究则显示,Rb/Sr高值反映了不利于化学风化的冷湿气候环境,较强风化作用的温暖时期则对应低Rb/Sr值阶段^[30,34]。结合江汉平原自然条件和JZ-2010剖面的湖相沉积特征,认为Rb/Sr值是东亚季风环流影响的降水量和干湿程度密切相关的环境替代指标:Rb/Sr高值指示夏季风增强带来较多降水的湿润环境;相反Rb/Sr低值指示夏季风减弱导致降水量减少的偏干环境。

3.3 沉积环境干湿变化阶段划分

根据元素Ti、Rb、Sr含量数据分析,结合Rb/Sr值和磁化率的变化特点,JZ-2010剖面所记录的江汉平原环境干湿变化可划分为7个阶段(图3)。

阶段I, 12.76~9.06 cal. ka B.P.(637~535 cm)。这是晚冰期向全新世过渡和偏干环境逐渐转向偏湿的阶段。各环境替代指标于12.0~11.5 cal. ka B.P.显著波动,综合分析是研究区域对YD事件的响应,其时段与邻近的大九湖泥炭TOC和 $d^{13}C$ ^[36]、南京葫芦洞 $d^{18}O$ ^[37]及贵州茂兰石笋 $d^{18}O$ ^[38]的记录部分重合。随后各指标于10.7~10.4 cal. ka B.P.和9.9~9.6 cal. ka B.P.又记录了两处较明显的变干。

阶段II, 9.06~7.9 cal. ka B.P.(535~503 cm)。该阶段初期各环境替代指标呈明显变化,指示着江汉平原全新世早期显著的环境变化。随后各指标显示江汉平原区降水和湿度持续增加。对非洲全新世湖泊水位变化的研究显示,在9.0 ka B.P.从 $15^{\circ}30'S$ 向北所有湖泊均处于高水位^[39]。Spaulding通过模拟研究认为是轨道变化驱动夏季辐射增加,导致低纬度地区季风增强,影响范围估算在 $10^{\circ}\sim35^{\circ}N$ ^[40]。这些结果有力地支持本文讨论。前

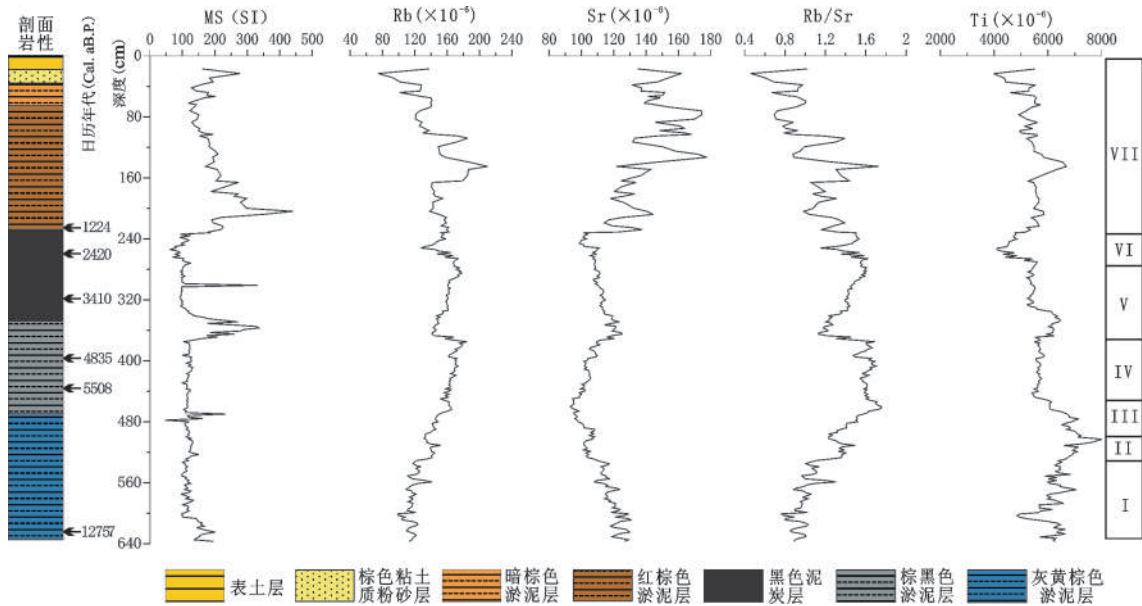


图3 江汉平原JZ-2010剖面环境替代指标变化

Fig. 3 Multi-proxy records and comparison of the JZ-2010 Profile

人研究指出^[41]约8.2 ka B.P.出现全新世以来范围最大、程度最强的气候突变,而JZ-2010剖面各指标表现均不突出。显然,江汉平原对显著变冷干的8.2 ka B.P.事件无明确响应,其环境变化的区域独特性值得结合其它替代指标进行更深入探讨。

