中国科学: 地球科学 2018 年 第 48 卷 第 1 期: 42 ~ 50
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

基于孢粉的古气候参数定量重建: 一种新思路及其在中国的应用实例

陈建徽[1*], 吕飞亚[1], 黄小忠[1], H J B Birks[2], R J Telford[2], 张生瑞[3], 许清海[3], 赵艳[4,5], 王海鹏[1], 周爱锋[1], 黄伟[1], 刘建宝[1], 魏国英[1]

1. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;
2. Department of Biology and Bjerknes Centre for Climate Research, University of Bergen, N-5020 Bergen, Norway;
3. 河北师范大学泥河湾考古研究院, 石家庄 050024;
4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
5. 中国科学院大学, 北京 100049

* E-mail: jhchen@lzu.edu.cn

收稿日期: 2017-01-31; 接受日期: 2017-08-21; 网络版发表日期: 2017-09-29
国家自然科学基金项目(批准号: 41471162、41571182)和国家重点研发计划项目(编号: 2017YFA0603402)资助

摘要 传统的孢粉-古气候定量重建评估主要衡量校准集对现代气候状况的模拟结果或化石样品与校准集样品的可比程度, 客观上导致特定地点重建气候参数的取舍缺少明确标准. 基于国际上通过随机数据开展定量重建显著性检验的新方法, 充分利用中国环境梯度大、植被类型丰富、现代表土孢粉数据完善等优势, 提出一种孢粉-古气候参数定量重建的新思路: 首先确定控制化石孢粉组成变化最主要环境因子, 随后通过限制其他环境因子来构造校准集以开展该因子的定量重建, 最后完成重建结果显著性评估. 将该思路应用于分别位于黄土高原东、西两侧的吕梁山公海和六盘山天池化石孢粉序列, 所获得的年降水量P_{ann}定量重建不仅具有统计上的显著性(p<0.001), 且相互间在共同时段表现出良好、稳定的相关关系, 均指示了约3300cal a BP以来的东亚夏季风降水快速下降, 显示其具备降低基于孢粉的古气候参数定量重建不确定性的较大潜力.

关键词 孢粉, 定量重建, 显著性检验, 季风边缘区

1 引言

湖相沉积物中的孢粉组合长期被用于重建过去植被和气候环境变化(Bennett和Willis, 2001), 特别是结合表土花粉数据库开展气候参数(例如温度、降水、湿度等)的定量重建愈来愈受到广大研究者的重视, 推动了对古气候、古环境变化及其机理的认识(如Birks和Gordon, 1985; 宋长青和孙湘君, 1997; 郑卓和Guiot, 1999; 朱诚等, 2008; Jiang等, 2010; Xu等, 2010; Lu等, 2011; Birks等, 2012; Herzschuh等, 2014; Chen等, 2015; Li等, 2017). 关于中国基于孢粉的古气候定量重建研究进展, 请参见近期发表的综述论文(秦锋和赵艳, 2013;

中文引用格式: 陈建徽, 吕飞亚, 黄小忠, Birks H J B, Telford R J, 张生瑞, 许清海, 赵艳, 王海鹏, 周爱锋, 黄伟, 刘建宝, 魏国英. 2018. 基于孢粉的古气候参数定量重建: 一种新思路及其在中国的应用实例. 中国科学: 地球科学, 48: 42–50, doi: 10.1360/N072017-00050
英文引用格式: Chen J H, Lv F Y, Huang X Z, Birks H J B, Telford R J, Zhang S R, Xu Q H, Zhao Y, Wang H P, Zhou A F, Huang W, Liu J B, Wei G Y. 2018. A novel procedure for pollen-based quantitative paleoclimate reconstructions and its application in China. Science China Earth Sciences, 60: 2059–2066, doi: 10.1007/s11430-017-9095-1

© 2017 《中国科学》杂志社

郑卓等, 2016). 其中一个值得关注的问题是, 基于同一个校准集(calibration set), 同一套化石孢粉数据常用于重建不同的环境因子, 甚至同时重建多个环境因子(如童国榜和吴瑞金, 1997; 肖景义等, 2008; Herzschuh等, 2010; Stebich等, 2015; Zhang等, 2015), 为后续各记录间的对比及重建结果在气候模式中的应用带来较大的不确定性. 一个技术上的原因在于, 传统的检验方法大多仅针对校准集对现代气候状况的模拟能力和/或化石样品与现代样品的相似程度(Juggins和Birks, 2012), 虽然有助于甄别校准集不宜于重建哪些环境因子、以及基于哪些化石样品获得的重建结果需要谨慎看待, 但由于不能直接针对重建结果开展评估, 无法判断在特定地点对于特定环境因子的重建是否具有整体上的可靠性, 故此也就缺乏进行取舍的客观标准.

近年来, 一种利用随机数据开展定量重建显著性检验的新方法(Telford和Birks, 2011)在国际上得到了日益广泛的应用(如Luoto和Nevalainen, 2013; Amesbury等, 2016; Rehfeld等, 2016; Jones等, 2017), 但在中国的相关工作中却较少涉及(Chen等, 2014, 2015). 幸运的是, 中国具有巨大的环境梯度和丰富的植被类型, 并且前人已经开展了系统的表土孢粉数据采集和整理(如Xu等, 2010; Lu等, 2011; Cao等, 2014; Ni等, 2014; Zheng等, 2014). 利用这些优势, 基于前述对重建结果直接进行显著性检验的新方法(Telford和Birks, 2011), 我们发展出一种首先确定控制化石孢粉组成变化最主要环境因子, 随后通过针对性设计校准集开展该因子的定量重建, 最后完成重建结果显著性评估的新思路. 将此思路应用于中国季风边缘区(黄土高原东、西侧)两个已建立良好年代控制的高山湖泊的化石孢粉序列, 所获结果为全新世东亚夏季风降水历史研究提供了新资料, 显示其具有降低古气候参数定量重建不确定性的良好潜力.

