

气候系统也有“软肋”，严寒突袭或成更大隐患

全球沸腾时代，气候学家为何重提《后天》？

吕建华



电影《后天》海报

就在联合国秘书长古特雷斯宣布“全球变暖时代已经结束，全球沸腾时代已经到来”之际，《自然·通讯》在线发表一篇论文，将人类社会可能面对的另一重气候危机推向前台：大西洋经向翻转环流(AMOC)将于本世纪中叶崩溃。

2004年上映的灾难科幻片《后天》所描述的正是AMOC关闭之后严寒突然降临的场景。在全球变暖的今天，气候突然变冷的灾难真的会在本世纪发生吗？气候突变是否会影响到碳达峰、碳中和战略实施？

本报特邀中山大学大气科学学院教授吕建华撰文，向读者介绍过去二百年科学界对AMOC认识的演变，以及目前对AMOC和气候变化之间关系的认识。由此，我们也可深入理解当下所采取的应对气候变化措施的必要性。

今年夏天，各种极端天气引发灾害的消息从全球不同地方传来：这个夏天成为人类有记录以来最炎热的一个夏天；过火面积逾12万平方公里的加拿大森林大火已成全球性环境事件；就在7月，我国京津冀地区在遭遇40℃以上持续高温后，又于7月29日到8月1日遭受暴雨袭击，引发北京门头沟区、河北涿州等地的洪涝灾害……

就在全球变暖导致的种种极端天气和气候现象令人类社会焦灼不安之时，《自然·通讯》于7月25日在线发表《对即将崩溃的大西洋经向翻转环流的警告》一文。

这篇文章的主要结论是大西洋经向翻转环流(AMOC)将于本世纪中叶(2050年，95%显著区间为2025年至2095年)崩溃。2004年上映的灾难科幻片《后天》所描述的正是AMOC关闭之后严寒突然降临的场景。

其实，早在2021年8月，德国波茨坦气候影响研究所的气候学家尼古拉斯·波尔斯就在《自然》发表文章指出，AMOC正在接近其临界点并且突然关闭的可能性越来越大。然而，政府间气候变化专门委

员会(IPCC)最近的报告却认为，AMOC不太可能在本世纪内崩溃。

这些相互矛盾的观点不禁让人怀疑，“后天”的警告究竟只是一部分人“狼来了”的炒作，还是真实可能发生的气候灾害？毕竟，不够全面与深入的认识，会让人因失去信任而放松本应保持的警惕。

那么，究竟是什么AMOC？为什么它对气候变化这么重要？科学界对它的认识有哪些共识与争议？我们有必要对这些问题深入探究，才能透过喧哗和强动的迷雾，通过对AMOC演变历史的客观、理性和冷静的认识，采取建立在科学认知基础上的有力行动，从而避免灾难性后果的发生。

气候突变是“灰犀牛”而非“黑天鹅”

“人猿相揖别。只几个石头磨过，小儿时节。铜炉中翻火焰，为何时猜得？不过几千年寒。”毛泽东同志这

首《贺新郎·咏史》道出了几千年人类文明在漫漫历史长河中的短暂。

且不提人类文明的“几千寒热”放到地球数十亿年的演变历史中是多么短暂，即使与过去百万年间历次冰期和间冰期的旋回相比，也不过是短暂的插曲。

事实上，从气候演变角度看，过去五千年，世界气候总体经历了由温暖到寒冷的变化过程，平均气温下降了2℃至3℃。但就在过去一千年中，中世纪暖期和小冰期的交互嬗变，也给人类带来了“流遍郊原血”的杀戮战争。不过，从总体上看，人类文明快速发展的这五千年是在温度最为适宜的全新世气候条件下实现的。

其实，哪怕我们只把人类这五千年文明发展历史放到过去八万年的历史背景中看，同样也很容易得出这样的结论：适合人类生存的气候条件绝非恒久不变的气候常态，在很大程度上，它恰恰可能只是个例外，我们完全没有理由认为这会理所当然地长久持续下去。

为何要放到八万年的背景下审视？因为自上世纪八十年代以来，通过格陵兰冰芯和我们南京石笋等古气候观测手

从气候突变看“双碳”战略

全球变暖本身会带来气候灾害，比如南北两极冰盖融化、海平面上升、极端天气多发等，人类已开始感受到这一切跌之痛。作为减缓气候变化的关键措施，“双碳”战略的意义不言而喻。如果再发生气候突变，尤其是突然变冷的前景考虑在内，这一战略的意义将更为重大。

地球气候变化历史告诉我们，作为自然规律，无论是下一次冰期，还是“D-O旋回”，气候突然变冷终究会再次发生，这是人类意志所不能阻挡的，人类对此只能适应，或对其应对调节。

