

▶ 前沿交叉研判



气候-生态突变 前沿交叉研判研究报告

气候-生态突变前沿交叉研判 项目组

中国科学院学部资助

2024

项目指导组

郭正堂 朴世龙 于贵瑞 周忠和 王会军 侯增谦 底青云

报告起草组

郭正堂 朴世龙 杜 鹏 张理茜 王 林 张 科 张扬建 张仲石
汪 涛 沙小晶

项目参与人员（排名按拼音顺序）

丁金枝 方克艳 冯晓娟 何 飞 侯居峙 胡 彬 李小强 梁尔源
鹿化煜 孟庆任 牛书丽 谭 宁 陶福祿 万 博 王国安 王艳芬
徐 上 徐志伟 许晨曦 燕 青 杨晓光 杨 威 姚玉鹏 于 晟
袁训来 赵 艳 周立华 周天军

摘要

气候系统会发生突然的、快速的、大幅度的、超出人类承受能力的变化。当一个临界点被触发之后，可能会像推倒多米诺骨牌一样，推动地球气候系统倒向另外一个临界点，放大气候变化的影响，从而引起气候、人类和生物系统发生大规模灾难甚至是毁灭级的气候破坏。因此，理解气候-生态突变并作出适应性变化成为当前应对气候变化的核心关键。

目前，生态系统对气候变化及极端因素事件的响应和其应对突然生态变化的潜力成为国际学术前沿，受到持续关注，并催生新的研究机遇。“气候-生态突变”这一主题涉及现代气候学、古气候学、生态学、地质学、地理学、数理科学、信息科学等学科领域，是一个多学科交叉的前沿领域。在科学意义层面，气候-生态突变研究涉及多学科交叉，有助于深化对全球气候变化的理解，并促进地球复杂系统演化特性的研究。在战略价值层面，该研究可保障我国应对气候变化政策和社会经济决策的科学性，提升我国适应和应对气候变化实际行动的能力，促进发展预测预警技术方法以服务社会经济发展。

气候-生态突变研究涉及多尺度、多层次和多手段的方法。从时间尺度来看，气候、生态变化领域涉及季节、年际、十年或百年甚至更长的直到地质时间尺度的宽广时域；从空间尺度来看，气候、生态变化领域涉及流域、区域、全球等不同尺度。时空尺度跨度较大是该领域的突出特征，不同时空尺度的要素存在相互影响和响应，这也进一步加剧了该领域研究的复杂性。不同尺度的研究方法不尽相同，呈现交叉融合和日趋复杂的趋势。

依据科学性、基础性、可能性等相关准则，围绕“弹性变化时空过程-突变阈值及机理-科学识别突变-预警与预测”的逻辑，“气候-生态突变”领域的关键科学问题与核心技术问题包括：

- （1）不同时空尺度下气候和生态系统突变的模式是怎样的，尤其是突变中各要素之间的相互作用关系如何？
- （2）不同时空尺度的突变之间的级联作用和远程耦合关系是怎样的？
- （3）如何量化系统弹性变化及突变阈值，进而揭示系统突变的特征和规律？
- （4）如何有效融合监测短期数据和古环境数据，结合模型模拟等多学科交叉

研究，定量不同时空尺度下气候-生态系统突变的阈值和弹性？

（5）如何深入揭示驱动-响应关系，尤其是厘清系统线性渐变、非线性突变的驱动机制？

（6）多重驱动力长期相互作用下，系统发生突变的过程是怎样的？

（7）如何厘清不同气候-生态系统反馈及互馈关系？特别是在长期变化过程中，系统正负反馈机制的改变过程和机理是什么？

（8）如何准确识别地球系统临界要素？如何确定临界要素的阈值？

（9）如何识别我国的关键临界要素并揭示其突变机制？如何评估当前系统的突变风险？

（10）如何科学预测未来气候和生态突变事件风险，进而采取相应的措施？

（11）如何确立不同生态系统在气候和人类活动驱动下的突变阈值、边界范围及典型系统的生态安全空间？

（12）如何应对气候-生态突变？

（13）如何利用突变的积极影响，规避消极影响？

最后，报告从数据观测平台与技术、学科建设与人才培养两个方面提出保障措施，以推动气候-生态突变研究。一是要建立长期、稳定的数据观测平台，加强观测系统部署，发展“天-空-地-海”立体协同监测技术，构建气候-生态突变基础数据库。二是要促进气候学、生态学、地质学等学科的交叉融合，培养战略科学家、战术科学家及青年后备人才，加强国际合作，发起全球性研究计划。

Abstract

The climate system can undergo sudden, rapid, and drastic changes that exceed human tolerance. Once a tipping point is triggered, it may set off a chain reaction, much like a domino effect, propelling the Earth's climate system toward another tipping point, thereby amplifying the impact of climate change and potentially causing large-scale disasters or even catastrophic devastation across climate, human, and biological systems. Therefore, understanding climate-ecological abrupt changes and implementing adaptive adjustments are crucial to addressing climate change.

At present, the response of ecosystems to climate change and extreme events, as well as their capacity to cope with sudden ecological changes, have become the cutting edge of international academic research, attracting continuous attention and spawning new research opportunities. The theme of “climate-ecological abrupt change” involves a wide range of disciplines, including modern climatology, paleoclimatology, ecology, geology, geography, mathematical and physical sciences, and information science. It is an interdisciplinary frontier field. From a scientific perspective, research on climate-ecological abrupt changes involves interdisciplinary integration, which helps deepen the understanding of global climate change and promotes the study of the evolutionary characteristics of the Earth's complex systems. Strategically, this research can ensure the scientific basis for China's climate change policies and socio-economic decision-making, enhance China's ability to adapt to and combat climate change, and foster the development of predictive and early warning technologies that support socio-economic development.

Research on climate-ecological abrupt changes involves multi-scale, multi-level, and multi-method approaches. Regarding temporal scale, the field of climate and ecological changes spans a broad temporal domain from seasonal, interannual, decadal to centennial and even geological time scales. Spatially, it encompasses different scales ranging from river basins to regions and the globe. The large span of spatial and temporal scales is a prominent feature of this field, with elements at different scales interacting and

responding to each other, which further increases the complexity of research. Research methods at different scales vary and exhibit a trend of cross-integration and increasing complexity.

Based on the principles of scientific rigor fundamental importance, and practical feasibility, the key scientific issues and core technological problems in the field of “climate-ecological abrupt changes” revolve around the logic of “spatial-temporal process of resilience change - tipping point and mechanism of abrupt changes - scientific identification of abrupt changes - early warning and prediction.” These include:

1. What are the patterns of abrupt changes in climate and ecosystems at different spatial and temporal scales, especially the interactions among various elements during these abrupt changes?

2. What are the cascading effects and remote coupling relationships between abrupt changes at different spatial and temporal scales?

3. How can we quantify the changes in system resilience and tipping points to reveal the characteristics and patterns of abrupt changes in the system?

4. How can we effectively integrate short-term monitoring data with paleoenvironmental data, and combine this with multi-disciplinary research methods such as model simulation, to quantitatively determine the tipping points and resilience of climate-ecological abrupt changes at different spatial and temporal scales?

5. How can we thoroughly reveal the driving mechanisms of linear gradual changes and nonlinear abrupt changes in the system, especially clarifying the system’s response mechanisms?

6. What is the process of abrupt changes in the system under the long-term interaction of multiple driving forces?

7. How can we clarify the feedback and mutual feedback relationships among different climate-ecological systems, especially the changes in positive and negative feedback mechanisms during long-term variations?

8. How can we accurately identify the critical elements of the Earth's system and determine their tipping points?

9. How can we identify the key critical elements in China and reveal their mechanisms of abrupt changes? How can we assess the current system's risk of abrupt changes?