2 材料与方法

东亚表土孢粉数据库目前包含2689个样点, 涉及355个属种(Xu等, 2010; Lu等, 2011; Zheng等, 2014), 去除境外样点(日本、蒙古和印度)、可能受人类活动影响的样点(根据原始采样记录)以及来自热带(季)雨林区和温带荒漠区的样点(根据样点所处的植被带(中国植被编辑委员会, 1980))之后, 共计1860个(分布如图1中白色圆点所示). 化石孢粉序列来自吕梁山公海岩芯(38.9°N, 112.2°E, 1860m a.s.l.; Chen等, 2015; Xu等, 2017)和六盘山天池岩芯(35.3°N, 106.3°E, 2430m a.s.l.; Zhao等, 2010; 周爱锋等, 2010). 这两个湖泊分别位于黄土高原东、西两侧(位置如图1中黄色五星所示), 是受人类活动扰动相对较小的高山湖泊, 接近现代夏季风北缘的位置(现代夏季风边界如图1中蓝色虚线所示)使其能敏感响应夏季风进退及相应的降水变化——对器测时段数据(1960~2014, NOAA/NCEP气候预测中

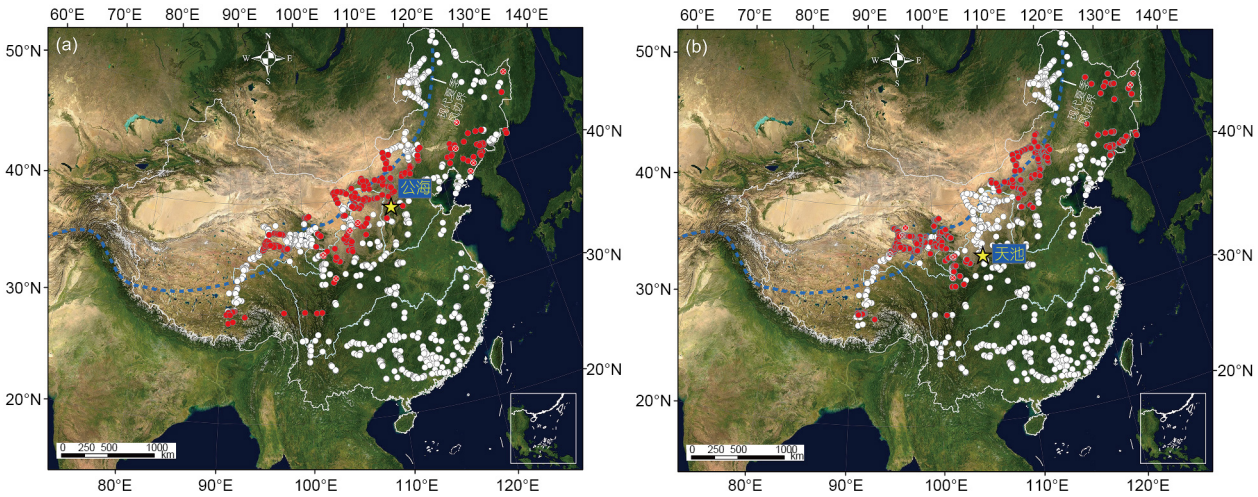

图 1 文中使用的现代表土孢粉数据库(1860个样点)分布以及为公海(a)和天池(b)P_{ann}定量重建所构造的校准集分布

白色圆点: 孢粉数据库; 红色圆点: 校准集分布; 红色带叉号圆点: 最终模型未包括的异常点, 此处为校准集中标准化残差(standardized residual)绝对值大于2.5的样点(Juggins和Birks, 2012)

心格点资料)的分析也显示, 两个湖泊在现代气候状况下年降水表现出显著的相关关系(r=0.32, p<0.05). 更为重要的是, 公海岩芯GH09B(25个陆生植物残体AMS ^{14}C年代, 14.7ka以来连续沉积; 1ka=1000cal a BP)和天池岩芯GSA07(17个陆生植物残体AMS ^{14}C年代, 6.2ka以来连续沉积)均已建立了良好的年代学框架, 为后续开展重建结果的对比提供了前提. 此外, 还依照表土孢粉数据库的属种名称对公海及天池的孢粉属种进行了归并、统一.

本文采用的基于随机数据开展定量重建显著性检验新方法(Telford和Birks, 2011), 其显著性评估主要以不同环境因子重建对化石孢粉种群变化的解释量与利用随机数据(本文取999次)训练样本集所获重建对化石孢粉种群变化的解释量的对比作为依据. 例如, 若环境因子重建对化石数据变化的解释量大于95%的随机变量重建, 则认为该重建达到95%显著性水平. 与主要评价转换函数本身性能(例如通过“刀切法(jackknife)”或“自助法(bootstrap)”获取的决定系数、预测误差等)和衡量化石样品与现代样品相似程度(例如类比(analogue)统计量、拟合优度(goodness-of-fit)等)的传统方法相比, 该检验方法实质上评估的是将化石数据用于校准函数以重建目标环境因子的整体性能, 具有良好的针对性和实用性.