然而，我们不能忘记，埋藏于地下的石油和煤炭是地球演化几千万乃至上亿年的产物。按照现在的消耗方式，人类可以在短短几百年里把它们消耗殆尽，并给气候带来巨大可知和

不可知的风险和危害。如果人类坚定持久地采取减排行动，让更多石油和煤炭继续深藏地下，那么，当寒冷气候不可避免地再次来临时，人类还可利用这些储藏在地底的石油和煤炭，将二氧化碳排放到大气中。那时的温室效应引起的将不是全球变暖的担忧，而是减轻全球寒冷的喜悦。

所以，除了减缓当前气候变暖的危害，“双碳”战略也将为后世多保留一份调节寒冷气候的工具和手段。

我们对这八万年间全球不同地方气候的演变已经有了相当详细的了解。

这八万年间，地球气候经历了在1.7万至2.2万年前的末次冰盛期(LGM)向间冰期全新世温暖气候的转折。同时，这八万年间又充斥着千年尺度的气温上下起伏和振荡。这些被称为“D-O旋回”的千年尺度冷暖气候交替，除了能在北冰地区引起10℃以上的温度变化外，还能导致整个北半球气候的冷热变化。

值得注意的是，过去八万年间，数十次“D-O旋回”并不是均匀缓慢变化的。这个过程经常以在短短几十年里从寒冷状态(称为“冰阶”)突然增暖到温暖状态(称为“间冰阶”)开始，再经过一个相对缓慢的降温阶段，接着又在几十年内突然大幅降温，最终重新回到冰阶状态而结束。

这些发生在几十年间的气候突然翻转，被称为“气候突变”。现在人们广泛认识到的气候突变，很有可能就是气候的常态，是“灰犀牛”，而不是“黑天鹅”。

距离人类文明最近的一万多年中，地球经历了从末次冰盛期到全新世的气候转变。其中，最近的一次类似冰阶、程度却轻微得多的变冷事件，是发生在1.2万多年前并持续了一千多年的新仙女木事件。

新仙女木事件的发生正值地球表面气温上升的冰消期，地球上的生命开始重新繁茂，可突如其来地变冷导致更多物种的灭绝。当时，人类通过工具的使用，学会了钻木取火，终于通过严寒的考验，迎来了近五千年的文明高速发展。

尽管最近一万年来，地球未曾发生过剧烈的冷暖气候突变，但既然这种气候突然翻转在过去几万年发生了数十次，可以说这是气候历史变化的常态，谁又能保证它在未来不会再次发生？

通过古气候观测、气候模拟和动力学理论研究的有机结合，美国科学家威廉·布鲁克于1991年提出非常概括性但形象生动的全球海洋运输带概念图。他于1997年在美国《科学》杂志撰文指出，AMOC是气候系统的“阿喀琉斯之踵”，温室气体的持续增加可能触发新一轮的气候突变。而当地球上的人口达到110亿至160亿时(现在已经超过80亿)，这样的气候突变将给人类带来极大危险。

温盐环流 气候系统也有“阿喀琉斯之踵”

自上世纪40年代起，经历了突飞猛进的现代气象学和海洋学，分别在大气环流和海洋环流的认识上初步建立起符合物理学基本原理的理论模型。

通过数值模拟和计算，科学家在上世纪五十年代后期开始了建立气候模式的大胆尝试。获得2021年诺贝尔物理学奖的美籍日裔气候学家真锅淑郎也是因此而开始了他的研究生涯。当时，科学家们已经认识到，气候是大气和海洋耦合起来运动的产物。

与此同时，观测技术和手段的进步也使人们对大气和海洋运动的认知更加全面和深入。到上世纪七十年代中叶，人们进一步认识到，我们所能感受到的点滴气候变化，实则是由大气圈、海洋、陆地、冰冻圈相互影响的结果。在此基础上，科学家提出了由这些圈层及其相

互作用所构成的气候系统的重要概念。

到了上世纪八十年代，包括中国科学家在内的国际科学界进一步在气候系统基础上加入生物圈，提出了地球系统的概念。他们认为，地球上不同地方的气候变化并不是孤立的现象，而是通过地球系统各个圈层之间的耦合作用而产生内在联系。在此认识基础上，科学家开始了国际性的全球气候变化研究。

在此历史背景下，从格陵兰冰芯、黄土等不同资料中观测的气候突变现象得到了全球性的关注：除了北冰地区，气候突变现象也出现在其他地方。

最早在上世纪六十年代的理论研究和八十年代耦合气候系统的模拟研究中，斯托梅尔和真锅淑郎等科学家提出了AMOC(当时被称为“温盐环流”)存在两个或以上的平衡态。而AMOC在不同平衡态之间的转换，则与北半球乃至全球气候状态转换相关联。

