

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019011501

赣中玉华山泥炭地沉积来源的粒度端元法分析与 2 000 aBP 以来气候环境重建

尚广春¹, 李亮¹, 马春梅^{1,2}, 禹双文¹, 赵琳¹, 崔安宁¹

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2. 江苏省气候变化协同创新中心, 南京 210023

摘要: 利用江西玉华山沼泽泥炭地 YSH-2 钻孔的沉积物进行 AMS¹⁴C 测年, 建立年代框架, 结合该孔粒度参数、粒级组分、粒级-标准偏差、端元分析法分析, 探寻响应气候变化的粒级组分, 重建 2 000 aBP 以来气候环境。结果表明, 玉华山泥炭地沉积物粒度组成以细粉砂 (4~16 μm) 为主, 中粗粉砂 (16~64 μm) 次之; 运用端元分析法得出 3 个端元, 其中端元组分 EM1 代表水动力搬运来的较细组分, 指示气候的干湿状况, EM2 是反映土壤的成壤改造作用的组分, EM3 是突发性的气候变化带来的组分。通过偏差法得出的敏感组分 10.473~16.535 μm, 结合上述 3 个端元的变化规律, 得出近 2 000 a 的干湿变化: (1) 0—300 AD 阶段, 降水逐渐增多, 气候由干转湿; (2) 300—500 AD 气候由湿润转入干旱, 但整体较干; (3) 500—650 AD 气候波动与突发性洪涝灾害都较少, 是稳定且持续的湿润期; (4) 650—900 AD, 气候波动较大, 变化频繁, 总体偏干; (5) 900—1400 AD 是较为湿润的时期, 其中有 100 年的频繁波动期; (6) 1400—1800 AD 为小冰期, 此区域的气候变化分为湿-干-湿的 3 个阶段。

关键词: 泥炭; 粒度; 标准-粒级偏差; 端元分析法; 干湿变化

中图分类号:P534, P532

文献标识码:A

Climatic and environmental changes since 2 kaBP by End Member Modeling analysis on grain size data from a peat core of Yuhua Mountain, Jiangxi Province

SHANG Guangchun¹, LI Liang¹, MA Chunmei^{1,2}, YI Shuangwen¹, ZHAO Lin¹, CUI Anning¹

1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change, Nanjing 210023, China

Abstract: Based on the AMS¹⁴C dating of a peat core from Mt Yuhua in Jiangxi Province, China, we explore how grain size varies in response to climate changes. We then reconstruct climate change since 2 000 aBP through grain size analysis, grade-standard deviation method, and end-member model. Our results show that the sediments in the peatland of Mt Yuhua are mainly consisting of fine sand (4~16 μm) and coarse silt (16~64 μm). Three end-members EM1, EM2, and EM3 represent, respectively, fine components transported by hydrodynamics, soil-forming components, and components that reflect abrupt climate changes. Grade-standard deviation indicates a range of sensitive components between 10.473 and 16.535 μm. Our reconstruction shows, first and foremost, an increase in precipitation between AD 1–300, which was followed by a generally dry condition in AD 300–500 and a wet condition in AD 500–650, the latter period probably witnessed fewer climate fluctuations and floods. Despite an overall dry condition, climate fluctuated greatly in AD 650–900, and, while AD 900–1400 was relatively humid, the climate was not stable for a brief duration of 100 years. The Little Ice Age (LIA), spanning over 500 hundred years from AD 1400 to 1800, can be roughly divided into three stages, each governed by a wet, dry, and wet condition. The palaeoclimatic reconstruction in this study is proved to be reliable when compared with δ¹⁸O data collected from Dongge cave and the humidity index of Jiangnan region.

Key words: peat; grain size; grade-standard deviation method; end member modeling; climate change

资助项目: 国家重点研发项目“过去气候变化定量重建方法和我国区域气候重建”(2016YFA0600501); 国家自然科学基金“赣北山地泥炭沼泽记录的小冰期高分辨率植被与气候变化”, “宁绍平原全新世植被对气候-海面变化-人类活动耦合过程的响应研究”(41371202, 41671196); 中央高校基本科研业务费专项资金资助“渭河盆地孢粉记录的植被对新生代降温事件的响应”(020914380066)

作者简介: 尚广春(1995—), 男, 硕士生, 主要从事第四纪环境变化的研究工作, E-mail: 1312051189@qq.com

通讯作者: 马春梅(1976—), 女, 副教授, 主要从事区域环境演变与环境考古研究, E-mail: chunmeima@nju.edu.cn

收稿日期: 2019-01-15; **改回日期:** 2019-04-05. 文凤英编辑

沉积物可以有效地反映地质与历史时期的气候变化和沉积环境^[1-4]。为了对未来的环境变化进行预测,重建地质时期尤其是全新世以来的环境演变变得十分重要^[5-6]。过去全球变化(PAGES)的基本任务旨在研究过去气候环境、生态过程和人类活动的长期相互作用。湖泊水量是控制粒度分布的重要因素,粒度的粗细代表水动力的强弱和湖泊水量的相对大小^[7-9];在黄土沉积物中,粗颗粒的含量和中值粒径的大小可以指示历史时期沙尘天气发生的频率和强度^[10-11];而在古洪水的判别中,粒度频率分布和累积曲线也是很重要的判别方法^[12-13]。随着数学在沉积学中的应用愈加广泛和深入,利用因子分析法^[14-15]、Weibull 分布函数拟合^[16]、粒级-标准偏差^[17-18]、端元模型法^[19-23]等数学方法可以从多峰态的粒度频率分布曲线中分离出单一粒度组分特征,提取敏感组分并对沉积物的来源进行分析。Liu^[23]等在苏凯湖通过端元法得出 4 个端元,取其中较有意义的 3 个做对数运算,得出的 HI 指数与季风有很好的对应关系;Yu^[22]等在端元分析法基础上改进的贝叶斯端元分析法,应用于西部的沙漠和湖泊。但运用端元分析法对泥炭地的探究未有实例,因此本文希望对此进行研究。