新思路下的古气候参数定量重建流程是: 首先使用表土孢粉数据库全集(包含1860个样点的317个孢粉属种的百分含量数据和年均温T_{ann}、年降水P_{ann}、最热月温度MTWA、最冷月温度MTCO等主要气候因子数据), 根据基于随机数据的定量重建显著性检验结果, 确定控制化石孢粉组成变化的最主要气候因子. 随后, 为充分利用中国表土花粉数据库覆盖地理范围广、环境因子梯度大的优势, 我们采取“构造校准集”的方法: 根据钻孔点的现代气候状况, 限制非目标气候因子(本文两例是温度)梯度, 选择与钻孔点温度相当(综合考虑全新世温度变幅和涉及样点数量, 取±2.5℃[1)])且能涵盖较大降水(本文两例中控制化石孢粉种群变化的最主要气候因子)梯度的表土样品参与重建, 有利于估计孢粉属种对降水的耐受范围和最适值, 实际达到与传统上根据钻孔在目标环境因子空间中的位置设计现代采样点(Juggins和Birks, 2012)以探寻属种-环境因子关系相同的目的. 校准集设计完成后, 根据目标环境因子梯度长度等因素选择合适的回归和校准方法, 并利用基于随机数据的定量重建显著性检验方法评估最终重建的可靠性. 此外, 为便于与过往研究对照, 我们还提供了构造校准集转换函数性能参数评估结果和化石种群-构造校准集种群类比分析结果.

上述分析主要利用R软件(version 3.0.0; R Core Team, 2013)完成, 其中对应分析使用“vegan”包(version 2.4-2; Oksanen等, 2017)、校准和回归使用“rioja”包(version 0.9-9; Juggins, 2015)、定量重建显著性检验使用“palaeoSig”包(version 1.1-3; Telford和Trachsel, 2015).

3 结果与讨论

基于表土孢粉数据库全集和公海、天池的化石孢粉序列所获重建的显著性检验结果(图2a和b)显示, P_{ann}在两个湖泊均为控制化石孢粉种群变化的最主要环境因子, 表现为其具有对化石孢粉数据最高的解释量, 在统计学上达到99.9%的显著性水平(p<0.001, 超过99.9%的基于随机数据所获重建对化石孢粉数据的解释量). 限制T_{ann}梯度后所获得的用于重建P_{ann}的校准集分别由498个(P_{ann}梯度0~1000mm)和525个(P_{ann}梯度0~900mm)样点组成, 其分布如图1中红色圆点所示. 考虑到校准集具有较长的环境梯度, 而加权平均-偏最小二乘(WAPLS)作为使用最为广泛的基于单峰响应的生物-气候重建方法之一, 适用于回归和校准函数的建立(Birks, 1998). 显著性检验结果(图2c和d)显示, P_{ann}相较于温度指标(T_{ann}、MTWA、MTCO)解释化石孢粉数据的优势更为明显, 且解释量有所提升, 在统计学上均达到99.9%的显著性水平. 校准函数性能参数评估结果见表1, 从另一个角度显示出两个构造校准集均具有良好的性能(表现为较高的决定系数和较低的误差; Birks, 1998). 化石样品-现代样品类比分析结果见图3, 表明两个湖泊的化石种群与对应的构造校准集种群均存在良好的相似性(表现为较少的“无类比

1) 根据现有资料, 中国北方全新世年均温度变幅不超过5℃(Wang等, 2001; Ge等, 2007; 方修琦和侯光良, 2011), 而全新世大暖期与现代年均温差为2~3℃(Jiang等, 2012). 事实上, 此处取±2℃或±3℃所获重建结果变化基本一致(图略)

