中国科学: 地球科学 2018 年 第 48 卷 第 2 期: 165 ~ 180
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 气候环境变化与文明演化专题

欧洲历史上气候变化与鼠疫的关系

余柏康[1,2*], 李峯[1,2†]

1. 香港大学地理系, 香港;
2. 香港大学中国发展国际研究中心, 香港

* 通讯作者, E-mail: ricciyue@connect.hku.hk
† 通讯作者, E-mail: harrylee@hku.hk

收稿日期: 2017-03-28; 接受日期: 2017-10-26; 网络版发表日期: 2017-11-29
许爱周信托基金项目(编号: 201502172003、201602172006)、中国香港特别行政区政府研究资助局项目(编号: HKU745113H、17610715)和CAS-SAFEA国际合作创新研究团队项目资助

摘要 先前对气候变化与鼠疫关系的研究, 主要是针对短期气候变化对鼠疫传播的实时影响. 此外, 科学家们对于气候变化如何影响鼠疫传播仍然存有分歧, 主要原因是相关研究的时空跨度过小, 影响了气候变化与鼠疫传播动态关系研究的全面性. 通过整合前工业时期欧洲414年的鼠疫爆发记录和相应的欧洲大陆和国家的气候数据, 采用普通最小二乘回归分析与小波一致性分析, 本研究发现, 在以下各个层面上, 包括气候及大规模气候现象、欧洲大陆及国家尺度、年际及数年际尺度和线性及非线性统计方法, 只有少量证据支持气候和大规模气候现象与鼠疫传播存在显著相关性. 上述的"零结果"并不否定先前有关气候和大规模气候现象与鼠疫传播关系的研究结论, 但本文认为, 在解释历史上和预测当代全球气候变化背景下的鼠疫传播时, 需要全面考虑研究本身的时空跨度、研究方法的稳健性和研究地区的地理背景等因素.

关键词 鼠疫, 气候变化, 尺度, 欧洲, 近世欧洲史

1 引言

全球气候变暖会增加传染病风险, 直接威胁人类社会, 这一观念正在全球普及化(Gubler等, 2001), 而在政府间气候变化专门委员会(IPCC, 2013)的最新报告中, 有关气候变化对未来影响的阐释也体现了这一点. 先前的研究指出, 气候变暖向北扩展不仅与许多疾病载体的活动范围转移有关(Gubler等, 2001), 而且与病原体的繁殖和感染率亦有关联(Mills等, 2010), 但其与鼠疫传播的关系并非如此. 在现有文献中, 对气候如何影响鼠疫传播的研究并不全面, 尤其以年际至多年际气候振荡对鼠疫传播的作用的研究结果存在矛盾, 因此我们尚未科学地总结出气候和鼠疫的联系, 并且我们发现缺少大规模气候现象对鼠疫传播影响的相关研究.

Stenseth等(2006)在中亚进行的有关温度对鼠疫影响的实地研究证实气候变暖有利于鼠疫传播. 据他们估计, 春季温度每上升1℃, 鼠疫爆发的风险就会增加50%. 然而, 这个结果存有争议, Enscore等(2002)指出, 当温度达到29℃或更高时, 鼠疫活动会急剧下降, 这与

中文引用格式: 余柏康, 李峯. 2018. 欧洲历史上气候变化与鼠疫的关系. 中国科学: 地球科学, 48: 165–180, doi: 10.1360/N072017-00101
英文引用格式: Yue R P H, Lee H F. 2018. Climate change and plague history in Europe. Science China Earth Sciences, 61: 163–177, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9127-x

© 2017 《中国科学》杂志社

早期有关鼠蚤生物特性的研究结果一致: 在28~30℃的温度范围内, 鼠疫杆菌回流到哺乳动物宿主的现象显着减少, 使到鼠疫病原体的传播非常困难(Perry和Fetherston, 1997). 但欧洲历史上大规模的鼠疫爆发往往出现在寒冷期内, 难以证明历史上高温对鼠疫传播的影响(McMichael, 2012). 降水量对鼠疫的影响则更为复杂. 在美国, 鼠疫活动的趋势与降水量的关系呈线性正相关(Parmenter等, 1999), 在湿润条件下, 鼠疫爆发次数增加. 但在越南和乌干达, 鼠疫爆发次数却在旱季明显增加(Moore等, 2012; Pham等, 2009). 另外, 在中国, 降雨量对鼠疫强度的影响在北部地区和南部地区是相反的(Xu等, 2011).

近年来, 大规模气候现象与鼠疫传播的关系的研究取得了新进展. Kreppel等(2014)观察到厄尔尼诺-南方涛动现象(El Nino Southern Oscillation, ENSO)与马达加斯加鼠疫的联系是非固定的. 美国西部一个研究小组发现, ENSO和太平洋十年涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)驱动鼠疫散播(Ari等, 2008, 2010), 而ENSO和鼠疫散播的关系也得到了Zhang等(2007)在中国的研究证实. 同时, 在南美洲(Jaksic等, 1997; Lima等, 1999)、美国(Hjelle和Glass, 2000)和中国(Jiang等, 2011; Zhang等, 2003)也发现了类似的联系. 然而, 大规模气候现象与鼠疫散播的关系的研究只局限于ENSO和PDO, 其他大规模气候现象对鼠疫的影响在文献中则尚未提及.

总结先前的大规模气候现象与鼠疫传播的研究结果, 我们发现有三个范畴的问题需要进一步讨论. 首先是Xu等(2011)提到的论点: 鼠疫风险因素的区域差异可造成气候对鼠疫散播的区域差异. 环境因素如地貌(Xu等, 2014)、交通路线分布(Yue等, 2017)和海拔(Eisen等, 2007)等都会影响鼠疫爆发的风险, 由每个地区都有各自的环境因素, 在不同地区, 鼠疫对气候变化的敏感度也随之不同. 其次, 由于缺乏长时期的历史鼠疫数据, 以致鼠疫研究的时间跨度受到限制, 同时也无法验证一些长周期的气候效应的影响. 第三, 普遍认为小规模研究的结果可以被用作推断大规模的现象(Ari等, 2011), 但这个假设忽略了生态研究的尺度敏感性和复杂性, 可能会导致相关结论不准确.

针对上述问题, 为研究气候与鼠疫的关系, 本研究基于并包括: (1) 长期气候与鼠疫数据; (2) 欧洲——一个缺乏气候与鼠疫关系研究的地区; (3) 基本气候变量对鼠疫的年际及多年际影响; (4) 其他大规模气候现象如北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)和北大西洋多年代际涛动(Atlantic Multi-decadal Oscillation, AMO)对鼠疫的年际及多年际影响; 和(5)不同的空间尺度. 本研究考虑了长期气候变化与鼠疫爆发两者关系中的多重动态, 并同时应用了线性和非线性的分析方法, 这些都是先前研究大多缺乏的.

2 数据与方法

2.1 研究时期和研究范围

本研究针对中世纪晚期和近代早期(AD1347~1760年)的欧洲和北非海岸, 研究时期以AD1347年意大利西西里岛的黑死病爆发开始(Benedictow, 2004), 以工业革命的开始终结(AD1760年), 避免工业革命前后科技、运输、医疗和生活方式的不一致, 干扰统计分析的结果(Ashtom, 1997). 我们采用的鼠疫爆发数据来自Büntgen等(2012)编制的欧洲历史鼠疫数据库, 当中包括了在北非海岸的鼠疫历史记录. 由于北非鼠疫爆发和欧洲鼠疫爆发受相似的气候模式驱动, 并且两地的鼠疫交叉传播(Yue等, 2016), 因此将北非鼠疫纳入一并分析. 为了要探索空间尺度和地区差异是否对气候-瘟疫的关联有影响, 本文也挑了五个瘟疫爆发频密的欧洲国家(即英国、法国、德国、意大利和西班牙)与整个欧洲大陆来作对比.

2.2 数据

本研究采用Büntgen等(2012)建立的历史鼠疫数据库进行分析, 鼠疫数据来自全面的历史文献考察, 包含了AD1347~1900年欧洲和非洲北部鼠疫次数, 数据分辨率达到年尺度. 鼠疫数据并没有任何显着趋势(F值=0.02, p值=0.895, 详细结果可按要求提供), 而鼠疫爆发次数的峰值出现在黑死病时期(AD1347~1353年)和30年战争时期(AD1618~1648年), 其原因有待进一步确定. 除了气候影响外, 学术界对鼠疫爆发的原因还有其他观点, 如Voigtländer和Voth(2012)认为战争和城市化才是鼠疫爆发的主因, 而McMichael(2012)提出, 每次大规模的鼠疫爆发与数十年前的饥荒有一定关系.

本文以温度、降水量和干旱阈限作为基本气候

变化的变量. 其中温度和降水量数据来自Büntgen等(2011)的研究, 他们以欧洲1546套树轮纪录, 重建达到年度分辨率的气候记录, 这些树轮纪录来自欧洲不同区域, 而庞大的样本数与地域覆盖度保证了数据的可靠性(Pei等, 2014). 干旱阈限则以帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)表示, 有关数据来自Cook等(2015)建立的“旧世界干旱地图集”(Old World Drought Atlas). 该地图集是一系列的年际地图, 每张地图记录了过往欧洲的夏季湿度和干燥度, 其空间分辨率达到0.5°×0.5°. 以欧洲大陆和国家为单位将从地图集提取的数据汇总, 并转换成时间序列.

