



中国古代疫病发生率与太阳活动相关分析

陈思^{1,2}, 魏勇^{1,2*}, 乐新安^{1,2}, 徐凯华^{1,2}, 李明锴^{3,4}, 林巍¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;
3. 中国科学院北京基因组研究所(国家生物信息中心), 北京 100101;
4. 中国科学院动物进化与遗传前沿交叉卓越创新中心, 昆明 650223

* 通讯作者, E-mail: weiy@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2022-03-22; 收修改稿日期: 2022-07-05; 接受日期: 2022-08-03; 网络版发表日期: 2022-12-19

中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA17010201)、国家自然科学基金项目(批准号: 41621004)和中国科学院地质与地球物理研究所重点研究计划项目(编号: IGGCAS-201904)资助

摘要 目前传染性极强的流行病在全球蔓延, 流行病对人类和生态系统产生了十分严重的影响. 太阳作为地球的主要能量来源, 之前也有科学家们试图寻找太阳活动指数与流行病发病率之间的显著关系. 文章将中国古代疫病数据与代表太阳活动的太阳黑子数进行了比较分析, 对比它们的周期性和趋势变化. 结果发现, 疫病数据与太阳活动变化在一定程度上变化一致, 尤其是在长周期部分(如 Gleissberg cycle 和 de Vries cycle). 小波相干性结果表明, 疫病指数与太阳黑子数具有高度相关性. 此外, 利用经验模态分解对疫病指数与太阳黑子数进行分析, 结果显示, 古代疫病低频分量和太阳黑子数的变化基本一致. 本研究对于进一步了解太阳活动对地球生物圈的潜在影响具有重要意义, 但其影响机制仍需要进一步探索.

关键词 疫病, 中国古代, 太阳活动, 谱分析

1 引言

地球系统的能量大部分来自太阳(Gray等, 2010; Kren等, 2017). 因此, 人们可能想知道: 地球生物圈的变化与太阳活动有关吗? 太阳活动与流行病之间的关系这一关乎人类命运的基本问题仍然是一个谜. 流行病是一种具有高度传染性和广泛传播性的疾病, 对人类社会的发展具有重大影响(Appleby, 1980; Zhang等, 2007; Pei等, 2015; Fei等, 2016). 历史上许多严重的流行病灾难性地摧毁了人类的文明甚至生命. 即使在现代社会, 尽管科学技术高度发达, 人类也未能阻止流

行病的侵袭, 例如2003年严重急性呼吸系统综合征(SARS). 人类与之抗争的病毒及其突变体将与我们永远共存(Fauci, 2006). 通过对历史记录进行统计并探索流行病的内在规律具有重要意义(Aalen等, 2008; Unkel等, 2012; Weihs和Ickstadt, 2018). 最近有研究从前两年的流行病病例数据集中发现了长度为四个月的周期(Mitchell和Zhang, 2022). 然而对流行病的长期内在规律性探索需要更多研究, 古代流行病记录恰好在古籍史书中有记载.

前人研究中也探讨过太阳活动与流行病之间的关系. Hope-Simpson(1978)首先提出太阳活动与流感之

中文引用格式: 陈思, 魏勇, 乐新安, 徐凯华, 李明锴, 林巍. 2023. 中国古代疫病发生率与太阳活动相关分析. 中国科学: 地球科学, 53(1): 167-174, doi: 10.1360/N072022-0081

英文引用格式: Chen S, Wei Y, Yue X, Xu K, Li M, Lin W. 2023. Correlation analysis between the occurrence of epidemic in ancient China and solar activity. Science China Earth Sciences, 66(1): 161-168, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-9986-5>