过去 2 000 a 的气候变化由来已久,最早对过去 2 000 a 的气候研究起源于欧洲学者,Lamb^[24]定义了罗马暖期(Roman W.)、黑暗时代冷期(Dark Age Cold)、中世纪暖期(MWP)、小冰期(LIA)的大致起讫年代。但欧洲的气候情况与我国不完全相同,因此,我国也有很多学者致力于研究近 2 000 a 的气候研究,最早的有竺可桢先生通过物候法对我国近五千年来气候变化得出温度曲线,划分出历朝的大致冷暖时期;葛全胜^[25]等在前人研究基础上得出,中国的温度变化存在准 700 a 和 200~300 a 的周期;降水变化则存在 20~30 a 和准 70 a 的周期。郑景云^[26]等的研究表明中国东部降水同样存在数百年的趋势变化,西部中世纪暖期与小冰期不明显;中世纪暖期时,中国东部的华北地区相对干旱,江南则相对湿润;而在小冰期,华北地区则相对湿润,且整个东部地区的降水变率增大。

本文基于江西玉华山泥炭钻孔沉积物高分辨率 AMS¹⁴C 测年的年代框架,结合粒度特征、沉积环境分析,运用粒级-标准偏差提取的敏感组分和 EMMA 端元分析法^[20]的端元进行比较,将历史资料与石笋记录等数据进行对比分析,明确了粒度各端元组分的环境指示意义,揭示了研究区内近 2 000 a 的环境变化及其控制因素。

1 区域地理背景

玉华山位于江西省中部(图 1),最高峰 1 169 m,其水系整体呈北北东向分布。该区属赣中南亚热带潮湿多雨季风气候区,四季交替明显,全年冷暖气团出现频繁,天气复杂且多变。春季多雨,来自南方的暖湿气流与北方的干冷气流相遇,出现强降雨、大风等强对流天气,4 月降水集中;夏季高温炎热,6 月降水集中;秋季由于副热带高压的影响,降水较少;冬季较寒冷,温度下降明显,并伴有雨雪等天气。年平均气温 18 ℃,夏季最高气温达到 39.5 ℃,冬季最低气温为 -9.2 ℃。年降水量达到 1 500~2 000 mm,3—6 月份为雨季,年蒸发量为 1 100~1 600 mm^[27-28]。

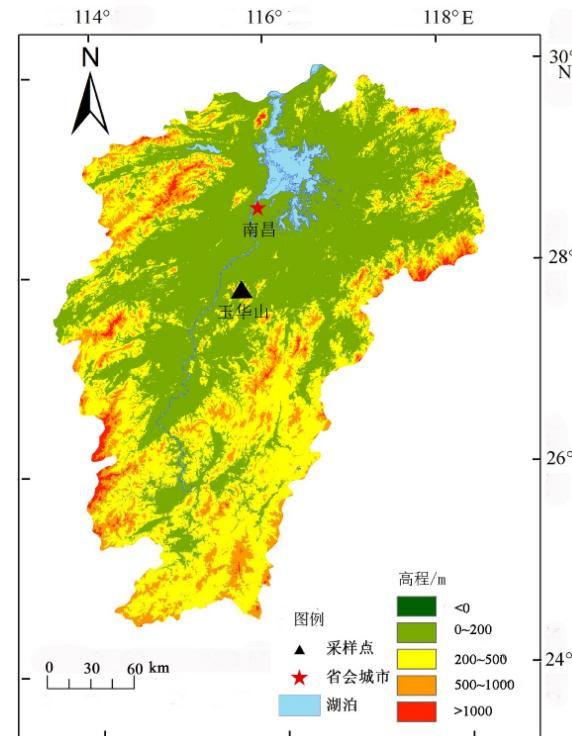


图 1 研究区地形图

Fig.1 Map showing the location of study area

2 材料与方法

2.1 样品采集

通过对玉华山的野外考察,研究组于 2014 年用半刀式俄罗斯泥炭钻钻取了钻孔,命名为 YHS2 ($27^{\circ}50'29.44''N$ 、 $115^{\circ}38'54.98''E$),YHS2 深度为 3.5 m。

2.2 实验方法

本文选取了 17 个 YHS2 钻孔的样品挑选陆生

植物残体或提取孢粉浓缩物在美国 Beta 实验室进行 AMS¹⁴C 年代测定。

YSH2 钻孔共分得 350 个样品, 粒度实验分析步骤以前人研究得出的黄土粒度前处理方法为基础^[29-30], 根据泥炭的特点做出适当调整, 具体步骤如下: 取大约 0.5 g 样品置于 200 mL 烧杯中, 静置一夜后, 加 10% 双氧水(去除样品中有机质)浸泡并加热促使反应, 直到无气泡产生为止(因泥炭地的样品含有有机质较多, 反应时间较长)。然后, 加入 10% 的 HCl 适量(去除样品中碳酸盐类物质), 于电热板上加热煮沸, 直到基本无气泡产生为止。加入超纯水浸泡样品静置一夜, 重复两遍, 样品水洗至中性, 加入 0.006 mol/L 的六偏磷酸钠 [(NaPO₃)₆] 试剂, 超声波振荡器中震荡 10 min, 使细颗粒物质充分散开, 用 Mastersizer2000 激光粒度仪进行粒度检测。

3 结果

3.1 剖面岩性特征

YHS2 钻孔根据地层岩性差异自上而下划分为 14 个岩性单元(图 2), 分别为: 0~30 cm 为棕色沼泽土; 30~70 cm 为灰黄色沼泽土; 70~108 cm 为灰黑色泥炭土; 108~130 cm 为灰黄色沼泽土; 130~145 cm 为灰黑色泥炭土; 145~165 cm 为灰黄色沼泽; 165~172 cm 为灰色沼泽土; 172~217 cm 为灰色黏土; 217~225 cm 为灰色粗砂; 225~265 cm 为灰色黏土; 265~304 cm 为褐色黏土; 304~312 cm 为灰黑色泥炭土; 312~323 cm 为灰色泥炭土; 323~350 cm 为褐色粉砂质黏土。0~172 cm 为沼泽-泥炭沉积, 172~304 cm 为黏土或砂, 为湖相沉积, 304~323 cm 为泥炭沉积, 323~350 cm 为褐色粉砂到黏土。