关于大规模气候现象, 欧洲的气候主要受NAO和AMO驱动(Ghosh等, 2017; Rodwell等, 1999). NAO主要由亚热带亚速尔高压和冰岛极地低压之间的压力相差带动(van Loon和Rogers, 1978), 而AMO则由北大西洋的海洋环流带动, 並以多年代际的周期变化(McCarthy等, 2015). 而且, 先前的实证研究已证实NAO与欧洲历史上的战乱显著相关(Lee等, 2013, 2016), 反映出大西洋的海温变化对欧洲人类社会发展有一定影响. 如前文所述, 目前的文献只包括厄尔尼诺-南方涛动现象对鼠疫传播的影响, 而缺乏关于NAO和AMO等大规模气候现象对鼠疫影响的研究. 本文所采用的NAO数据库来自Ortega等(2015), 其数据重建采用了48个由树木年轮、湖底沉积物、冰芯和洞穴灰华组成的年度分辨率时间序列. AMO方面, 选择了Mann等(2009)基于树轮、湖底沉积物、冰芯、洞穴灰华、海洋珊瑚及历史档案文件复合构建的数据集, 然而该数据集在AD1600年前用了低斜截参数函数作假设, 针对此不足之处, 我们同时采用了Gray等(2004)建立的AMO数据, 反复检查结果的有效性, 但由于这个数据以AD1567以后的树轮建构, 其应用也局限于AD1567以后的数据分析. 图1显示了本研究所采用的变量的时间序列.

2.3 方法

本研究通过普通最小二乘法(Ordinary Least Square, OLS)回归分析与小波一致性(Wavelet Transform Coherence, WTC)分析, 研究欧洲历史上气候变化和大规模气候现象与鼠疫的关系. 我们采用了普通最小二乘回归模型和小波一致性分析两种统计方法, 简述如下:

普通最小二乘回归模型是一种线性回归方法, 常用于社会科学研究, 特别是涉及面板数据或追踪模型中一个或多个解释变量的影响(Craven和Islam, 2011), 它对检验线性关系非常有效(Hutcheson和Sofroniou, 1999). 小波一致性分析可识别空间与频率定域中变量之间的相关性(Torrence和Compo, 1998), 透过检测变量中的周期性分量, 找出时间上频率的局部变化和时间序列之间的相关性(Grenfell等, 2001). 此外, 小波一致性分析能确定频率分量之间的间歇动态, 找出变量之间的非线性关系. 因为本研究的目的是探讨气候和大规模气候现象对鼠疫传播年际与多年际的影响, 所以小波一致性分析设定为只计算高频率维度中的周期关联.

本文的数据分析包括四个部分. 首先, 利用普通最小二乘回归模型, 在控制时间序列自相关的情况下, 在大陆和国家尺度检测年际至多年际气候(温度、降水量和干旱阈限)与鼠疫的相关性. 其次, 同样在大陆和国家尺度上并控制时间序列自相关的情况下, 检测大规模气候现象(NAO和AMO)与鼠疫年际至多年际的相关性. 再次, 通过小波一致性分析探索鼠疫传播与地区性气候和大规模气候现象的周期性关系. 最后, 将小波一致性分析的结果与普通最小二乘回归的结果进行交叉验证.

本文针对气候变化对鼠疫的年际及多年际影响, 我们理解到AMO是年代尺度上的全球性气候现象, 放在年度维度上分析或许值得商榷. 但我们考虑到气候系统的复杂性, AMO能影响气候系统某些较高频的变量(如温度、降水量和干旱阈限), 再透过有关变量的变化, 影响鼠疫转播. 所以, 我们也把AMO放在年度维度上分析, 作为补充验证.

3 结果

我们首先以普通最小二乘回归模型检测气候(温度、降水量和干旱阈限)与鼠疫的关系. 在大陆尺度上, 回归模型(1)~(3)(表1)显示, 整个欧洲鼠疫当年的爆发频次与鼠疫前一年的爆发频次(鼠疫$_{t-1}$)显著相关(p<0.001), 但与温度、降水量和帕尔默干旱指数当年、前一年(t−1)和前两年(t−2)的变化不相关. 模型(4)综合了模型(1)~(3)的解释变量再作回归分析, 也得出相同结论(表1). 综上所述, 无法在普通最小二乘回归

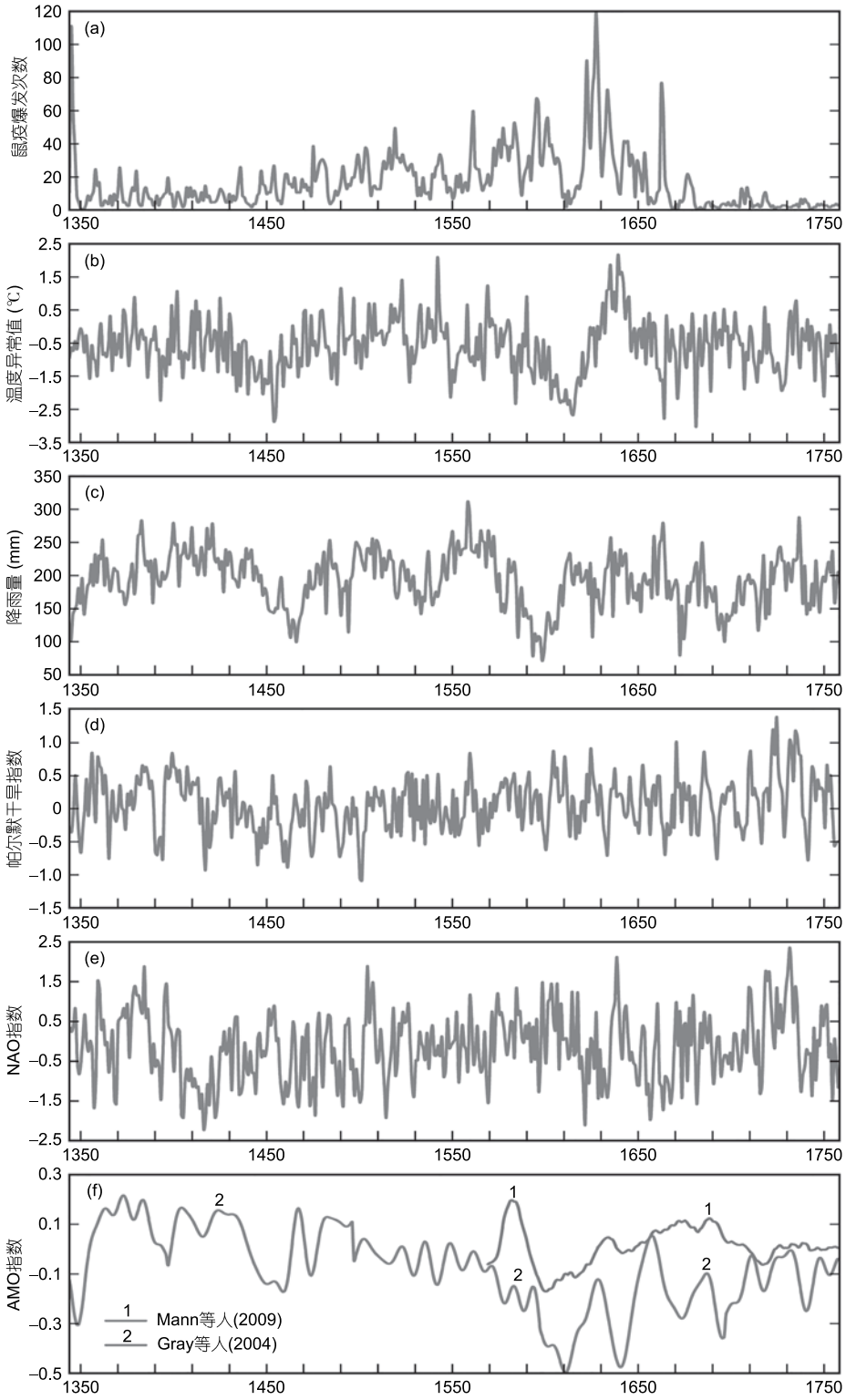

图 1　本研究使用的各项变量的时间序列

(a) 鼠疫爆发次数; (b) 以AD1901~2000年欧洲温度作基准的温度异常; (c) 降水量; (d) 欧洲平均帕尔默干旱指数; (e) NAO指数; (f) 由Mann等(2009)及Gray等(2004)重建的AMO指数

表 1 AD1347~1760年欧洲大陆气候与鼠疫传播的关系[a)]