间存在联系, 并表明其中一种甲型流感与1919~1968年的太阳黑子周期同步变化. 这一观点得到Ing(1978)以及Hoyle和Wickramasinghe(1990)的支持: 有一种流感与太阳黑子高峰期有明显的相关性, 并认为可能与太阳黑子高峰年紫外线增加有关(Ing, 1978); 在强烈的太阳活动期间, 来自太阳风的粒子进入低层大气也可能是导致流行病的因素之一(Hoyle和Wickramasinghe, 1990). 最近, 科学家们还试图寻找流行病与太阳活动之间具有相关性的证据, 这些研究主要基于1700年以来的现代数据. Qu(2016)使用流行病学方法描述并分析流行病与太阳活动之间的关联, 发现太阳黑子活动高年和低年的 ± 1 年内可能会引发流行病发生; 随着更多流行病的出现, 提出建立空间天气监测器以进一步研究这种关联性(Qu和Wickramasinghe, 2020). Navia(2020)发现历史上的流行病发生时期与太阳极小期相吻合. 然而, 这些研究仅分析了百年尺度(数据分布在公元1700~2019年间, 约200~300年长度)的流行病学数据集和基于现代观测的太阳黑子数据. 这个时间跨度不足以研究流行病与太阳活动之间的千年尺度相关性变化. 太阳活动周期不仅表现在Schwabe周期尺度变化, 还表现在其他时间尺度变化, 特别是在太阳活动极小期间, 太阳活动周期的长度会发生变化(Usoskin等, 2007; Miyahara等, 2021). 为了在较长时间尺度上比较太阳活动与流行病发生率之间的关系, 较长时间尺度的数据是必不可少的. 在中国古代历史文明时期, 关于流行病的记载丰富且错综复杂. 张志斌(2007)汇编了过去2000年的流行病记录, 但这些数据还没有被广泛使用, 分析这些数据有助于我们构建现代人类医疗保健系统的一些准则.

流行病的爆发和传播是高度复杂的过程, 通过对长期历史记录的研究可以了解太阳活动是否在流行病的广泛发生中起作用. 本文使用张志斌(2007)编纂的公元0~1840年的中国古代疫病记录, 利用小波谱和经验模态分解的方法分析了流行病的发生与太阳黑子的周期性和长期趋势的相关性.

2 数据和方法

2.1 数据

疫病具有伤亡严重、传染性强、发病范围广的特点, 也称流行病. 在中国源远流长的历史中, 有丰富的

古代流行病记录. 张志斌(2007)发表了中国古代流行病的2500年年表(从公元前674年到公元1840年), 扩展了井村孝全(Imura, 1936)汇编的《中国疫病地方史记》. 张志斌(2007)预先过滤了小尺度人群水平的疾病, 以低比率排除小规模地方病, 同时保留具有流行病特征记录. 数据记录主要包括暴发年份、地区、疫病相关描述和记录来源. 本文对这些数据进行了过滤并重组, 得到了公元0~1840年疫病发生数目(年分辨率和十年分辨率).

本文对张志斌(2007)汇编的古代疫病数据与太阳黑子数进行比较分析. 从树轮中 ^{14}C 同位素数据可以反演得到十年平均太阳黑子数(Solanki等, 2004), 疫病指数是每十年疫病发生数目的总和. 图1显示了从公元0年到1840年的疫病指数和太阳黑子数的时间序列.

2.2 方法

为了研究疫病指数与太阳活动之间的关系, 应用了小波谱分析和小波相干(WTC)分析(Grinsted等, 2004). 小波谱分析方法将时间序列分解为时频空间, 并同时获得“周期性”信号的时变幅度(Torrence和Compo, 1998), WTC发现疫病指数和太阳黑子数在时频域上具有一致性.

为了比较小波谱信号中可能存在的分量的变化趋势, 在假设每个信号都可以分解为一组固有模式函数(IMF)的基础上, 使用集合经验模态分解(EEMD)方法对疫病指数和太阳黑子数进行分解(Wu和Huang, 2004; Huang和Wu, 2008), 第一个IMF是原始信号 $s(t)$.

EEMD算法的主要步骤如下(Huang和Wu, 2008):

- (1) 原始信号为 $s(t)$, 加入白噪声, 求 $s(t)$ 的最大值和最小值;
- (2) 使用三次样条插值将最大值和最小值拟合到上下包络中, 计算上下包络线的均值是 $m_i(t)$;
- (3) 计算IMFs, $h_i(t)=s(t)-m_i(t)$, IMF_{*i*}要满足两个条件, 即极值数和过零数等于或相差1, 上下包络的平均值为零;
- (4) 确定不再提取IMFs时的停止条件: 得到所有IMFs和趋势 $r_n(t)$: $s(t)=\text{IMF}(i)-r_n(t)$.

本文将小波谱和EEMD方法应用于疫病指数和太阳黑子数, 以探索流行病和太阳活动变化之间的关系.