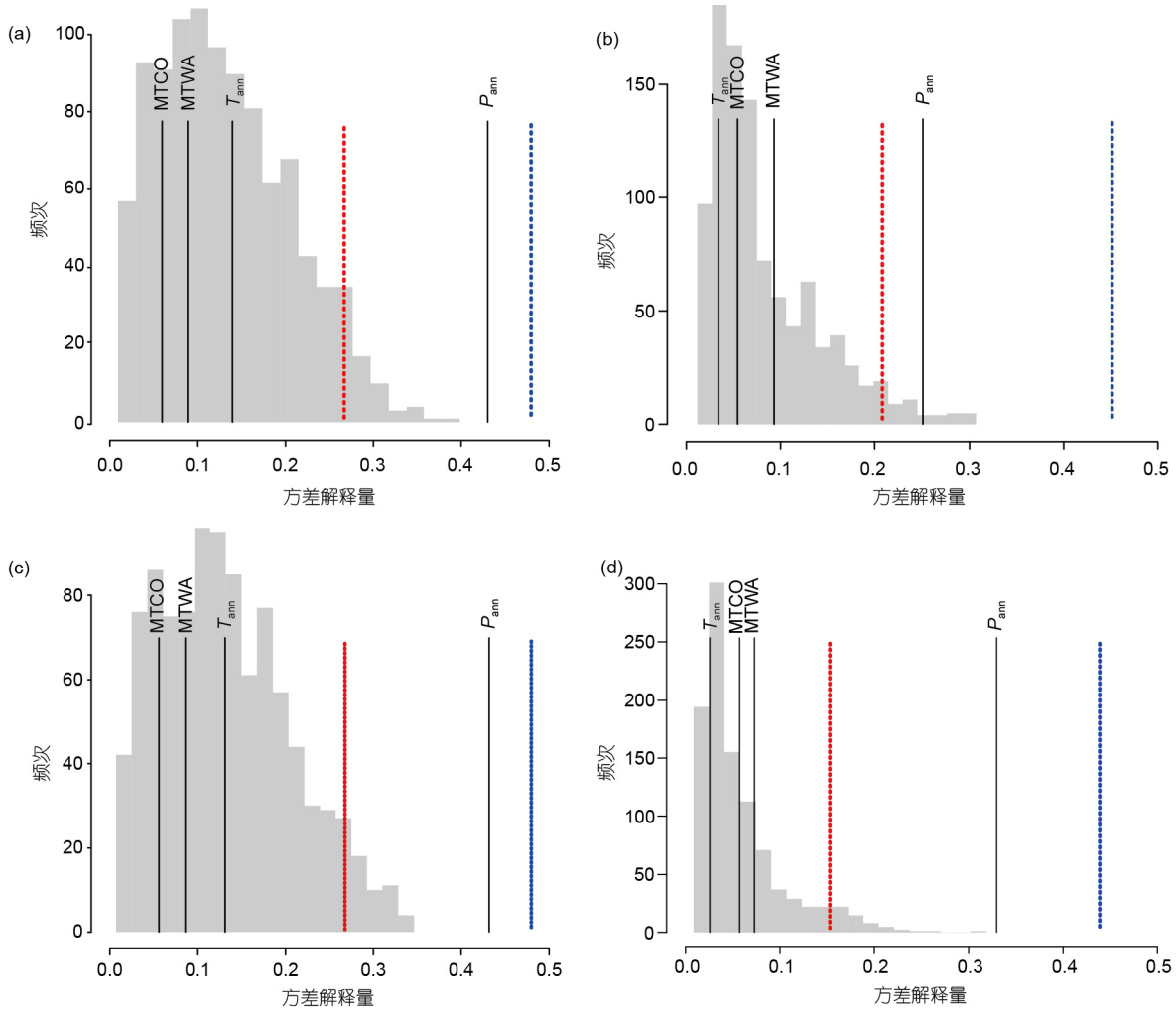

图 2　基于随机数据(999次)的定量重建显著性检验结果

红色虚线指示95%的随机变量重建解释量, 蓝色虚线指示对化石数据开展主成分分析PCA所得第一轴的解释量, 代表了环境因子重建所能达到的对化石数据变化的最大解释量. (a) 利用表土孢粉数据库全集和公海化石孢粉数据所获定量重建的显著性检验结果; (b) 利用表土孢粉数据库全集和天池化石孢粉数据所获定量重建的显著性检验结果; (c) 利用构造校准集和公海化石孢粉数据所获定量重建的显著性检验结果; (d) 利用构造校准集和天池化石孢粉数据所获定量重建的显著性检验结果

表 1　公海和天池P_{ann}定量重建所使用校准函数的性能参数列表[a)]

研究点	WAPLS 组分个数	预测误差 (mm)	决定系数r^2	平均偏差 (mm)	最大偏差 (mm)	预测误差变化(%)	P
公海	2	85.85	0.84	3.45	147.44	−10.46	0.000
天池	2	74.70	0.87	0.74	64.02	−9.78	0.017

a) “自助法”运行1000次

(non-analogue)”状况和较多的“好类比(good analogue)”状况; Simpson, 2012).

由上述结果确认的P_{ann}作为控制两个研究点化石孢粉组成变化的最重要气候因子(暂简单推论为“降水是控制中国黄土高原半湿润区植被变化的最重要因子”), 具有明确的生态学意义(Yang等, 2015), 实际也

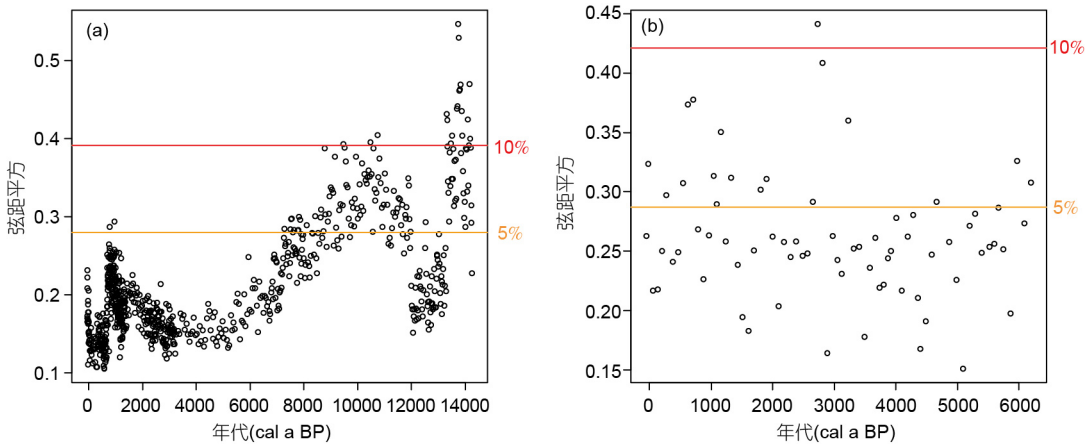

图 3　公海(a)和天池(b)各化石样品与其最接近的现代类比之间的弦距平方(squared chord distance)

橙色实线和红色实线分别代表校准集中各样品与其最接近的类比之间弦距平方的第5百分位数和第10百分位数——通常把距离小于第5百分位数的化石样品视为具有“好类比(good analogue)”, 把距离大于第10百分位数的化石样品视为“无类比(non-analogue)”(Simpson, 2012). 据此, 公海和天池的“好类比”样品分别占到82.7%和75%, 而“无类比”样品仅分别占2.5%和1.4%