	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)
鼠疫$_{t-1}$	−0.815***(0.044)	0.812***(0.044)	0.815***(0.044)	0.816***(0.045)
鼠疫$_{t-2}$	−0.403(0.044)	−0.035(0.044)	−0.039(0.044)	−0.042(0.045)
温度	−0.553(0.817)			−0.427(0.843)
温度$_{t-1}$	0.914(0.873)			−0.743(0.917)
温度$_{t-2}$	−0.570(0.810)			−0.683(0.848)
降水量		−0.001(0.014)		−0.0004(0.016)
降水量$_{t-1}$		−0.008(0.015)		−0.002(0.017)
降水量$_{t-2}$		−0.012(0.014)		0.018(0.016)
帕尔默干旱指数			0.733(1.077)	0.525(1.245)
帕尔默干旱指数$_{t-1}$			−1.118(1.187)	−0.632(1.395)
帕尔默干旱指数$_{t-2}$			−0.390(1.070)	−1.230(1.242)
N值	412	412	412	412
R^2	0.6642	0.6638	0.6644	0.6666
F值	160.63	160.30	160.76	72.69

a) 以普通最小二乘(OLS)回归计算; ***, p<0.001

模型中证明气温、降雨量和干燥阈限的短期波动与鼠疫传播有关. 在国家尺度上, 使用同一组解释变量(表1, 模型(4)), 欧洲五国(即英国、法国、德国、意大利和西班牙)鼠疫当年的爆发频次(鼠疫)与鼠疫前一年的爆发频次(鼠疫$_{t-1}$)显著相关(p<0.001)(表2). 在英国和法国, 鼠疫当年的爆发频次(鼠疫)与鼠疫前两年的爆发频次(鼠疫$_{t-2}$)也显著相关(p<0.05). 同时, 除德国的温度$_{t-2}$变量与鼠疫呈负相关, 各项气候变量与鼠

表 2 AD1347~1760年欧洲五国气候与鼠疫传播的关系[a)]

	模型(1) 英国	模型(2) 法国	模型(3) 德国	模型(4) 意大利	模型(5) 西班牙
鼠疫$_{t-1}$	0.674***(0.049)	0.903***(0.047)	0.527***(0.050)	0.429***(0.047)	0.551***(0.047)
鼠疫$_{t-2}$	−0.102*(0.050)	−0.097*(0.047)	−0.003(0.050)	0.073(0.047)	0.043(0.047)
温度	0.675(0.453)	−0.741(0.435)	0.250(0.233)	−0.053(0.334)	−0.227(0.203)
温度$_{t-1}$	−0.098(0.484)	0.547(0.464)	0.042(0.263)	0.753(0.384)	−0.091(0.211)
温度$_{t-2}$	−0.875(0.455)	0.544(0.439)	−0.505*(0.232)	−0.330(0.336)	0.064(0.198)
降水量	−0.003(0.011)	−0.007(0.010)	−0.003(0.007)	−0.003(0.004)	0.001(0.003)
降水量$_{t-1}$	−0.006(0.012)	−0.002(0.011)	−0.009(0.008)	0.001(0.005)	0.0002(0.004)
降水量$_{t-2}$	0.004(0.011)	−0.005(0.010)	0.007(0.007)	−0.0003(0.004)	−0.002(0.003)
帕尔默干旱指数	0.121(0.340)	0.323(0.213)	0.074(0.143)	0.118(0.289)	0.064(0.122)
帕尔默干旱指数$_{t-1}$	−0.087(0.441)	0.052(0.241)	0.148(0.177)	0.4946(0.327)	0.047(0.138)
帕尔默干旱指数$_{t-2}$	0.251(0.358)	0.262(0.207)	−0.092(0.143)	−0.058(0.286)	0.033(0.130)
N值	412	412	412	412	412
R^2	0.4001	0.7260	0.2971	0.2684	0.3889
F值	24.25	96.37	15.37	13.34	23.14

a) 以普通最小二乘(OLS)回归计算; ***, p<0.001; *, p<0.01

疫之间的关系并不显著. 综合以上普通最小二乘回归模型的检测结果, 在大陆尺度(表1)和国家尺度(表2), 年际至多年际的气候变异对鼠疫爆发几乎没有影响.

先前研究显示各种大规模气候现象可能对生态系统产生不同影响, 继而影响鼠疫传播路径(Forchhammer等, 2001; Ottersen等, 2001; Stenseth等, 2002), 因此本文进一步以普通最小二乘回归模型检测大规模气候现象(NAO和AMO)与鼠疫的关系. 结果显示整个欧洲或欧洲五国, 大规模气候现象与鼠疫传播之间的关系并不显著(表3). 唯一例外的是西班牙, 鼠疫当年的爆发频次与NAO_{t-1}呈微弱的负相关($p<0.05$). 我们随后以Gray等(2004)的AMO数据替代Mann等(2009)的数据, 重复检测AMO与鼠疫的关系(参考数据). 结果表4与3的结果一致, 在年际至多年际的变化层面上, AMO与鼠疫动态的关系并不显著. 结合表3及4的统计结果, 在大陆尺度及国家尺度上, 年际至多年际的大规模气候现象变异与鼠疫爆发没有关联.

本文继而利用小波一致性分析检测整个欧洲和欧洲五国, 气候和大规模气候现象与鼠疫间的非线性周期关联. 温度与鼠疫的小波一致性分析结果显示于图2, 发现温度对鼠疫的影响在英国比较明显, 但两者的显著关系缺乏连续性(图2a). 此外, 其他欧洲国家如法国、德国、意大利及西班牙的温度与鼠疫没有关联. 采用相同的方法检测鼠疫与降水量及干燥阈值的

表 3　AD1347~1760年欧洲大陆和欧洲五国大规模气候现象与鼠疫传播的关系[a)]

	模型(1) 欧洲	模型(2) 英国	模型(3) 法国	模型(4) 德国	模型(5) 意大利	模型(6) 西班牙
鼠疫$_{t-1}$	0.803***(0.044)	0.633***(0.048)	0.907***(0.047)	0.526***(0.050)	0.418***(0.047)	0.560***(0.046)
鼠疫$_{t-2}$	−0.045(0.045)	−0.148***(0.048)	−0.086**(0.047)	−0.023(0.050)	0.065(0.046)	0.046(0.046)
NAO	0.091(0.788)	−0.009(0.421)	0.209(0.401)	−0.231(0.204)	0.212(0.241)	−0.201(0.184)
NAO_{t-1}	0.621(0.831)	0.237(0.446)	−0.453(0.423)	0.206(0.217)	0.336(0.255)	0.411*(0.195)
NAO_{t-2}	0.444(0.789)	0.809(0.424)	0.276(0.401)	−0.165(0.206)	−0.020(0.242)	−0.0817(0.186)
AMO	−9.356(31.184)	−29.782(16.662)	17.932(15.813)	−10.679(8.087)	7.162(9.469)	−6.223(7.28)
AMO_{t-1}	27.290(58.084)	36.284(31.054)	−23.051(29.533)	15.488(15.088)	−5.042(17.724)	12.352(13.596)
AMO_{t-2}	3.276(0.688)	−14.112(16.506)	4.409(15.693)	−6.345(8.017)	−0.077(9.431)	−7.323(7.225)
N值	412	412	412	412	412	412
R^2	0.6675	0.4227	0.7198	0.2877	0.2668	0.3918
F值	101.11	36.88	129.44	32.80	19.28	32.44

a) 以普通最小二乘(OLS)回归计算; ***, $p<0.001$; **, $p<0.005$; *, $p<0.01$

表 4　AD1572~1760年欧洲大陆和欧洲五国AMO与鼠疫传播的关系

	模型(1) 欧洲	模型(2) 英国	模型(3) 法国	模型(4) 德国	模型(5) 意大利	模型(6) 西班牙
鼠疫$_{t-1}$	0.959***(0.073)	0.659*** (0.073)	1.009***(0.073)	0.559***(0.074)	0.547***(0.074)	0.646***(0.074)
鼠疫$_{t-2}$	−0.148(0.073)	−0.142**(0.073)	−0.156***(0.073)	0.068(0.074)	−0.090(0.074)	0.044(0.074)
AMO	−20.147(13.783)	8.458(8.975)	10.084(6.548)	−0.199(3.290)	−0.354(3.578)	−1.886(3.261)
AMO_{t-1}	−36.413(26.324)	−19.115(17.111)	−14.488(12.512)	2.127(6.284)	3.036(6.791)	1.170(6.205)
AMO_{t-2}	15.251(13.843)	9.574(8.971)	4.109(6.584)	−2.290(3.303)	−2.906(3.555)	0.620(3.254)
N值	187	187	187	187	187	187
R^2	0.7223	0.3806	0.7862	0.4018	0.2808	0.4917
F值	94.17	22.24	33.08	24.32	14.14	35.02