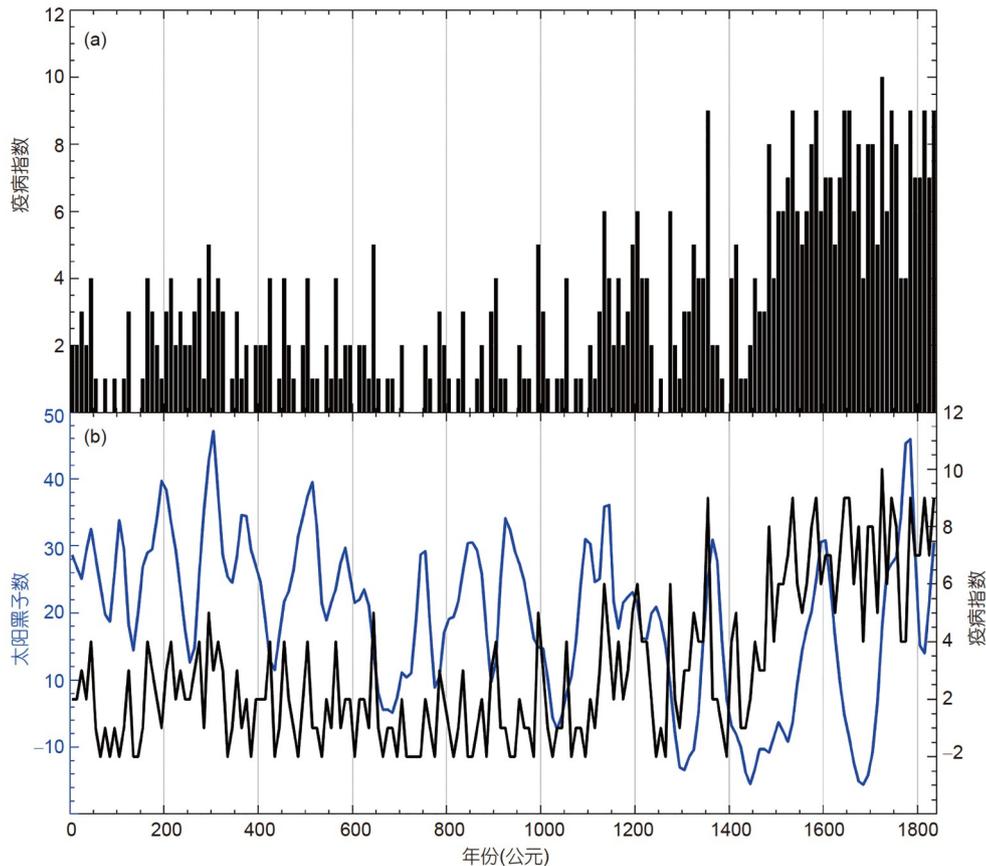


图1 公元0~1840年疫病指数(a)、太阳黑子数(蓝线)和疫病指数(黑线)对比(b)的时间序列

3 结果

从图1所示的太阳黑子数和疫病指数折线图可以看出,在公元1200~1600年期间,疫病指数的两次连续下降与相应的两次太阳黑子数下降相位吻合,对应于两个太阳极小期(Wolf极小期和Spörer极小期)。但是,它们之间相关性直观上并不明显。

为了获得更多关于疫病指数与太阳黑子数之间相关性的信息,本文使用小波谱分析对这些数据进行分析,以获得周期性变化谱图。此外,使用WTC方法分析疫病指数和太阳黑子数得到它们随时间变化的相关性。分析结果如图2所示。

在图2a中,疫病指数显示出明显的周期,有如下几种周期长度:40~55年,主要出现在公元550年之前,公元750~1150年间以及公元1250年之后;60~78年,主要出现在公元450~750年间;78~128年,主要出现在公元700~1100年间;60~85年,主要出现在公元1000~1500

年间;140~195年,主要出现在公元950年之后;270~360年的周期长期存在。太阳黑子数显示出的周期有:40~60年,主要出现在公元0~200年、公元750~1250年间和公元1735年之后;64~120年,主要出现在公元200~1500年间;90~150年周期长期存在;180~240年,主要出现在公元0~700年间和公元1000年以后;240~390年周期长期存在。如WTC结果所示,相对相位关系如箭头所示(同相向右,反相向左,太阳黑子数领先流行病指数 90° 直下)。如图2c所示,疫病指数和太阳黑子数在72~92、55~70、208~276、256~338年的周期尺度上大致同相位变化,而在74~128、34~64年的周期尺度上呈现反相位变化。小波分析结果表明,太阳活动和流行病在长周期和少数短周期中具有一致的变化。在图2中透明区域显示的是边缘效应,它是由于数据的不连续性引起的边缘值的小波功率下降到 e^{-2} 的区域。