10. How can we scientifically predict the risks of future climate and ecological abrupt change events and implement corresponding measures?

11. How can we establish the tipping points and boundary ranges of different ecosystems under the drivers of climate and human activities, as well as the ecological safety space of typical systems?

12. How can we respond to climate-ecological abrupt changes?

13. How can we leverage the positive impacts of abrupt changes and mitigate the negative impacts?

Finally, the report outlines safeguard measures to promote research on climate-ecological abrupt changes in the following two aspects:

First, data observation platforms and technologies: Establish long-term and stable data observation platforms, enhance the deployment of observation systems, develop “space-air-ground-sea” integrated monitoring technologies, and construct a foundational database for climate-ecological abrupt changes.

Second, academic discipline development and talent cultivation: Promote the integration of disciplines such as climatology, ecology, and geology, cultivate strategic and tactical scientists as well as promising young talent, strengthen international cooperation, and initiate global research programs.

目 录

摘要	I
Abstract	III
引言	1
一、科学意义与战略价值	3
(一) 气候-生态突变研究的科学意义	3
(二) 气候-生态突变研究的战略价值	4
二、理论演进与研究特点	6
(一) 气候-生态突变研究的理论内涵	6
(二) 多尺度、多层次和多手段的研究方法	12
(三) 数据成为未来研究的关键要素	16
(四) 气候-生态突变的检测方法和预警技术	18
三、关键科学问题与核心技术问题	20
(一) 气候-生态系统突变的过程、模式和规律	20
(二) 气候-生态系统突变机理研究	21
(三) 识别气候-生态系统关键的突变要素	22
(四) 评估与预测气候变暖背景下生态系统安全及突变风险	24
四、保障措施	26
(一) 数据观测平台与数据分析技术	26
(二) 学科建设、人才培养以及国际合作	27

引言

工业革命以来的人类活动,特别是大量消费化石能源所产生的CO₂累积排放,导致大气中温室气体浓度显著增加,加剧了以变暖为主要特征的全球气候变化。气候变化带来的温度升高、海平面上升、极端气候事件频发给人类生存和发展带来严峻挑战,同时也对全球自然生态系统产生严重影响,对全球粮食、水、生态、能源、基础设施以及民众生命财产安全构成长期重大威胁。

2022年2月,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布报告指出,今后二十年,随着全球平均升温1.5℃,世界会面临不可避免的多重气候危害,其中一些影响将是不可逆转的,迫切需要采取紧急且更有力的行动来应对气候风险。2022年9月,英国埃克塞特大学全球系统研究所所长提摩西·莱顿(Timothy Lenton)教授团队在*Science*撰文指出,如今全球已升温1.1℃至1.2℃,气候临界点(tipping point)的风险已经逐渐凸现,格陵兰冰盖、西南极冰盖、低纬珊瑚礁、北半球冻土、巴伦支海海冰等全球5个临界点处于危险区。如果全球升温达到1.5℃,可能会触发4个临界点,并使得另外5个临界点进入危险区;若全球升温达到2℃以上,将触发更多临界点^[1]。2022年12月,经济合作与发展组织(OECD)发布题为《气候临界点为有效政策行动提供了见解》(Climate Tipping Points Insights for Effective Policy Action)的报告,呼吁改变当前气候政策对临界点的处理方式。2023年3月,IPCC发布了其第六个评估周期的综合报告(AR6),重点关注气候变化造成的损失和损害及其在未来的持续影响,而最脆弱人群与生态系统首当其冲。

气候系统会发生突然的、快速的、大幅度的、超出人类承受能力的变化。当一个临界点被触发之后,可能会像推倒多米诺骨牌一样,推动地球气候系统倒向另外一个临界点,放大大气变化的影响,从而引起气候、人类和生物系统发生大规模灾难甚至是毁灭级的气候破坏。因此,理解气候-生态突变并作出适应性变化也成为当前应对气候变化的核心关键。

为此,“气候-生态突变”课题组组织开展了多次不同层次、不同规模、不同领域的研讨,并针对985高校、相关专业院校、中国科学院资环相关研究所的330

^[1] Armstrong McKay D., Staal A., Abrams J.F., et al. Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*. 2022.377(6611). DOI: 10.1126/science.abn7950.

位优秀科学家代表发送问卷（回收 140 份，其中有效问卷 130 份），调查我国地球系统重要的突变临界要素。通过研讨和调查来充分理解气候-生态突变领域的关键科学问题和核心技术问题，进而形成此报告。报告旨在呼吁学术界加强气候-生态突变研究，开展生态系统突变对气候变化响应的监测、解释和预测，以此提升我国生态复原力，建设社会主义生态文明。

一、科学意义与战略价值

（一）气候-生态突变研究的科学意义

目前，生态系统对气候变化及极端因素事件的响应和其应对突然生态变化的潜力成为国际学术前沿，受到持续关注，并催生新的研究机遇。国际过去全球变化计划（PAGES）将“地球系统中的阈值、拐点及多平衡态”作为多学科研究的重点方向；2021年英国皇家学会将“气候弹性和适应性”作为碳中和12个重大科学技术问题之一；联合国可持续发展纲要、巴黎气候变化公约等国际合约中均把弹性作为重要的议题；2020年1月27日，《英国皇家学会哲学会刊B辑：生命科学》发表题为《气候变化与生态系统：威胁、机遇与解决方案》的专刊。

近年来，我国也牵头组织了多个气候、生态、环境领域的国际大科学计划。2009年由姚檀栋院士牵头发起的“第三极环境”国际计划（TPE）已为研究第三极地区环境的科学家提供一个国际性交流平台，在国际上产生重大影响。科技部积极推动“三极环境与气候变化”（Environment and Climate Change at the Three Poles）国际大科学计划，旨在构建三极环境与气候天空地冰海一体化观测系统，揭示三极多圈层环境与气候变化机理，预测、预估三极与全球气候环境的未来，为应对气候变化、保障极地安全、构建人类命运共同体提供科技支撑。2017年由傅伯杰院士和 Mark Stafford Smith 博士共同倡导发起的全球干旱生态系统国际大科学计划（Global Dryland Ecosystem Programme, Global-DEP）得到美国、澳大利亚、欧洲地中海沿岸国家及非洲、中亚等全球主要干旱地区的国家和地区的积极响应。该计划完成了全球干旱区生态系统大科学计划的《科学报告》，揭示了干旱区社会-生态系统如何响应全球环境变化，以及可持续目标下干旱区生态系统韧性提升和可持续发展的路径。

气候-生态突变既涉及时间尺度，也涉及空间尺度。从时间尺度来看，气候、生态变化领域涉及季节、年际、十年或百年甚至更长的直到地质时间尺度的宽广时域；从空间尺度来看，气候、生态变化领域涉及流域、区域、全球等不同尺度。时空尺度跨度较大是该领域的突出特征，不同时空尺度的要素存在相互影响和响应，这也进一步加剧了该领域研究的复杂性。为了更进一步的研究和明确突变及渐变的关系，在本报告中，我们将“气候-生态突变”研究领域的时间尺度暂时界定为

万年尺度，同时希望能架起古气候数据与模型之间的桥梁，从古气候变化规律中寻找未来全球变化的趋势。在上述范畴下，气候-生态突变研究的科学意义至少体现在以下两方面：

1、促进对全球气候变化的科学理解。“气候-生态突变”这一主题涉及现代气候学、古气候学、生态学、地质学、地理学、数理科学、信息科学等学科领域，是一个多学科交叉的前沿领域，对于学科发展具有重要意义。气候-生态突变前沿领域的研究将气候变化与生态系统耦合作为一个复杂的、不断适应的整体系统来理解，将会推动气候学、生态学、地理学等诸多相关学科的交叉融合，提升我国在国际全球变化科学领域内的科研水平及学术地位。