a) 以普通最小二乘(OLS)回归计算; ***, $p<0.001$; **, $p<0.005$

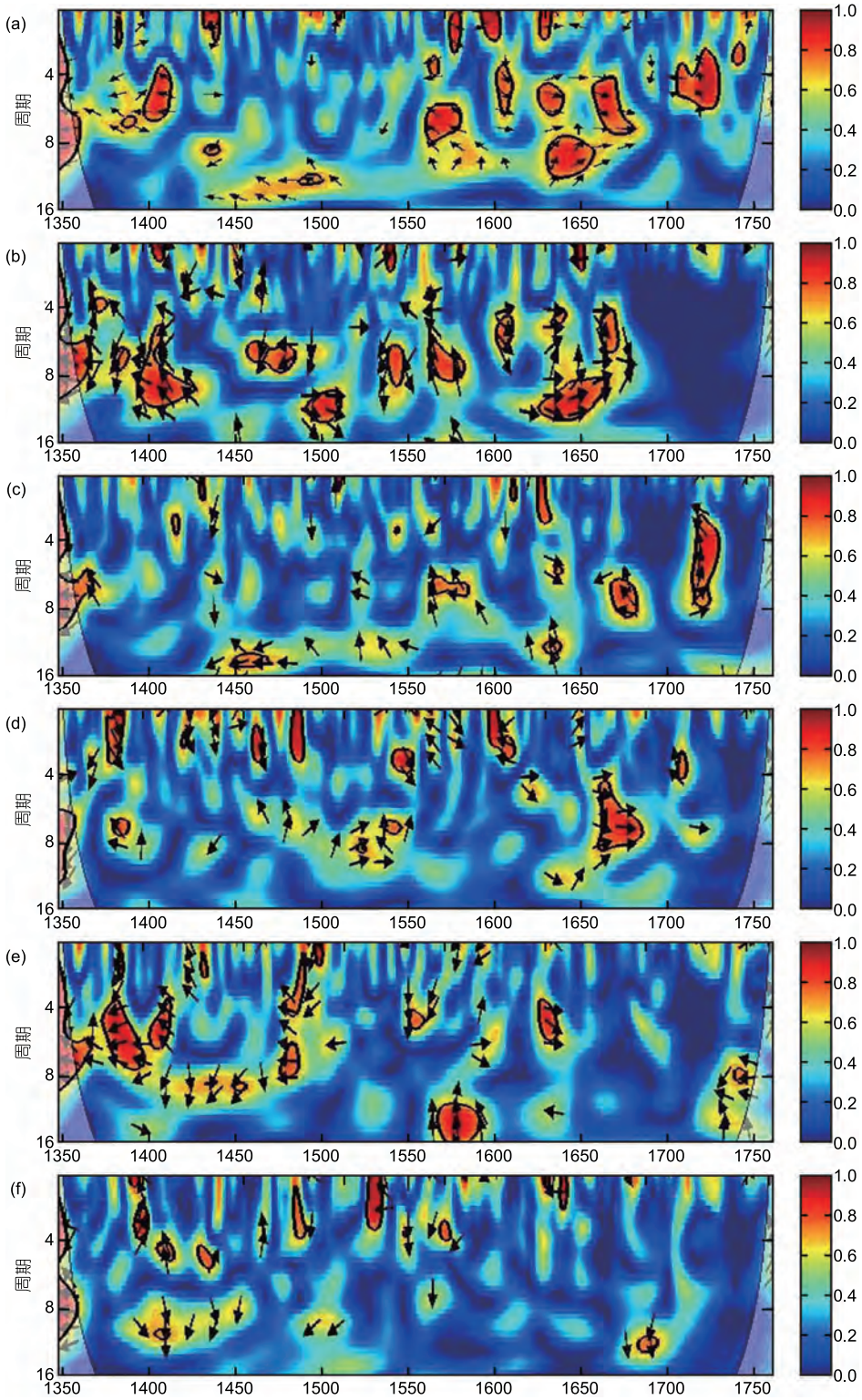

图 2　温度与鼠疫频次在不同空间尺度的小波一致性谱图

(a) 欧洲大陆; (b) 英国; (c) 法国; (d) 德国; (e) 意大利; (f) 西班牙. 色谱代表信号的强弱, 深红为最强而深蓝为最弱; 粗实线表示通过95%显著性检验的临界值, 阴影部分表示受数据边界效应影响的区域

周期性关联, 结果显示于图3和4. 在大陆尺度上, 在AD1450~1505年, 整个欧洲的鼠疫频次与降水量存在12~16年的一致性周期(图3a); 在AD1465~1515年, 整个欧洲的鼠疫频次与干燥阈限同样存在12~16年的一致性周期(图4a). 在国家尺度上, 只有英国在AD1590~1640年鼠疫频次与干燥阈限存在4~16年的一致性周期(图4b). 图上三个区域同时显示了鼠疫与降雨量/干燥阈限有270°的相位角关系, 由于鼠疫不可能引致降雨量/干燥阈限变化, 相位角说明降雨量/干燥领先鼠疫3/4个周期. 然而, 在其他区域的降雨量-鼠疫/干燥阈限-鼠疫周期性关联出现时段颇短, 一概不超过50年. 综上所述, 虽然发现了气候与鼠疫在整个欧洲地区及英国的周期性关联, 但关联非常零散和微弱.

图5及6显示了大规模气候现象与鼠疫传播之间的小波一致性分析结果, 结果与普通最小二乘回归模型结果(表3和4)吻合, 在高频率维度上NAO和AMO与鼠疫皆无直接关系. 以上结论适用于大陆尺度及国家尺度, 大规模气候现象与鼠疫传播没有显著关系. 图7展示了采用Gray等(2004)提供的AMO数据所作的小波一致性分析结果, 结果再次显示AMO跟鼠疫没有连贯的显著关系.

4 讨论

综合普通最小二乘回归模型(表1~4)及小波一致性分析结果(图2~7), 发现年际至多年际尺度下, 地区气候变量和大规模气候现象变量对鼠疫传播没有显著影响(null-finding). 先前的研究指出, 气候和大规模气候现象变量都是预测鼠疫传播的有效指标(Stenseth等, 2006). 然而, 本文的统计分析结果却无法证实在前工业革命时期, 气候和大规模气候现象与欧洲鼠疫爆发有直接联系, 这虽然与Schmid等(2015)的结论一致, 却与先前很多研究的结论不一样. 这衍生出两个相关问题: 第一, 本文的研究结果是否只是揭示了前工业革命时期欧洲的独特现象? 第二, 本文的研究结果是否可以推翻先前研究的结果?

Ari等(2011)提出, 研究鼠疫时必须注意研究的尺度规模和生态系统中相互影响的复杂性, 气候对鼠疫的长期影响并不是气候对鼠疫的短期影响的加总. 历史上气候与人类社会的联系, 可能在某个时间尺度下显著, 在另一个时间尺度下则不显著; 也可能在某个时段相关, 在其他时段则不相关(Lee等, 2013, 2016; Pei等, 2015). 气候变化与鼠疫传播不是单纯的因果关系, 而是一种复杂和受观测尺度影响的非线性过程. 气候与鼠疫传播的联系并不是实时和点对点的, 而是气候先影响生态, 再由生态变化驱动鼠疫传播, 是一个比较慢长的过程(Yue和Lee, 2017). 根据小波一致性分析结果(图2~7), 可以发现在2~4年周期的维度, 气候和大规模气候现象与鼠疫频次不相关. 但在4~8和8~16年周期的维度, 气候和大规模气候现象变量与鼠疫频次开始呈现间断性的显著相关. 假若研究只着眼于气候变化与鼠疫传播四年以下的周期, 我们会找不到两者的相关性. 另一方面, 即使针对4~8和8~16年周期的维度, 假若研究的时段落在气候变化与鼠疫传播有显著关系的时段, 我们便会找到两者的相关性, 反之亦然. 这里呈现出气候-鼠疫动态关系具有对时间(包括尺度和时段)敏感的特性 .

本文的普通最小二乘回归模型(表1~4)和小波一致性分析结果(图2~7)显示, 气候-鼠疫的间断显著关系在欧洲大陆、英国、法国、德国、意大利和西班牙等国家出现在不同的时段, 反映出鼠疫动态在相同时段, 但在不同空间尺度(欧洲大陆对欧洲五国)和不同区域(欧洲五国), 对气候可以出现不同响应, 这种现象可能是源于自然生态是气候-鼠疫联系的导体, 而自然生态有很强的的尺度依赖性和地区差异(Lee等, 2017; Ari等, 2011). 近十年在美国(Ari等, 2008; Enscore等, 2002)、亚洲(Pham等, 2009; Xu等, 2011)及非洲(MacMillan等, 2012; Monaghan等, 2012; Moore等, 2012)的研究证明在不同的地域, 近代气候变迁影响着鼠疫传播, 但空间尺度怎样影响气候-鼠疫的联系则很少在文献中提及.

