

周期性气候变化与人类适应

吕厚远^{1,2,3}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境院重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院地球科学研究所, 北京 100029; 3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 101408

摘要: 从古至今, 气候变化特别是周期性气候变化, 一直深刻影响着人类社会的变革和发展, 从旧石器时代人类起源迁移、新石器时代文化文明演变、历史时期王朝兴衰更替, 到工业化以来社会经济发展动荡等, 无不留下周期性气候变化影响的烙印。本文依据近年来古气候、古人类、环境考古等研究的新证据、新进展, 从周期性气候变化的角度审视人类社会各个发展阶段、关键节点的气候特征; 通过典型案例, 介绍和分析旧石器、新石器、历史时期不同时空尺度周期性气候变化和人类活动之间复杂的相互作用关系, 讨论自然科学和人文社会科学对气候变化与人类活动关系认识的异同, 阐述在学科交叉背景下研究气候与人类活动关系的新范式。

关键词: 气候变化; 周期性; 人类活动; 文化演替; 学科交叉; 人地关系

Periodic climate change and human adaptation

LYU Houyuan^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 2. Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408

Abstract: Since ancient times, climate change, especially periodic oscillation, has profoundly affected the transformation and development of human society. Periodic climate change left its imprints in the origins and migration of humans in the Paleolithic Age, the evolution of culture and civilization in the Neolithic Age, the rise and fall of dynasties in historical periods, the socio-economic turmoils in the era of industrialization, and all other anthropological issues. On the basis of new evidence and progresses in paleoclimatology, paleoanthropology, and environmental archaeology in recent years, this paper examines climatic characteristics at various development stages and key nodes of human society from the perspective of periodic climate change. Using typical study cases, it introduces and analyzes the complex interaction between periodic climate change and human activities at different temporal and spatial scales in the Paleolithic, Neolithic

收稿日期: 2022-04-06; 定稿日期: 2022-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41830322; T2192950)

作者简介: 吕厚远, 研究员, 主要从事第四纪地质和环境考古研究。Email: houyuanlu@mail.iggcas.ac.cn

Citation: Lyu HY. Periodic climate change and human adaptation[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2022, 41(4): 731-748

and historical periods, involving the link of periodic climate change to human evolution and migration during the Paleolithic Age, the association of periodic climate change with cultural succession as well as the origin and development of agriculture during the Neolithic Age, complex relationship between periodic climate change and human activities since the historical period, and new viewpoints on the mechanisms of periodic climate change and human social adaptability; it also discusses the similarities and differences between natural and social sciences in understanding the mechanisms underlying the relationship of climate change to human activities, and expounds a new paradigm to study of the relationship between climate change and human activities under the background of interdisciplinary research.

This new research paradigm involves progresses and breakthroughs in theories, methods, technologies, and applications of climate change and social-cultural development. The following aspects thus must be considered in future studies: 1) transforming the traditional and scattered evidence of qualitative description into continuous temporal-spatial sequences of quantitative parameters (e.g., rate of change, speed, amplitude, threshold) and, and taking into account the multi-source, multi-scale, high-dimensional and complex spatio-temporal dependence of data; 2) merging the case study into the statistical test of big data, and distinguishing the climate-culture phenomena and nodes associated with periodic changes and event superpositions at different time scales through statistical methods such as Bayesian probability and probability inference; 3) carrying out systematical studies on the representative signs of cultures and their quantitative methods in different scenes of history and prehistoric periods, and establishing linear-nonlinear relationships models among human activities, cultural changes, and variations of temperature, precipitation and ecological environment; and 4) having a clear understanding that the studies of paleoclimate changes are providing evidence of multi-layered interaction for the study of earth system science together with the studies of archaeological culture instead of just serving for interpreting past human activities.

Keywords: climate change; periodically; human activities; cultural succession; Interdisciplinarity; human-environment interaction

1 前言

目前, 气候变化可能正以超过历史记录的速度推动着环境生态的变化或转型, 这无疑是对现代社会政治、经济发展的严峻挑战^[1-3]。过去数百万年以来, 人类就曾屡次面对过类似的遭遇, 经历了从依附自然、利用自然、到试图与自然和谐发展的历程, 塑造了今天的文明^[4-8]。现今全球气候变化与人类社会发展的格局, 是在气候长期演变背景下形成的。地球气候经历了构造尺度(10~1 Ma)、轨道尺度(100~10 ka)、短时间尺度(1000~100 a)

和超短时间尺度（年代际 - 季节性）等不同时间尺度的变化^[9]，在不同时间尺度上，气候变化与人类活动的关系有不同的特征和模式。要客观认识现今人地关系的规律和趋势，有必要回顾过去不同时间尺度气候变化背景下人类社会适应发展的历史。

过去一个世纪以来，有关人类起源、农业起源、文明起源、社会发展与气候环境变化关系的研究，不仅涉及到自然科学领域的自然选择、协同演化等生物学重大理论性问题^[10-12]，而且也涉及到社会科学领域的环境决定论、文化决定论等与意识形态有关的重大理论性问题^[13,14]。随着多学科交叉研究深入、新证据的积累和新方法的应用，逐渐深化对人地关系机制的理解。

总结近年来相关研究案例，从研究方法上来看，开始通过古气候参数定量重建^[15-18]、量化人类活动（文化）指标，推进了气候变化与文化演替因果关系的判别研究^[19-21]；通过探索多学科交叉研究范式，建立了人类活动 - 环境变化适应性循环研究新方向^[22,23]。从研究证据上来说，大致分为 3 个方面：1) 灾变性气候事件与人类文化演替的关系，例如洪水、干旱、地震、火山事件等对人类社会活动产生的重大影响^[24-27]；2) 周期性气候变化与人类文化演替的关系，例如认为十年 - 百年际时间尺度的周期性气候振荡，可能对游牧迁徙、人口变动、战争频率、王朝更替等人类社会的发展进程有深远影响^[22,29-32]；3) 人类社会对气候变化的弹性适应（social resilience），涉及到考古学文化对气候事件或周期性胁迫的敏感程度和阈值研究等^[23,33-36]。

其中，周期性气候变化与人类活动关系研究，由于其在证据方面具有一定程度的可重复性，在时间尺度方面具有多样性，在发展趋势方面具有可预报、预警性，从而得到越来越多的关注。本文试图根据国内外部分周期性气候变化与人类活动关系研究案例，特别是近年来中国学者开展的相关工作进展，探寻旧、新石器以及历史时期以来，人类是如何在适应大幅度周期性气候变化过程中壮大了种族、发明了农业、繁荣了文化、发展了文明的，以及如何在利用自然、改造自然的过程中和谐发展的，以期探索不同时间尺度周期性气候变化与人类活动相互作用的规律和可能机制。

2 旧石器时代 周期性气候变化与人类活动

进入新生代以来，大约从距今 65 Ma 开始，地球气候进入了变冷的模式，温度逐渐下降，先后经历了 3 个不同的宏观场景，分别是两极无冰、到单极（南极）有冰、到今天两极有冰的冰室地球^[9,37]。广义上的人类（Hominina，人亚族，灵长目中习惯性两足直立行走的种类）起源的时间，大致发生在从单极有冰向两极有冰的过渡时期（距今 7-5 Ma）^[38,39]；直立人走出非洲的时间，发生在两极有冰以后，在大约距今 2 Ma 前后走出非洲走向欧亚大陆^[40,41]。

在上述过程中，有两个关于人类发展与周期性气候变化有关的问题受到关注：1) 周期性气候变化与古人类演化；2) 周期性气候变化与人类迁移。

2.1 旧石器时代：周期性气候变化与古人类演化

在人类演化的过程中，先后出现了多个古人类成员，从早期的托麦人（Toumai, 距今

7-6 Ma)、仟僂人、地猿始祖种,到多种纤巧(细)型南方古猿、粗壮型南方古猿、能人、直立人和现代人的演化^[42],在这期间气候变化过程有两个特点:1)随着时间的推移,气候温度整体下降;2)随着温度整体下降,周期性(轨道尺度)气候变化幅度频率出现阶段性变化^[38]。早期人类演化与气候变化关系显示,一些早期人类重要成员的出现、绝灭和扩散,与高频率的气候波动周期相吻合^[43,44]。

Potts 根据尼罗河流域沉积记录变化序列,识别出在非洲东部距今 5 Ma 以来气候经历了 32 个气候干与湿的高频率波动期(High climate variability, H1~H32)和 31 个相对稳定期^[45]。其中有 8 个高频率波动期持续时间较长($t > 192$ ka),由新到老分别为 H2、H9、H14、H17、H18、H19、H30 和 H31^[43]。研究显示,早期人类重要成员的出现、绝灭、扩散的时间与这 8 个高频率气候波动期的时间节点相吻合。例如, H14 期(约距今 1.9-1.7 Ma),直立人(*Homo erectus*) 在非洲出现,脑容量扩大,走出非洲; H2 期(约距今 358-50 ka),智人(*Homo sapiens sapiens*) 在东非出现,并快速扩散至欧亚大陆^[43,46]。