2、更深入地了解地球复杂系统的演化特性。从不同的尺度去看一个复杂系统，它既可能从大量的无序中产生有序，又可以从大量的有序中产生出混沌现象。目前，针对不同尺度下生态系统突变特征的研究方法已成为现阶段研究的重点内容。在种群、群落等较小尺度上，一般通过实验测定相关指标变化来研究生态系统突变特征，而随着研究尺度增加，系统也越复杂，对应的研究方法随之趋于综合化的方式。在生态系统尺度上，大型模拟实验和脆弱性结构分析等方法相对广泛应用于揭示生态系统的状态转换；在区域尺度上，空间代替时间和卫星遥感监测是用于区域尺度上监测生态系统突变现象常见的方法；而在全球尺度上，探讨生态系统突变多采用模型模拟或者全球实地调研和遥感观测相结合的方法。“气候-生态突变”领域的研究涉及不同的时空尺度，可以有效地将不同尺度的研究方法进行整合，进而更深入理解跨尺度、跨层次的地球复杂系统涌现问题，促进范式变革和科学进步。

（二）气候-生态突变研究的战略价值

气候-生态突变不仅是科学问题，同时也涉及能源、环境、经济、社会和政治问题，受到各国政府、学术界与公众的极大关注，其战略价值至少体现在以下三方面：

1、气候-生态突变研究可保障我国应对气候变化政策和社会经济决策的科学性。针对气候变化，各国政府出台了经济、管制、技术等多方面的政策，《巴黎协定》《联合国气候变化框架公约》等都突显了各国应对气候变化的决心。2020年9月22日，国家主席习近平在第75届联合国大会上宣布，中国力争2030年前CO₂排

放达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和目标。不同的碳达峰、碳中和路径会导致不同的 CO₂ 浓度轨迹，进而产生不同的气候-生态后果。气候-生态突变的研究有助于我国更好地履行《联合国气候变化框架公约（UNFCCC）》及其相关协议，减小我国在减缓与适应未来气候变化过程的社会经济成本，为双碳目标的实现提供理论指引和实践指导。

2、气候-生态突变研究可提升我国适应和应对气候变化实际行动的能力。世界气象组织发布的《2022 年全球气候状况》临时报告指出，2022 年，高温、干旱和洪水等极端天气灾害给全球数百万人造成影响，带来的经济损失达数十亿美元。极端天气事件再次警示人们应对气候变化、提升抗风险能力必要而紧迫，我们必须采取更多实际行动来减少温室气体排放，监测气候变化，降低气候变化带来的影响。气候、生物多样性与人类之间存在相互依存性，生态系统通过其在碳循环、水循环和其他生物地球化学循环中的作用在气候系统中发挥着积极作用。如果以一种强有力的生态系统和生物多样性科学的方式进行可持续管理，则生态系统可以成为人类复原力的主要来源，并能够支持人类社会适应环境的迅速变化。气候-生态突变研究有助于评估未来气候变化对生态系统的影响及其导致的人类生存风险，为人类经济社会活动调控和环境变化应对适应提供理论和技术支撑。

3、气候-生态突变研究可促进发展预测预警技术方法以服务社会经济发展。预测气候-生态突变虽然非常困难，但通过监测一些指标可以判断气候变化及生态系统是否临近重大突变阈值，从而有效预警气候和生态系统的重大突变。发展预测预警技术和平台可减轻灾害事件对我国农业发展、生态恢复、经济建设等方面的负面影响，有效提升我国生态复原力。

二、理论演进与研究特点

（一）气候-生态突变研究的理论内涵

突变是指系统对较小的外界条件变化产生快速、剧烈的不可逆响应。气候-生态突变主要指气候变化引起的生态突变，以及生态系统对气候变化的反馈和响应。

突变理论（Catastrophe Theory）的渊源可以追溯到数学家庞加莱（Poincare），他在一个世纪前就已指出常微分方程的解有三个要素：结构稳定性、动态稳定性和临界集^[2]。当时的数学界并未接受庞加莱的思想，直到1972年，法国数学家勒内·托姆（R. Thom，菲尔兹奖获得者）在《结构稳定性和形态发生学》中强调系统从一种稳定状态进入不稳定状态，随着参数的变化，又使不稳定状态进入另一种稳定状态，系统状态就在这一刹那间发生突变。突变理论与混沌学中的分岔现象密切相关，尤其是鞍结分岔，它刻画动力系统在双（多）平衡态之间的不可逆临界转换^[3]。突变理论以拓扑学为工具，以结构稳定性理论为基础，用数学模型来描述连续行动突然中断出现质变的过程。突变理论从创始之初就被用于解决多个领域的应用问题。

根据IPCC报告，气候突变（abrupt climate change）是指气候从一种稳定态（或稳定持续的变化趋势）跳跃式和快速地（几十年或更短）转变到另一种稳定态（至少稳定几十年或稳定持续的变化趋势）的现象，它可对人类和自然系统产生严重干扰^[4]。早在突变理论建立之前，气候学家就揭示出气候系统状态变化存在不连续性和跳跃性的特征。气候学界对突变的研究最早始于古气候学里长时期的代用资料分析。1990年以前，古气候学界关注冰期-间冰期旋回，对地球气候系统突变知之甚少；后来北大西洋和格陵兰冰芯的研究表明，气候系统在数十年内会发生变幅很大的状态突变（可达10℃左右）。例如，西北欧许多湖泊沉积氧同位素、花粉和昆虫种群记录表明，发生在14C年代11000~10000年B.P.的新仙女木事件开始时降温和结束时升温的过程迅速，各经历了约50年^[5]，期间陆地年平均气

^[2] 杨梅学,姚檀栋.气候突变及其研究进展.大自然探索,1999(02):30-34.

^[3] Scheffer, M., Bascompte J., Brock W. A., et al. Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 2009,461, 53-59.

^[4] 赵宗慈,罗勇,黄建斌.全球变暖与气候突变.气候变化研究进展, 2021,17(01):114-120.

^[5] Atkinson T.C., Briffa K.R.,Coope G R .Seasonal temperatures in Britain during the past 22000 years reconstructed using beetle remains.*Nature*.1987.325:587-592.

温降低 5~12℃。而现代气候学研究一般将气候突变与人类活动联系起来,借助气候模式考虑人为排放所引起的地球系统控制参量(关键因子是温度)的变化对地球区域系统气候突变的触发效应。

长期以来,大量的古气候地质记录显示在末次冰期发生了广泛的气候突变事件。发生在大约 56 Ma 前后,由迅速的温室气体释放所引发的古新世-始新世极热事件(PETM)就是古气候记录中最显著的气候突变之一,可为理解人类排放温室气体所引起的全球变暖提供重要参考。气候变暖是冰盖消融的主要原因,但是气候变暖究竟能造成多大的冰盖消融,可以从古气候的研究中得到启示。末次间冰期(130~116 kaBP)全球平均温度比现代高 0.7℃,北半球高 1.3℃,格陵兰高 5℃;冰盖的高度可能比现代低 500m,格陵兰南部可能无冰盖;海平面比现代高 2.2~3.4m,由此可以对变暖与冰盖消融之间的关系得到一个量的认识。此外,千年气候模拟表明,中世纪气候异常时湿润,小冰期时干旱,现代暖期湿润。这说明全球夏季风降水对气候变暖的分布是敏感的。

生态系统也会发生突变。当外部干扰达到一定程度,生态系统一旦无法继续维持其内部稳定状态,突变就会发生。20 世纪 70 年代,突变理论和恢复力理论结合,逐渐应用于解释生态系统突变行为。突变产生于演变的累积或突发事件的影响。随着时间的推移,在资源环境要素与生物因素的相互作用下,生态系统中的生物群落不断发生变化,生态系统的外貌和内部结构都会改变^[6]。在这种改变过程中,由于资源环境要素缓慢变化累积到一定程度(如放牧强度)或者发生骤变(如突发的极端气候事件或者自然灾害),生态系统结构和功能发生了转折性的变化过程即为生态系统突变^[7]。生态系统突变最突出的特点是生态系统结构包括物种组成、生态系统水平结构或者垂直结构发生重大改变,进而使生态系统功能发生改变。

在外力的作用下,气候-生态系统是否会发生突变与弹性密切相关。弹性这一概念最初被物理学家表示物体发生弹性形变后的恢复力。1973 年生态学家霍林将弹性概念引入生态系统研究,将其定义为“系统吸收状态变量、驱动变量以及其他

^[6] 徐兴良,于贵瑞.基于生态系统演变机理的生态系统脆弱性、适应性与突变理论.应用生态学报,2022, 33 (03): 623-628.