3.2 年代的校正

AMS¹⁴C 测年结果见表 1^[31] 所示, 为了更好地处理年代-深度关系, 我们基于贝叶斯公式年代模型^[32], 结合 R 软件为不同的年代控制点选择合适的函数^[33], 从而为 YHS2 钻孔建立准确完整的年代框架。

3.3 粒度组成与参数特征

沉积物粒度组成的粒级分成黏土(<4 μm)、细粉砂(4~16 μm)和中粗粉砂(16~64 μm)、砂(>64 μm) 4 个级别; 粒度参数是综合反映沉积物粒度特征及沉积环境的量化指标, 本文分析采用 Fork、Ward 提出的平均粒径(Mz)、分选系数(r1)、偏度(SK)、峰

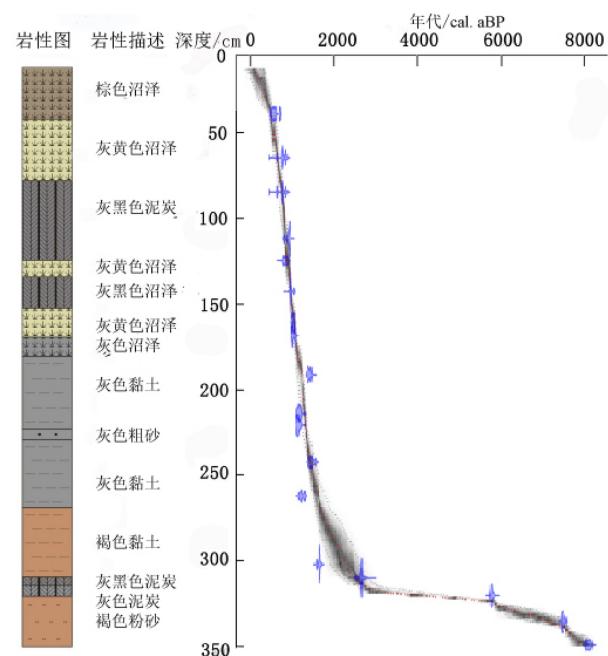


图 2 年代-深度模型

Fig.2 Age-depth model

态(Ku)4 项粒度参数, 结合平均粒径辅以比较。

YSH2 钻孔的粒度组成与参数见图 3 所示, 平均粒径 6.57~3.18Φ, 平均值 5.77Φ; 黏土含量 6.46%~20.07%, 平均值 14.48%; 细粉砂含量 13.42%~52.46%, 平均值 34.36%; 粗粉砂含量 18.50%~48.85%, 平均值 34.67%; 砂含量 1.57%~61.60%, 平均值 16.46%, 分选系数 1.06~2.97, 平均值 1.99; 偏度 -0.30~0.38, 平均值 0.013; 峰态 0.70~1.58, 平均值 1.11。

3.4 敏感组分的提取

粒级-标准偏差法用于提取敏感组分、进行古气候变化的研究由来已久, 对于追溯物源, 探讨季风海流等提供重要信息^[34-35]。本方法是依据每一粒级对应含量的标准偏差变化来获取环境敏感因子, 它的基本思路是计算每一粒级在柱状沉积物中的标准偏差值, 将标准偏差值最大的粒级作为环境敏感因子, 其敏感粒级往往是单一的。由此可以看出 YHS2 钻孔存在 3 个敏感的组分, 分别为 10.473~16.535、29.264~72.951、404.412~453.326 μm, 占比最高的 10.473~16.535 μm 组分是气候的最敏感组分。

3.5 端元组分的提取

EMMA 端元模型法^[20]能够区分粒度的不同组分, 在 MATLAB 环境下运行 Paterson^[21]等提供的 AnalySize 软件包, 然后通过综合分析各条线性相关

表 1 年代-深度模型^[32]
Table 1 List of Age-depth model^[32]

样品编号	深度/cm	测年材料	¹⁴ C年龄/aBP	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	校正年龄 2σ
YHS2-45	45	陆生植物残体	110.1±0.3	-26.9‰	
YHS2-70	70	陆生植物残体	250±30	-23.9‰	1520—1575 AD
YHS2-90	90	陆生植物残体	260±30	-25.1‰	1525—1555 AD
YHS2-117	117	孢粉浓缩物	430±30	-24.2‰	1430—1485 AD
YHS2-130	130	孢粉浓缩物	420±30	-25.2‰	1435—1490 AD
YHS2-147	147	孢粉浓缩物	530±30	-26.7‰	1405—1445 AD
YHS2-172	172	孢粉浓缩物	670±30	-27‰	1275—1315 AD
YHS2-195	195	陆生植物残体	1 060±30	-23.1‰	890—1015 AD
YHS2-217	217	陆生植物残体	880±30	-27.5‰	1155—1260 AD
YHS2-224	224	孢粉浓缩物	810±30	-27.6‰	1165—1270 AD
YHS2-245	245	陆生植物残体	1 150±30	-25.8‰	775—790 AD
YHS2-265	265	小木屑	930±30	-27.3‰	1040—1220 AD
YHS2-304	304	孢粉浓缩物	1 350±30	-28.9‰	645—685 AD
YHS2-312	312	陆生植物残体	2 380±30	-28.8‰	405—370 BC
YHS2-322	322	孢粉浓缩物	4 910±30	-28.8‰	3755—3745 BC
YHS2-337	337	陆生植物残体	6 630±30	-28.4‰	5605—5695 BC
YHS2-350	350	孢粉浓缩物	7 270±40	-25.8‰	6225—6050 BC