为了研究太阳活动与流行病在长周期时间尺度上

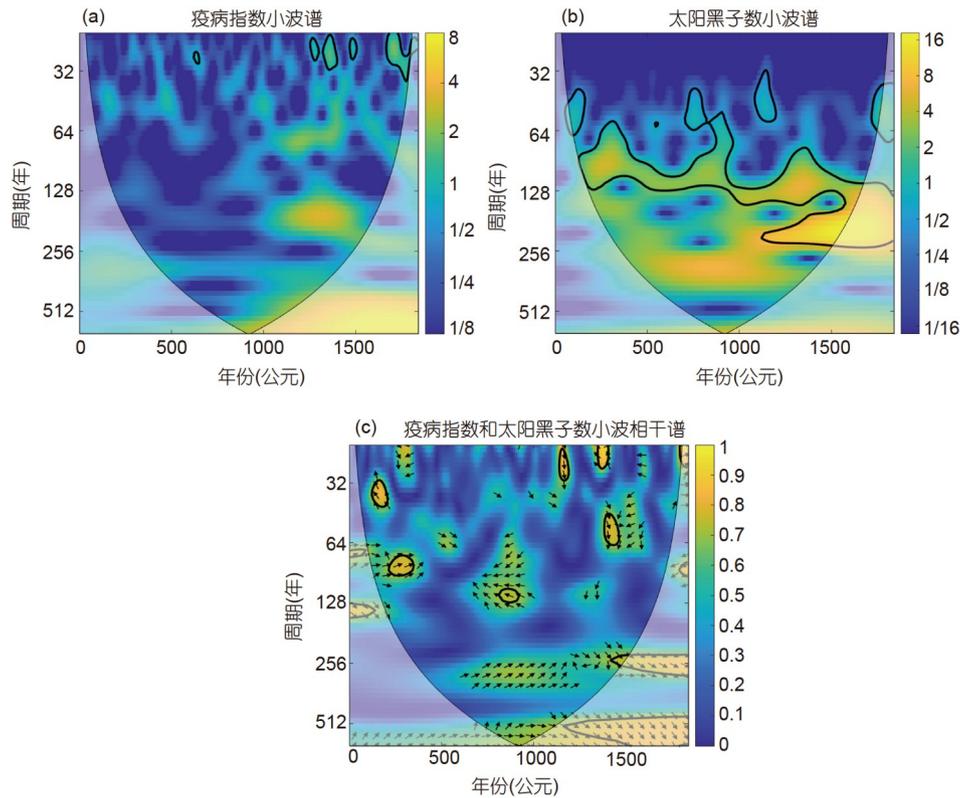


图 2 公元0~1840年疫病指数和太阳黑子数的小波谱和小波相干性(WTC)分析

(a) 古代疫病指数的小波谱; (b) 太阳黑子数的小波谱; (c) 疫病指数和太阳黑子数的WTC谱. WTC结果表示相对相位关系(向右表明同相位, 向左表明反相位). 黑色粗等高线表示红噪声的5%显著性水平

的相关性, 本文还使用了EEMD分析数据的长期准周期变化的分量. 用于EEMD分析的总数据量为 $N=184$, 白噪声设置为0.2, IMF总个数为 $N_{IMFs}=\log_2 N=7$, 分解后得到分量位原始数据和6个分解分量, 以及趋势曲线. 为了研究流行病与太阳活动之间的长期变化关系, EEMD中的高频分量并没有被考虑在内, 比较了太阳黑子数和疫病指数的3~6个分量(如图3所示). IMF6显示疫病指数和太阳黑子数呈正相关. IMF5显示疫病指数和太阳黑子数量的在相位变化大致相同. IMF4的变化是阶段性的, 在公元1400年之前, 疫病指数和太阳黑子数呈同相位变化; 公元1400年以后, 疫病指数与太阳黑子数呈负相位变化. IMF3显示疫病指数和太阳黑子数在公元350~700年间和公元1400~1840年间呈负相关, 而在其他时间几乎呈正相关. 显著性检验(如图3b和3c)结果显示, 基本上每个IMF都在 3σ 的置信区间内, 且大部分都在90%的置信水平之上. 对于置信水平较低的IMF, 可能是受其他因素的影响. 从EEMD结果可

以大致看出, 它们与WTC结果是一致的. 从IMF2可以看出, 在公元400年之前和公元500~600年的相变比较一致, 公元600~1050年和公元1350~1650年的相变大致相反; 从IMF3中可以看出, 公元350~700年和1400年之后有一个反相位变化.