参数的变化后,仍能保持原有状态的能力”^[7]。近二十多年来,弹性的定义和内涵不断丰富和发展,研究对象由单纯的生态系统转向复杂的社会-生态系统^{[8][9]},研究尺度由单一尺度转向跨时空尺度^{[10][11]}。生态弹性研究关注的角度从过去侧重系统恢复时间/速度对应的保持和恢复能力,转向侧重系统抗冲击能力对应的持久性和稳健性,最后转向关注系统持续和发展对应的适应、转型、学习和创新能力^{[8][12]}。在气候学领域,学术界和决策机构关于气候系统弹性的准确定义和相关概念仍在构建过程中^[13]。例如,当前气候弹性的研究主要关注社会-生态系统在气候变化影响下维持自身完整结构和功能的能力。除了单一气候子系统的恢复力和稳定性,扰动信号在各子系统之间传递过程中的一系列反馈过程,会放大或抑制初始扰动的影响^[14]。也就是说,即使影响超过该子系统自身的弹性阈值,整个系统仍然可以通过其他子系统的关联性和适应性调整来维持稳定;同样地,一个子系统临界点的突破,也可能会增大其他系统突破临界点的风险。

复杂系统理论指出一个非线性系统里存在着多个稳态,在系统控制参量变化至某一临界点,或者该参量未到临界点但外部随机扰动足够强时,系统可以从一个稳态不可逆地转换至另一稳态,即稳态转换(regime shift),一般表现为突变前后状态维持的时间远长于突变发生的时间^[15]。气候系统外强迫(如温室气体排放、火山和太阳活动等)可以导致地气辐射收支的变化,当地球系统的控制参量(关键因子是温度)超过一定阈值时,会触发气候系统内部的冰-反照率、水汽反馈等正反

^[7] Holling, C.S. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 1973, 4(1):1-23.

^[8] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global environmental change*. 2006, 16(3):253-267.

^[9] Carpenter S., Walker B., Anderies J. M., et al. From metaphor to measurement: resilience of what to what?. *Ecosystems*. 2001, 4(8):765-781.

^[10] Walker B., Salt D.. Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in A Changing World. Washington: Island press. 2006.

^[11] Gunderson L.H., Holling C.S. Panarchy: Understanding Transformations In Human And Natural Systems. Washington: Island press. 2002.

^[12] 周晓芳. 社会-生态系统恢复力的测量方法综述. *生态学报*. 2017, 37(12):4278-4288.

^[13] 陈德亮,秦大河,效存德,等.气候恢复力及其在极端天气气候灾害管理中的应用. *气候变化研究进展*, 2019, 15(2): 167-177

^[14] 方修琦. 社会-生态弹性视角下的历史气候变化影响社会发展机制. *第四纪研究*, 2021, 41(2): 577-588.

^[15] 徐驰,王海军,刘权兴,王博.生态系统的多稳态与突变[J]. *生物多样性*, 2020, 28(11): 1417- 1430.

馈过程，进而导致系统状态急剧变化到另一稳定状态。生态系统突变反映的是环境对生态系统的压力超出了生态系统对胁迫或干扰响应与适应的自我调节能力。生态系统突变可以体现在生态系统结构、过程和功能等方面。许多不同类型的生态系统在特定条件下都可能发生状态突变。这些生态系统虽然具有极大差异，但突变却往往遵循相似的轨迹：随着外部环境条件（如降水、营养条件等）的逐渐变化，生态系统状态（如植被盖度、生物量等）在初期可以保持相对稳定，表现出相对较小的变幅；但在越过某临界阈值后，生态系统状态变量则在短时间内发生大幅变化（如生物量大幅下降），表现出突变特征；而且突变后的生态系统也可以保持相对稳定，难以恢复到突变前的状态。

气候-生态突变中的一个核心概念是临界点（也称临界阈值、翻转点、突变点）。临界点是衡量气候变化的重要指标，在该点后发生突变且不会恢复到以前的状态（即使强迫停止），其结果变率独立于强迫，该点即为翻转点^[4]。越过临界点，气候从一种稳定状态转变为另一种稳定状态。2001年，IPCC提出了“气候临界点”的概念。在IPCC报告中提到的9个临界点为：（1）亚马孙热带雨林的枯萎；（2）北极海冰面积减少；（3）大西洋经向翻转环流（AMOC）的减弱；（4）北美的北方森林火灾和虫害；（5）全球珊瑚礁大规模死亡；（6）格陵兰冰盖加速消融失冰；（7）永久冻土层解冻；（8）南极西部冰盖加速消融失冰；（9）南极洲东部冰盖加速消融。

2008年，Lenton教授团队在PNAS撰文指出，地球气候系统有15个临界要素（后增加为17个），涉及冰冻圈、生物圈和海洋—大气环流等地球表层系统中最为脆弱的环节^[16]。这些临界要素的控制参数、临界点的升温幅度、转变速率以及影响各不相同。因此，要评估未来地球系统的命运，不仅要深入认识地球系统不同尺度的生物地球物理化学过程，还要借助复杂性科学理论，并与社会与人文科学相融合。

2019年，Lenton教授团队在Nature撰文提出，全球15个气候临界点已被激活9个，分别是亚马孙热带雨林的枯萎、北极海冰面积减少、大西洋经向翻转环流（AMOC）的减弱、北美的北方森林火灾和虫害、全球珊瑚礁大规模死亡、格陵兰

^[16] Lenton T M, Held H, Kriegler E, et al. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 2008, 105(6): 1786-1793.

冰盖加速消融失冰、永久冻土层解冻、南极西部冰盖加速消融失冰、南极洲东部冰盖加速消融^[17]。值得重视的是，某一个临界点被突破后，通过系统内的反馈过程，引起骨牌式连锁反应；例如，永久冻土层解冻可以加剧温室气体释放，进一步加速冰盖消融、海洋酸化、珊瑚礁死亡等。这些长期不可逆转的变化，进而可能对经济社会的可持续发展造成严重的威胁^[18]。2022 年 Lenton 教授团队在 *Science* 发表的研究更进一步指出，目前全球升温 1.1 摄氏度已经将几个临界点推入“可能已越过”范围——其中包括格陵兰岛和南极西部冰盖的崩塌、全球热带珊瑚礁的大规模死亡以及北半球永久冻土层的解冻^[1]。Lenton 教授指出，“我们给出了相当大的不确定性范围，但（一些临界点）肯定处于危险区域。我们可能正处于一个更大规模触发乃至越过临界点的过程中，我们希望还没有越过，但是这正在变得越来越有可能^[19]。

为此，气候-生态突变已成为一个重要而又迫切的研究领域，进入 21 世纪以后，气候-生态突变相关的研究热度持续上升，发文量也快速增长（图 1）。截至 2023 年年底，该领域发文量前五的国家依次为美国、英国、澳大利亚、中国和加拿大（图 2）。该领域的研究重点正在从对现象的解释向对现象的预测和管理转变。2023 年 4 月中国气象局发布的“2022 年度气候变化十大科学事件”就包括 *Science* 等期刊发表气候临界点研究揭示气候变化风险。

^[17] Lenton T M, Rockström J, Gaffney O, et al. Climate tipping points: too risky to bet against. *Nature*. 2019. 575(7784):592-595.