阶段 III, 7.9~6.05 cal. ka B.P. (503~452 cm)。本时期江汉平原环境湿润程度继续增强,植被发育良好使基岩侵蚀减弱,沉积通量减少且沉积组分变细。但在约7.1~6.6 cal. ka B.P.期间磁化率异常波动,Ti含量也显著升高,可能是古人类活动的反映。考古研究证实,江汉平原新石器时代大溪文化起始时间即为约6.9 ka B.P.^[42]。

阶段 IV, 6.05~4.42 cal. ka B.P. (452~375 cm)。该阶段江汉平原处于全新世以来最湿润的环境。对新石器时代人类遗址时空分布与环境变迁关系的研究表明,此期江汉湖群不断扩张^[42, 43]。而约5.2~4.8 cal. ka B.P.为气候相对变干时期,推测是促成大溪文化向屈家岭文化转变的自然背景。

阶段 V, 4.42~2.7 cal. ka B.P. (375~280 cm)。该阶段初期各环境替代指标都现突变,磁化率值异常偏高,侵蚀加剧且较粗颗粒组份增多,显示江汉平原4.42~4.0 cal. ka B.P.经历显著的干旱事件,此前7.9~4.42 cal. ka B.P.持续约达3.5 ka的湿润期迅速结束。自然环境的变化促进了屈家岭文化向石家河文化转变,人类开始进入江汉平原腹地定居^[42, 43]。4.0 cal. ka B.P.后环境又快速转向偏湿直

至本时段结束。约3.0 cal. ka B.P.的磁化率异常偏高应与古楚人迁入江汉平原有关^[42~44]。

阶段 VI, 2.7~1.22 cal. ka B.P. (280~231 cm)。前期各指标变化显示江汉平原经历由湿润转偏干再转湿的过程。现存史料对这一阶段的环境变化记载明确^[13, 44]。对比各指标对4.42~4.0 cal. ka B.P.干旱事件和本阶段2.2~1.9 cal. ka B.P.变干的记录,本阶段磁化率无异常增高,Ti含量以溶解降低为主,结合史料推测应是楚人迁入江汉平原后,研究区长期做为楚王游猎的禁苑保护地,客观上减少了人类活动对植被的破坏,减弱了侵蚀和沉积。

阶段 VII, 1.22 cal. ka B.P.至今 (231~0 cm)。各环境替代指标波动剧烈,江汉平原环境整体向偏干发展,侵蚀加剧,水位与沉积条件变化迅速,气候与环境受人类活动强干扰,磁化率峰值和Ti的高含量显示其影响于唐宋时期达到高峰。

4 结 论

1) 在JZ-2010剖面AMS¹⁴C测年建立的时间序列基础上,通过对沉积物中的元素Rb、Sr和Ti含量及Rb/Sr值、磁化率等多项环境替代指标的综合分析,江汉平原12.76 cal. ka B.P.以来环境干湿变化可划分为7个阶段,即晚冰期由偏干转向偏湿波动、全新世开始湿度增强、全新世中期偏湿到湿润再至干湿波动,全新世晚期至现代偏湿到偏干的过程;同时多指标明确记录了YD、4.2 cal. ka B.

P.和 2.0 cal. ka B.P.的变干事件。

2) JZ-2010 剖面记录的江汉平原 12.76 cal. ka B.P.以来环境干湿变化体现了东亚季风环流的影响,特别是晚冰期后夏季风快速增强,全新世早期强盛和随后衰退的变化特点,其驱动机制应当是夏季太阳辐射控制下赤道热带辐合带逐渐南移并导致东亚季风降水减弱;同时也表现出较强的区域独特性,即受到白垩纪以来持续构造沉降,以及东北、北、西三面环山而东南面向夏季风倾斜开放的地势影响。

3) JZ-2010 剖面中磁化率波动与江汉平原新石器时代各文化类型的出现或转型相关。在东亚季风环流占主导地位的湿润地区,磁化率异常偏高突显了人为因素对自然沉积环境的影响。

4) 特定元素在沉积层中的含量和分布及其比值受到多重因素影响,今后需加强对湿润半湿润地区 Rb、Sr 差异分布和 Rb/Sr 值变化以及 Ti 的稳定沉积条件与腐殖质酸溶解的量化研究。

致谢:衷心感谢南京大学地理与海洋科学学院王富葆教授、鹿化煜教授两位老师的关心指导。

参考文献:

- [1] Lowe J J, Walker M J C. 第四纪环境演变[M]//沈吉,于革,吴敬禄,等译.北京:科学出版社,2010:92~95.
- [2] Dearing J. Core correlation and total sediment influx[C]//Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. Berglund B E (Eds.). Chichester & New York: John Wiley, 1986: 67-90.
- [3] Thompson R, Oldfield F. 环境磁学[M]//严尧基,吴邦灿,陈达,等译.北京:地质出版社,1995.
- [4] Schilman B, Bar-Matthews M, Almogi-Labin A, et al. Global climate instability reflected by Eastern Mediterranean marine records during the late Holocene[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2001, **176**(1-4): 157-176.
- [5] Chen J, An Z S, Head J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during the last 130 000 years and their implications for monsoon paleoclimatology[J]. *Quaternary Research*, 1999a, **51**: 215-219.
- [6] 陈骏,汪永进,陈旻,等.中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义[J]. *地质学报*, 2001, **75**(2): 259-266.
- [7] Haug G H, Günther D, Peterson L C, et al. Climate and the Collapse of Maya Civilization[J]. *Science*, 2003, **299**: 1731-1735.
- [8] 庞奖励,黄春长,刘安娜,等.黄土高原南部全新世黄土-古土壤序列若干元素分布特征及意义[J]. *第四纪研究*, 2006, **27**(3): 357~364.
- [9] 李福春,谢昌仁,金章东,等.南京老虎山黄土剖面中铷锶地球化学与磁化率与古气候变化的关系[J]. *中国地质*, 2003, **30**(1): 93~98.
- [10] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon[J]. *Nature*, 2007, **445**: 74-77.
- [11] Ver Straeten C A, Brett C E, Sageman B B. Mudrock sequence stratigraphy: A multi-proxy (sedimentological, paleobiological and geochemical) approach, Devonian Appalachian Basin[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, **304**: 4-73.
- [12] 李中轩,朱诚,闫慧,等.静水沉积地层中 Ti 含量变化对干湿环境的响应——以重庆中坝遗址为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, **30**(5): 137~143.
- [13] 周凤琴. 云梦泽与荆江三角洲的历史变迁[J]. *湖泊科学*, 1994, **6**(1): 22~32.
- [14] 张玉芬,李长安,陈国金,等.江汉平原湖区周老镇钻孔磁化率和有机碳稳定同位素特征及其古气候意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2005, **30**(1): 114~120.
- [15] 张丕远. 中国历史气候变化[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1996.
- [16] Boyle J F, Rose N L, Bennion H, et al. Environmental impacts in the Jiangnan Plain: Evidence from lake sediments[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, **112**: 21-40.
- [17] 羊向东,朱育新,蒋雪中,等.沔阳地区一万多年来孢粉记录的环境演变[J]. *湖泊科学*, 1998, **10**(2): 23~29.
- [18] 谢远云,李长安,王秋良,等.江汉平原 9.0 ka B.P. 以来的气候演化: 来自江陵剖面沉积物的记录[J]. *地理科学*, 2006, **26**(2): 199~204.
- [19] 陈正洪,史瑞琴,陈波. 季节变化对全球气候变化的响应——以湖北省为例[J]. *地理科学*, 2009, **29**(6): 911~916.
- [20] 李中轩,朱诚,闫慧. 汉江中下游新石器文化遗址的空间格局[J]. *地理科学*, 2011, **31**(2): 239~243.
- [21] 方修琦,侯光良. 中国全新世气温序列的集成重建[J]. *地理科学*, 2011, **31**(4): 387~393.
- [22] Yin H F, Liu G R, Pi J G, et al. On the river-lake relationship of the middle Yangtze reaches[J]. *Geomorphology*, 2007, **85**: 197-207.
- [23] Stuiver M, Reimer P J. Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program[J]. *Radiocarbon*, 1993, **35**(1): 215-230.
- [24] Stuiver M, Reimer P J, Bard E, et al. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24 000-0 cal B P [J]. *Radiocarbon*, 1998, **40**(3): 1041-1083.
- [25] Reimer P J, Baillie M G L, Bard E, et al. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50 000 years cal BP [J]. *Radiocarbon*, 2009, **51**(4): 1111-1150.
- [26] Sandgren P, Fredskild B. Magnetic measurements recording Late Holocene man-induced erosion in S. Greenland[J]. *Boreas*, 1991, **20**: 215-228.
- [27] Beach T, Dunning N, Luzzadder-Beach S, et al. Impacts of the ancient Maya on soils and soil erosion in the central Maya Lowlands[J]. *Catena*, 2006, **65**(2): 166-178.
- [28] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [29] 任美铎. 中国自然地理纲要(修订第三版)[M]. 北京: 商务印书