先前气候-鼠疫动态关系研究出现的矛盾(Xu等, 2011), 在一定程度上是源于每个研究都有特定的时空设定(时空尺度和时间地点). 在不同的时空设定下, 气候-鼠疫关系会有所不同. 基于上述的考虑, 本文的研究结果只能看成是前工业革命时期欧洲的独特现象, 并不能推翻先前研究的结果. 虽然本文的研究结果指出气候和大规模气候现象并未对前工业革命时期欧洲的鼠疫传播带来实时或短时间内的影响, 但我们绝不排除气候和大规模气候现象与鼠疫在较长的时间尺度有显著关系. 如前所述, 已有多项研究证实不同气候系统与鼠疫动态存在显著关系, 同时也有科学证据显示气候可以透过其低频率(长期)变化去影响气候

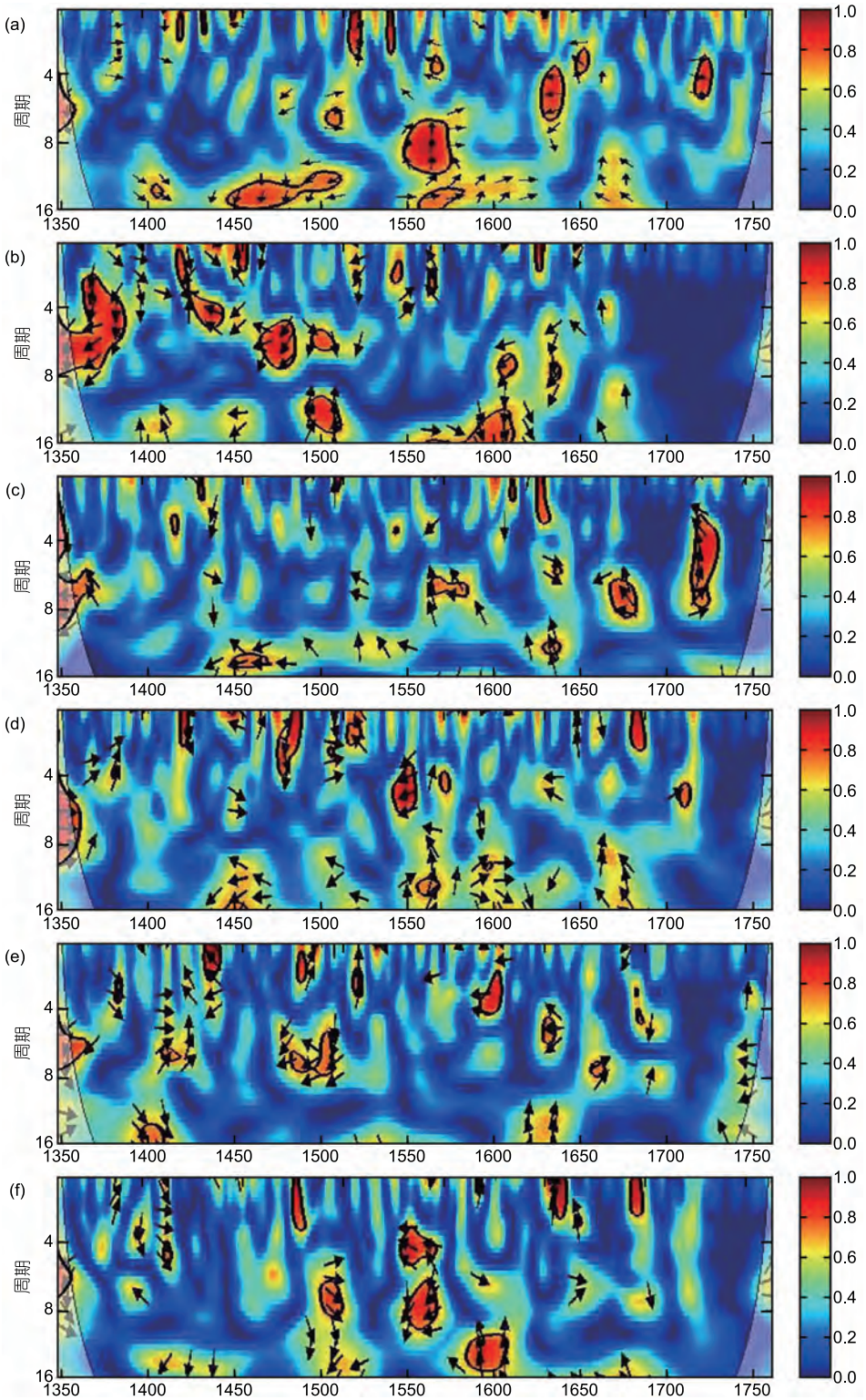

图 3　降水量与鼠疫频次在不同空间尺度的小波一致性谱图

(a) 欧洲大陆; (b) 英国; (c) 法国; (d) 德国; (e) 意大利; (f) 西班牙. 色谱代表信号的强弱, 深红为最强而深蓝为最弱; 粗实线表示通过95%显著性检验的临界值, 阴影部分表示受数据边界效应影响的区域

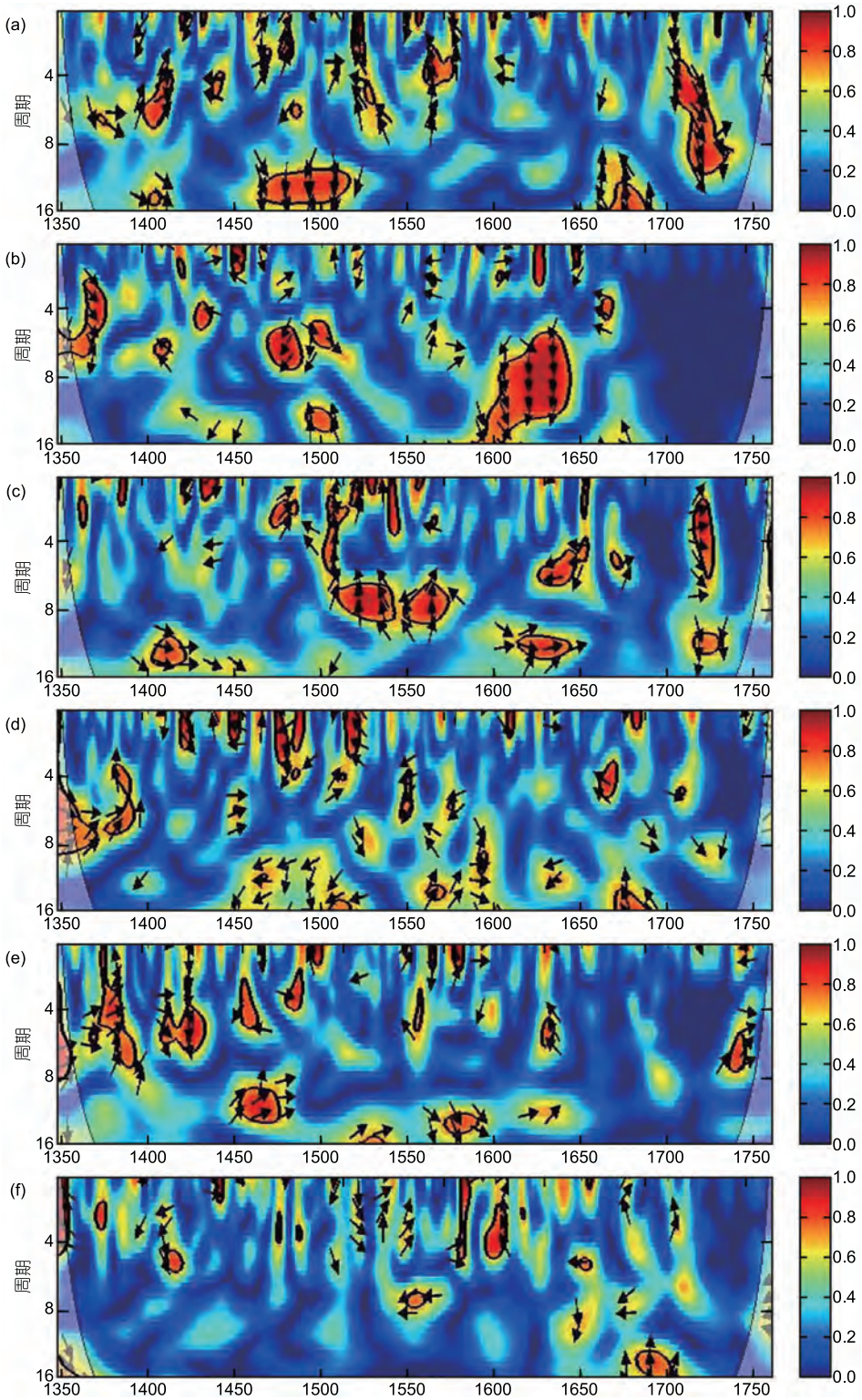

图 4　帕尔默干旱指数与鼠疫频次在不同空间尺度的小波一致性谱图

(a) 欧洲大陆; (b) 英国; (c) 法国; (d) 德国; (e) 意大利; (f) 西班牙. 色谱代表信号的强弱, 深红为最强而深蓝为最弱; 粗实线表示通过95%显著性检验的临界值, 阴影部分表示受数据边界效应影响的区域