^[18] 蔡榕硕, 王慧, 郑惠泽, 等. 气候临界点及应对——碳中和[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(09):16-23.

^[22] 刘栋. 气候临界点迫近：不可逆的影响和积极的“转折点”. 澎湃新闻. 2022-09-23. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_20012845

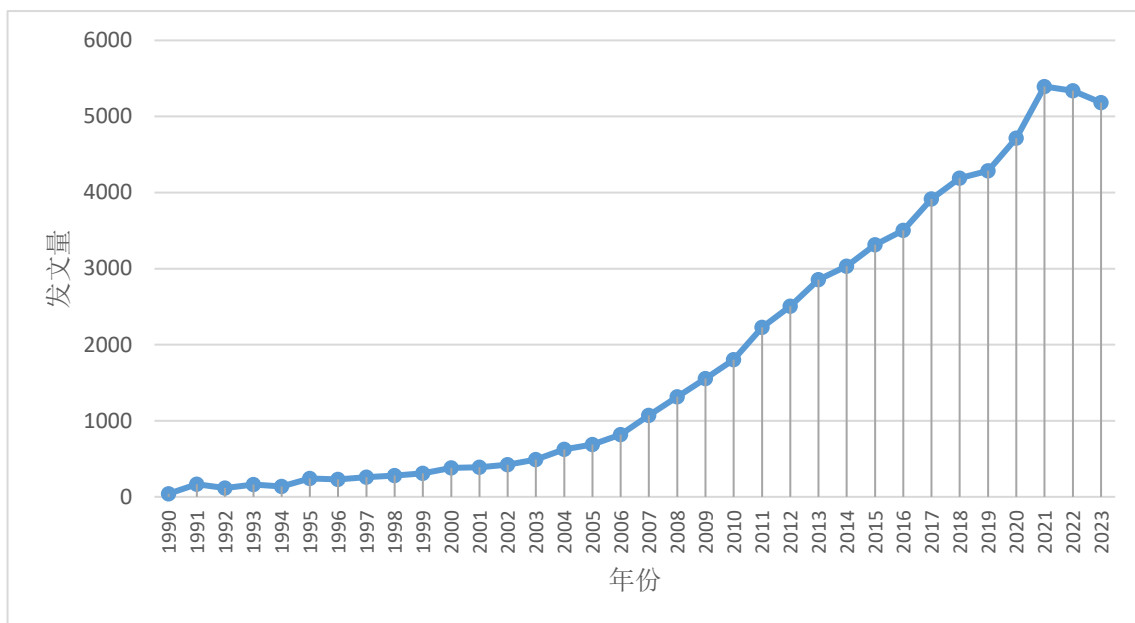


图 1 近 30 年来气候-生态突变领域的 SCI 论文产出增长曲线

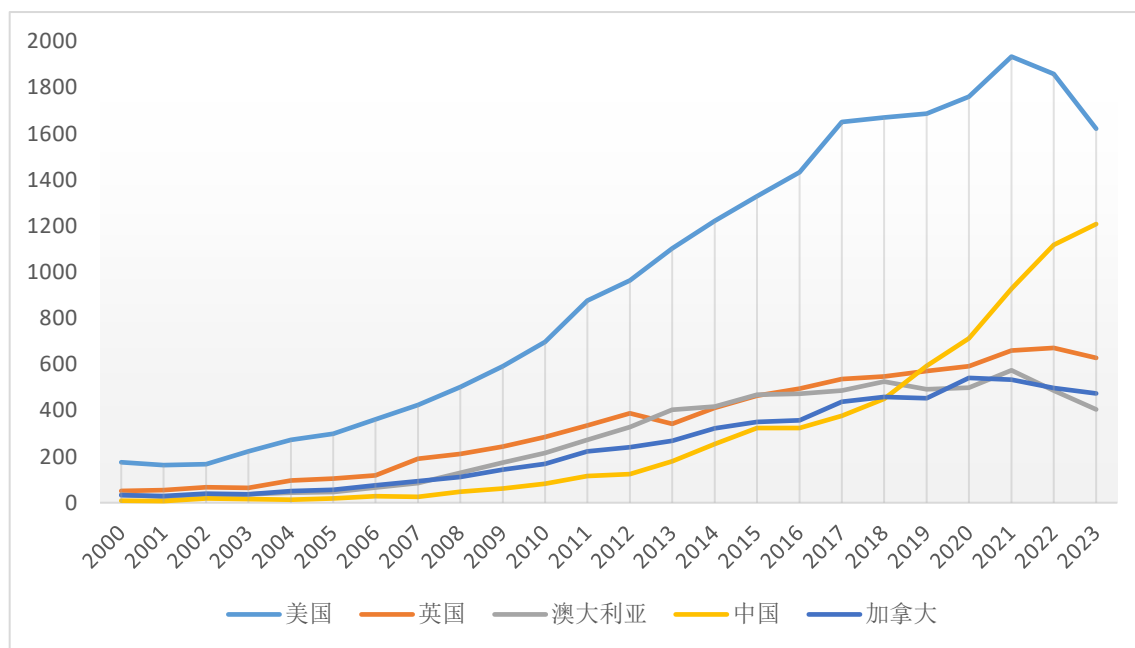


图 2 主要国家气候-生态突变领域的 SCI 论文产出增长曲线

当然，全球不同的气候和生态系统类型，临界点实际上是不一样的，其影响机制也不完全清楚，同时对临界点的认识目前还有一些不同的声音。随着科学研究工作的不断深入，特别是近年来学术界对全球增温的重视，突变这一概念在内涵上得到了拓展。近年来的研究使学术界认识到，所有的渐变似乎均有可能引发突变，而突变的阈值是不固定的，取决于几个因素的相互作用。突变是有弹性的，但在目前

的研究中，弹性的范围和机理也不明确。另外，时间因素在气候-生态变化的过程中，也有着非常重要的作用。

（二）多尺度、多层次和多手段的研究方法

气候-生态突变领域涉及不同的研究尺度，时间尺度跨度大，而从空间尺度来看，气候变化研究领域涉及流域、区域、全球，生态系统研究涉及物种、种群、群落、生态系统等多个层面。不同尺度的研究方法不尽相同，呈现交叉融合和日趋复杂的趋势。

对于生态突变，在种群或群落尺度上，常用的方法是设置模拟实验，通过改变特定外部环境因素引发系统变化，结合各阶段观测值指示突变状态。如有研究采用恒化器培养蓝藻，使其暴露在不断增加的光胁迫下，并定期轻微扰动，通过测量光衰减率来衡量蓝藻生物量，并间接测量蓝藻的恢复速率。这个实验显示了系统突变的临界点和形成的多稳态，一定的光强有助于蓝藻的生长，并产生荫蔽进一步促进生长，这是一种正反馈，但太高的光强对蓝藻生长是有害的，这构成了双稳态背后的机制。此外，还可以通过测量物种/群落水平上不同时间序列生物量的变化，或集中监测能有效指示生态系统发生突变状态的最佳指示物种，进而将临界点理论和网络结构模式相结合以得出临界指示指标。例如 Dakos 等^[20]利用一个环境逐渐变化的场景来影响一个有 79 个物种的互利共生网络，该场景第一次导致一个物种的突然灭绝事件，然后是一系列物种的灭绝，直到群落完全崩溃。其结果表明，首次灭绝的物种拥有最强的变异系数，互利共生网络的嵌套结构会增加稳态转换的概率。

在生态系统尺度上，常用的方法是大型模拟实验和脆弱性结构分析等。Carpenter 等^[21]在 3 年多的时间同时监测两个湖泊生态系统，一个逐渐增加顶级捕食者来破坏湖泊的食物网，另一个相邻的湖泊不加扰动作为参考。结果发现在实验组的湖泊中生态系统转换的预警信号是明显的。此外，在生态系统尺度上可以采用脆弱性的结构进行分析。这类系统的总体响应有两个主要特征：组件的异质性和连

^[20] Dakos V. Baseompte J. Critical slowing down as early warning for the onset of collapse in mutualistic communities. *PNAS*.2014. 11(49): 17546-17551

^[21] Carpenter S R, Cole J J, Pace M L, et al. (2011) Early warnings of regime shifts:a whole- ecosystem experiment. *Science*, 332(6033): 1079-1082.