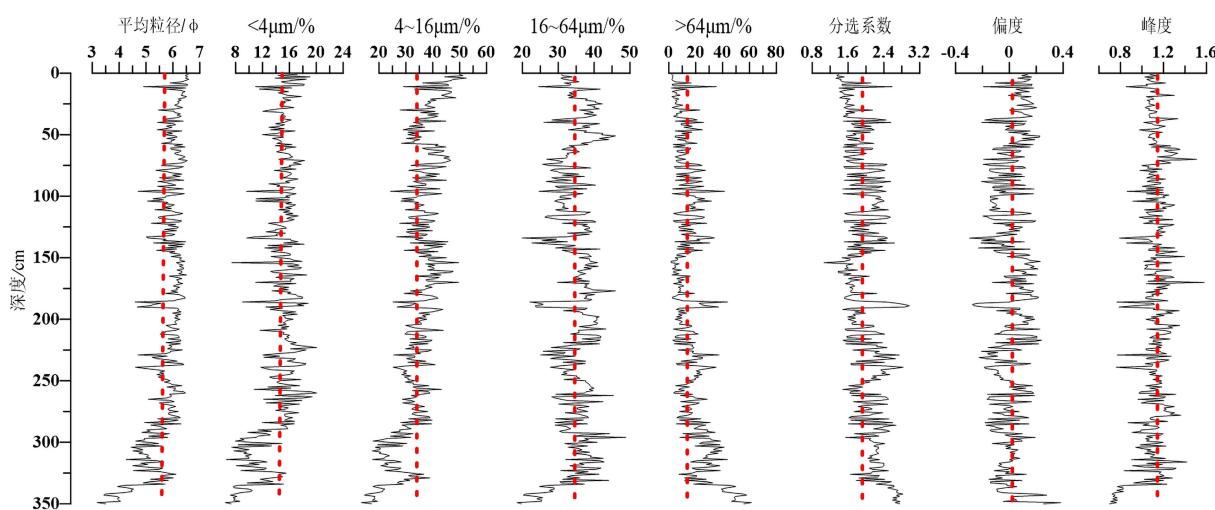


图 3 粒度组分与参数图
Fig.3 Particle size composition and parameters

性、角度偏差和端元相关度确定了最佳端元数量。

对粒度进行计算,此地属于泥炭地,多为粉砂与黏土,沉积物来源稳定单一,基于上述讨论,本文采用3个端元,两个单峰模式和有一个高低峰的模式,分别标记为EM1、EM2、EM3。EM1的峰值大约为13 μm、EM2为32 μm,EM3低峰为8 μm,而高峰为453 μm。

4 讨论

4.1 年代及粒度组成参数的讨论

YHS2 钻孔虽然在最底部的测年达到 7 ka,但是从沉积速率来看,在 312 cm 以上沉积速率较快,为

0.23 cm/a, 312 cm 以下速率缓慢, 其中 312~322 cm 沉积速率为 0.004 cm/a, 322~337 cm 沉积速率为 0.0087 cm/a, 337~350 cm 沉积速率为 0.0203 cm/a。我们认为在 312 cm 以下分辨率较低, 与前部差距较大, 可另做其他方面研究。基于此推断, 本文主要对该钻孔 312 cm 以上部分的粒度进行环境替代指标变化分析, 讨论过去 2 ka 期间的气候环境变化。

玉华山泥炭位于山间盆地, 我国西部的泥炭主要来源物质以风成为主, 而东部以水成为主, 且受到东亚季风影响强烈^[11,36]。物质输入粒度的粗细受到碎屑物质来源和水位波动相对变化的影响, 暴雨和大暴雨会夹带少量大颗粒, 周边的落石也会滚落而至, 分选性较差。分选性和平均粒径有一定的相关性, 即较粗颗粒时, 分选较差, 较细颗粒时分选较好。偏态基本都在对称态左右波动, 没有明显的趋向。峰度的变化范围基本都为 0.9~1.4, 峰态较宽。总的来说是变细的过程, 砂的含量在减少、粉砂的含量在增加。

4.2 端元组分的探讨

悬浮微粒沉积过程与其输导机制和沉积环境密切相关, 湖泊沉积物粒度组成的控制因素主要有 3 个: (1) 碎屑物质来源, (2) 湖泊水位变化, (3) 湖泊水动力^[37]。研究区位于沼泽泥炭, 东亚季风带来大部分降水, 山间盆地蓄水形成泥炭沼泽或是小型湖泊; 同时, 物质输入粒度的粗细受到碎屑物质来源和水位波动的相对变化的影响。

EM1 组分的众数为 13 μm(图 4), 占比最大, 对应的敏感组分为 10.473~16.535 μm, 是对气候干湿变化最为敏感的部分, 属于细粉砂, 粒度特征分布为正态分布, 与平均粒径的变化也较为一致, 此地是山间集水盆地, 粒径含量的变化主要反映气候干湿对粒径的影响, 当东亚季风增强、降水增多、气候湿润、侵蚀能力加强, 冲入更多的水流易带走的细粉砂粒径的物质; 反过来沉积物中 EM1 的含量增多, 指示水动力变强、降水增多、气候湿润、东亚夏季风增强。同理, EM1 减少, 水动力变弱、降水减少、气候干燥。EM1 指代的是降水的变化, 即气候的干湿状况的反映, 与葛全胜重建的江南地区的干湿指数和董哥洞石笋的同位素记录有很好的对应关系。

EM2 组分的众数为 32 μm(图 4), 对应的偏差法的敏感组分为 29.264~72.951 μm, 属于粗粉砂, 单峰结构反映较好的分选性, 同此钻孔的腐殖化度曲线有较好的对应, 腐殖化度^[38-39]是在微生物作用下, 通过生物与化学作用形成腐殖质的过程, 腐殖