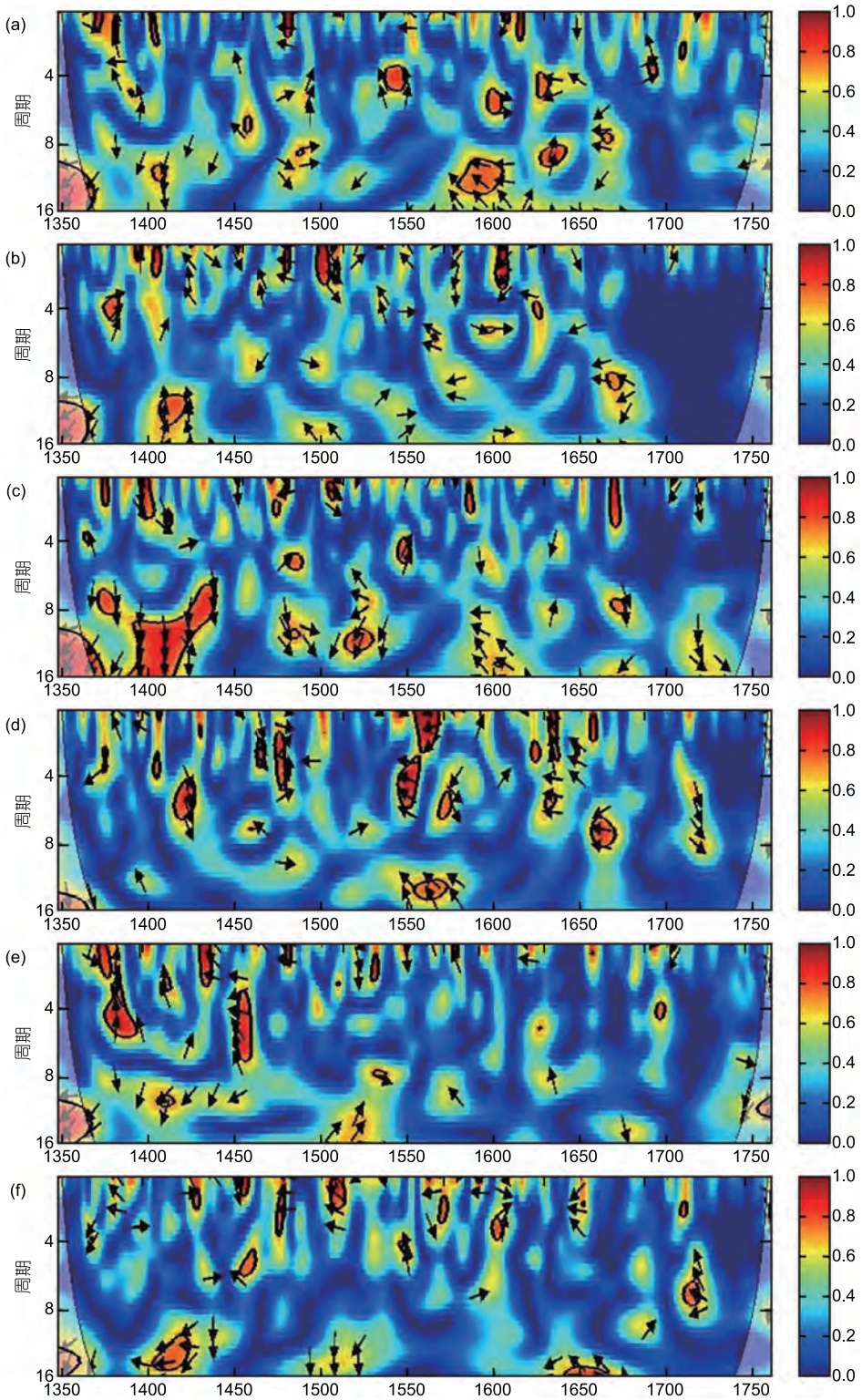

图 5　NAO与鼠疫频次在不同空间尺度的小波一致性谱图

(a) 欧洲大陆; (b) 英国; (c) 法国; (d) 德国; (e) 意大利; (f) 西班牙. 色谱代表信号的强弱, 深红为最强而深蓝为最弱; 粗实线表示通过95%显著性检验的临界值, 阴影部分表示受数据边界效应影响的区域

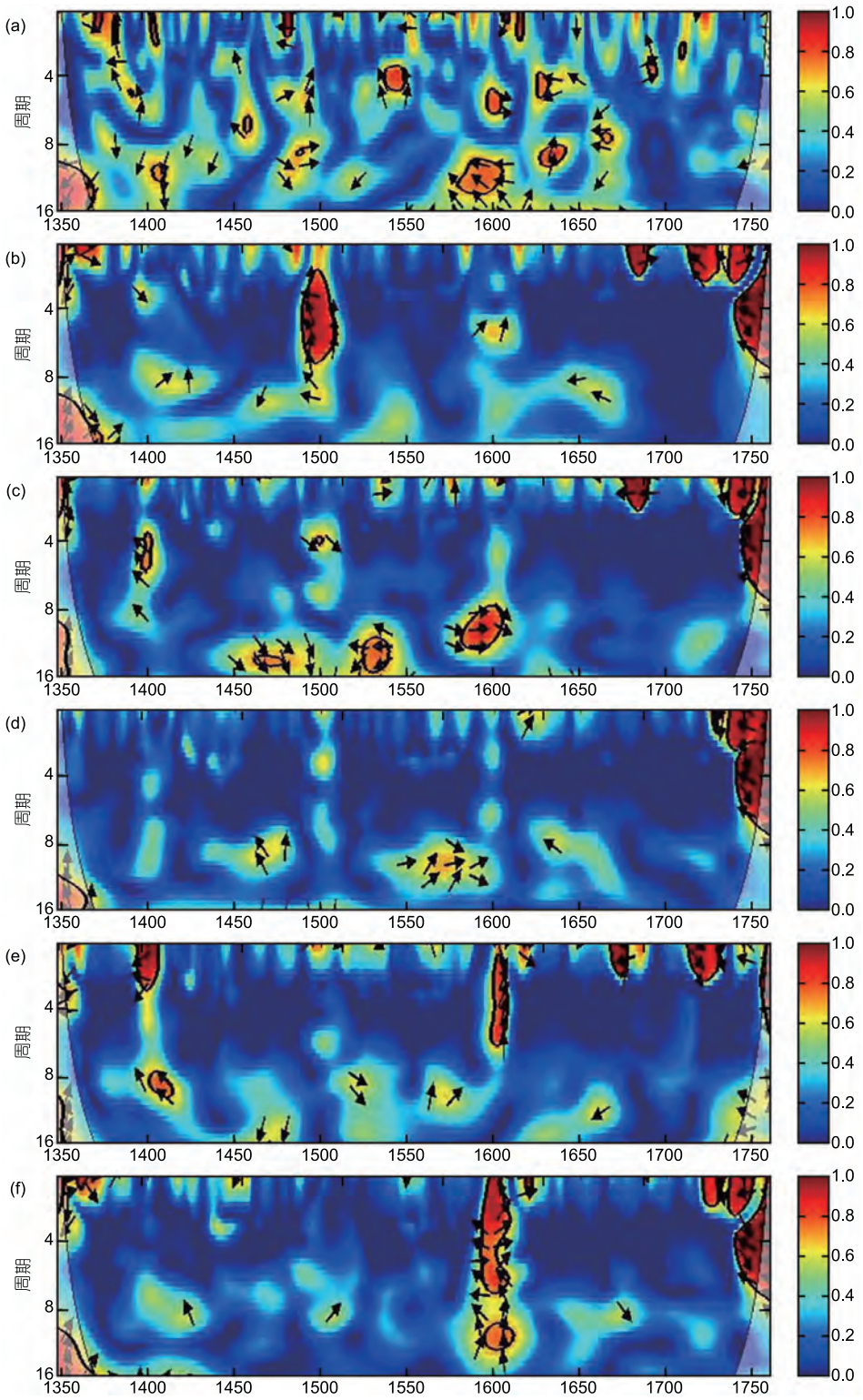

图 6　由Mann等(2009)重建的AMO指数与鼠疫频次在不同空间尺度的小波一致性谱图

(a) 欧洲大陆; (b) 英国; (c) 法国; (d) 德国; (e) 意大利; (f) 西班牙. 色谱代表信号的强弱, 深红为最强而深蓝为最弱; 粗实线表示通过95%显著性检验的临界值, 阴影部分表示受数据边界效应影响的区域