接性，这些特性如何影响稳定性取决于网络中交互作用的性质。单个节点的响应异质性和低连接度可能会导致整个网络响应环境变化是渐变的而不是突变的。这是因为相对阻力较小，不同的节点将会逐个转移到另一种状态。相比之下，同质性的节点和高连接度的网络可能会使得稳态转换出现阻力，直到临界点时，所有的节点几乎同步移动到另一个状态。

从更大的空间范围来看，区域尺度和全球尺度的研究方法也有差异。

在区域尺度上，通常使用空间代替时间和卫星遥感监测生态系统突变现象。然而，使用空间代替时间的方法来预测生态系统稳态转换对气候变化的响应是具有局限性的。例如在土壤属性上，气候变化、植被动态和响应之间存在时空不一致性。而用来预测或验证生态系统突变的另一种方法卫星遥感监测主要包括两种方式：即遥感影像目视解译与计算机自动分类相结合的方法以及基于遥感或其所衍生的指标，利用数理统计进行时间序列对比分析。

在全球尺度探讨生态系统突变多采用模型模拟或者全球实地调研和遥感观测相结合的方法。有研究在探讨古气候变化和物种大灭绝过程中发现最好的方法就是利用模型模拟古气候事件发生的时间序列，再进行稳态转换的验证。比如大约 5000 年前，撒哈拉突然从一个有湖泊的植被繁茂的区域变成了沙漠。Dakos 等^[20]从地质记录中重建了 8 个古代气候突变的时间序列，采用了简单的气候模型来模拟地球从温室到冰球的转变。通过全球实地调研和遥感观测相结合，Berdugo 等^[21]调查了 20 个生态系统结构和功能属性对全球干旱的响应，表明干旱化导致多种生态系统属性发生系统性的突变。

总体而言，定量分析生态系统突变现象相对局限于较小尺度的生态系统，这种系统一般也易于通过实验手段观测突变的临界点。随着尺度上推，预测则比较困难，特别是无法通过实验方式探索系统突变的临界点，而转用模型模拟和遥感观测相结合的方法探讨生态系统突变特征。

由于气候系统十分复杂且时空尺度广泛，其突变研究多基于古气候记录、卫星和实地观测以及气候模式等手段的结合。在年际-年代际时间尺度上，仪器和卫星观测为研究气候突变提供了有力证据，气候学家采用丰富的突变检测手段基于地

表温度、气压、降水等气象要素进行气候突变分析^{[22][23]}。对于更长时间尺度，古气候领域中的气候突变研究一般基于代用指标和重构的时间序列。冰芯、湖泊/深海沉积物、孢粉、树木年轮、动物化石等记载了大量长时间尺度的气候变化信息^{[24][25]}。例如，冰芯中氧同位素比值（ $\delta^{18}\text{O}$ ）变化与气温的密切联系，为重建过去大气温度和推断过去气候提供了可能^[26]。20 世纪 90 年代从格陵兰中部冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 表明最后一个间冰期温度比现在高 5°C ，并且北半球冰的范围可以调节格陵兰岛温度的经向变化^[27]。Dansgaard & Oeschger 发现了冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中一系列反复、剧烈的快速冷暖交替的信号，即 Dansgaard-Oeschger 现象^[28]；石笋中氧同位素的特征受源区和局地降雨量的变化调控，可以记录大气环流和对流强度的变化，Cruz^[29] 基于此论证了 Dansgaard 和 Oeschger 循环对巴西南部亚热带地区水循环的影响。

人类对古气候信息的获取是间接的，主要是通过对气候变化有响应的物理参数（如磁化率和粒度）、化学参数（如元素）和/或生物化石（如有孔虫、孢粉）等代用指标来重建过去气候变化。然而，气候环境代用指标并不是完美的气候记录，存在固有的不确定性。例如，格陵兰岛和南极洲的冰芯记录显示在末次冰期，千年时间尺度上的南北半球温度变化是同步的，与东南极洲罗斯海地区记录得到的结论相反^[30]。尽管可通过转换函数等方法，将古气候定量重建结果与模拟结果进行直接比较，但如果不考虑这些方法的不确定性，就可能导致错误的解释，造成利用

^[22] 符淙斌，王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学 1992, (4):482-493.

^[23] Wang, J., 2020: Determining the most accurate program for the Mann-Kendall method in detecting climate mutation. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 847-854.

^[24] Council, N. R., 2006: Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years. The National Academies Press.

^[25] Yuan N., Xiong F., Xoplaki E., et al.. A new approach to correct the overestimated persistence in tree-ring width based precipitation reconstructions. *Climate Dynamics*, 2021.58, 2681-2692.

^[26] Jouzel, J. .Water Stable Isotopes: Atmospheric Composition and Applications in Polar Ice Core Studies. *Treatise on Geochemistry*, 2003,4, 347.

^[27] North Greenland Ice Core Project members. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*. 2004. 431, 147–151 .

^[28] Dansgaard W., Johnsen S. J., Clausen H. B., et al.. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993.364, 218-220.

^[29] Cruz, F., Burns, S., Karmann, I. et al. Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. *Nature*. 2005.434, 63–66.

^[30] Stenni, B., Buiron, D., Frezzotti, M. et al. Expression of the bipolar see-saw in Antarctic climate records during the last deglaciation. *Nature Geosci* .2011.4, 46–49.

古气候代用指标指示过去气候变化和评估气候模型具有一定的局限性。气候模型提供了对地球系统温度、风速和降水等直接的模拟结果，如何将古气候数据和气候模拟结果有效结合就显得至关重要。可以用三个关键的步骤解决这一问题，包括：①选择合适的与指标记录相关的化学示踪方法；②明确代用指标的气候环境意义；③整合古气候记录与模型数据的分析方法。例如，欧洲南极冰层取芯项目获得的高分辨率的氡记录和包括水同位素的大气环流模式共同揭示 Dansgaard-Oeschger 事件的温度变化强度^[31]。

理想的动力气候模型是研究气候突变过程和机理的重要工具，它将复杂的气候系统抽象为简化的动力模型，通过控制特定的参数连续变化来求解系统内部平衡状态性质（包括数目和稳定性等）的变化，并进一步分析稳态转换的物理机制^[32]。例如，经典的箱式模型可以求解大西洋热盐环流在千年尺度上对高纬度淡水输入的响应平衡态^[33]；Levermann^[34]利用季风降水凝结潜热、海陆热量平流冷却和接收辐射的平衡关系抽象出了一个理想的概念模型，据此求解得到季风系统崩溃的临界辐射，并指出印度、北美等区域正处于季风崩溃的临界状态。

随着计算机性能和模式分辨率的不断提高、模式物理过程参数化的不断完善，气候模式已经成为研究气候系统中临界转变现象和机制的有效手段，研究范围可以覆盖多个时空尺度的气候突变现象。不同复杂程度的气候模式也被广泛应用于气候突变事件和临界转变现象的研究中。例如，North^[35]用一个包括冰盖-反照率反馈和热扩散过程的简化能量平衡模式，模拟出了北极冰盖随太阳常数的变化存在有限冰和无冰两个稳定的平衡态；王志远^[36]利用通用气候系统模式 CESM 开展了过去 2000 年的全球气候变化模拟试验，检测并分析了百年尺度全球地表气温突变

^[31] Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O., et al. . Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science*, 2007,317, 793-796.