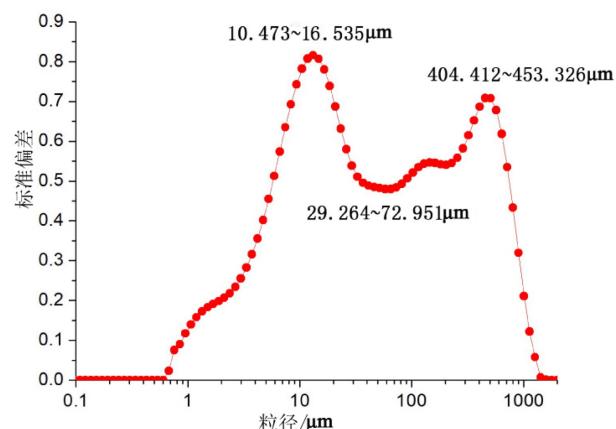


图 4 标准偏差法 (上图) 和端元分析法 (下图)

Fig.4 Standard deviation method (a) and end element analysis method (b)

化度高代表成壤作用强, 反之代表弱, 因此 EM2 可能是土壤的成壤改造作用, 受环境的氧化还原影响, 此地泥炭发育, 沉积环境较稳定, 微生物作用持续而强烈, 对沉积环境同样起到更加适合自己发展的改造作用, 因此 EM2 代表的是一定条件下土壤的成壤改造作用。

EM3 是高低峰的形态, 分为主峰和次峰, 多峰结构反映弱分选主峰的众数在 453 μm, 次峰在 8 μm, 峰值在 400 μm 以上, 且位于东部地区, 只能是水成的砂, 与河流和湖滨相砂的累积概率曲线峰值相差不大, 但符合这种双峰形式粒度频率曲线的是近源坡面冲积和洪积泥石流等突发性的事件, 分选较差, 且 EM3 占比较小, 不是主要的物质来源, 不能代表时间段的稳定的气候变化, 可能对东部地区的洪涝有指示意义, 一定程度上代表着较大的降水事件引发的山洪、滑坡或者泥石流的过程, 指示着突发性气候变化对于沉积的影响。

4.3 过去 2 000 a 气候重建

通过粒度与前人所用指标的对比来探讨端元组分所反映的干湿状况变化, 端元法 EM1 与偏差法得出的最敏感组分 10.473~16.535 μm、董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$, 与葛全胜^[40]等利用历史文献重建的江南地区干湿状况和我国东中部温度距平做了对比分析(图 5), 在 0—300 AD 阶段, EM1 增多, EM2 减少, $\delta^{18}\text{O}$ 含量相对较高, 表明此时降水较多, 沉积颗粒较细, 为较为湿润的时期, 东亚季风强盛带来的雨水较为充沛, 温度总体处于相对较暖的阶段, 但在此阶段后期, 也就是汉末三国时期, 气候开始波动较大; 在 300—500 AD 阶段, EM1、EM2 都有缓慢下降的过程, 腐殖质处于低值, 土壤的生产力较低,

还原性较强,温度逐渐转冷,沉积粒径相对变粗,整个江南地区都较为干旱,此时属于由湿润转入较干旱的时期,降水相对变少,东亚季风减弱,东亚的暖湿气流减少,江南地区整体偏干;500—650 AD 时期,EM1、EM2 再次升高,腐殖化度依然较低,

$\delta^{18}\text{O}$ 相对升高,细颗粒再次上升,代表不稳定的 EM3 减少,江南地区的大涝次数也较少,较为稳定,而且此时也有了较为完备的记录,总体比较可信,温度也有了上升的趋势,这是稳定、持续的湿润时期,这个时间段处于 Lamb 定义的黑暗时期中,但此