越来越多的证据揭示,气候周期性高频波动期有可能是早期人类成员演替的关键期,类似生物有机体应对气候环境波动的适应方式,通过基因适应自然选择,倾向于一种等位基因或基因变体,帮助有机体适应快速高频的环境变化^[47]。气候周期性波动频率、幅度变化,明显受地球轨道偏心率 and 岁差周期的控制,偏心率大,岁差变化强烈,可以形成气候周期性高频波动期^[45,48],也是新人类成员出现、种类演替的关键时期。

我国泥河湾地区有连续的第四纪黄土-湖泊高分辨率周期性气候记录和丰富的古人类活动遗存,有希望在周期性气候变化与古人类适应等方面获得新证据和新认识^[49,50]。

随着气候变化,人类祖先逐渐增强了他们应对栖息地变化的能力,而不是专注于单一类型的环境。扩大适应性、多样性的程度,选择新的栖息地,对任何生物世系的延续都是重要的,人类也不例外。

2.2 旧石器时代:周期性气候变化与古人类迁移

距今约 2 Ma 以来,地球在逐渐变冷的过程中,气候变化经历了 30 多次冰期-间冰期旋回,温度变化幅度快速增加,从早期的 2-3°C 的变化,到中更新世革命(MPR, mid-Pleistocene revolution, 约 900 ka BP)以后,逐渐达到 8-10°C 以上的变化;气候变化周期也发生了从 40 ka 向 100 ka 主控周期的转变^[38,51]。在这个期间,人类多次走出非洲、向外迁移,有关迁移的过程、方向、动力以及是否与周期性气候变化有关,一直是研究的热点。

一种观点认为“气候变化温暖期,温暖的气候引导人类多次走出非洲”^[52]。非洲古人类向欧亚迁徙需要应对沙漠、季节性加大、冬季寒冷等挑战,超长间冰期可能为古人类大规模持续北迁提供适宜的气候环境条件,例如,中更新世 MIS 15-13 (MIS, marine isotope stages, 深海氧同位素 15-13 阶段, 600-500 kaBP 前后)阶段是北半球整体温暖的超级间冰期,非洲沙漠区消退,与阿舍利手斧从非洲向欧亚地区大规模传播以及人类遗传学证据指示的人类扩张时间是一致的^[53,54]。温暖气候为人类适应北半球高纬度环境提供了机遇。

也有观点认为,气候寒冷期也是促使人类向外迁徙的重要时期。Timmermann 等认为在寒冷的末次冰期人类多次走出非洲。他以过去 125 ka 气候与海平面变化为背景,建立了智人扩散模型,模拟结果和考古证据表明,在距今 106-29 ka 期间,现代人类曾经 4 次

横跨阿拉伯半岛走出非洲（106-94 kaBP、89-73 kaBP、59-47 kaBP 和 45-29 kaBP）；而且在每次走出之前，非洲都遭受过长时间的旱灾，揭示了短时间尺度气候变化在人类迁徙过程中也发挥了重要的驱动作用^[55]。

气候温暖期和寒冷期的环境格局是不同的，在寒冷的末次盛冰期（LGM, Last Glacial Maximum, 22-18 kaBP），全球海平面下降 120-130 m，广泛出露的海岸带有可能方便了人类的迁移^[56]，海岸带分布的地理位置，有可能影响了人类迁移方向。是否存在寒冷冰期人类沿海岸带从非洲大陆大概率向东南亚 - 澳大利亚迁移、温暖期更方便人类向北 - 地中海 - 欧洲大陆移动的可能性？这还需要更多环境考古的证据去验证。

3 新石器时代 周期性气候变化与文化演替

末次冰消期到全新世转暖过程中，人类社会经历了从渔猎采集、作物驯化到农业社会的重大转折，尽管全新世期间周期性气候波动的幅度相对末次冰期期间要小很多，但周期性气候变化与新石器文化文明演替、农业起源关系的证据和研究案例更为丰富。

3.1 新石器时代：周期性气候变化与文化演替

有关新石器以来文化演替、文明起源的驱动机制，一直是科学界关注和争议的问题^[8,57,58]。人文社科领域的学者多认为，主要是由内部社会发展驱动的；自然科学领域的学者多认为，主要是外部环境变化驱动的^[29,32,59-61]。近年来，越来越多的学者认识到文化演替、文明起源的驱动机制是复杂的^[1,62]。气候变化与文化事件研究的证据和方法，经历了从简单的定性对比，到对具有准确定年的、量化的高分辨率气候参数（温度、降水等）与文化强度（人口等）变化序列的统计分析。

3.1.1 定性对比分析

依据逐渐积累的国内外考古学证据和古气候研究的成果对比，初步揭示出新石器时代短时间尺度周期性气候变化与文化演替的大致关系。Hinsch 较早根据气候 - 农业 - 文化关系的逻辑论述了中国新石器 - 历史时期，社会文化以农为本，在气候变化面前格外脆弱；从新石器时代至清朝，气候温暖期与寒冷期周期性变化的过程，对应了农耕文明与游牧文明较量与整合的过程。在温暖期，中国经济繁荣，民族统一，国家昌盛；在寒冷期，经济衰退，游牧民族南侵，多农民起义，国家分裂，经济文化中心南移等^[63]。

针对北温带草原地区，吕厚远通过对新石器以来气候变迁与北温带草原文化关系的对比分析，揭示出 10 kaBP 以来存在约 500-800 a 的气候变化周期，在气候寒冷期，对应了北方游牧民族的南移。认为“如果新石器以来气温的升降幅度按 2-4℃ 计算，气温等值线在纬度上的迁移幅度应达 3-6 度，如果这种气候变化导致的水热条件的变化在 200-300 a 期间能够完成草原植被的演替及草原的迁移，那么草原带的迁移幅度至少 300-500 km；随着在大约在 2.8 kaBP、4.2 kaBP、5.5 kaBP、6.9 kaBP、8.2 kaBP 前后气候出现显著的降温，从东亚到西亚的草原文化，也随之向南扩展”^[30]。由于全球变化的同步性，从东亚到西亚草原文化，向南扩展也呈现同时性，人类历史发展的重要界限对应了显著的气候变化的节点^[30]。

在中原文化区,韩建业认为新石器时代的中原文化的实力、内部统一性和对外文化关系,呈现出 2000 a 左右的周期性变化,表面上看只是中原文化自身发展的韵律,深层次上是裴李岗文化、仰韶文化、龙山文化繁盛期分别对应了 3 次气候温暖期,受气候变化的影响非常明显^[64]。在这种周期性的变化过程中,中原文化得以呈螺旋式发展壮大,“中国相互作用文化圈”的范围由小到大、内部联系日趋密切、认同感日益加强,具有历史意义的“早期中国”从酝酿至雏形到最终形成。

在北美大陆,Munoz 等研究了涵盖缅因州到宾夕法尼亚州的 500 余个考古地点的证据,包含 1887 份 14 kaBP 以来的 ¹⁴C 数据、63 个剖面花粉记录等气候和文化的数据库。分析发现,在 11.6 kaBP、8.2 kaBP、5.4 kaBP 和 3.0 kaBP 几乎所有文化演替的时间,都恰好发生在生态环境快速变化的时期^[61]。

在印度季风区,同样存在千年尺度周期性气候变化与文化演替的关系。Rawat 等根据喜马拉雅南坡贝德尼昆湖(Bednikund lake)沉积记录的高分辨率气候序列,揭示出印度河流域哈拉帕文明(5.2-3.3 kaBP)和吠陀文明(3.4-2.4 kaBP)的演替与周期性印度季风变化有关,在印度季风增强、降水增加期间,文明建立并繁荣,印度季风减弱期则对应着文明的崩溃^[65]。

上述研究工作表明,不同区域短尺度周期性气候变化与文化演替存在密切联系,但是这种联系在不同区域之间是如何对应的,如何检验这些关系的可靠性?如何获得精确定年的、高分辨率气候重建记录和人类活动-文化变迁的定量指标,是影响深入研究气候变化与人类活动关系的关键所在。

3.1.2 定量统计分析

最近,来自中国东北龙岗小龙湾玛珥湖年纹层沉积的孢粉记录,提供了全新世以来准确定年的年际-年代际分辨率气候变化证据,通过对距今 9260 a 以来植物花粉种类和含量变化的分析,揭示出适应温暖湿润气候的栎属等花粉含量以及花粉组合第一主成分呈现周期性变化;谱分析呈现出显著的 500 a 周期,但是每个周期的波动幅度并不一样,500 a 气候周期,叠加在中全新世暖湿期(7-5 kaBP)总体变化趋势上^[29]。