^[32] Zickfeld K., B. Knopf, V. Petoukhov, and H. J. Schellnhuber, Is the Indian summer monsoon stable against global change? *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L15707, doi:10.1029/2005GL022771

^[33] Bard, E. Climate shock: abrupt changes over millennial time scales. *Phys. Today* .2002.55, 32-38.

^[34] Levermann, A., Schewe J., Petoukhov V.,et al.. Basic mechanism for abrupt monsoon transitions. *PNAS*,2009. 106, 20572-20577.

^[35] North, G. R..The Small Ice Cap Instability in Diffusive Climate Models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1984. 41, 3390-3395.

^[36] 王志远. 外强迫驱动下地球系统模式模拟的过去 2000 年全球气候变化. 中国科学院大学自然地理学博士学位论文, 2015.

的年份及其成因。

除了单一气候子系统的临界突变，不同气候子系统之间也可能由于大气和海洋环流变化产生级联效应。当前学界一般根据专家经验得出的临界点性质和逻辑推理得出的因果关系，采用动力系统和网络方法结合的方法来研究不同气候子系统之间的相互作用^[37]。Wunderling^[38]基于一个概念网络模型，假定格陵兰冰架、西南极冰架、AMOC 和亚马逊雨林均满足双稳态的鞍结分岔，并考虑它们的线性耦合来研究四个子系统的相互作用，结果表明，格陵兰冰架损失将随着全球增温率先触发级联效应，由 AMOC 传递到其他子系统。Liu 等^[39]利用全球表面气温逐日资料建立了一个气候网络统计模型，基于交叉相关的方法发现亚马逊雨林与青藏高原和西南极冰架之间存在稳健的遥相关，并指出气候子系统之间存在突变的同步性。可见，气候系统十分复杂且时空尺度广泛，其突变研究多基于古气候记录、卫星和实地观测、理想概念分析以及气候模式等多手段结合的方法。

（三）数据成为未来研究的关键要素

数据革命将促使地球科学研究两大转变：从问题驱动到数据驱动的研究范式转变，从专家学习到机器学习和人工智能的转变^[40]。在数据驱动的科研范式下，数据成为一项关键要素，进而，数据观测、获取、分析、使用方式都发生了极大的变化。气候-生态突变研究需要开展评估、模拟与预测，数据的重要性不言而喻。因此，如何获取长期、精准的数据，是本领域研究的重要问题，研究方法也需要根据尺度进行选择。

随着人类对地球认识和研究需求的变化，以及研究技术手段不断升级和新方法新设施不断引入，地球科学相关研究的时空尺度加速扩大。气候-生态突变相关领域的研究时间尺度既可以是瞬时，也可以是数亿年，空间尺度可以是某个区域，

^[37] Klose A. K., Karle V., Winkelmann R., et al. Emergence of cascading dynamics in interacting tipping elements of ecology and climate. *R Soc Open Sci*, 2020.7, 200599. <https://doi.org/10.1098/rsos.200599>.

^[38] Wunderling N., Donges J. F., Kurths J., et al. Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. *Earth System Dynamics*. 2021,12, 601–619.

^[39] Liu, T., and Coauthors. Teleconnections among tipping elements in the Earth system. *Nature Climate Change*, 2023,13, 67-74.

^[40] 2021-2030 地球科学发展战略研究组. 2021-2030 地球科学发展战略：宜居地球的过去、现在与未来. 北京：科学出版社，2021.

也可以是整个地球。建立综合的、完整的、可持续的跨时空尺度的观测和数据获取系统，对于理解气候-生态系统具有重要的基础性意义。实验室、野外观测台站、航空飞行器、对地观测卫星等是相关领域观测检测和获取原始数据资料开展创新性研究的重要来源。

对于生态系统研究，传统的数据获取方法尺度小、准确性高，但耗时费力，在大时空尺度上，进行重复性和可控性的实验缺乏实际意义也不具有可行性。同时，小尺度对生态过程和规律的认识总结，不足以全面和深入的解释在更大尺度（如景观尺度和全球尺度）上的生态过程和现象^{[41][42]}。遥感是唯一能在大尺度上有效获取反映现实数据的技术手段^{[43][44]}。遥感数据是气候-生态突变领域研究的关键数据来源，遥感技术是气候-生态突变评估、模拟与预测的重要手段。

相比传统地面调查方法的局限性，遥感技术具有快速、多波段、周期性、大尺度的观测能力，非常适合旱区生态系统、森林生态系统等生态系统突变的监测与评估。遥感作为生态学研究从单点尺度向区域尺度扩展的关键技术手段，在如今的生态学研究中，不仅可以为地面监测提供补充资料，甚至具备替代实地测量的潜力^[45]。通过遥感可以在大尺度范围内获得多种长时间序列的地表参数，如各种植被指数（NDVI, EVI, SAVI 等）、植被覆盖度、地表反照率、表层土壤水分等，它们可以反映生态系统的状态，是重要的数据信息源。近年来，随着遥感技术应用领域的不断扩展，气象观测领域、国土测绘领域、海洋观测领域、灾害监测领域、环境监测领域等都在广泛应用遥感技术。需求的扩大催生了技术的不断进步，遥感数据的空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率正在逐步提升，我国遥感卫星发射数量也大幅度提升。

^[41] Gulinck H, Dufourmont H, Coppin P, et al. Landscape research, landscape policy and Earth observation. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21: 2541-2554.

^[42] Andrew Skidmore Edited. The biosphere: A global perspective. Environmental modelling with GIS and remote sensing. London: CRC Press. 2002.

^[43] Nagendra H. Using remote sensing to assess biodiversity. *International Journal of Remote Sensing*, 2001. 22: 2377-2400.

^[44] Kerr J T., Ostrovsky M.. From space to species: Ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18: 299—305.

^[45] 张扬建, 范春捆, 黄珂, 刘瑶杰, 俎佳星, 朱军涛. 遥感在生态系统生态学上应用的机遇与挑战. *生态学杂志*, 2017, 36(03): 809-823.

（四）气候-生态突变的检测方法和预警技术

准确地识别和检测突变对于预测气候-生态系统未来的演变趋势具有重要的意义。传统的突变检测方法大多基于状态变量在统计意义上的显著变化来判断突变的发生，如滑动 t-检验、Cramer 法、Yamamoto 法以及 Mann-Kendall 法等^[35]，这些系统位相突变检测技术并不适用于监测气候-生态系统动力学结构突变，而近年来发展的若干新的气候动力学结构突变检测方法具有潜在的应用价值。例如，气候系统的演变具有长程相关性特征，表现为地表温度、气压、降水等气象要素的演变、极端事件的重现时间等；基于气候系统演变的长程相关性提出的滑动去趋势波动分析、滑动移除去趋势波动分析、滑动移除重标极差法、滑动移除重标方差法、基于去趋势波动分析的指纹法、红噪声检验法等有望用于气候-生态系统的突变监测和检测^{[46][47][48]}。基于时间序列的复杂性的近似熵和信息熵方法是另一种选择^{[49][50]}。近似熵方法是一个理想的非线性动力学检测方法，它具有所需数据点较少、有较好的抗噪和抗干扰能力且适用于随机信号、确定性信号或两种混合信号等特点。Cheng 等^[63]将近似熵方法引入到气候突变检测中，提出了滑动移除近似熵方法，其在降水观测资料中的应用证实了该方法的可靠性。Fisher^[51]发展了一种测量不确定性的统计量，称为 Fisher 信息，可用于衡量评估参数的能力，还可以用于检验系统或现象的状态。针对空间场的动力学指数分割算法、模态相关法等也是具有应用潜

^[46] He W. P., Feng G. L., Wu Q., et al.. A new method for abrupt change detection in dynamic structures. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2008,15, 601-606.