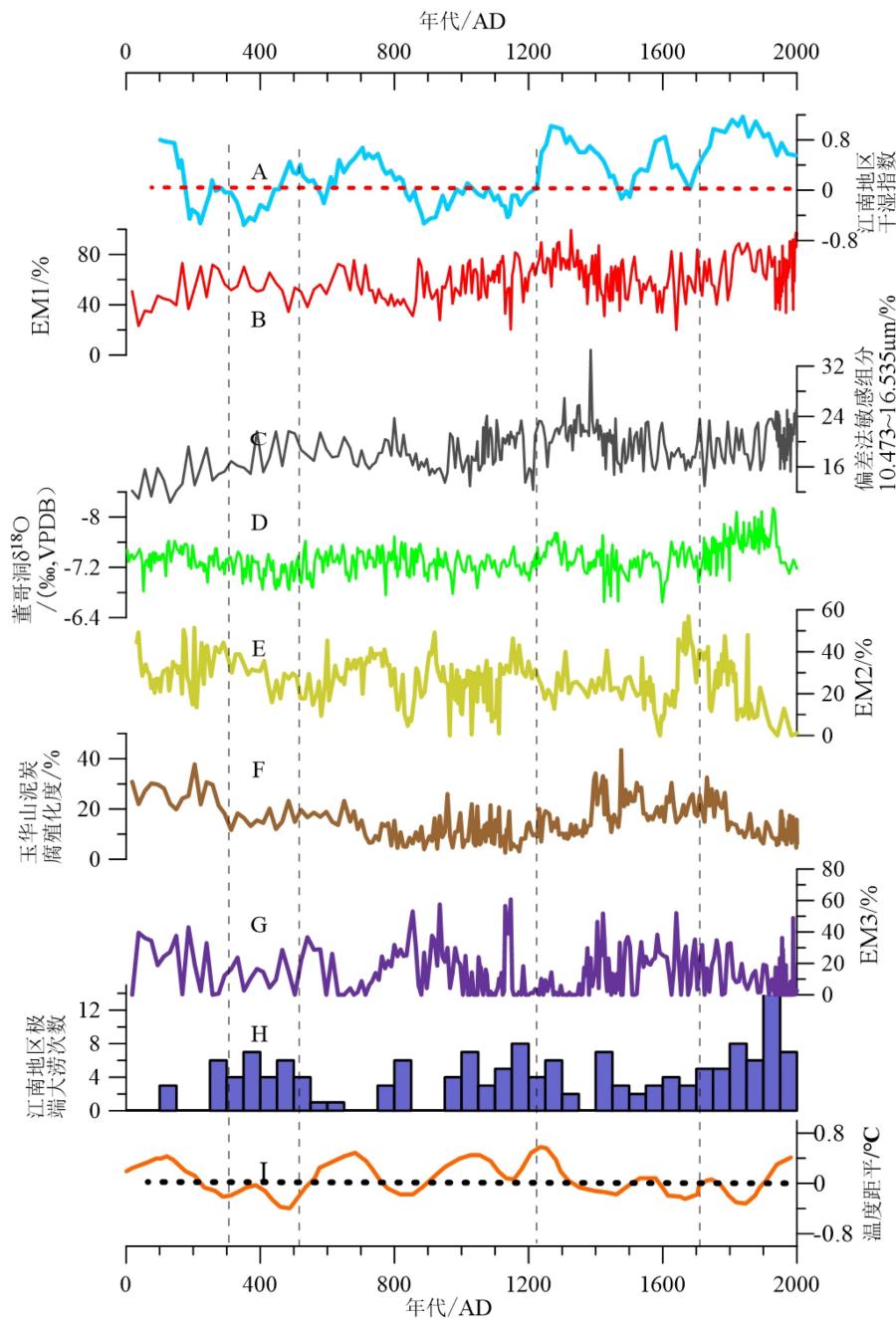


图 5 端元各组分与古气候之间的比较

A. 江南地区干湿指数^[40], B. EM1 百分含量, C. 偏差法敏感组分 10.473~16.535 μm 百分含量, D. 董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ (% VPDB)^[41], E. EM2 百分含量, F. 玉华山腐殖化度, G. EM3 百分含量, H. 江南地区极端大涝次数^[42], I. 我国东中部地区温度距平^[43]。

Fig.5 Comparison of the components of terminal element and paleoclimate

A. Dry and wet index in Jiangnan region,B. EM1 percentage content, C. Deviation method sensitive component 10.473~16.535 μm percentage content,

D. Dongge Cave stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ (% VPDB),E. EM2 percentage content, F. The humification degree of Yuhua mountain,G. EM3 percentage content,

H. Extreme floods in jiangnan region, I. Temperature in central and Eastern China.

地纬度较低, 气温较高, 因此与欧洲的结果有些不同, 与百年尺度的冷暖阶段存在区域的差异及北半球温度变化重建结果尚存在一定不确定性有关; 650—900 AD 阶段, 各曲线有良好的一致性, EM1 降低, EM2、EM3 升高, 细粒变少, 粗粒含量增多, 与 $\delta^{18}\text{O}$ 有很好的对应关系, 气候开始由湿润转为干旱, 其中出现转折, 出现大涝或是大旱次数也增多, 说明气候较不稳定, 与郝志新^[42]等统计的唐朝后期气候较为干旱相符。气候变化也可能是唐朝盛衰变化的转折, 大约从 900 AD 起, EM2、EM3 变低, 腐殖化度升高, 沉积颗粒细粒部分升高, 持续到 1100 AD 前后, 都是比较湿润的时期, 这阶段降水变化比较频繁, EM1 波动较大, 水动力的变化也较频繁, 但总体是长期的高值, 气候湿润, 季风带来较多的降水, 气候总体较为温暖; 1100—1200 AD 各个曲线依旧波动比较频繁, 总体的趋势是由湿润转向干旱, 温度则是缓慢上升, 1200—1400 AD 时期, EM1 处于高值, 细颗粒占比上升, $\delta^{18}\text{O}$ 含量也上升, 反映了江南地区气候已经由干旱转入湿润, 此时温度也慢慢转凉, EM2 与腐殖化度的占比都较高, 土壤的发育较好, 此时是比较湿润的凉爽时期; 与郑景云^[26]等得出中世纪暖期时, 中国东部的华北地区相对干旱, 江南则相对湿润的结论相似。1400—1800 AD, 总体也分为 3 个小阶段: EM1 与敏感组分都由高值缓慢转入低值, 江南地区整体分为湿-干-湿的 3 个阶段, $\delta^{18}\text{O}$ 也有相应的波动, 全都反映了小冰期时期前期较为湿润, 中期缓慢变干, 后期又慢慢变为湿润, 但温度总体还是偏低。葛全胜^[40]等认为 1430—1530 年和 1630—1740 年是两个最为干旱的百年, 这在偏差法和 EM1 的曲线中都有体现; 1800 AD 后受到人类活动的影响越来越大。

整体看来, 近 2 000 a 来我国南方的温度是总体偏暖, 即使是在小冰期, 温度距平在 0 以下的也不多见, 较暖的空气增加蒸发的强度, 空气湿度大的情况下遇冷凝结, 这也是南方地区降水变率大的一个重要的因素, 而区域内的降水总体偏湿润, 整体有略微上升的趋势, 南方地区在历史时期的水热变化不均一, 有模拟^[44]表明这可能与太阳辐射和降水带的移动等因素有关。

5 结论

(1) 玉华山泥炭地沉积物粒度组成以细粉砂(4~16 μm)为主、中粗粉砂次之(16~64 μm)、黏土(<4 μm)再次之, 砂(>64 μm)的含量最少, 结合岩

性分析表明在过去 2 000 a 沉积环境表现为湖泊向泥炭演化。

(2) 粒度端元分析结果显示 3 个端元能够最大程度地解释玉华山钻孔沉积, EM1 代表流水搬运而来的较细组分, EM2 是反映土壤的成壤改造作用的组分, EM3 代表突发性的气候事件带来的组分。其中 EM1 的变化可以较为准确地反映该区域 2 000 a 以来的干湿状况, 与各条对比曲线都有很好的一致性。

(3) 玉华山地区近 2 000 a 来干湿变化的规律为: 0—300 AD 气候由干转湿, 300—500 AD, 气候由湿润转入干旱, 整体偏干, 500—650 AD 是持续稳定的湿润期, 650—900 AD, 气候波动较大, 变化频繁, 总体偏干; 900—1400 AD 是总体较为湿润的时期, 其中有 100 a 的波动期, 1400—1800 AD 为小冰期, 气候变化为湿-干-湿的 3 个阶段。

致谢: 野外采样中得到江西师范大学贾玉连副教授、朱笑虹博士、凌超豪硕士生、凌光久硕士生、南京大学地理与海洋科学学院的本科生李圆圆等人的帮助, 在此一并感谢!