4 讨论

从周期性变化的结果可以看出, 疫病指数周期变化与太阳黑子数周期变化具有一致性, 尤其是在长期周期中疫病指数与太阳黑子数据变化一致. 太阳黑子数的周期变化反映了Suess/de Vries太阳周期(Suess, 1980; Steinhilber等, 2012)和Gleissberg太阳黑子周期(Sonett和Finney, 1990; Hathaway, 2010), 其周期分别约为210年(Wagner等, 2001; Braun等, 2005; Ma和Vaquero, 2009; Ma和Vaquero, 2020)和88年(Braun等, 2005). 根据周期变化和趋势分析, 疫病指数与太阳活

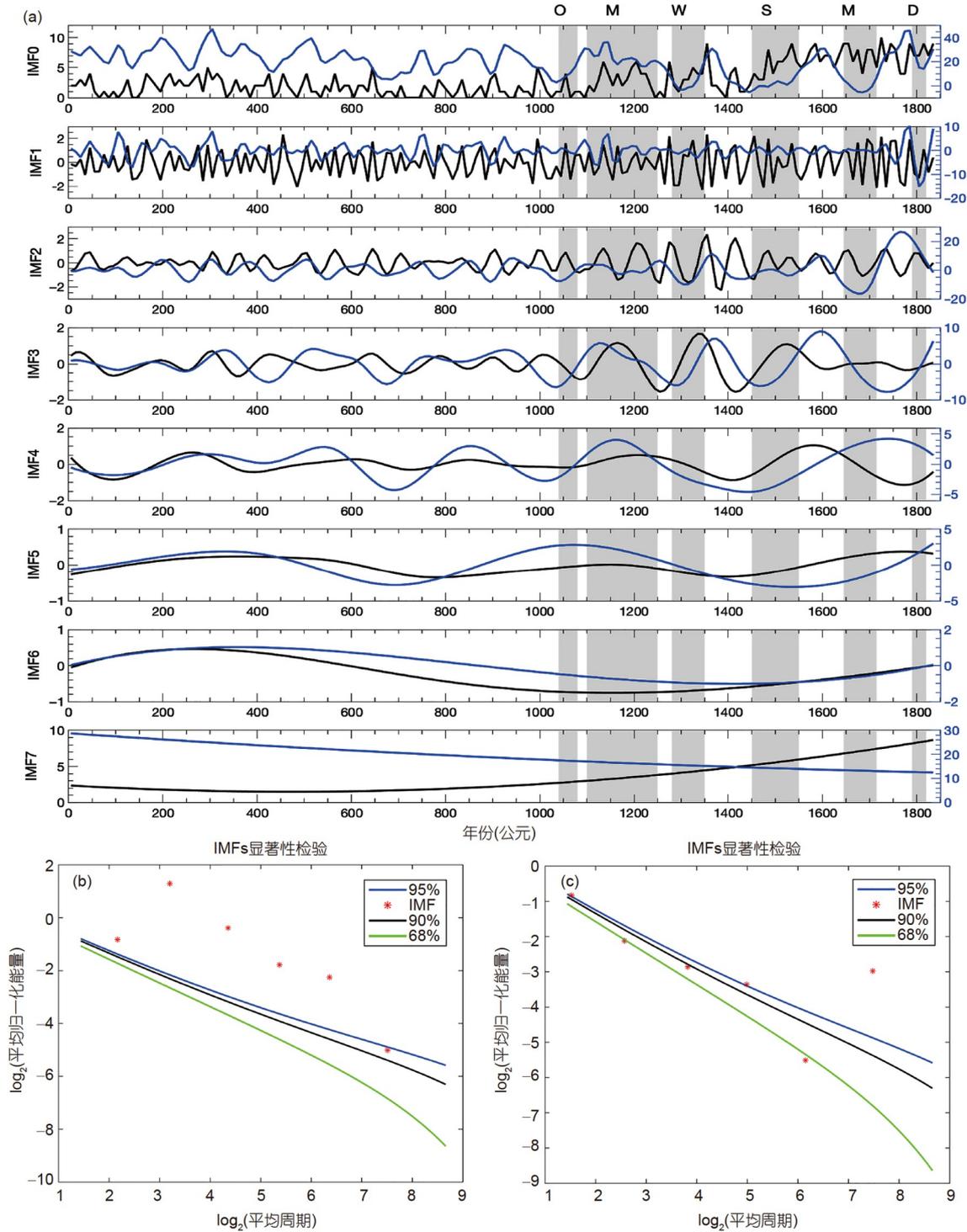


图3 公元0~1840年期间疫病指数和太阳黑子数EMD分解时间序列与显著性检验

(a) 公元0~1840年疫病流行指数(黑线)和太阳黑子数(蓝线)数据集的EMD分解时间序列. 灰色阴影是太阳活动的最大值和最小值, O、M、W、S、M、D从左到右分别代表Oort极小期、Medieval极大期、Wolf极小期、Sporer极小期、Maunder极小期和Dalton极小期. (b) 公元0~1840年太阳黑子数EMD分解的显著性检验. (c) 公元0~1840年疫病指数EMD分解的显著性检验. 红点对应IMF, 蓝线、黑线和绿线分别对应95%、90%和68%置信水平