同时,利用考古遗址 ¹⁴C 测年数据概率密度方法^[66],重建了具有高精度年龄框架的、量化的史前人口变化记录。通过全面系统获取的我国东北和华北北部 627 个考古遗址 ¹⁴C 测年数据,在排除大误差样品和其他无法反映人类活动的材料数据之后,进一步通过卡方检验进行数据合并,减少遗址间或同一遗址不同时期人为采样的偏差^[15,29]。利用国际通用计算方法和希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transform)^[67],获得了 8-2 kaBP 期间反映人类活动强度的 ¹⁴C 概率密度曲线和经验模态分解出的稳态频率信号。谱分析结果表明,人类活动强度变化同样具有显著的约 500 a 主导周期^[29]。

统计检验分析表明,花粉记录的气候变化和 ¹⁴C 概率密度揭示的人类活动存在约 500 a 周期的同步变化。气候周期性的暖湿/冷干与人类活动的强/弱,以及与文化的盛或衰的过程显著相关(图 1)。但是,并不是所有的文化演替都与 500 a 气候周期对应,在东北地区史前六个文化繁盛期中(兴隆洼文化,赵宝沟文化,红山文化,小河沿文化,夏家店下层文化,夏家店上层文化),只有红山文化(6.5-5.0 kaBP)出现例外,几乎涵盖(跨越)了中全新世 3 次 500 a 周期而没有衰退^[29]。

红山文化是中国北方最具代表性的新石器文化之一，目前位于东亚夏季风北部的边缘区，其生态环境对周期性气候变化敏感；但与红山文化期对应的中全新世是夏季风最强盛的暖湿期，当时夏季风北部边缘区会进一步向西北迁移，可能抑制了该区 500 a 气候周期信号的强度，难以击垮一个“社会弹性”已经很强的文化体系，包括增强土地利用的集约化农业、居住地和宗教活动的变化，以及精英阶层获得的空前的祭祀权力等。直到 5 kaBP 前后，中全新世后期快速的变冷同时叠加了 500 a 周期冷相位，加速恶化的气候击垮了红山文化社会弹性的底线。进一步研究发现 500 a 周期性气候演化与太阳活动引发的厄尔尼诺 - 南方涛动的频率有明确的关系。

对于新石器时期文化与气候关系的研究，正在经历从定性分析到量化统计检验的过程，明确量化环境变化因素在文化变迁中的贡献，揭示不同区域、不同时间尺度周期性气候叠加和文化变化的节点、变化阈值的关系，及其相互作用的非线性过程，仍然是今后长期研究的难题和切入点。

3.2 不同周期性气候叠加与农业起源和发展

不同时间尺度周期性气候叠加，是古气候演化过程的常态^[9,68]，在现代大气系统中经常以非平稳、多层次、奇异突变的状态出现^[69]。在晚更新世以来冰期 - 间冰期万年尺度的气候变化中，叠加了千年尺度的 H（Heinrich）准周期性事件和 D-O（D-O: Dansgaard-Oeschger）振荡周期^[70-72]。被认为是 H0 的新仙女木 - YD 寒冷事件（YD: Younger Dryas event, 12.9-11.7 kaBP），叠加在末次冰消期向全新世变暖的万年尺度气候变化相位上，是地球显著转暖（博林 - 阿勒罗得暖期，BA: Bølling/Allerød, 14.5-13 kaBP）过程中的一次“倒春寒”，全球农业从此在中南美洲（玉米 *Zea mays*）、西亚（小麦 *Triticum spp.*）、东亚（黍 *Panicum miliaceum*、粟 *Setaria italica*、水稻 *Oryza sativa*）3 个中心区域出现，人类进入了选择以禾本科植物为主要驯化农作物的农耕文化新纪元。

人们已经意识到，农业的起源可能是对 YD 环境压力的反应^[59,73,74]。无法解释的是，至少在晚更新世期间，类似 YD 快速变化事件（H1-H8 事件）发生多次，为什么只有到 YD 以后农业才开始出现（时间）？又是什么因素导致只在中南美洲、西亚、东亚几个全

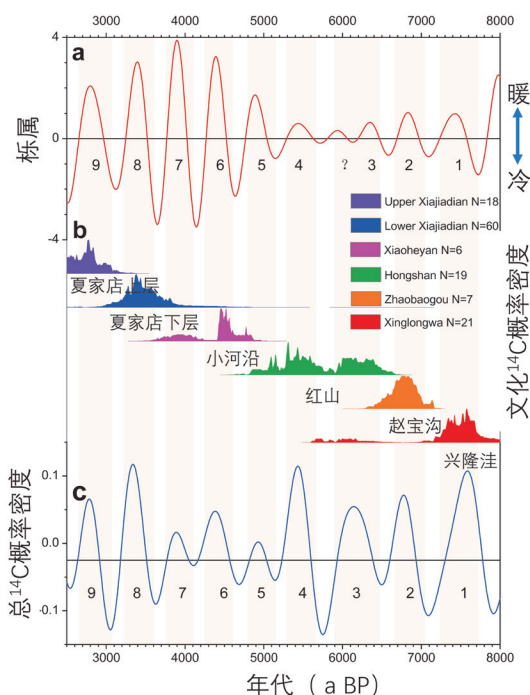


图 1 东北亚地区全新世 500 年周期性气候和人类活动的同步变化^[29]

Fig.1 Synchronous changes of Holocene 500 year periodic climate and human activities in Northeast Asia (by [29])

球相互没有关联的中心地区几乎同步出现（地点）？如何解释人类从自然界几十万种高等植物中特别宠爱禾本科植物进行驯化（种类）？这是迄今农业起源研究还没有回答的 3 个相互关联的（时间、地点、种类）最基本的问题。

我国东部地处东亚季风区，拥有旱作和稻作两套农业体系，孕育了悠久的农耕文明，是研究气候周期性变化与农业起源、文化演替关系的关键区域。本文作者课题组 20 多年以来通过对我国古气候定量重建、人类活动和旱作、稻作农业起源的系统研究^[15,16,75-86]，发现末次冰消期以来，有 3 个气候变化与农作物驯化同步的关键时间节点：约 14.5 kaBP 开始增温（BA 博林暖期）、约 12 kaBP 突然变冷（YD 事件）、约 10 kaBP 以来长期增温阶段（全新世温暖期），分别与水稻的出现、水稻消失（衰退）、和 水稻、黍、粟的驯化完成，以及人口变化过程^[15]在时间上是对应的（图 2）；并发现和明确了东亚农作物驯化需要 2-3 ka 以上长期驯化的证据和观点^[75-86]。

基于农作物驯化是长期过程的事实^[75-86]。在末次冰期期间，气候寒冷，尽管存在千年尺度气候波动（D-O 旋回、H 事件），但是一直缺少持续 2 ka 以上的稳定的温暖期，缺少完成水稻、黍、粟驯化的气候条件；约 14.5 kaBP 开始了历时约 2 ka 左右的逐渐升温，促进了区域资源和人口增加^[15]、水稻开始利用采集（驯化？）^[75]；12 kaBP 的突然降温，在长江中下游地区降温幅度达 5-6°C 左右，又导致水稻驯化中断、资源减少，但人口已经增多^[15]；在人口多资源少的压力驱动下，在 10 kaBP 以后的持续升温过程中，完成了黍、粟、稻的栽培驯化^[76,78,83,86]。

从目前人类选择采集 - 驯化植物种类的过程和证据看^[15,77,79]，晚更新世以来的广谱革命（Broad spectrum revolution），大致经历了从开始的采集坚果类木本植物 → 双子叶草本植物 → 单子叶草本植物，到最后选择一年生、季节性生长、自花授粉的禾本科植物的过程。无论美洲起源的玉米、西亚的小麦、东亚的水稻、黍、粟等禾本科植物，他们都是以生长期短、成熟快、可以适应快速气候变化、自花授粉利于选择过程中遗传性状保留、果实大而且方便储存过冬的植物，成为不同地区早期人类为应对食物短缺、有意或无意、不约而同选择的目标。因此，能够适宜繁衍这类禾本科植物的区域，不仅是季节性气候变

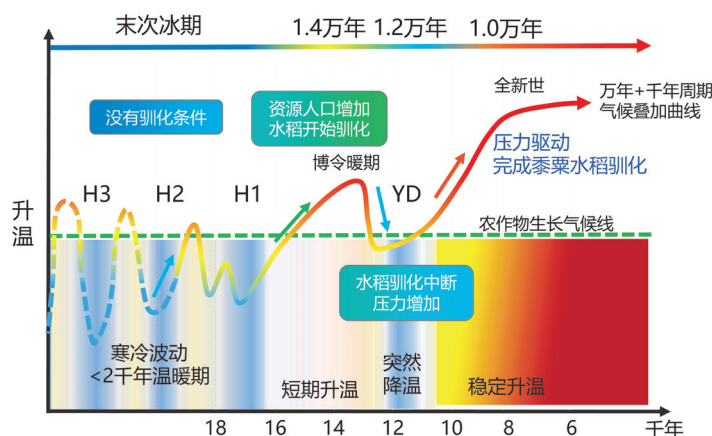


图 2 东亚农业起源气候周期叠加驱动的可能机制^[15,16,75-78,83]