比如，当北半球或全球变暖时，一方面海水温度上升会引起海水变轻，另一方面由于极地海冰和陆地冰盖的融化和降水增加，上层海水会进一步变淡。在这样的综合作用下，处于高纬度的上层海水往海底下沉就会变得越来越弱，甚至消失。伴随着AMOC的这种变化，气候系统通过内部反馈和调整，就会引起北半球乃至全球性的气候变冷。

通过古气候观测、气候模拟和动力学理论研究的有机结合，美国科学家威廉·布鲁克于1991年提出非常概括性但形象生动的全球海洋运输带概念图。他于1997年在美国《科学》杂志撰文指出，AMOC是气候系统的“阿喀琉斯之踵”，温室气体的持续增加可能触发新一轮的气候突变。而当地球上的人口达到110亿至160亿时(现在已经超过80亿)，这样的气候突变将给人类带来极大危险。

AMOC的强度每年都有不同，但变化幅度一般不超过20%。由于观测时间太短，目前的观测还不足以观察到由于全球变暖而导致的AMOC强度减弱。然而，从现在所观测到的AMOC强度看，IPCC的结论可能性更大，即“AMOC虽然会减弱，但可能不会在本世纪内关闭”。

过去近二十年对AMOC的直接观测表明，AMOC的强度每年都有不同，但变化幅度一般不超过20%。由于观测时间太短，目前的观测还不足以观察到由于全球变暖而导致的AMOC强度减弱。然而，从现在所观测到的AMOC强度看，IPCC的结论可能性更大，即“AMOC虽然会减弱，但可能不会在本世纪内关闭”。

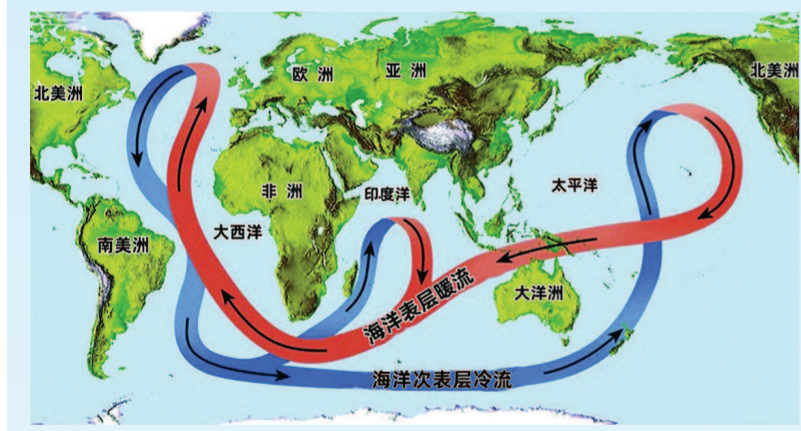
由于AMOC对全球气候变化十分重要，因此对其开展长期稳定的监测非常必要。从2014年至今的观测数据看，AMOC仍保持着较高强度，并没有很快崩溃的迹象。但从气候突变的角度来说，既然是突变，就不能用线性的趋势来外推，所以AMOC在本世纪内关闭的可能性也不能完全被排除。

由于科幻影片《后天》和新闻媒体的报道，人们普遍接受AMOC崩溃可能带来的灾难性后果。如果这一气候突变真的在本世纪内就发生，那么这就是一个迫在眉睫的危机。笔者认为，这种观点有利于让大家取得共识，果断采取减缓气候变化的行动，以防止“后天”这样的灾难发生。不过，如果AMOC的威胁并非如此迫在眉睫，那么过于夸张的渲染也会使人们对气候科学产生不信任。

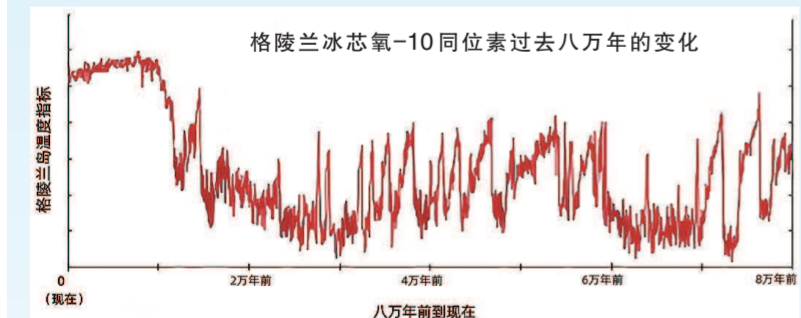
从科学角度看，真正的危险并不在于AMOC的崩溃会很快发生，而是在于它很可能发生，而且发生时间越晚，其危害程度越高。因为，地球人口会不断增长，AMOC崩溃得越晚，气候突变导致的粮食减产和极端天气所造成的损失就会越严重，届时受灾人口也会越多，对整个人类社会的冲击也愈加剧烈。