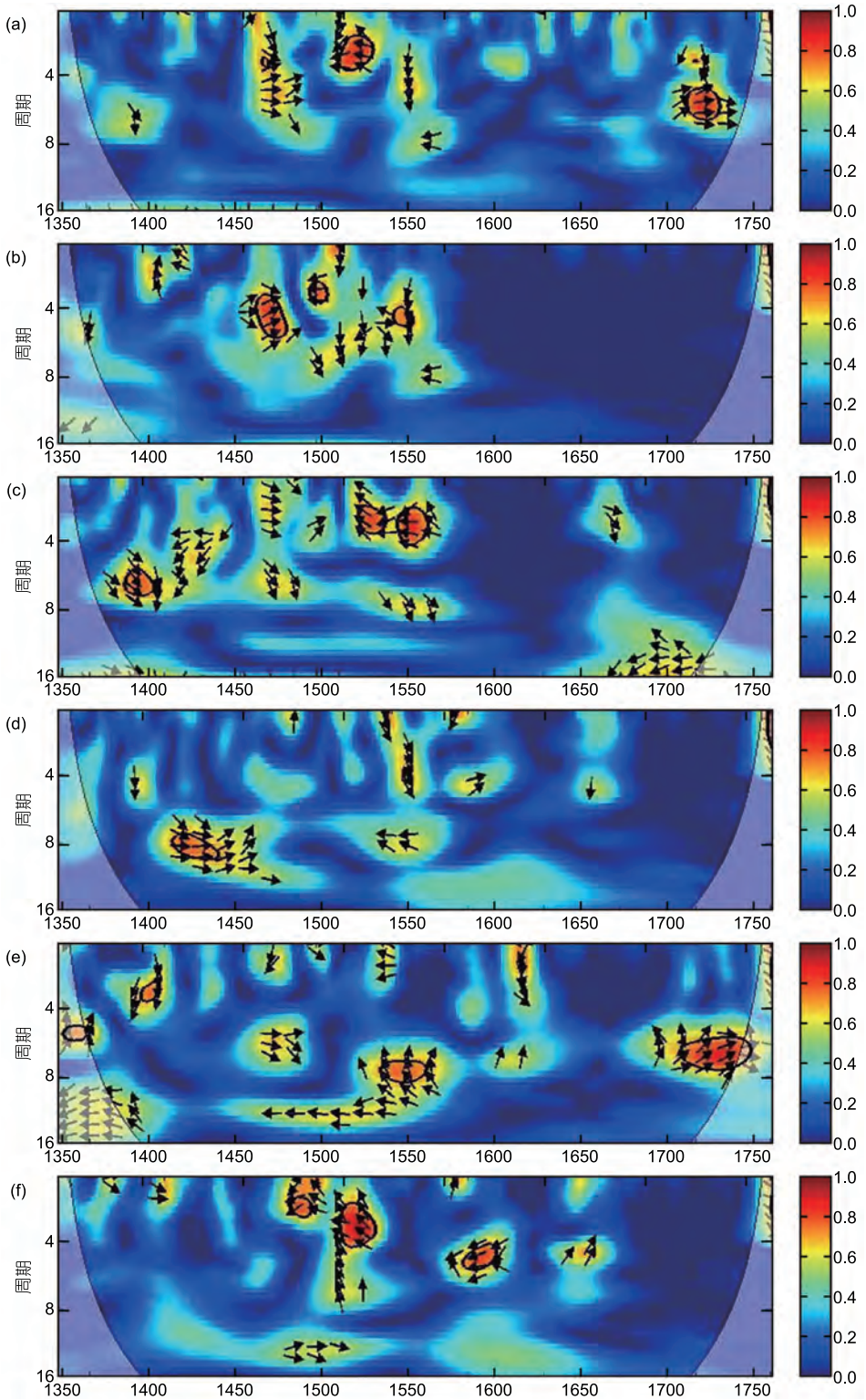

图 7　鼠疫动态时序与由Gray等(2004)所建立的北大西洋多年代振荡时序在不同空间尺度的小波相干谱图

(a) 欧洲大陆; (b) 英国; (c) 法国; (d) 德国; (e) 意大利; (f) 西班牙. 色谱代表信号的强弱, 深红为最强而深蓝为最弱; 粗实线表示通过95%显著性检验的临界值, 阴影部分表示受数据边界效应影响的区域

与鼠疫间高频率(短期)互动, 而气候对鼠疫的影响甚至会滞后数十年(Yue, 2017). 另一方面, Lee等(2017)证明在不同空间尺度上分析气候对传染病的影响会有不同结果, 在大的空间尺度(如国家)时, 气候对传染病的影响会比较明显. 学术界未来应进一步研究并厘清在不同空间尺度下气候变化对鼠疫传播的长期影响, 探讨气候与鼠疫之间的非线性关系.

本文的研究结果带出了时空设定在研究气候-鼠疫关联的重要性. 遗憾的是, 先前的研究很少会在多个不同的时间和空间尺度上, 分别检验气候与鼠疫之间是否存在显著关系, 并探索时间和空间尺度对结果的影响. 这种现象在一定程度上源于学术界缺乏可用的长时期、高(时间和空间)分辨率的历史鼠疫纪录. Cook(1985)曾经提到, 气候数据的长度能够影响结果. 在这方面, 气候数据已经比较成熟, 但鼠疫数据则尚有改善空间. 研究人员也必须建立一个覆盖年代更久远、时间分辨率更高的历史鼠疫数据库, 其长度需要包含历史上各种气候状况. 同时, 数据覆盖的地域和空间分辨率也需要进一步提升, 以计算出鼠疫爆发的规模, 从而容许气候与鼠疫在不同时段和不同地区的比较分析, 以便探索气候与鼠疫之间在多尺度上的关系, 统计结果也能准确地反应气候与鼠疫之间的互动.

在研究方面, 另一个需要克服的问题是气候与鼠疫互动时存在的复杂性存在多种情况, 如跳蚤病原体本身的生命周期与气候之间的微观互动、带病原体的跳蚤与宿主的活动、啮齿类动物在进行长时间空间跨度时的移动与疫带同步的宏观变化等(Perry和Fetherston, 1997). 由于上述的每一种情况都可能与气候有独特的联系, 所以研究时应小心决定研究的时空设定, 不能忽视不同尺度层面上气候与鼠疫的关系. 当前气候变化背景下, 应特别关注鼠疫细菌和宿主在极端及恶劣气候状况下的变化, 得出结论后及时改进相关的公共卫生政策.

5 结论

本研究通过普通最小二乘回归模型及小波一致性分析, 证明了在年际及多年际尺度下, 历史时期欧洲的气候和大规模气候现象与鼠疫动态无显著关系. 我们认为气候变化与鼠疫动态不是单纯的因果关系, 而是一种复杂和受观测尺度影响的非线性过程. 然而, 目前的研究大多只关注气候变化对鼠疫的即时影响, 却忽视两者关系的非线性本质和对时空尺度的敏感性. 除了上述问题, 在历史时期或当代气候变化与鼠疫传播研究上, 也需要全面考虑研究本身的时空跨度、研究方法的稳健性和研究地区的地理背景等因素.

参考文献

Ari T B, Gershunov A, Gage K L, Snäll T, Ettestad P, Kausrud K L, Stenseth N C. 2008. Human plague in the USA: The importance of regional and local climate. Biol Lett, 4: 737–740

Ari T B, Gershunov A, Tristan R, Cazelles B, Gage K L, Stenseth N C. 2010. Interannual variability of human plague occurrence in the Western United States explained by tropical and North Pacific Ocean climate variability. Am J Trop Med Hyg, 83: 624–632

Ari T B, Neerinckx S, Gage K L, Kreppel K, Laudisoit A, Leirs H, Stenseth N C. 2011. Plague and climate: Scales matter. Plos Pathog, 7: e1002160

Ashtom T S. 1997. The Industrial Revolution. 1760–1830. London: Oxford University Press

Benedictow O J. 2004. The Black Death, 1346–1353: The Complete History. England & Wales: Boydell & Brewer

Büntgen U, Ginzler C, Esper J, Tegel W, McMichael A J. 2012. Digitizing historical plague. Clin Infect Dis, 55: 1586–1588

Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, McCormick M, Frank D, Trouet V, Kaplan J O, Herzig F, Heussner K U, Wanner H, Luterbacher J, Esper J. 2011. 2500 years of European climate variability and human susceptibility. Science, 331: 578–582

Cook E R. 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization (dendrochrology, forestry, dendroclimatology, autoregreesive process). Dissertation for Doctoral Degree. Tucson: The Univeristy of Arizona

Cook E R, Seager R, Kushnir Y, Briffa K R, Bu ntgen U, Frank D, Krusic P J, Tegel W, van der Schrier G, Andreu-Hayles L, Baillie M, Baittinger C, Bleicher N, Bonde N, Brown D, Carrer M, Cooper R, Cufar K, Dittmar C, Esper J, Griggs C, Gunnarson B, Gu nther B, Gutierrez E, Haneca K, Helama S, Herzig F, Heussner K U, Hofmann J, Janda P, Kontic R, Ko se N, Kyncl T, Levanic T, Linderholm H, Manning S, Melvin T M, Miles D, Neuwirth B, Nicolussi K, Nola P, Panayotov M, Popa I, Rothe A, Seftigen K, Seim A, Svarva H, Svoboda M, Thun T, Timonen M, Touchan R, Trotsiuk V, Trouet V, Walder F, Wazny T, Wilson R, Zang C. 2015. Old world megadroughts and pluvials during the Common Era. Sci Adv, 1: e1500561–e1500561

Craven B D, Islam S M N. 2011. Ordinary Least-Squares Regression. London: Sage Publications

Eisen R J, Enscore R E, Biggerstaff B J, Reynolds P J, Ettestad P, Brown

T, Pape J, Tanda D, Levy C E, Engelthaler D M, Cheek J, Bueno Jr R, Targhetta J, Montenieri J A, Gage K L. 2007. Human plague in the Southwestern United States, 1957–2004: Spatial models of elevated risk of human exposure to *Yersinia pestis*. J Med Entomol, 44: 530–537