Fig.2 Possible mechanism of climate cycle superposition driving the origin of agriculture in East Asia^[15,16,75-78,83]

化大的区域，同时也应该是受到 YD 事件显著影响的区域，大概率才有可能成为农业起源的中心区域，形成农业起源时间、地点、种类相互关联的完整的证据链。

事实上 YD 事件并不是全球性寒冷事件。在南半球 YD 事件并没有变冷，甚至出现变暖的“跷跷板现象”^[87]。在北半球，YD 事件影响程度从高纬度向低纬度总体是逐渐减弱的，但是从植被生态、土壤发育的背景看，冰后期高纬度大面积依然被冰川、冻土覆盖，缺少土壤积累，而在低纬度赤道地区依然是茂盛的森林植被^[88]。只有在北纬 30-35 度线附近的中美洲、西亚、东亚内陆大江大河流域，包各大河延伸的大陆架区域，既是 YD 影响相对显著的地区、也是土壤发育、适宜禾本科等草本植物繁衍的森林草原 - 草原地带，更是副热带高压影响的季节性最显著的气候区。

基于 YD 事件显著影响的区域气候和土壤、植被生态分布特点，依据古气候和农业考古的证据，从环境、社会、人类认知几个方面考虑，我们认为 20 kaBP 以来气候转暖（BA）、又突然降温（YD）、然后持续升温的气候周期叠加驱动，是农业最早在 3 个中心区起源的重要驱动机制。相对过去农业起源的“绿洲说”“边缘说”“人口压力说”“竞争宴享说”等各种假说^[89]，气候周期叠加驱动机制不仅可以回答全球农业为什么在 20 kaBP 以来起源，而且可以回答为什么最早在中南美洲、西亚、东亚几个中心区域起源等难题。

本文把农业起源气候周期叠加驱动机制，称之为“BA-YD 资源压力说”，或者说是“博林 - 新仙女木叠加驱动资源压力说”。YD 事件的寒冷程度并不比 H1~H8 事件更寒冷，但它是在长周期全球升温、万物复苏过程中叠加的寒冷事件，同时随着冰消期海平面上升、促使生活在大陆架的人群向海岸带迁移，进一步打破了北半球中纬度森林草原 - 草原区域正常的人口与资源的平衡变化趋势，徒增了人类群体生存性资源压力。人类在广谱革命的适应探索过程中，受益于单位面积“采集农业”资源养活人口的数量远大于狩猎人口数十至百倍以上，选择生长期短、成熟快、果实方便储存的禾本科植物进行栽培，或从无意到有意的驯化，成为人类社会适应气候环境变化的最佳选择、也许是最辛苦的选择。

进入全新世以后，依然存在明显的周期性气候变化，不仅对新石器时期文化发展演替产生了重要影响，而且对于历史时期已经繁盛的农耕文化也产生了重大影响^[64,90,91]。

4 历史时期以来：周期性气候变化与人类活动关系的复杂性

相对史前气候与文化关系的研究，历史时期更多的案例^[20,32,36,60]吸引了自然科学、人文社会科学不同学科学者依据更具体的文献证据、发表了更短时空尺度的研究成果^[26,92,93]，丰富了对于人地关系的认识。

综合近年来的进展，大部分是以传统农业（游畜牧业）为经济基础的文化演替为对象，研究历史时期周期性气候变化与人类活动的关系。另外，是以近百年来工业革命为基础的近代场景，分析气候周期性变化与社会经济发展的关系。

4.1 以传统农业（游畜牧业）为经济基础的历史场景

与新石器时期研究相似，有两种不同的研究方式，即：1）是通过区域气候 - 文化变化节点的对比；2）是通过气候 - 生态 - 文化量化关系的统计检验。

4.1.1 区域气候 - 文化变化节点的对比研究

许多古气候学家与历史学家相信,大规模、长时期的战乱、大一统朝代和强大帝国出现的背后,多数有区域气候变化的身影。许靖华先生从全球角度介绍了近 4 kaBP 来有 4 次准周期性变冷期(2000 BC、800 BC、400 AD 及 1600 AD 左右)影响了欧洲不同地区的降水形式,在欧洲北部变得更潮湿,而中低纬度地区变得更干旱;这两种变化形式的快速变化都不利于农业生产,造成庄稼歉收和大面积饥荒,对应了历史记载的民族大迁移^[26]。

在西亚,3000- 2000 BC 气候变冷同样影响了地中海 - 西亚地区的环境格局和文化变迁。安田喜宪教授指出,北纬 35 度线是西亚地区一个重要的分界线,气候变冷在界线以北形成冷湿的环境,以南形成冷干的环境,显著影响了人类活动和文化演替^[94]。

在东亚,以我国周期性气候变化、北方农牧交错带变迁、人口迁移和中原王朝演替的有关研究案例为代表^[22,32,92,93]。总体的逻辑解释与史前新石器时期类似,气候恶化都会削减农业产量,产量减少会引发饥荒、抗税和国家权力的削弱,在前期温暖气候条件下积累的人口扩张加剧了生计资源的短缺,北方游牧民族南侵,社会危机多在气候恶化期间爆发^[95]。

但是并不是所有的案例都存在相同的模式,许倬云先生通过对东汉 - 南北朝历史史料分析,明确了 4 个寒冷时期(90-130 AD, 180-200 AD, 270-330 AD 和 410-540 AD),但他没有发现北方游牧民族大肆南侵的记录,认为“天气与人事间,难以建立密切因缘”^[96],不符合寒冷干旱驱动游牧民族扩展说;并指出“寒冷干旱驱动”的观点可能是错误的,需要更深层次的思考气候变化与游牧社会间的关系。

许倬云先生所有记录的时间尺度,是年际 - 十年际的,相对史前时期和其他案例所揭示的百年 - 千年尺度的气候变化,有很大的不同。不同时间尺度的气候系统、对应不同空间范围;不同时、空过程气候变化有不同的机制。例如在全新世尺度上东亚季风区,温度与降水是同步的(湿热同期),但是十年 - 百年尺度周期变化上,或者出现北干、南湿或者北湿、南干,甚至出现湿 - 干 - 湿的“三明治”型分布^[97,98]。

另外从全球范围来看,气候变化在一些地区已经成为社会危机的驱动力,但在其他地区气候变化程度依然可以维持区域经济文化发展,这与气候影响生态植被演替的过程相似且有关,最早响应气候变化的区域是植被生态位的边缘区、也是敏感区^[99]。从某些具体的社会变革事件看,好像更直接受到政治因素的影响,或者过高估计了气候的影响^[36],但从长期的时间序列、统计分析可以揭示出人地关系不同层次的关联规律。因此,要把这些假说上升为理论框架,需要打通不同时间、空间尺度气候 - 文化动态关系,一个重要的途径是量化研究。

4.1.2 气候 - 生态 - 文化量化关系的统计检验范式

有关年际 - 十年际高分辨率定量古温度、古降水重建,在材料和方法方面都取得了新的进展,获得了许多可靠的、量化的 2 kaBP 以来的古温度和降水记录^[100,101],但是如何量化社会变化的过程一直是个难题。

方修琦等定量分析了过去 2130 a 气候变化与中国不同朝代相关的宏观经济周期的关系^[22]。将气候和社会变化的研究基于一系列以 10 a 为分辨率、长达 2000 a 的经济代理数据,统计分析发现存在 100 a 和 320 a 两个优势波段(周期),经济与气温和降水显著相关;

气候对经济的影响是一种驱动响应关系, 伴随人类在多尺度上的主动响应和影响。从更宏观的视野来看, 经济周期的气候驱动受到社会记忆、技术进步等更大、更慢的过程的调节。

时间尺度越小, 区域差异越明显。李峯等通过对 1470~1911AD 这近 500 a 中国 3 个农业生态区(水稻、小麦种植区和牧业区)气候、灾害、农业、内乱等开展定量分析^[20], 探究中国周期性旱涝灾害与内乱的对应关系。他们采用 Poisson 回归分析和小波一致性分析检测两者关系, 结果显示旱涝灾害显著地诱发了中国历史时期的内乱, 但区域差异明显。在水稻种植区, 洪涝在年际和数十年际时间尺度引发内乱; 在小麦种植区, 洪涝和干旱均在年际和数十年际时间尺度引发内乱; 牧业区的内乱只在数十年际尺度与洪涝相关。此外, 在数十年际时间尺度上, 3 个农业生态区的旱涝事件只在人口密度不断增加或处于相对区域承载力较高的时段内和内乱显著相关, 指示气候 - 战争的对应关系明显受地区因素如自然环境及人口压力影响。