- 馆,2004.
- [30] 申洪源,贾玉连,李徐生.内蒙古黄旗海不同粒级湖泊沉积物 Rb、Sr 组成与环境变化[J].地理学报,2006,61(11):1208~1217.
- [31] 陈 骏,安芷生,汪永进,等.最近 800 ka 洛川黄土剖面中 Rb/Sr 分布和古季风变迁[J].中国科学(D 辑),1998,28(6):498~504.
- [32] Rohling E J, Liu Q S, Roberts A P, et al. Controls on the East monsoon during the last glacial cycle, based on comparison between Hulu Cave and polar ice-core records[J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(27-28): 3291-3302.
- [33] 董进国,孔兴功,汪永进.神农架全新世东亚季风演化及其辐射耦合带控制[J].第四纪研究, 2006, 26(5): 827~834.
- [34] 金章东,王苏民,沈 吉,等.全新世岱海流域化学风化及其以气候事件的响应[J].地球化学,2004,33(1): 29~36.
- [35] 黄 润,朱 诚,王升堂.天堂寨泥炭地层的磁化率、Rb/Sr 值及其反映的古气候意义[J].地理科学,2007, 27(3): 385~389.
- [36] 马春梅,朱 诚,郑朝贵,等.晚冰期以来神农架大九湖泥炭高分辨率气候变化的地球化学记录研究[J].科学通报,2008,53(增刊 I): 26~36.
- [37] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. Science, 2001, 294(5550): 2345-2348.
- [38] 覃嘉铭,袁道先,程 海,等.新仙女木及全新世早中期气候突变事件: 贵州茂兰石笋氧同位素记录[J].中国科学(D 辑·地球科学),2004,34(1):69~74.
- [39] Kiage L M, Liu Kam-biu. Late Quaternary paleoenvironmental change in East Africa: a review of multiproxy evidence from palynology, lake sediments, and associated records[J]. Progress in Physical Geography, 2006, 30(5): 633-658.
- [40] Spaulding W G. Pluvial climatic episodes in North America and Africa: types and correlation with global climate[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1991, 84(1-4): 217-227.
- [41] Alley R B, Mayewski P A, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago[J]. Geology, 1997, 25(6): 483-486.
- [42] 王红星. 长江中游地区新石器时代遗址分布规律、文化中心的转移与环境变迁的关系[J]. 江汉考古, 1998, (1): 53~61.
- [43] 朱 诚, 钟宜顺, 郑朝贵, 等. 湖北旧石器至战国时期人类遗址分布与环境的关系[J]. 地理学报, 2007, 62(3): 227~242.
- [44] 谭骥骧. 云梦与云梦泽[J]. 复旦大学学报(历史地理专辑, 社会科学版), 1980, (S1): 1~11.

A High-resolution Study of Moisture Evolution in the Jiangnan Plain Since 12.76 cal. ka B.P.

LI Feng¹, WU Li¹, ZHU Cheng¹, SUN Wei¹, WANG Xiao-cui¹, MENG Hua-ping², LIU Hui²,
QI Shi-zheng³, GONG Qi-lan³, ZHU Guang-yao⁴, ZHOU Feng-qin⁵, LI Su-yuan⁶, OUYANG Jie⁷

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210013, China; 2. Hubei Provincial Institute of Cultural Relics and Archaeology, Wuhan, Hubei 430077, China; 3. Department of Geography, National Kaoshiung Normal University, Kaoshiung, 80201 Taiwan, China; 4. Human Literary Society Branch Department, Bengbu College, Bengbu, Anhui 233000, China; 5. Jiangjiang Institute of Hydrologic and Water Resource Survey, Changjiang River Water Resources Commission, Jingzhou, Hubei 434000, China; 6. Department of History, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China; 7. Guangdong Radio & TV University, Guangzhou, Guangdong 510091, China)

Abstract: Six AMS radiocarbon ages combined with the concentration and distribution of element Rb, Sr and Ti, Rb/Sr ratio and magnetic susceptibility are utilized to reconstruct the moisture evolution in the Jiangnan Plain during the last 12.76 ka. The multi-proxy integrated indicators of the regional moisture conditions turned from dry to wet after the Late Glacial and progressively became better and reached its optimum period until the mid-Holocene, however, punctuated by several humidity decrease phases. Begin with the severe dry event around 4.42-4.00 cal.kaBP, the environment was dry again in the Jiangnan Plain as a whole. It can be inferred that the evolution of moisture condition in the study area was dominated by the East Asian monsoon system which likely be driven by the solar insolation changes on the Northern Hemisphere. As the first time to apply the Rb/Sr ratio and Ti concentration in tracing moisture evolution in a region with typical subtropical humid climate, this study highlights the different effects and consequences of the proxies throughout the paleoenvironment process. Also the regional characteristics of continuously subsided since the Cretaceous period as well as the topography opening down to southeast. What's more the variations of magnetic susceptibility are well coincided with the transition of Neolithic culture of the Jiangnan Plain.

Key words: Jiangnan Plain; Ti concentration; Rb/Sr ratio; magnetic susceptibility; moisture evolution