Enscore R E, Biggerstaff B J, Brown T, Fulgham R F, Reynolds P J, Engelthaler D M, Levy C E, Parmenter R R, Montenieri J A, Cheek J E. 2002. Modeling relationships between climate and the frequency of human plague cases in the southwestern United States, 1960–1997. Am J Trop Med Hyg, 66: 186–196

Forchhammer M C, Clutton-Brock T H, Lindström J, Albon S D. 2001. Climate and population density induce long-term cohort variation in a northern ungulate. J Anim Ecol, 70: 721–729

Gray S T, Graumlich L J, Betancourt J L, Pederson G T. 2004. A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 A.D. Geophys Res Lett, 31: L12205

Grenfell B T, Bjørnstad O N, Kappey J. 2001. Travelling waves and spatial hierarchies in measles epidemics. Nature, 414: 716–723

Ghosh R, Müller W A, Baehr J, Bader J. 2017. Impact of observed North Atlantic multidecadal variations to European summer climate: A linear baroclinic response to surface heating. Clim Dyn, 48: 3547–3563

Gubler D J, Reiter P, Ebi K L, Yap W, Nasci R, Patz J A. 2001. Climate variability and change in the United States: Potential impacts on vector- and rodent-borne diseases. Environ Health Perspect, 109: 223

Hjelle B, Glass G E. 2000. Outbreak of hantavirus infection in the Four Corners region of the United States in the wake of the 1997–1998 El Niño-Southern Oscillation. J Infect Dis, 181: 1569–1573

Hutcheson G D, Sofroniou N. 1999. The Multivariate Social Scientist: Introductory Statistics Using Generalized Linear Models. London: Sage Publications

IPCC. 2013. The physical science basis. In: Tignor K, Allen M, Boschung S K, Nauels J, Xia A, Bex Y, Midgley V, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1535

Jaksic F M, Silva S I, Meserve P L, Gutiérrez J R, Gutierrez J R. 1997. A long-term study of vertebrate predator responses to an El Niño (ENSO) disturbance in western South America. Oikos, 78: 341

Jiang G, Zhao T, Liu J, Xu L, Yu G, He H, Krebs C J, Zhang Z. 2011. Effects of ENSO-linked climate and vegetation on population dynamics of sympatric rodent species in semiarid grasslands of Inner Mongolia, China. Can J Zool, 89: 678–691

Kreppel K S, Caminade C, Telfer S, Rajerison M, Rahalison L, Morse A, Baylis M. 2014. A non-stationary relationship between global climate phenomena and human plague incidence in Madagascar. Plos Negl Trop Dis, 8: e3155

Lee H F, Fei J, Chan C Y S, Pei Q, Jia X, Yue R P H. 2017. Climate change and epidemics in Chinese history: A multi-scalar analysis. Social Sci Med, 174: 53–63

Lee H F, Zhang D D, Brecke P, Fei J. 2013. Positive correlation between the North Atlantic Oscillation and violent conflicts in Europe. Clim Res, 56: 1–10

Lee H F, Zhang D D, Pei Q, Fei J. 2016. Downscaling and disaggregating NAO-conflict nexus in pre-industrial Europe. Chin Geogr Sci, 26: 609–622

Lima M, Marquet P A, Jaksic F M. 1999. El Nino events, precipitation patterns, and rodent outbreaks are statistically associated in semiarid Chile. Ecography, 22: 213–218

MacMillan K, Monaghan A J, Apangu T, Griffith K S, Mead P S, Acayo S, Acidri R, Moore S M, Mpanga J T, Enscore R E. 2012. Climate predictors of the spatial distribution of human plague cases in the West Nile region of Uganda. Am J Trop Med Hyg, 86: 514–523

Mann M E, Zhang Z, Rutherford S, Bradley R S, Hughes M K, Shindell D, Ammann C, Faluvegi G, Ni F. 2009. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. Science, 326: 1256–1260

McCarthy G D, Haigh I D, Hirschi J J M, Grist J P, Smeed D A. 2015. Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea-level observations. Nature, 521: 508–510

McMichael A J. 2012. Insights from past millennia into climatic impacts on human health and survival. Proc Natl Acad Sci, 109: 4730–4737

Mills J N, Gage K L, Khan A S. 2010. Potential influence of climate change on vector-borne and zoonotic diseases: A review and proposed research plan. Environ Health Perspect, 118: 1507–1514

Monaghan A J, MacMillan K, Moore S M, Mead P S, Hayden M H, Eisen R J. 2012. A regional climatography of West Nile, Uganda, to support human plague modeling. J Appl Meteorol Climatol, 51: 1201–1221

Moore S M, Monaghan A, Griffith K S, Apangu T, Mead P S, Eisen R J. 2012. Improvement of disease prediction and modeling through the use of meteorological ensembles: Human plague in Uganda. Plos ONE, 7: e44431

Ortega P, Lehner F, Swingedouw D, Masson-Delmotte V, Raible C C, Casado M, Yiou P. 2015. A model-tested North Atlantic Oscillation reconstruction for the past millennium. Nature, 523: 71–74

Ottersen G, Planque B, Belgrano A, Post E, Reid P C, Stenseth N C. 2001. Ecological effects of the North Atlantic oscillation. Oecologia, 128: 1–14

Parmenter R R, Yadav E P, Parmenter C A, Ettestad P, Gage K L. 1999. Incidence of plague associated with increased winter-spring precipitation in New Mexico. Am J Trop Med Hyg, 61: 814

Pei Q, Zhang D D, Lee H F, Li G. 2014. Climate change and macroeconomic cycles in pre-industrial Europe. Plos One, 9: e88155

Pei Q, Zhang D D, Li G, Winterhalder B, Lee H F. 2015. Epidemics in

Ming and Qing China: Impacts of changes of climate and economic well-being. Social Sci Med, 136-137: 73–80

Perry R D, Fetherston J D. 1997. Yersinia pestis-etiologic agent of plague. Clin Microbiol Rev, 10: 35–66

Pham H V, Dang D T, Tran Minh N N, Nguyen N D, Nguyen T V. 2009. Correlates of environmental factors and human plague: An ecological study in Vietnam. Int J Epidemiol, 38: 1634–1641

Rodwell M J, Rowell D P, Folland C K. 1999. Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. Nature, 398: 320–323

Schmid B V, Büntgen U, Easterday W R, Ginzler C, Walløe L, Bramanti B, Stenseth N C. 2015. Climate-driven introduction of the Black Death and successive plague reintroductions into Europe. Proc Natl Acad Sci USA, 112: 3020–3025

Stenseth N C, Samia N I, Viljugrein H, Kausrud K L, Begon M, Davis S, Leirs H, Dubyanskiy V M, Esper J, Ageyev V S, Klassovskiy N L, Pole S B, Chan K S. 2006. Plague dynamics are driven by climate variation. Proc Natl Acad Sci USA, 103: 13110–13115

Stenseth N C, Mysterud A, Ottersen G, Hurrell J W, Chan K S, Lima M. 2002. Ecological effects of climate fluctuations. Science, 297: 1292–1296

Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. Bull Amer Meteor Soc, 79: 61–78

van Loon H, Rogers J C. 1978. The seesaw in winter temperatures between Greenland and northern Europe. Part I: General description. Mon Weather Rev, 106: 296–310

Voigtländer N, Voth H. 2012. The three horsemen of riches: Plague, war, and urbanization in early modern Europe. Rev Econ Stud, rds034

Xu L, Liu Q Y, Stige L C, Ari T B, Fang X Y, Chan K S, Wang S C, Stenseth N C, Zhang Z. 2011. Nonlinear effect of climate on plague during the third pandemic in China. Proc Natl Acad Sci USA, 108: 10214–10219

Xu L, Stige L C, Kausrud K L, Ari T B, Wang S, Fang X, Schmid B V, Liu Q, Stenseth N C, Zhang Z. 2014. Wet climate and transportation routes accelerate spread of human plague. Proc R Soc B-Biol Sci, 281: 20133159–20133159

Yue R P H. 2017. Climate change, geographic factors and plague dynamic in pre-industrial Europe. Dissertation for Doctoral Degree. Hong Kong: The University of Hong Kong

Yue R P H, Lee H F. Accepted. Pre-industrial plague transmission is mediated by the synergistic effect of temperature and aridity index. BMC Infect Dis, accepted

Yue R P H, Lee H F, Wu C Y H. 2016. Navigable rivers facilitated the spread and recurrence of plague in pre-industrial Europe. Sci Rep, 6: 34867

Yue R P H, Lee H F, Wu C Y H. 2017. Trade routes and plague transmission in pre-industrial Europe. Sci Rep, 7: 12973

Zhang Z, Li Z, Tao Y, Chen M, Wen X, Xu L, Tian H, Stenseth N C. 2007. Relationship between increase rate of human plague in China and global climate index as revealed by cross-spectral and cross-wavelet analyses. Integr Zool, 2: 144–153

Zhang Z, Pech R, Davis S, Shi D, Wan X, Zhong W. 2003. Extrinsic and intrinsic factors determine the eruptive dynamics of Brandt's voles Microtus brandti in Inner Mongolia, China. Oikos, 100: 299–310