参考文献 (References)

- [1] Hu X F, Lu H Y, Xu Q, et al. Red ratings for Loess-Paleosol sequences on China's Loess Plateau and their paleo-climatic implications [J]. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 433-440.
- [2] Prins M A, Postma G, Weltje G J. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: the Makran continental slope [J]. *Marine Geology*, 2000, 169(3-4): 351-371.
- [3] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3-4): 263-277.
- [4] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 159-163.
- [5] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件 [J]. *中国科学 B 辑*, 1992, 22(12): 1300-1308. [SHI Yafeng, KONG Zhaochen, WANG Sumin, et al. Climatic fluctuations and important events during the Holocene warm period in China [J]. *Science in China Series B-Chemistry, Life Sciences & Earth Sciences*, 1992, 22(12): 1300-1308.]
- [6] 安芷生, Porter S, 吴锡浩, 等. 中国中、东部全新世气候适宜期与东亚夏季风变迁 [J]. *科学通报*, 1993, 38(14): 1302-1305. [AN Zhisheng, Porter S C, WU Xihao, et al. The climate suitable period of middle and eastern Holocene in China and the change of east Asian summer monsoon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(14): 1302-1305.]
- [7] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环

- 境记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 19-30. [SHI Xuefa, LIU Shengfa, QIAO Shuqing, et al. Depositional features and Palaeoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe Coastal Mud Area, East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 19-30.]
- [8] 王中波, 杨守业, 张志珣, 等. 东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(6): 1039-1049. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, ZHANG Zhixun, et al. The grain size compositions of the surface sediments in the East China Sea: indication for sedimentary environments [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(6): 1039-1049.]
- [9] 陈敬安, 万国江, 徐经意. 洱海沉积物粒度记录与气候干湿变迁[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 341-345. [CHEN Jing'an, WAN Guojiang, XU Jingyi, et al. Sediment particle sizes and the dry- humid transformation of the regional climate in Erhai Lake [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 341-345.]
- [10] 强明瑞, 陈发虎, 周爱锋, 等. 苏干湖沉积物粒度组成记录尘暴事件的初步研究[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 915-922. [QIANG Minrui, CHEN Fahu, ZHOU Aifeng, et al. Preliminary study on dust storm events documented by grain size component of Sugan Lake sediments, North Qaidam Basin [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 915-922.]
- [11] 何报寅, 张穗, 蔡述明. 近2600年神农架大九湖泥炭的气候变化记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2): 109-115. [HE Baoyin, ZHANG Sui, CAI Shuoming. Climatic changes recorded in peat from the Dajiu Lake Basin in Shennongjia since the last 2 600 years [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(2): 109-115.]
- [12] 薛积彬, 钟巍, 彭晓莹, 等. 南岭东部大湖泥炭沉积记录的古气候[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 105-113. [XUE Jibin, ZHONG Wei, PENG Xiaoying, et al. Paleo-climate significance for the past 12 kaBP revealed by Dahu peat record in the eastern South Mountain [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(5): 105-113.]
- [13] 潘峰, 林春明, 李艳丽, 等. 钱塘江南岸SE2孔晚第四纪以来沉积物粒度特征及环境演化[J]. *古地理学报*, 2011, 13(2): 236-244. [PAN Feng, LIN Chunming, LI Yanli, et al. Sediments grain-size characteristics and environmental evolution of Core SE2 in southern bank of Qiangtang River since the Late Quaternary [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(2): 236-244.]
- [14] 陈国成, 郑洪波, 李建如, 等. 南海西部陆源沉积粒度组成的控制动力及其反映的东亚季风演化[J]. 科学通报, 2008, 53(10): 1533-1543. [CHEN Guocheng, ZHENG Hongbo, LI Jianru, et al. Dynamic control on grain-size distribution of terrigenous sediments in the western South China Sea: implication for East Asian monsoon evolution [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(10): 1533-1543.]
- [15] 商圣潭, 钟巍, 魏志强, 等. 南岭东部定南大湖沉积物粒度敏感组分及末次冰消期环境记录[J]. 沉积学报, 2018, 36(2): 310-318. [SHANG Shengtan, ZHONG Wei, WEI Zhiqiang, et al. Evolution of climate recorded by sensitive grain-size components of Dahu swamp since 16 ka, Nanling Mountains, South China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(2): 310-318.]
- [16] 陈桥, 刘东艳, 陈颖军, 等. 粒级-标准偏差法和主成分因子分析法在粒度敏感因子提取中的对比[J]. 地球与环境, 2013, 41(3): 319-325. [CHEN Qiao, LIU Dongyan, CHEN Yingjun, et al. Comparative analysis of grade-standard deviation method and factors analysis method for environmental sensitive factor analysis [J]. *Earth and Environment*, 2013, 41(3): 319-325.]
- [17] 孙斌斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(2): 184-187. [SUN Youbin, GAO Shu, LI Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(2): 184-187.]
- [18] 肖尚斌, 李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分[J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 122-129. [XIAO Shangbin, LI Anchun. A study on environmentally sensitive grain-size population in inner shelf of the East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(1): 122-129.]
- [19] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem [J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
- [20] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(12): 4494-4506.
- [21] Yu S Y, Colman S M, Li L X. BEMMA: a hierarchical Bayesian end-member modeling analysis of sediment grain-size distributions [J]. *Mathematical Geosciences*, 2016, 48(6): 723-741.
- [22] 张晓东, 季阳, 杨作升, 等. 南黄海表层沉积物粒度端元反演及其对沉积动力环境的指示意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 59(2): 258-267. [ZHANG Xiaodong, JI Yang, YANG Zuosheng, et al. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(2): 258-267.]
- [23] Liu X Q, Dong H L, Yang X D, et al. Late Holocene forcing of the Asian winter and summer monsoon as evidenced by proxy records from the northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 280(1-4): 276-284.
- [24] Lamb H H. Climate: Present, Past and Future. Volume 2: Climatic History and the Future[M]. London: Methuen, 1977: 831-837.
- [25] 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 过去2000年中国气候变化研究的新进展[J]. *地理学报*, 2014, 69(9): 1248-1258. [GE Quansheng, ZHENG Jingyun, HAO Zhixin, et al. State-of-the-arts in the study of climate changes over China for the past 2 000 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1248-1258.]
- [26] 郑景云, 王绍武. 中国过去2000年气候变化的评估[J]. *地理学报*, 2005, 60(1): 21-31. [ZHENG Jingyun, WANG Shaowu. Assessment on climate change in China for the Last 2 000 Years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 21-31.]
- [27] 王兵, 高鹏, 郭浩, 等. 江西大岗山林区樟树年轮对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 71-76. [WANG Bing, GAO Peng, GUO Hao, et al. Responses of tree-ring width of *Cinnamomum camphora* to climate change in Dagangshan forest area of Jiangxi province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 71-76.]
- [28] 周强强. 江西玉华山盆地玉华山超单元地质特征及U-Pb定年[D].