支持原作者将其解释为季风降水指标的认识(Zhao等, 2010; Xu等, 2017). 此两例中, 在没有限制温度梯度的情况下(图2a和b), 三个与温度有关的指标无法通过显著性检验(p>0.05), 表明公海和天池的化石孢粉样品并不适宜于重建温度变化. 事实上, 在未开展基于前向选择的显著性检验之前(首先接受能通过显著性检验的解释量最大的重建, 然后在去除该重建影响的情况下检验解释量第二的重建是否仍能通过显著性检验, 以此类推), 同时提供对两个甚至多个环境因子的重建需要谨慎; 根据我们未发表的结果, 中国某些样点由于气候环境的复杂性或者校准集本身的限制, 即便单一环境因子重建亦无法通过显著性检验——这种状况在国际上已经发表的序列中并不鲜见, 例如基于孢粉的芬兰两个湖泊全新世温度重建就是如此(Salonen等, 2014).

公海和天池P_{ann}定量重建在共同时段(6.2ka以来)显示了极好的对应关系, 均揭示了降水量在6.2~3.3ka的缓慢下降, 特别是3.3ka以来的快速减少(图4a), 其中蕴含的古气候信息及意义已另文讨论(Chen等, 2015; 陈建徽等, 2016), 此处不再赘述. 为使两序列数据一一对应, 根据天池样品所处层位的年代对分辨率较高的公海降水量重建结果进行线性插值, 所获相关系数为0.76(p<0.001); 为排除异常值对相关系数的潜在影响, 我们还利用“自助法”取样1000次计算两个序列的相关系数(Trauth, 2015)——单峰分布形态表明两序列间的显著相关关系确有较强的稳定性(图4c). 此外, 利用基于小波变换的相似度分析(Cooper和Cowan, 2008)进一步考察两个时间序列的关系, 结果表明两序列间的显著正相关(见图4b相似度图中红色区)不仅具有时域上的稳定性, 还具有频域上的稳定性.

来自相距600余公里两个研究点的化石孢粉序列, 在独立的年代学框架下, 基于不同的校准集, 获得了相关关系如此良好、稳定的降水定量重建结果, 不仅由于它们同处现代夏季风边缘区, 植被组成变化对季风进退极为敏感, 也显示出本文采用的这套重建方法具有准确提取古气候信号的潜力. 不仅如此, 分辨率较高的公海P_{ann}定量重建在近50年来与器测记录表现出相似的变化趋势(Chen等, 2015); 全序列重建结果与黄土高原(Wang等, 2014)和东部沙地(Li等, 2014)大范围测年数据集所反映的干湿波动也具有很好的对应关系, 进一步证实了其可靠性. 我们正在利用该方法开展对全国范围内已发表孢粉化石数据的再分析, 已经得到部分较有意义的结果, 期望在区分控制不同气候区化石孢粉组成变化的主控因子、减少气候参数定量重建的不确定性方面有所进展.