动变化的周期相似,但在某些周期存在相位偏差。IMF6的周期可能对应于由太阳惯性运动驱动的Hallstatt cycle(约2000~2400年)(Charvátová, 2000; Usoskin等, 2016)。太阳极大期和极小期分别倾向于在Hallstatt cycle的最大值和最小值处聚集。IMF5与Millennial Eddy cycle有关,太阳活动周期约为600~700年或1000~1200年(Vitinsky等, 1986; Steinhilber等, 2012)。IMF4的变化周期与Suess/de Vries周期相当,周期约为210年(Suess, 1980; Vasiliev和Dergachev, 2002),这表明每个周期分量中都出现了太阳极小期(Usoskin等, 2007)。公元1500年前后相关相位交替的一个原因可能是地球对太阳活动的响应可能随Hallstatt cycle的相位而变化。公元1500~1840年期间位于Hallstatt cycle的最小值之内。IMF3疫病指数和太阳黑子数量之间的正相关性似乎在Millennial Eddy cycle(IMF5)的不同阶段发生变化。而IMF3的疫病指数和太阳黑子数量的负相关通常发生在Millennial Eddy cycle(IMF5)的最小值附近。

太阳活动对疫病的影响可能是多样的,是全球和区域影响叠加的结果。在太阳活动的不同阶段,太阳本身的变化并不是一成不变的,其与流行病的关系可能发生变化,这可能是太阳和地球共同造成的。为了全面了解太阳活动对地球及其生物圈的影响,需要更长期的调查和历史数据。流行病爆发的变化也可能受到宏观社会转型的附加影响。例如,隋唐以后,交通技术的逐步发展和地理环境的变化(章典等, 2004)受到诸多因素的影响,并夹杂着战争和其他社会政治因素(Zhang和Zhang, 2019; Zhang等, 2010),使得生物圈环境更加复杂。因此,对流行病学进行更深入的研究,需要更多的交叉学科来寻找内在机制。

作为地球的主要能量来源,太阳对地球的生物圈有很多影响(Raman, 2011)。历史流行病的长期连续记录只在古代中国存在,而在其他古代文明中则没有连续长期的记载。应用历史古籍记录可能存在一些不确定的局限性,如不完整的数据记录。然而,这是代表长期流行病学变化的唯一有价值的信息,是研究流行病长期历史变迁的重要依据。事实上,大量研究已经发现流行病和气候之间的关系(Stige等, 2007; Zhang等, 2007; Xu等, 2011, 2014),并发现气候是驱动流行病的重要因素之一。太阳的极端变化将影响地球的生物圈,这可能会导致流行病与太阳活动同相位或反相位变

化。太阳对地磁场有特定的影响(Akasofu, 2011),这可能与流行病的发生相关联(Zaporozhan和Ponomarenko, 2010)。太阳与疫病可能有直接关系,也可能有间接关系。这是一个复杂且混沌的系统。可能是强太阳活动和强紫外线以及进入低层大气的粒子导致病毒突变(Hoyle和Wickramasinghe, 1990),在这种情况下,太阳活动与疫病正相关。此外,太阳活动影响宇宙射线的变化也可能引起流行病(Qu, 2016),当太阳活动处于平静期,宇宙线增强,可能导致太阳活动和流行病处于反相位变化。在太阳活动变化期间,太阳紫外线辐射与人体维生素D水平有关,维生素D水平又与流感密切相关(Hayes, 2010),太阳活动对流行病的间接影响可能是正相关也可能是负相关。也有推测认为,病毒突变是由地球上光涡区的场效应和太阳活动极端变化期间场效应放大引起的,在太阳活动极端变化期间,病毒可能发生变异或产生新病毒(Nasirpour等, 2021; Ragulskaya, 2021),太阳活动极端变化期间,流行病会受到影响,与太阳活动呈正相关或负相关。这是一个需要进一步探索的多学科交叉融合的重要问题。在研究太阳活动如何影响流行病的发生的问题时,长期的历史数据是必不可少的。中国古代丰富的历史文献资源为流行病学的研究提供了极好的契机,但仍需要更详细和深入的跨学科交叉研究来了解其潜在机制。