定量化的统计检验研究结果, 相对变化节点的经验对比更客观, 不仅可以了解统计误差范围、事件发生的概率大小, 更重要是可以进行不同数据的可重复检验^[102]。

4.2 近 100 年以来工业革命时期气候变暖场景

近百年以来的气候变暖, 目前既没有达到 20 kaBP 以来温度最高的高度, 也没有达到最快的变化速度和最大的变化幅度, 但是人类社会依然感觉到气候变暖的压力和威胁^[3]。与史前和历史时期的气候变化场景不同的是, 近百年气候变暖过程被认为极其可能是人类影响造成的, 是否有自然气候周期性贡献是有争议的^[103]。由于自然气候系统的复杂性、模拟预估的不确定性以及系统的人类器测记录也仅有近百年的历史, 首先需要了解今天的气候变化是否有长期自然周期气候变化的信号。

最近, 来自我国东北小龙湾玛珥湖过去 5350 a (止于 2005 AD) 的沉积年纹层花粉记录, 揭示了气候冷、暖变化存在约 500 a 的自然周期。其中, 近百年来的全球气候变暖位于最近一次 500 a 周期的暖相位上(图 3), 如今的气候变暖, “极其可能”叠加了自然周期的变暖过程^[103]。

在 20 世纪末我国西北干旱区年降水量显著增多, 施雅风先生认为我国西北干旱区正在发生从暖干向暖湿的气候转型^[104]。这次气候转型是人类活动影响还是自然周期变化的继续, 事关社会经济环境的发展。崔安宁等基于对青藏高原北部湖泊年纹层沉积物孢粉分析, 通过孢粉 - 降水转换函数定量重建了该区过去 1656 a (350 AD 到 2006 AD 止) 的降水变化, 发现降水变化过程主要受 3 个自然周期的调控, 分别为约 200 a 周期(与西风带有关)和 88 a、60 a 周期(与亚洲季风有关)。目前这 3 个周期大致都处于降水开始增加的相位上, 可用来解释近年来降水的转型^[100], 说明年际 - 十年际自然气候周期依然在现今的全球变暖过程中起作用。

毫无疑问, 人类活动排放温室气体造成大气温度增加是不争的事实, 然而在温室气体一直线性增加的驱动下, 依然存在年际 - 十年际气候自然周期变化^[105-107]。如何区分和量化近百年以来全球变暖过程中自然和人类的贡献, 仍存在技术方面的困难。

无论自然和人类因素分别有多大的影响, 今天的气候变暖已经成为科学、社会、公众高度关注以及政府间博弈的全球性话题。与历史时期重点研究气候变化与社会动乱、朝

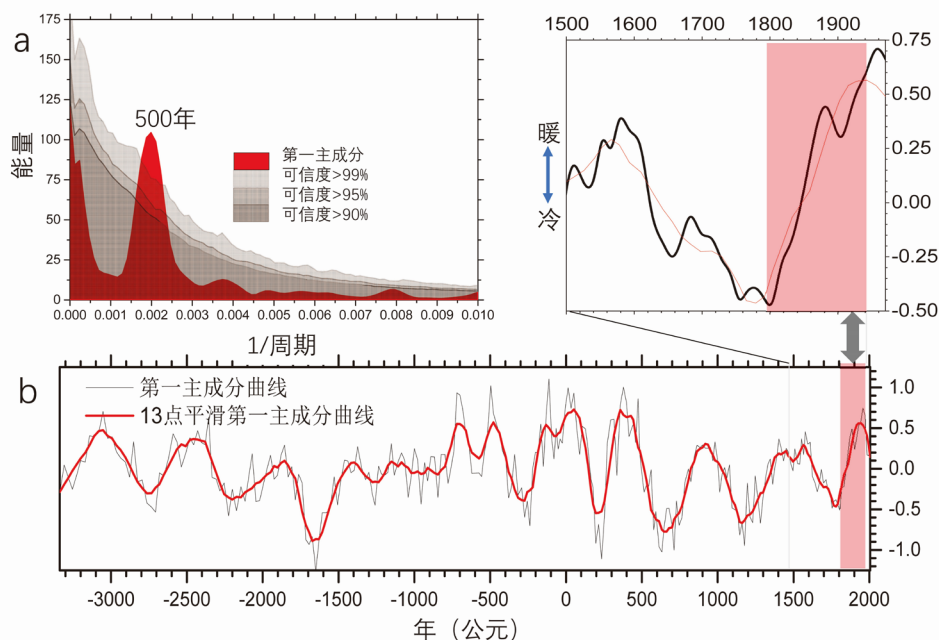


图 3 中国东部小龙湾年纹层孢粉分析揭示的 5350 年以来的温度变化示意图

Fig.3 Temperature changes since 5350 years ago revealed by annual stratigraphy pollen analysis in Xiaolongwan Lake, Eastern China

该图显示,近 100 年升温过程位于 500 年自然周期的变暖相位上; a. 谱分析结果; b. 气候变化曲线 (据 [103])。indicating a warming process in the last 100 years, which is located in the warming phase of the 500-year natural cycle. a. spectrum analysis results; b. Climate change curve (by [103])

代更替关系的案例不同,目前大量的气候经济学研究应运而生,例如《气候变化经济学》《气候金融》《贸易与气候变化》等^[108-110]。

经济学家在建立气候与社会经济文化周期关系的过程中,同样遇到如何量化社会经济周期的指标问题。瑞·达利欧教授提出了 8 个社会大周期的量化指标^[111],包括教育、竞争力、创新和技术、经济产出、世界贸易份额、军事实力、金融中心实力和储备货币地位。通过考察这些指标,他发现存在 3 个至关重要的周期【50-100 a 长期和约 8 a 短期债务周期、内部秩序和混乱约 100 a 周期、和外部秩序和混乱周期(周期长度取决于各国财富与权力的竞争力)】与创新和自然灾害一并构成了 5 大决定性力量,驱动一个可以跨越百年的巨大的社会兴衰周期,每个国家都曾经和正在经历这样的周期,不同国家可以处于周期的不同阶段(相位)。

虽然瑞·达利欧考虑到气候变化、自然灾害会在导致经济崩溃、加速帝国和王朝的衰落起到重要作用,但是他承认自己不是气候方面的专家,乐意相信周期性气候变化在他建立的周期律中起作用^[111]。

自然环境和人类社会都处在永恒的运动变化中,气候学家、政治家和社会学家都试图从各自的视角去阐述社会演化中形式多样的周期性规律。如何探究人类社会周期性兴衰背后的驱动机制?是自然科学和社会科学近年来共同努力的方向。

5 周期性气候变化与人类社会适应性循环机制研究

历史事件是在短期内看似没有规律的偶然现象，但放在一个更大的时间尺度和空间尺度内，可能看出它的潜在周期性规律，虽然历史不会重演，但总会在押韵。

过去的一个多世纪，有关人类活动 - 气候环境变化关系的研究，产生了许多假说或“理论”，从环境决定论、生态论、唯意志论到文化决定论等^[14,112-116]。有人用研究自然生态系统演化的思路去分析人类社会的周期性发展，但是会忽视人类社会的发展能力及其在社会系统中存在反身性、灵活性和跨尺度互动，特别是人类有能力做出前瞻性的行为和有能力设计对生态系统产生巨大影响的技术，如果没有考虑到这些因素，就难以真实理解气候 - 人类关系系统是如何周期性运行的。

Gunderson 和 Holling 提出了扰沌 (panarchy) - 适应性循环模型^[23]，在解释不同时间尺度社会 - 气候周期性变化问题方面，得到越来越广泛的应用。适应性循环模型指出了社会 - 气候系统发展的 4 个阶段 (r 、 K 、 Ω 、 α)，并指明了 4 个阶段的状态特征和系统变化阈值。从 r 到 K 的过程将生产和积累最大化，以发展和稳定为主，系统基本上是确定的、可预测的；从 Ω 到 α 的过程以创新和分类最大化，以改革和更新为主，系统是不确定和不可预测的 (图 4)。

扰沌提供了跨越尺度的联结模式，反映了适应循环的嵌套性，不同时间尺度的气候变化和社会发展周期环之间是相互嵌套的，小的系统中存在的环可以嵌套在大的系统环上。

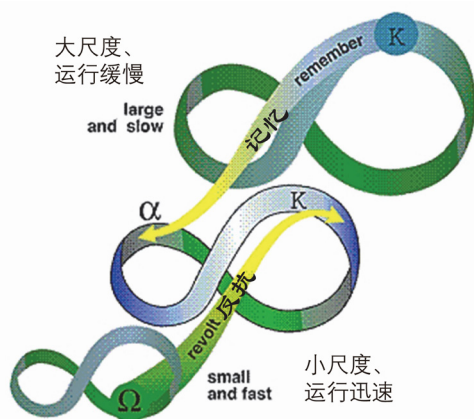


图 4 扰沌 (panarchy) 连接，多个尺度上的关联适应循环^[23]