- 东华理工大学硕士学位论文, 2012. [ZHOU Qiangqiang. Geological characteristics and U-Pb dating of Yuhuashan super unit in Yuhuashan Basin, Jiangxi province[D]. Master Dissertation of East China University of Technology, 2012.]
- [29] 鹿化煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究[J]. *科学通报*, 1997, 42(23): 2535-2538. [LU Huayu, AN Zhisheng. Experimental study on the effect of pretreatment on particle size measurement of loess sediments [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(23): 2535-2538.]
- [30] 孙有斌, 高抒, 鹿化煜. 前处理方法对北黄海沉积物粒度的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(6): 665-671. [SUN Youbin, GAO Shu, LU Huayu. Influence of different pretreatment procedures on the particle-size distribution of surficial sediments in the northern Yellow Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(6): 665-671.]
- [31] 李亮, 马春梅, 鹿化煜, 等. 江西中部玉华山沼泽泥炭记录的过去两千年气候变化初步研究[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(3): 548-559. [LI Liang, MA Chunmei, LU Huayu, et al. A preliminary study of the climate change since 2 ka archived by a peat core from Yuhua Mountain in the middle Jiangxi province [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(3): 548-559.]
- [32] Blaauw M, Christen J A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process [J]. *Bayesian Analysis*, 2011, 6(3): 457-474.
- [33] Knezevic S Z, Streibig J C, Ritz C. Utilizing R software package for dose-response studies: the concept and data analysis [J]. *Weed Technology*, 2007, 21(3): 840-848.
- [34] 刘金庆, 印萍, 陈小英, 等. 威海南部近岸泥质区晚更新世以来的沉积环境演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(6): 199-209. [LIU Jinqing, YIN Ping, CHEN Xiaoying, et al. Sedimentary environmental evolution of mud area off the southern coast of Weihai since Late Pleistocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(6): 199-209.]
- [35] 刘升发, 刘焱光, 朱爱美, 等. 东海内陆架表层沉积物粒度及其净输运模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(1): 1-6. [LIU Shengfa, LIU Yanguang, ZHU Aimei, et al. Grain size trends and net transport patterns of surface sediments in the east china sea inner continental shelf [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(1): 1-6.]
- [36] 周卫建, 卢雪峰, 武振坤, 等. 若尔盖高原全新世气候变化的泥炭记录与加速器放射性碳测年[J]. *科学通报*, 2002, 47(1): 66-70. [ZHOU Weijian, LU Xuefeng, WU Zhenkui, et al. Peat record reflecting Holo-cene climatic change in the Zoige Plateau and AMS radiocarbon dating [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(1): 66-70.]
- [37] Xiao J L, Fan J W, Zhai D Y, et al. Testing the model for linking grain-size component to lake level status of modern clastic lakes [J]. *Quaternary International*, 2015, 355: 34-43.
- [38] 马春梅, 朱诚, 郑朝贵, 等. 中国东部山地泥炭高分辨率腐殖化度记录的晚冰期以来气候变化[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 52(1): 118-131. [MA Chunmei, ZHU Cheng, ZHENG Chaogui, et al. Climate changes in East China since the Late-glacial inferred from high-resolution mountain peat humification records [J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 2009, 52(1): 118-131.]
- [39] 王华, 洪业汤, 朱咏煊, 等. 红原泥炭腐殖化度记录的全新世气候变化[J]. *地质地球化学*, 2003, 31(2): 51-56. [WANG Hua, HONG Yetang, ZHU Yongxuan, et al. The peat humification records of Holocene climate change in Hongyuan region [J]. *Geology-Geochemistry*, 2003, 31(2): 51-56.]
- [40] 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 过去2000年中国气候变化的若干重要特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 56(2): 321-329. [GE Quansheng, ZHENG Jingyun, HAO Zhixin, et al. General characteristics of climate changes during the past 2000 years in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(2): 321-329.]
- [41] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian Monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate [J]. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.
- [42] 郝志新, 葛全胜, 郑景云. 过去2000年中国东部地区的极端旱涝事件变化[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 388-394. [HAO Zhixin, GE Quansheng, ZHENG Jingyun. Variations of extreme drought/flood events over eastern China during the Past 2000 Years [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 388-394.]
- [43] Ge Q S, Zheng J Y, Hao Z X, et al. Temperature variation through 2000 years in China: An uncertainty analysis of reconstruction and regional difference [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(3): L03703.
- [44] 周秀骥, 赵平, 刘舸, 等. 中世纪暖期、小冰期与现代东亚夏季风环流和降水年代-百年尺度变化特征分析[J]. *科学通报*, 2011, 56(28-29): 3003-3011. [ZHOU Xiuji, ZHAO Ping, LIU Ge, et al. Characteristics of decadal-centennial-scale changes in East Asian summer monsoon circulation and precipitation during the Medieval Warm Period and Little Ice Age and in the present day [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(28-29): 3003-3011.]