4　结论与展望

基于检验定量重建显著性的新方法, 充分利用中国环境梯度大、植被类型丰富、现代表土孢粉数据完善等优势, 通过首先确定控制化石孢粉组成变化最

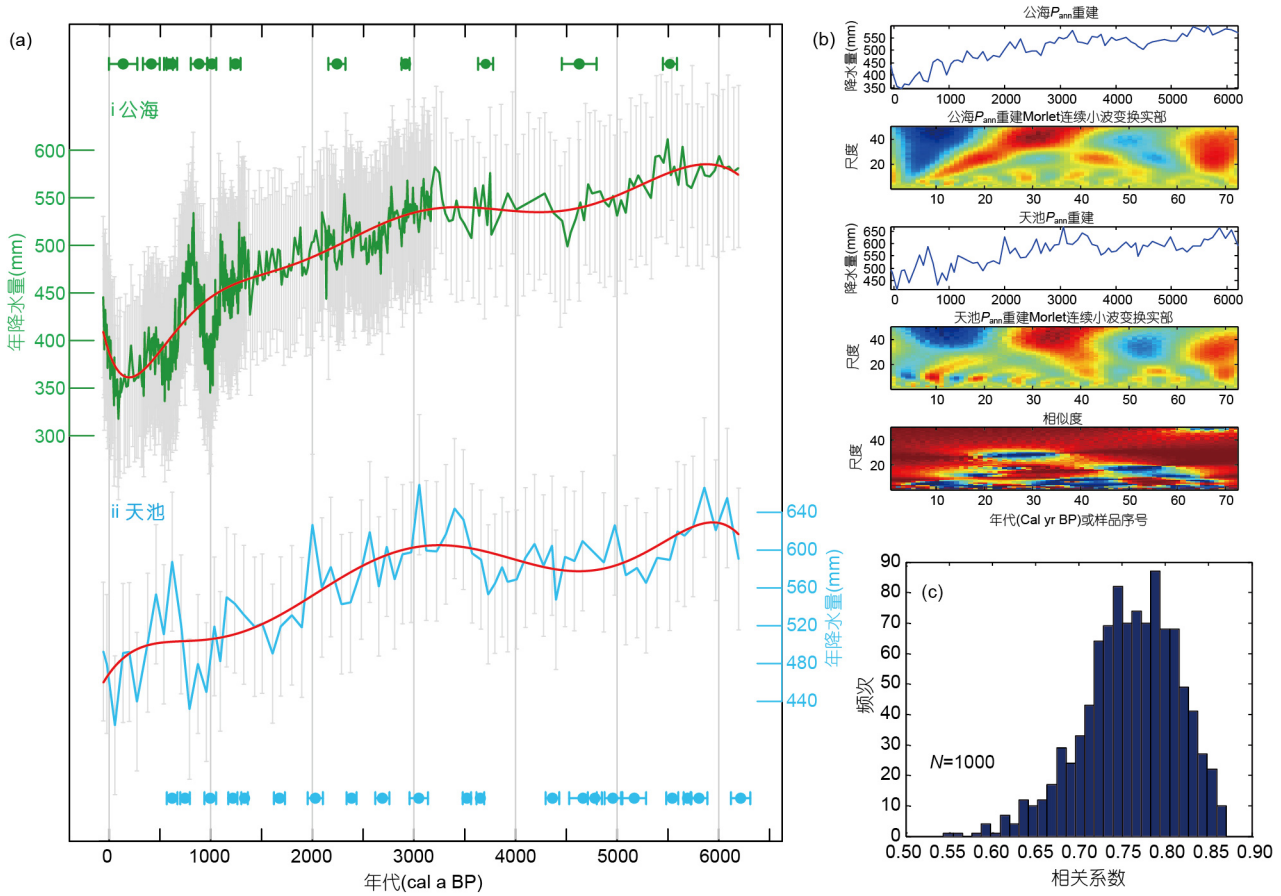

图 4　**(a)吕梁山公海(i)和六盘山天池(ii)6.2ka以来P_{ann}定量重建结果、(b)基于Morlet小波变换的时间序列相似度分析结果以及(c)利用“自助法”取样1000次获得的两个时间序列相关系数分布直方图**

顶部和底部的实心圆点分别为公海岩芯和天池岩芯的测年点, 短棒代表误差范围

主要环境因子、利用构造校准集开展该因子的定量重建、最后完成重建结果显著性评估的新思路及相应的工作流程, 实现了黄土高原两个高山湖泊的孢粉-年降水量定量重建. 结果不仅为全新世东亚夏季风降水历史研究提供了新资料, 也显示出该套工作流程具有良好的实用性、以及降低古气候参数定量重建不确定性的潜力. 毋庸讳言, 除直接对定量重建的显著性检验之外, 我们并未期望此方法能够解决传统孢粉-古气候定量重建中仍然普遍存在的问题, 例如现代气候空间中获得的孢粉-植被-气候关系在过去的适用性、孢粉-植被-气候关系本身的复杂性、较低的鉴定分辨率导致对生态意义差异较大的植物属种区分度不高等——这些问题的逐步解决将有赖于长期、大量的基础性工作(如许清海等, 2015). 事实上, 新思路的意义更在于整合现有数据和方法资源, 实现了客观评估特定区域化石孢粉组合的主控气候因子、并有效完成具备统计显著性的重建; 另外, 相同工作流程在不同地点的应用也无疑有利于重建记录间的对比.

后续将在应用过程中继续实现该方法的改进和加强. 例如, “构造校准集”时对非目标环境因子的限定, 目前是结合其在研究时段的变幅和涉及的现代样品数量权衡确定的, 虽然最终通过显著性检验进行质量控制, 但仍存在一定的不确定性, 有待开展系统的对比实验以提供更一般的参考标准. 又如, 基于目标环境因子梯度和应用的广泛性, 本文直接使用了WAPLS模型, 进一步开展多模型(包括现代类比法MAT及其衍生方法; 转换函数法中加权平均法WA、局部加权的加权平均法LWWA等)对比、并在适宜情况下进行“共识”重建(consensus reconstruction)显得极为必要. 此外, 还需考虑提高现代表土孢粉数据库中气候参数的

插值精度并丰富其种类(引入与湿度相关的因子)(如Zhao等, 2017, 以及结合植被反演方法IVM(如Guiot等, 2000; Wu等, 2007)气候重建进行结果评估等. 我们相信, 随着工作的逐渐推进, 新思路能够为提高基于孢粉的古气候参数定量重建的可靠性有所贡献, 从而推动其在代用资料集成和气候模式中的深入应用.

致谢 三位审稿人对论文的修改提出了建设性意见, 郑卓教授和吕厚远研究员提供了部分表土孢粉数据, 吕厚远研究员和吴海斌研究员提供了表土样点气候参数插值数据, 作者在此谨致谢忱. 文中使用的R脚本可向陈建徽(jhchen@lzu.edu.cn)索取.

参考文献

陈建徽, 饶志国, 刘建宝, 黄伟, Feng S, 董广辉, 胡玉, 许清海, 陈发虎. 2016. 全新世东亚夏季风最强盛期出现在何时?——兼论中国南方石笋氧同位素的古气候意义. 中国科学: 地球科学, 46: 1494–1504

方修琦, 侯光良. 2011. 中国全新世气温序列的集成重建. 地理科学, 31: 385–393

秦锋, 赵艳. 2013. 基于孢粉组合定量重建古气候的方法在中国的运用及思考. 第四纪研究, 33: 1054–1068

宋长青, 孙湘君. 1997. 花粉-气候因子转换函数建立及其对古气候因子定量重建. 植物学报, 39: 554–560

童国榜, 吴瑞金. 1997. 龙感湖地区近3000年来的植被及其气候定量重建. 海洋地质与第四纪地质, 17: 53–61

肖景义, 陈建强, 李辉, 许哲平, 孙刚, 牛彩香, 杨国臣. 2008. 河北邯郸HZ-S孔第四纪孢粉组合的定量分析. 地质通报, 27: 599–604

许清海, 李曼玥, 张生瑞, 张娅红, 张攀攀, 卢静瑶. 2015. 中国第四纪花粉现代过程: 进展与问题. 中国科学: 地球科学, 45: 1661–1682