Fig.4 Panarchy connections, linked adaptive cycles at multiple scales^[23]

图中 r 、 K 、 Ω 和 α 解释： r 阶段（生长）系统的连接度和稳定性增加，并且开始积累自然资源和社会资本； K 阶段（积累）聚集的资源越来越为系统所固持，随着系统的连接度增加、控制力也越来越强； Ω 阶段（重组）随着 K 状态过度连接和僵硬的控制，导致系统的恢复力 (resilience) 降低，积累变得十分微弱，在微不足道的干扰下，会导致系统出现巨大危机和转变； α 阶段（更新）系统进行重新组织，过程具有高度不确定性，有可能重复上一循环，也可能进入新的不同的循环。Originally published in Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems, Edited by Lance H. Gunderson and C.S. Holling 2002. Permission Island Press[23]）.

r 、 K 、 Ω 和 α Explanation: r stage (growth), the connectivity and stability of the system increase in r stage, and begin to accumulate natural resources and social capital; K -stage (accumulation), the resources gathered in stage K are increasingly fixed by the system, and the control force becomes increasingly stronger with the increase of the connection degree of the system; Ω stage (reorganization) with the over connection and rigid control in K state, the resilience of the system decreases and the accumulation becomes very weak, under insignificant interference, it will lead to great crisis and transformation of the system; α stage (update) system is reorganized, and the process is highly uncertain, it is possible to repeat the previous cycle or enter a new and different cycle.

要考察环之间的嵌套点, 就要注意 K 状态。小的环如果以 Ω (重组崩溃) 状态嵌套在大的系统的 K 状态时, 称为反抗, 这种反抗的积累有可能使得大的系统的 K 状态崩溃, 造成部分影响全局。另外, 如果小的环处于 α (更新重生) 过程中, 那么更大级别的 K 状态将会影响小系统的重建方向, 造成全局控制部分 (图 4)。

Rosen 等利用适应性循环模型解释了新仙女木采集者的适应性问题, 认为在整个末次盛冰期 (LGM)、博林暖期 (BA)、新仙女木 (YD) 小冰期和全新世早期, 地中海东部的黎凡特采猎者的响应过程分别与中尺度适应循环的 α 、r、K 和 Ω 相对应^[35]。

基于中国的长达 2130 a 的、分辨率为 10 a 的经济代理数据和气候记录, 方修琦等利用适应性变化理论分析了王朝演替的自适应周期, 发现几个长期朝代 (汉、唐宋、明清) 的经济表现都经历了帝国规模的 α 、r、K 和 Ω 阶段的适应周期, 并与周期性的气候变化相互作用, 揭示了气候对中国历史社会演化的影响不是简单的因果关系, 而是一种多尺度的驱动 - 响应关系^[22] (图 5)。

相对来说, 适应性循环模型是目前揭示周期性气候变化与人类社会周期性兴衰关系的较全面的概念模型之一。地球系统科学的最大挑战是将社会科学和人文科学中体现人类活动动力学与生物物理动力学充分结合起来, 通过物质、能量、生命、信息等动力链条的交流, 打通时间隧道、圈层隔离、空间局限、揭示圈层相互作用过程, 阐明自然界和人类文明在不同尺度上的动态协同演化关系, 需要不同学科全力以赴、负重致远。

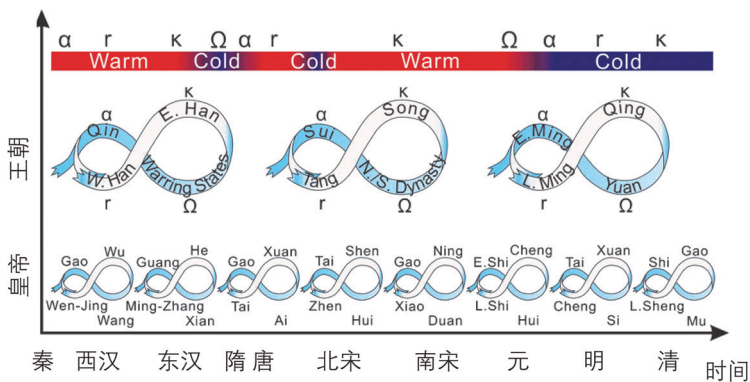


图 5 自适应循环模型分析气候变化在中国近 2000 年以来宏观经济周期和朝代周期中的作用^[22]

Fig.5 The adaptive cycle model used to analyze the role of climate in the macro-economic and dynastic cycles in China over the past 2000 a^[22]

从上到下: 1) α 、r、K 和 Ω 分别代表自适应周期的 4 个阶段^[23]; 它们同时也对应图中第 2 排的不同王朝; 2) 彩色条表示中国百年尺度的暖/冷期^[18]; 3) 适应周期中每个主要王朝的阶段; 4) 各朝代皇帝在适应周期中所处的阶段; 这 8 个圆圈代表 8 个漫长的朝代: 西汉 (公元前 206 年至公元 25 年)、东汉 (公元 25 年至 220 年); 唐 (公元 618-907 年); 北宋 (北公元 960-1127 年); 南宋 (公元 1127-1279 年); 元 (公元 1234-1368 年); 明代 (公元 1368-1644 年); 清朝 (公元 1644-1911 年)。From top to bottom: 1) α , r, K, and Ω represent four phases of the adaptive cycle, respectively^[23]; here, they also refer to the dynasties identified in the second row of the figure; 2) the colored bar indicates centennial-scale warm/cold periods in China^[18]; 3) the phase of each major dynasty in the adaptive cycle; 4) the phase of Emperor in each dynasty in the adaptive cycle; the eight loops represent eight long dynasties: the Western Han(W. Han, 206 BC-AD 25), Eastern Han(E. Han, AD 25-220); Tang(AD 618-907); Northern Song(N. Song, AD 960-1127); Southern Song(S. Song, AD 1127-1279); Yuan(AD 1234-1368); Ming(AD 1368-1644); and Qing(AD 1644-1911)

6 小结

了解气候变化及其对人类文化的可能影响, 是 21 世纪重大的科学挑战之一。自然和人类社会是两个复杂的系统, 旧、新石器以来不同场景、不同时间尺度周期性气候变化和人类社会兴衰发展的关系、过程和机制有很大不同。特别是对新石器以来的人类社会(文化、文明、帝国、王朝等)周期性演替的驱动机制的认识, 人文社科领域学者多从社会内部发展驱动找原因, 自然科学领域学者多从外部周期性环境变化驱动找原因。开展社会科学和自然科学领域的交叉研究, 形成多学科交叉研究的新范式, 是深入研究的关键途径。

新的研究范式涉及到研究理论、方法、技术、应用的变化和突破, 无论是气候变化研究还是社会文化发展研究, 需要做到以下几点: 1) 把传统的、零散的定性描述证据转变为定量的(变率、速度、幅度、阈值)连续的时空变化序列, 充分考虑数据的多源、多尺度、高维、复杂时空依赖性; 2) 把个案讨论汇入大数据统计检验中, 把不同时间尺度周期性、事件性叠加的气候-文化现象、节点, 通过贝叶斯、概率推断等统计方法区分出来; 3) 系统开展历史和史前时期不同场景中文化的代表性标志和定量化方法研究, 建立人类活动、文化变迁与温度、降水、生态环境变化的线性-非线性关系与模型; 4) 古气候变化研究并不只是为解释过去古人类活动服务的, 应该是与考古学文化研究一起, 为地球系统科学研究提供多圈层相互作用的证据。

最近几十年, 新证据、新方法和新突破已经加深了人们对周期性气候变化与人类活动关系的理解。仅从我国古代人类发展与气候背景关系看, 气候增温有利有弊, 周期性气候变暖总体上有利于我国社会文化的发展; 快速气候环境变化(变暖、变冷), 一旦超出人类文化的应对(弹性)能力, 将直接威胁着人类生存安全; 减缓气候变化速度, 是正确的选择; 自然界存在多种尺度的气候变化周期, 今天的气候变化有自然周期变化延续的背景, 今天的气候变暖要考虑自然气候变化的贡献。

致谢: 感谢靳桂云教授的宝贵意见; 感谢贺可洋、崔安宁博士对本文提供的大力支持; 感谢张健平、贺可洋、邹秀佳、杨晓燕、王灿、吴海斌、吴乃琴、沈才明等参与关于农业起源机制的讨论。