5 总结

本研究使用历史书籍中的长期流行病数据来分析其与太阳活动的关系。结果表明,疫病指数和太阳黑子数具有相似的周期性变化;在低频信号中,趋势变化的一致性也很明显。当然,影响流行病的因素可能是多样且复杂的,未来还需要更多的跨学科研究。这项研究促进了对流行病长期变化的研究。为今后寻找流行病与太阳活动变化的关系以及流行病长期变化的机制提供契机,为人类提供流行病预警特征提供了参考。

致谢 本文使用的古代疫病数据资料来自张志斌的《中国古代疫病流行年表》,太阳黑子数来自Solanki等由同位素重建获得的11000年太阳黑子数,这些数据为本研究提供了数据支持。匿名审稿人及责编委给出详尽的审

阅与建议, 张金海、何飞、闫丽梅给予了宝贵建议, 在此一并感谢.

参考文献

- 章典, 詹志勇, 林初升, 何元庆, 李峰. 2004. 气候变化与中国的战争、社会动乱和朝代变迁. *科学通报*, 49: 2468–2474
- 张志斌. 2007. 中国古代疫病流行年表. 福州: 福建科学技术出版社
- Aalen O O, Borgan O, Gjessing H K. 2008. *Survival and Event History Analysis: A Process Point of View*. New York: Springer Science and Business Media
- Akasofu S I. 2011. A historical review of the geomagnetic storm-producing plasma flows from the sun. *Space Sci Rev*, 164: 85–132
- Appleby A B. 1980. Epidemics and famine in the little ice age. *J Interdiscipl Hist*, 10: 643
- Braun H, Christl M, Rahmstorf S, Ganopolski A, Mangini A, Kubatzki C, Roth K, Kromer B. 2005. Possible solar origin of the 1,470-year glacial climate cycle demonstrated in a coupled model. *Nature*, 438: 208–211
- Charvátová I. 2000. Can origin of the 2400-year cycle of solar activity be caused by solar inertial motion? *Ann Geophys*, 18: 399–405
- Fauci A S. 2006. Emerging and re-emerging infectious diseases: Influenza as a prototype of the host-pathogen balancing act. *Cell*, 124: 665–670
- Fei J, Zhang D D, Lee H F. 2016. 1600 AD Huaynaputina eruption (Peru), abrupt cooling, and epidemics in China and Korea. *Adv Meteor*, 2016: 1–12
- Gray L J, Beer J, Geller M, Haigh J D, Lockwood M, Matthes K, Cubasch U, Fleitmann D, Harrison G, Hood L, Luterbacher J, Meehl G A, Shindell D, van Geel B, White W. 2010. Solar influences on climate. *Rev Geophys*, 48: RG4001
- Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Proc Geophys*, 11: 561–566
- Hathaway D H. 2010. The solar cycle. *Living Rev Sol Phys*, 7: 1
- Hayes D P. 2010. Influenza pandemics, solar activity cycles, and vitamin D. *Med Hypotheses*, 74: 831–834
- Hope-Simpson R E. 1978. Sunspots and flu: A correlation. *Nature*, 275: 86
- Hoyle F, Wickramasinghe N C. 1990. Sunspots and influenza. *Nature*, 343: 304
- Huang N E, Wu Z. 2008. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Rev Geophys*, 46: RG2006
- Ing R. 1978. Solar activity and influenza. *Nature*, 276: 556
- Imura K. 1936. Brief investigation into Chinese epidemics recorded in local histories (in Japanese). *New Period Medical Matters*, 1232: 263–274
- Kren A C, Pilewskie P, Coddington O. 2017. Where does Earth's atmosphere get its energy? *J Space Weather Space Clim*, 7: A10
- Ma L, Vaquero J M. 2020. New evidence of the Suess/de Vries cycle existing in historical naked-eye observations of sunspots. *Open Astron*, 29: 28–31
- Ma L, Vaquero J M. 2009. Is the Suess cycle present in historical naked-eye observations of sunspots? *New Astron*, 14: 307–310
- Mitchell R N, Zhang J. 2022. Four-month intrinsic viral cycle in COVID-19. *Innovation*, 3: 100196
- Miyahara H, Tokanai F, Moriya T, Takeyama M, Sakurai H, Horiuchi K, Hotta H. 2021. Gradual onset of the maunder minimum revealed by high-precision carbon-14 analyses. *Sci Rep*, 11: 5482
- Nasirpour M H, Sharifi A, Ahmadi M, Jafarzadeh Ghouschi S. 2021. Revealing the relationship between solar activity and COVID-19 and forecasting of possible future viruses using multi-step autoregression (MSAR). *Environ Sci Pollut Res*, 28: 38074–38084
- Navia C E. 2020. On the occurrence of historical pandemics during the grand solar minima. *Eur J Appl Phys*, 2: 1–8
- 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. *Soc Sci Med*, 136–137: 73–80
- Qu J. 2016. Is sunspot activity a factor in influenza pandemics? *Rev Med Virol*, 26: 309–313
- Qu J, Wickramasinghe N C. 2020. The world should establish an early warning system for new viral infectious diseases by space-weather monitoring. *MedComm*, 1: 423–426
- Ragulskaya M. 2021. Solar activity and COVID-19 pandemic. *Open Astron*, 30: 149–158
- Raman K S. 2011. Space weather—Sun Earth relations. *Int J Astron Astrophys*, 1: 10–14
- Solanki S K, Usoskin I G, Kromer B, Schüssler M, Beer J. 2004. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 431: 1084–1087
- Sonett C P, Finney S A. 1990. The spectrum of radiocarbon. *Phil Trans R Soc Lond A*, 330: 413–426
- Steinhilber F, Abreu J A, Beer J, Brunner I, Christl M, Fischer H, Heikkilä U, Kubik P W, Mann M, McCracken K G, Miller H, Miyahara H, Oerter H, Wilhelmis F. 2012. 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: 5967–5971
- Stige L C, Chan K S, Zhang Z, Frank D, Stenseth N C. 2007. Thousand-year-long Chinese time series reveals climatic forcing of decadal locust dynamics. *Proc Natl Acad Sci USA*, 104: 16188–16193