郑卓, Guiot J. 1999. 我国热带地区40万年以来古气候的定量恢复. 中山大学学报: 自然科学版, 38: 94–98

郑卓, 张潇, 满美玲, 魏金辉, 黄康有. 2016. 中国及邻区利用孢粉进行定量古气候重建的回顾与数据集成. 第四纪研究, 36: 503–519

中国植被编辑委员会. 1980. 中国植被. 北京: 科学出版社. 1382

周爱锋, 孙惠玲, 陈发虎, 赵艳, 安成邦, 董广辉, 王宗礼, 陈建徽. 2010. 黄土高原六盘山天池记录的中晚全新世高分辨率气候变化及其意义. 科学通报, 55: 2263–2266

朱诚, 陈星, 马春梅, 朱青, 李中轩, 徐伟峰. 2008. 神农架大九湖孢粉气候因子转换函数与古气候重建. 科学通报, 53: 38–44

Amesbury M J, Swindles G T, Bobrov A, Charman D J, Holden J, Lamentowicz M, Mallon G, Mazei Y, Mitchell E A D, Payne R J, Roland T P, Turner T E, Warner B G. 2016. Development of a new pan-European testate amoeba transfer function for reconstructing peatland palaeohydrology. Quat Sci Rev, 152: 132–151

Bennett K D, Willis K J. 2001. Pollen. In: Smol J P, Birks H J B, Last W M, eds. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments-Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Dordrecht: Springer Netherlands. 5–32

Birks H J B. 1998. Numerical tools in palaeolimnology—Progress, potentialities, and problems. J Paleolimn, 20: 301–332

Birks H J B, Gordon A D. 1985. Numerical Methods in Quaternary Pollen Analysis. London: Academic Press. 317

Birks H J B, Lotter A F, Juggins S, Smol J P. 2012. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments-Data Handling and Numerical Techniques. Heidelberg: Springer. 745

Cao X Y, Herzschuh U, Telford R J, Ni J. 2014. A modern pollen-climate dataset from China and Mongolia: Assessing its potential for climate reconstruction. Rev Palaeobot Palynol, 211: 87–96

Chen F, Chen X, Chen J, Zhou A, Wu D, Tang L, Zhang X, Huang X, Yu J. 2014. Holocene vegetation history, precipitation changes and Indian Summer Monsoon evolution documented from sediments of Xingyun Lake, south-west China. J Quat Sci, 29: 661–674

Chen F, Xu Q, Chen J, Birks H J B, Liu J, Zhang S, Jin L, An C, Telford R J, Cao X, Wang Z, Zhang X, Selvaraj K, Lu H, Li Y, Zheng Z, Wang H, Zhou A, Dong G, Zhang J, Huang X, Bloemendal J, Rao Z. 2015. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. Sci Rep, 5: 11186

Cooper G R J, Cowan D R. 2008. Comparing time series using wavelet-based semblance analysis. Comp Geosciences, 34: 95–102

Ge Q, Wang S, Wen X, Shen C, Hao Z. 2007. Temperature and precipitation changes in China during the Holocene. Adv Atmos Sci, 24: 1024–1036

Guiot J, Torre F, Jolly D, Peyron O, Boreux J J, Cheddadi R. 2000. Inverse vegetation modeling by Monte Carlo sampling to reconstruct palaeoclimates under changed precipitation seasonality and CO_2 conditions: Application to glacial climate in Mediterranean region. Ecol Model, 127: 119–140

Herzschuh U, Birks H J B, Mischke S, Zhang C, Böhner J. 2010. A modern pollen-climate calibration set based on lake sediments from the Tibetan Plateau and its application to a Late Quaternary pollen record from the Qilian Mountains. J Biogeogr, 37: 752–766

Herzschuh U, Borkowski J, Schewe J, Mischke S, Tian F. 2014. Moisture-advection feedback supports strong early-to-mid Holocene monsoon climate on the eastern Tibetan Plateau as inferred from a pollen-based reconstruction. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 402: 44–54

Jiang D, Lang X, Tian Z, Wang T. 2012. Considerable model-data mismatch in temperature over China during the Mid-Holocene: Results of PMIP simulations. J Clim, 25: 4135–4153

Jiang W, Guiot J L, Chu G, Wu H, Yuan B, Hatté C, Guo Z. 2010. An improved methodology of the modern analogues technique for palaeoclimate reconstruction in arid and semi-arid regions. Boreas, 39: 145–153

Jones R T, Turney C S M, Lang B, Brooks S J, Rundgren M, Hammarlund D, Björck S, Fogwill C J. 2017. Delayed maximum northern European summer temperatures during the Last Interglacial as a result of Greenland Ice Sheet melt. Geology, 45: 23–26

Juggins S. 2015. Rioja: Analysis of Quaternary Science Data, R package version 0.9-9. Newcastle upon Tyne: University of Newcastle

Juggins S, Birks H J B. 2012. Quantitative environmental reconstructions from biological Data. In: Birks H J B, Lotter A F, Juggins S, Smol J P, eds. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Data Handling and Numerical Techniques. Dordrecht: Springer Netherlands. 431–494