参考文献

- [1] Burke A, Peros MC, Wren CD, et al. The archaeology of climate change: The case for cultural diversity[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118(30): e2108537118
- [2] 周佰铨, 翟盘茂. IPCC 第六次气候变化评估中的气候约束预估方法[J]. *气象学报*, 2021, 79(6): 1063-1070
- [3] Doblas-Reyes FJ, Srensson AA, Almazroui M, et al. IPCC AR6 WGI Chapter 10: Linking global to regional climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- [4] 吴新智. 人类起源与进化简说[J]. *自然杂志*, 2010, 32(2): 63-66
- [5] 郭正堂, 任小波, 吕厚远, 等. 过去 2 万年以来气候变化的影响与人类适应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之影响与适应任务群研究进展[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(1): 142-151
- [6] Gowdy J. Our hunter-gatherer future: Climate change, agriculture and uncivilization[J]. *Futures*, 2020, 115: 2488
- [7] Gornitz V. Ancient Cultures and Climate Change[A]. In: Gornitz V(Eds.). *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*[M]. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Dordrecht: Springer, 2009

- [8] 陈星灿. 考古学对于认识中国早期历史的贡献——中外考古学家的互动及中国文明起源范式的演变[J]. 南方文物, 2011, 2: 85-88
- [9] 汪品先, 田军, 黄恩清, 等. 地球系统与演化[M]. 北京: 科学出版社, 2018
- [10] Zeder MA. Central questions in the domestication of plants and animals[J]. *Evolutionary Anthropology*, 2006, 15(3): 105-117
- [11] 达尔文. 达尔文进化论全集·第三卷·物种起源[M]. 北京: 科学出版社, 1996
- [12] Gao X, Zhang X, Yang D, et al. Revisiting the origin of modern humans in China and its implications for global human evolution[J]. *Sci China Earth Sci*, 2010, 40(9): 1287-1300
- [13] Keighren IM. *Environmental Determinism* (2nd Edition)[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015
- [14] Rabie M. Cultural Determinism[A]. In: Rabie M. *Global Economic and Cultural Transformation: The Making of World History*[M]. New York: Palgrave Macmillan, 2013
- [15] Wang C, Lu HY, Zhang JP, et al. Prehistoric demographic fluctuations in China inferred from radiocarbon data and their linkage with climate change over the past 50,000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 98: 45-59
- [16] Lu HY, Wu NQ, Liu KB, et al. Modern pollen distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the development of transfer functions for reconstructing Holocene environmental changes[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30: 947-966
- [17] Miller DS, Gingerich J. Regional variation in the terminal Pleistocene and early Holocene radiocarbon record of eastern North America[J]. *Quaternary Research*, 2013, 79(2): 175-188
- [18] Ge QS, Hao ZX, Zheng JY, et al. Temperature changes over the past 2000 yr in China and comparison with the Northern Hemisphere[J]. *Climate of the Past*, 2013, 9(3): 1153-1160
- [19] 裴卿. 历史气候变化和社会经济发展的因果关系实证研究评述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(4): 375-382
- [20] 李峯, 章典, 裴卿, 等. 中国近五百年旱涝灾害与内乱关系的定量分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(12): 1395-1405
- [21] Zhang DD, Lee HF, Wang C, et al. The causality analysis of climate change and large-scale human crisis[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108(42): 17296-17301
- [22] Wei ZD, Rosen AM, Fang XQ, et al. Macro-economic cycles related to climate change in dynastic China[J]. *Quaternary Research*, 2015, 83(1): 13-23
- [23] Gunderson LH, Holling CS. *Panarchy: Understanding Transformations In Human And Natural Systems*[M]. Washington, DC: Island Press, 2003
- [24] Wu WX, Liu TS. Possible role of the "Holocene Event 3" on the collapse of Neolithic Cultures around the Central Plain of China[J]. *Quaternary International*, 2004, 117(1): 153-166
- [25] Zhang DD, Pei Q, Lee HF, et al. The pulse of imperial China: a quantitative analysis of long-term geopolitical and climatic cycles[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2015, 24(1): 87-96
- [26] 许靖华. 太阳、气候、饥荒与民族大迁移[J]. 中国科学: 地球科学, 1998, 28(4): 366-384
- [27] 贾雷德·戴蒙德. 枪炮、病菌与钢铁: 人类社会的命运[M]. 上海: 上海译文出版社, 2014
- [28] Wu QL, Zhao ZJ, Liu L, et al. Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty[J]. *Science*, 2016, 353(6299): 579-582
- [29] Xu DK, Lu HY, Chu GQ, et al. Synchronous 500-year oscillations of monsoon climate and human activity in Northeast Asia[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-10
- [30] 吕厚远. 新石器以来的北温带草原文化与气候变迁[J]. 文物保护与考古科学, 1991, 3(2): 43-50
- [31] Catto N, Catto G. Climate change, communities, and civilizations: driving force, supporting player, or background noise?[J]. *Quaternary International*, 2004, 123: 7-10
- [32] 章典, 詹志勇, 林初升, 等. 气候变化与中国的战争、社会动乱和朝代变迁[J]. 科学通报, 2004, 49(23): 2468-2474
- [33] Griffiths S, Robinson E. The 8.2 ka BP Holocene climate change event and human population resilience in northwest Atlantic Europe[J]. *Quaternary International*, 2018, 465: 251-257
- [34] Blockley S, Candy I, Matthews I, et al. The resilience of postglacial hunter-gatherers to abrupt climate change[J]. *Ecology & Evolution*, 2018, 2(5): 810-818
- [35] Rosen AM, Rivera-Collazo I. Climate change, adaptive cycles, and the persistence of foraging economies during the late Pleistocene/Holocene transition in the Levant[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109(10): 3640-3645
- [36] 舒展. 气候与中国北方游牧族群南侵再探[J]. 黄河黄土黄种人, 2021, 33: 41-48
- [37] 拓守廷, 刘志飞. 始新世-渐新世世界线的全球气候事件: 从“温室”到“冰室”[J]. 地球科学进展, 2003, 18(5): 691-696
- [38] Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686-693
- [39] Callaway E. Femur findings remain a secret[J]. *Nature*, 2018, 553(7689): 391-392
- [40] Carotenuto F, Tsikaridze N, Rook L, et al. Venturing out safely: The biogeography of *Homo erectus* dispersal out of Africa[J]. *Journal of Human Evolution*, 2016, 95: 1-12
- [41] Leo G, Abesalom V, David L, et al. Earliest Pleistocene Hominid Cranial Remains from Dmanisi, Republic of Georgia: Taxonomy, Geological Setting, and Age[J]. *Science*, 2000, 288(5468): 1019-1025
- [42] Hadjouis D. Migration and Paleogeographic Distribution of the Homininae[A]. In: Hadjouis D. *The Skull of Quadruped and Bipedal*