- Suess H E. 1980. The radiocarbon record in tree rings of the last 8000 years. *Radiocarbon*, 22: 200–209
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 79: 61–78
- Unkel S, Farrington C P, Garthwaite P H, Robertson C, Andrews N. 2012. Statistical methods for the prospective detection of infectious disease outbreaks: A review. *J R Statist Soc-Ser-Stat Soc*, 175: 49–82
- Usoskin I G, Solanki S K, Kovaltsov G A. 2007. Grand minima and maxima of solar activity: New observational constraints. *Astron Astrophys*, 471: 301–309
- Usoskin I G, Gallet Y, Lopes F, Kovaltsov G A, Hulot G. 2016. Solar activity during the Holocene: The Hallstatt cycle and its consequence for grand minima and maxima. *Astron Astrophys*, 587: A150
- Vasiliev S S, Dergachev V A. 2002. The ~2400-year cycle in atmospheric radiocarbon concentration: Bispectrum of ^{14}C data over the last 8000 years. *Ann Geophys*, 20: 115–120
- Vitinsky Y I, Kopecky M, Kuklin G V. 1986. Statistics of sunspot activity. Nauka, Moscow
- Wagner G, Beer J, Masarik J, Muscheler R, Kubik P W, Mende W, Laj C, Raisbeck G M, Yiou F. 2001. Presence of the Solar de Vries Cycle (~205 years) during the Last Ice Age. *Geophys Res Lett*, 28: 303–306
- Weihs C, Ickstadt K. 2018. Data Science: The impact of statistics. *Int J Data Sci Anal*, 6: 189–194
- Wu Z, Huang N E. 2004. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method. *Proc R Soc Lond A*, 460: 1597–1611
- Xu L, Liu Q, Stige L C, Ben Ari T, Fang X, Chan K S, Wang S, 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, Ben Ari T, 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*, 281: 20133159
- Zaporozhan V, Ponomarenko A. 2010. Mechanisms of geomagnetic field influence on gene expression using influenza as a model system: Basics of physical epidemiology. *Int J Environ Res Public Health*, 7: 938–965
- 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 S, Zhang D D. 2019. Population-influenced spatiotemporal pattern of natural disaster and social crisis in China, AD 1–1910. *Sci China Earth Sci*, 62: 1138–1150
- Zhang Z, Tian H, Cazelles B, Kausrud K L, Bräuning A, Guo F, Stenseth N C. 2010. Periodic climate cooling enhanced natural disasters and wars in China during AD 10–1900. *Proc R Soc B*, 277: 3745–3753

(责任编辑: 傅绥燕)