Li J, Dodson J, Yan H, Zhang D D, Zhang X, Xu Q, Lee H F, Pei Q, Cheng B, Li C, Ni J, Sun A, Lu F, Zong Y. 2017. Quantifying climatic variability in monsoonal northern China over the last 2200 years and its role in driving Chinese dynastic changes. Quat Sci Rev, 159: 35–46

Li Q, Wu H, Yu Y, Sun A, Marković S B, Guo Z. 2014. Reconstructed moisture evolution of the deserts in northern China since the Last Glacial Maximum and its implications for the East Asian Summer Monsoon. Glob Planet Change, 121: 101–112

Lu H, Wu N, Liu K, Zhu L, Yang X, Yao T, Wang L, Li Q, Liu X, Shen C, Li X, Tong G, Jiang H. 2011. Modern pollen distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the development of transfer functions for reconstructing Holocene environmental changes. Quat Sci Rev, 30: 947–966

Luoto T P, Nevalainen L. 2013. Long-term water temperature reconstructions from mountain lakes with different catchment and morphometric features. Sci Rep, 3: 2488

Ni J, Cao X, Jeltsch F, Herzschuh U. 2014. Biome distribution over the last 22000 yr in China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 409: 33–47

Oksanen J, Blanchet F G, Friendly M, Kindt R, Legendre P, McGlinn D, Minchin P R, O'Hara R B, Simpson G L, Solymos P, Henry M, Stevens H, Szoecs E, Wagner H. 2017. Vegan: Community Ecology Package, R package version 2.4-2. Oulu: University of Oulu

R Core Team 2013. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing

Rehfeld K, Trachsel M, Telford R J, Laepple T. 2016. Assessing performance and seasonal bias of pollen-based climate reconstructions in a perfect model world. Clim Past, 12: 2255–2270

Salonen J S, Luoto M, Alenius T, Heikkilä M, Seppä H, Telford R J, Birks H J B. 2014. Reconstructing palaeoclimatic variables from fossil pollen using boosted regression trees: Comparison and synthesis with other quantitative reconstruction methods. Quat Sci Rev, 88: 69–81

Simpson G L. 2012. Analogue Methods in Palaeolimnology. In: Birks H J B, Lotter A F, Juggins S, Smol J P, eds. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Data Handling and Numerical Techniques. Dordrecht: Springer Netherlands. 495–522

Stebich M, Rehfeld K, Schlütz F, Tarasov P E, Liu J, Mingram J. 2015. Holocene vegetation and climate dynamics of NE China based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake. Quat Sci Rev, 124: 275–289

Telford R J, Birks H J B. 2011. A novel method for assessing the statistical significance of quantitative reconstructions inferred from biotic assemblages. Quat Sci Rev, 30: 1272–1278

Telford R, Trachsel M. 2015. PalaeoSig: Significance Tests for Palaeoenvironmental Reconstructions, R package version 1.1-3. Bergen: University of Bergen

Trauth M H. 2015. MATLAB Recipes for Earth Sciences. 4th ed. Verlag Berlin Heidelberg: Springer. 427

Wang H, Chen J, Zhang X, Chen F. 2014. Palaeosol development in the Chinese Loess Plateau as an indicator of the strength of the East Asian summer monsoon: Evidence for a mid-Holocene maximum. Quat Int, 334-335: 155–164

Wang S, Gong D, Zhu J. 2001. Twentieth-century climatic warming in China in the context of the Holocene. Holocene, 11: 313–321

Wu H, Guiot J, Brewer S, Guo Z, Peng C. 2007. Dominant factors controlling glacial and interglacial variations in the treeline elevation in tropical Africa. Proc Natl Acad Sci USA, 104: 9720–9724

Xu Q, Chen F, Zhang S, Cao X, Li J, Li Y, Li M, Chen J, Liu J, Wang Z. 2017. Vegetation succession and East Asian Summer Monsoon Changes since the last deglaciation inferred from high-resolution pollen record in Gonghai Lake, Shanxi Province, China. Holocene, 27: 835–846

Xu Q, Xiao J, Li Y, Tian F, Nakagawa T. 2010. Pollen-based quantitative reconstruction of holocene climate changes in the Daihai Lake Area, Inner Mongolia, China. J Clim, 23: 2856–2868

Yang S, Ding Z, Li Y, Wang X, Jiang W, Huang X. 2015. Warming-induced northwestward migration of the East Asian monsoon rain belt from the Last Glacial Maximum to the mid-Holocene. Proc Natl Acad Sci USA, 112: 13178–13183

Zhang H, Zhang Y, Kong Z, Yang Z, Li Y, Tarasov P E. 2015. Late Holocene climate change and anthropogenic activities in north Xinjiang: Evidence from a peatland archive, the Caotanhu wetland. Holocene, 25: 323–332

Zhao Y, Chen F, Zhou A, Yu Z, Zhang K. 2010. Vegetation history, climate change and human activities over the last 6200 years on the Liupan Mountains in the southwestern Loess Plateau in central China.

Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 293: 197–205
Zhao H, Huang W, Feng S, Chen F, Xian W. 2017. Optimization and evaluation of monthly air temperature and precipitation gridded datasets with 0.025° spatial resolution over China for 1951−2015. Theor Appl Climatol, under review
Zheng Z, Wei J, Huang K, Xu Q, Lu H, Tarasov P, Luo C, Beaudouin C, Deng Y, Pan A, Zheng Y, Luo Y, Nakagawa T, Li C, Yang S, Peng H, Cheddadi R. 2014. East Asian pollen database: Modern pollen distribution and its quantitative relationship with vegetation and climate. J Biogeogr, 41: 1819–1832