- Vertebrates[M]. Hoboken: Wiley-ISTE, 2021
- [43] 李潇丽. 气候波动频率与古人类演化[J]. 化石, 2016(2): 18-22
- [44] Potts R, Faith T. Alternating high and low climate variability: The context of natural selection and speciation in Plio-Pleistocene hominin evolution[J]. *Journal of Human Evolution*, 2015, 87: 5-20
- [45] Potts R. Hominin evolution in settings of strong environmental variability[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 73: 1-13
- [46] Veldhuis D, Kjærsgaard P, Maslin M. Human Evolution: Theory and Progress[M]. New York: Springer, 2014
- [47] Potts R. Evolution and climate variability[J]. *Science*, 1996, 273(5277): 922-922
- [48] 丁仲礼. 米兰科维奇冰期旋回理论: 挑战与机遇[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 710-717
- [49] 裴树文, 李潇丽, 刘德成, 等. 泥河湾盆地东谷坨遗址古人类生存环境探讨[J]. 科学通报, 2009, 54(19): 2895-2901
- [50] 吴文祥, 刘东生. 泥河湾与黄土高原地层对比及其旧石器文化序列[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 33
- [51] 汪品先, 田军, 成鑫荣. 第四纪冰期旋回转型在南沙深海的记录[J]. 中国科学: 地球科学, 2001, 31(10): 793-799
- [52] Hao QZ, Wang L, Oldfield F, et al. Extra-long interglacial in Northern Hemisphere during MISs 15-13 arising from limited extent of Arctic ice sheets in glacial MIS 14[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12103
- [53] Templeton A. Out of Africa again and again[J]. *Nature*, 2002, 416(6876): 45-51
- [54] Templeton AR. Haplotype trees and modern human origins[A]. In: Stinson S(Ed.). *Yearbook of Physical Anthropology*[C]. Washington: Washington University, 2005, 33-59
- [55] Timmermann A, Friedrich T. Late Pleistocene climate drivers of early human migration[J]. *Nature*, 2016, 538(7623): 92-95
- [56] Lambeck K, Rouby H, Purcell A, et al. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(43): 15296-15303
- [57] Dietrich T. *The Origin of Culture and Civilization*[M]. Austin: Turnkey Press, 2005
- [58] 严文明. 文明起源研究的回顾与思考[J]. 文物, 1999, 10: 27-34
- [59] Feynman J, Ruzmaikin A. Climate Stability and the Origin of Agriculture[A]. In: Hussain S(Ed.). *Climate Change and Agriculture*[M]. London: IntechOpen, 2018
- [60] 葛全胜, 方修琦, 郑景云. 中国历史时期气候变化影响及其应对的启示[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 23-29
- [61] Munoz SE, Gajewski K, Peros MC. Synchronous environmental and cultural change in the prehistory of the northeastern United States[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107(51): 22008-22013
- [62] Benati G, Guerriero C. Climate change and state evolution[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118(14)
- [63] Hinsch B. Climatic change and history in China[J]. *Journal of Asian History*, 1988, 22(2): 131-159
- [64] 韩建业. 论新石器时代中原文化的历史地位[J]. 江汉考古, 2004(1): 59-64
- [65] Rawat V, Rawat S, Srivastava P, et al. Middle Holocene Indian summer monsoon variability and its impact on cultural changes in the Indian subcontinent[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 255: 1-15
- [66] Williams AN. The use of summed radiocarbon probability distributions in archaeology: a review of methods[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2012, 39(3): 578-589
- [67] 安怀志. 希尔伯特黄变换理论和应用的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008
- [68] 郭正堂. 《地球系统与演变》: 未来地球科学的脉络简[J]. 科学通报, 2019, 64(9): 883-884
- [69] 荣平平, 刘式达. 不同时间尺度下气候变化基本特征的探索[J]. 气候与环境研究, 1997, 2(1): 78-83
- [70] 王绍武. D/O 循环与 H 事件[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(6): 458-460
- [71] Clark PU, Bartlein PJ. Correlation of late Pleistocene glaciation in the western United States with North Atlantic Heinrich events[J]. *Geology*, 1995, 23(6): 483-486
- [72] Bond GC, Showers W, Elliot M, et al. The North Atlantic's 1-2 Kyr Climate Rhythm: Relation to Heinrich Events, Dansgaard/Oeschger Cycles and the Little Ice Age[M]. Washington, DC: American Geophysical Union, 1999
- [73] Bar-Yosef O. *From foraging to farming in Western and Eastern Asia*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012
- [74] Belfer-Cohen BY. The Origins of Sedentism and Farming Communities in the Levant[J]. *Journal of World Prehistory*, 1989, 3(4): 447-498
- [75] Lu HY, Liu ZX, Wu NQ, et al. Rice domestication and climatic change: phytolith evidence from East China[J]. *Boreas*, 2002, 31(4): 378-385
- [76] Lu HY, Zhang JP, Liu KB, et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(18): 7367-7372
- [77] Lu HY. New methods and progress in research on the origins and evolution of prehistoric agriculture in China[J]. *Science China(Earth Sciences)*, 2017, 60(12): 2141-2159
- [78] Zuo XX, Lu HY, Jiang LP, et al. Dating rice remains through phytolith carbon-14 study reveals domestication at the beginning of the Holocene[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(25): 6486-6491
- [79] He KY, Lu HY, Zhang JP, et al. Prehistoric evolution of the dualistic structure mixed rice and millet farming in China[J]. *The Holocene*, 2017, 27(12): 1885-1898

- [80] Xu DK, Lu HY, Wu NQ, et al. Asynchronous marine-terrestrial signals of the last deglacial warming in East Asia associated with low- and high-latitude climate changes[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110(24): 9657-9662
- [81] Lu HY, Zhang JP, Wu NQ, et al. Phytoliths Analysis for the Discrimination of Foxtail Millet (*Setaria italica*) and Common Millet (*Panicum miliaceum*)[J]. *PLoS One*, 2009, 4(2): 1-15
- [82] Lu HY, Wu NQ, Liu KB, et al. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China II: palaeoenvironmental reconstruction in the Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(5-6): 759-772
- [83] Yang XY, Wan ZW, Perry L, et al. Early millet use in northern China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(10): 3726-3730
- [84] Wang WY, Liu JQ, Liu TS, et al. The two-step monsoon changes of the last deglaciation recorded in tropical Maar Lake Huguangyan, Southern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 16(16): 1529-1532
- [85] Huan X, Lu H, Jiang L, et al. Spatial and temporal pattern of rice domestication during the early Holocene in the lower Yangtze region, China[J]. *The Holocene*, 2021, 31(9): 1366-1375
- [86] 吕厚远. 中国史前农业起源演化研究新方法与新进展 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(2): 181-199
- [87] Shakun JD, Carlson AE. A global perspective on Last Glacial Maximum to Holocene climate change[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(15-16): 1801-1816
- [88] Kaplan J. Late Quaternary-Holocene Vegetation Modeling[A]. In: Gornitz V(Eds.). *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*[M]. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Dordrecht: Springer, 2009: 507-514
- [89] 张修龙, 吴文祥, 周扬. 西方农业起源理论评述 [J]. *中原文物*, 2010(2): 36-45
- [90] Anderson DG, Maasch KA, Sandweiss DH, et al. *Climate and Culture Change: Exploring Holocene Transitions*[M]. San Diego: Academic Press, 2007
- [91] 吕厚远, 张健平. 关中地区的新石器古文化发展与古环境变化的关系 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28(6): 1050-1060
- [92] Tan M, Liu TS, Hou JZ, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12): 1617
- [93] 陈强. 气候冲击、王朝周期与游牧民族的征服 [J]. *经济学 (季刊)*, 2015, 14(1): 373-394
- [94] 安田喜亮, 刘绩生. 五千年前的气候变化与古代文明 [J]. *世界科学*, 1991, 13(2): 40-42
- [95] Lee HF, Zhang DD, Pei Q, et al. Demographic impact of climate change on northwestern China in the late imperial era[J]. *Quaternary International*, 2016, 425(15): 237-247
- [96] 许倬云. 许倬云观世变 [M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2008
- [97] 范伶俐, 徐峰, 徐华, 等. 春季/夏季型 El Nino 对中国夏季降水变化的影响 [J]. *大气科学学报*, 2018, 41(6): 819-828
- [98] Ge QS, Zheng JY, Hao QZ, et al. Recent advances on reconstruction of climate and extreme events in China for the past 2000 years[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 827-854
- [99] Straalen V, Roelofs NM, Straalen D, et al. *An introduction to ecological genomics*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2011
- [100] Cui AN, Lu HY, Liu XQ, et al. Tibetan Plateau Precipitation Modulated by the Periodically Coupled Westerlies and Asian Monsoon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(7)
- [101] 葛全胜, 华中, 郑景云, 等. 过去 2000 年全球典型暖期的形成机制及其影响 [J]. *科学通报*, 2015, 60(18): 1728-1735
- [102] 赵红军. 气候变化是否影响了我国过去两千年间的农业社会稳定?——一个基于气候变化重建数据及经济发展历史数据的实证研究 [J]. *经济学 (季刊)*, 2012, 11(2): 691-722
- [103] Xu DK, Lu HY, Chu GQ, et al. 500-year climate cycles stacking of recent centennial warming documented in an East Asian pollen record[J]. *Scientific Reports*, 2016, 4: 3611
- [104] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226
- [105] 张天宇, 陈正洪, 孙佳, 等. 三峡库区近百年来气温变化特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(22): 138-144
- [106] 潘蔚娟, 吴晓绚, 何健, 等. 基于均一化资料的广州百年气温变化特征研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(4): 444-454
- [107] 李黎, 崔研, 王浩宇, 等. 营口市百年气温变化特征研究 [J]. *气象与环境学报*, 2021, 37(3): 73-80
- [108] 尼古拉斯·斯特恩. 气候变化经济学 (上)[J]. *经济社会体制比较*, 2009
- [109] 王遥. 气候金融 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2013
- [110] 于鹏. 贸易与气候变化 [J]. *国际贸易译丛*, 2010, 4: 6
- [111] Dalio R. *Principles for Dealing with the Changing World Order: Why Nations Succeed and Fail*[M]. New York: Simon & Schuster, 2021
- [112] 王恩涌. “人地关系”的思想从“环境决定论”到“和谐” [J]. *北京大学学报 (哲学社会科学版)*, 1992, 1: 84-90
- [113] 王兴成. 社会生态学与社会发展问题 [J]. *国外社会科学*, 1988, 1: 18-21
- [114] 成海鹰, 成芳. 唯意志论哲学在中国 (第 2 版) [M]. 北京: 首都师范大学出版社, 2002
- [115] 韩东屏. 审视文化决定论 [J]. *探索与争鸣*, 2016, 6: 79-84
- [116] Peet R. The Social Origins of Environmental Determinism[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1985, 75(3): 309-333