由此可见，AMOC的关闭是一种真实存在的威胁——若非迫在眉睫，就是危害更大。所以，在几乎可以确认全球变暖对AMOC确有减弱作用的前提下，无论AMOC关闭会不会在本世纪内发生，都需要人类立刻且持久地采取行动以减缓气候变化。

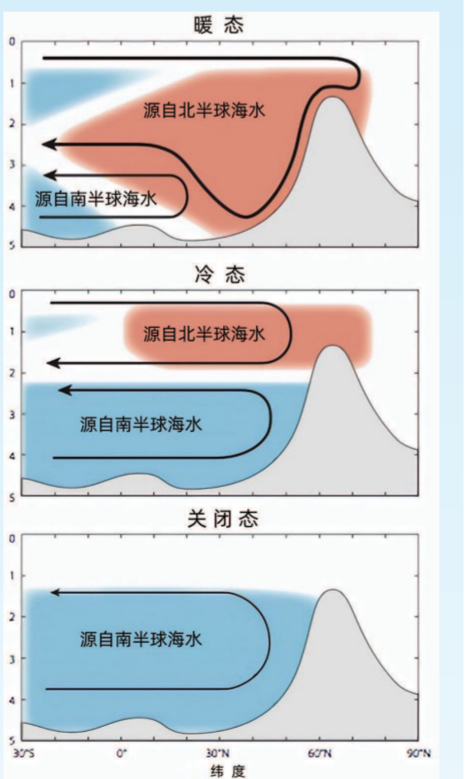
(本文参考了国内外多位科学家对AMOC的长期研究、介绍和综述，特此致谢)



AMOC示意图(图片来源:astronomyonline)



格陵兰冰芯氧-10同位素过去八万年的变化



AMOC三个平衡态示意图

动。1800年，他在一篇文章中明确引用埃利斯的测量数据来证明深海必定存在从极地到赤道海水流动。

随后，通过德国科学家亚历山大·冯·洪堡的推广，以及俄国物理学家海因里希·楞次等多位科学家的不断研究和探索，大西洋经向翻转环流的图像逐步建立起来。上世纪五十年代末和六十年代初，美国物理海洋学家亨利·斯托梅尔和他的合作者一起建立了全球海洋深层环流的理论模型。

作为地球主要的海洋环流系统之一，AMOC能将温暖而偏咸的海水从低纬度向高纬度输送。在到达高纬度以后，因为冷却作用和海水表面大量蒸发，上层海水温度降低且盐度增加，因而海水密度增加，在拉布拉多海和北冰海等处下沉。接下来，深层冷水主要沿着北大西洋西部底部掉头向南，一直流至南半球的南大洋，再通过复杂的海洋动力过程上升到海洋的近表层，继续往北流，从而形成一个闭合的环流圈。

AMOC是如何被发现的？

十八世纪中叶，正是欧洲殖民者从非洲贩运黑人奴隶到欧洲和美洲的鼎盛时期。

1751年的一天，英国从事黑奴贸易的船主哈利法克斯伯爵的船长亨利·埃利斯给一位名叫斯蒂芬·黑尔斯的牧师写信，描述他在热带大西洋上的一次深海温度测量过程。

这位黑尔斯牧师给埃利斯设计并提供了船上使用的桶式海水测温器。虽然这个测温器只是一个家常用桶，但其顶部和底部都加装了活门调节阀——当桶在海里下沉时，活门打开，而当桶上升时，活门就会关闭。这样，这桶就可以用来提取不同深度的海水。埃利斯船长还在桶里装上了温度计，把测温器固定在测深索上放到海洋中，从110米到1629米的不同深度提取海水，并测得其温度。

他发现，在110米至1189米之间深度的海水温度随深度逐渐下降，但在1189米处，海水温度骤升到11.7℃，而继续再深入到1629米处，温度也未见有进一步下降。当时，洋面温度是28.9℃。

黑尔斯牧师把这封信转交给了位于英国伦敦的皇家学会保存。而此后，埃利斯船长似乎也没有再做进一步的测量，更不可能意识到他的这次测量在科学上的意义。在信中，他只提到了用桶式测温器提取的深海冷水，给他和同伴们在炎热的海上旅途中，带来了洗冷水澡和冷却葡萄酒的快乐。

直到1797年，物理学家、英国伦敦福德伯爵杰明·汤普森才在一篇名为“流体中热的传播”的文章中推测，在海洋深层有海水从极地向赤道流