^[46] He W. P., Feng G. L., Wu Q., et al.. A new method for abrupt change detection in dynamic structures. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2008,15, 601-606.

^[47] Held, H., Kleinen T. Detection of climate system bifurcations by degenerate fingerprinting. *Geophysical Research Letters*, 2004.31. L23207, doi:10.1029/2004GL020972.

^[48] Peng C. K., S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley, and A. L. Goldberger, 1994: Mosaic organization of DNA nucleotides. *Physical Review E*, 49, 1685-1689.

^[49] Pincus S. M., Approximate entropy as a measure of system complexity. *PNAS*, 1991, 88, 2297-2301.

^[50] Cheng H.Y., He W.P., Zhang W.,etal.. A new method to detect abrupt change based on approximate entropy. *Acta Physica Sinica*, 2011.60, 049202-049202

^[51] Fisher R. A., Russell E. J. On the mathematical foundations of theoretical statistics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. 1922: 222, 309-368.

力的方法^{[52][53]}，其中后者是气候变化研究中一种广泛使用的方法，可以用来分析导致气候变化的可能原因，如区分人类活动与自然变率在气候变化中的作用^[54]。

为检测气候-生态突变的早期预警信号，理解气候系统面临突变时状态参量变化的内涵具有重要意义。临界慢化和闪烁现象气候系统发生临界转变最重要的信号。临界慢化现象是指动力系统的控制参数趋近于临界点时，系统雅克比矩阵的特征值实部由负趋近于零，按照平衡态稳定性分析，叠加的小扰动将以缓慢的速率指数衰减，且恢复时间较长，这导致动力系统状态参量在突变点前的时间序列存在自相关系数和方差增大、偏度减小的现象。Dakos 等^[55]分析了新仙女木期的结束、北非沙漠化、末次冰期的结束等 8 次古气候突变事件，结果表明它们在突变之前都存在临界慢化现象，即时间序列的自相关性增强，因此临界慢化在数学上被证明是气候系统趋于临界点的标志。当动力系统的控制参数趋近临界点时，由于临界慢化导致状态参量在时间序列上的概率密度分布存在偏度下降^[56]，如果随机强迫足够强，系统将在两（多）个稳定的平衡态之间切换，这表现为动力系统状态参量的概率密度分布呈现双（多）峰特征，以及时间序列的一阶自相关系数下降和方差增大，即闪烁现象。例如，Bakke 等^[57]基于湖底沉积物岩心记录和重构的海洋温盐数据，发现新仙女木期结束之前，海洋和大气在两个平衡态之间交替转换，并最终转换到相对较暖的全新世阶段。因此，临界慢化和闪烁现象对揭示复杂动力系统是否趋于突变临界点提供了重要的参考意义^[3]。

^[52] Santer B. D., Taylor K. E., Wigley T. M. L., et al. A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere. *Nature*, 1996, 382, 39-46.

^[53] Savit, R., Green M.. Time series and dependent variables. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1991, 50, 95-116.

^[54] Mocenni, C., A. Facchini, and A. Vicino, Identifying the dynamics of complex spatio-temporal systems by spatial recurrence properties. *PNAS*, 2010, 107, 8097 - 8102.

^[55] Dakos, V., Scheffer M., van Nes E. H., et al.. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change. *PNAS*, 2008, 105, 14308 - 14312.

^[56] Guttal, V., Jayaprakash C.. Changing skewness: an early warning signal of regime shifts in ecosystems. *Ecology Letters*, 2008, 11, 450-460.

^[57] Bakke, J., Lie Øyvind, Heegaard E., et al. Rapid oceanic and atmospheric changes during the Younger Dryas cold period. *Nature Geoscience*, 2009, 2, 202-205.

三、关键科学问题与核心技术问题

依据科学性、基础性、可能性等相关准则，本研究围绕“弹性变化时空过程-突变阈值及机理-科学识别突变-预警与预测”的逻辑，研判关键科学问题与核心技术问题，具体包括：

（一）气候-生态系统突变的过程、模式和规律

1、不同尺度气候和生态系统突变的相互作用

（1）不同时空尺度气候和生态系统突变的模式是怎样的，尤其是突变中各要素之间的相互作用关系如何？

气候系统变化在年际、年代际、百年、千年以及万年尺度上均可能发生突变，厘清这些不同时间尺度上气候突变阈值、特征和模式，尤其是气候转型期、过渡期的瞬时的动态变化特征，以及不同尺度突变之间的嵌套关系等，是气候突变研究的重要突破口。而对于生态系统来说，从物种、种群、群落、生态系统各层面均存在突变和重组，导致物种组成、生物量、生产力以及功能组成和关键优势种属必然发生显著变化，这些不同层级的突变阈值有何关系，他们之间是如何相互作用的？例如单一种群的突变如何影响系统内其它群落的突变，最终导致整个系统层面的突变，进而引起更大范围生态系统突变的连锁反应等等。

（2）不同时空尺度的突变之间的级联作用和远程耦合关系是怎样的？

在不同的空间尺度上，从流域、区域尺度到全球尺度，气候和生态系统存在不同的阈值范围和突变特征，而这些突变之间的级联作用及远程耦合关系仍然不清楚。因此，亟需深入阐明典型的生态系统，如草原生态系统、海洋生态系统、湿地生态系统在相同气候变化背景下或者人类活动影响下发生的突变的过程、特征和模式，综合对比其突变差异和规律，为突变研究提供新的理论支持。

2、气候-生态系统突变的弹性及阈值的定量研究

（1）如何量化系统弹性变化及突变阈值，进而揭示系统突变的特征和规律？

气候和生态系统随着自身弹性的降低，会跨过阈值或者临界点，进而发生突变或者稳态转换。目前相关的研究主要集中的基于时间序列分析系统变化的动态特征，如方差、自相关、斜率等表征系统自身变化的特征来半定量揭示弹性的变化。

进而利用不同数理统计分析模型等，基于时间序列均值或者变率的变化，鉴别系统突变的阈值。如何从机理上深入分析系统结构和功能、多样性及关联性等与弹性和突变之间的关系？如何基于生态系统结构和功能来揭示系统弹性的变化，进而更好地理解系统突变的模式和特征？如何建立表征弹性和突变的综合指标体系，对比不同生态系统之间弹性的变化？这些都是当前研究的难点、热点和突破口。

（2）如何有效融合监测短期数据和古环境数据，结合模型模拟等多学科交叉研究，定量不同时空尺度下气候-生态系统突变的阈值和弹性？

目前的相关研究主要基于观测、实验室控制实验、模型模拟等分析，一方面时间尺度过短，难以捕捉系统突变前后的全部过程，另外缺乏基于现实世界的长时间尺度数据的有效验证，对弹性和突变理论的解释上仍然存在较大的争议和不确定性。如何充分发挥古环境分析中的长时间序列的优势，发掘高分辨率的、具有精确定年、各种机理明确的生物指标变化序列，为反演过去地球历史时期不同气候、不同生态系统的演化轨迹和突变过程，阐明气候-生态系统突变的规律和模式提供重要数据支撑。

（二）气候-生态系统突变机理研究

1、多重驱动下系统突变机制

（1）如何深入揭示驱动-响应关系，尤其是厘清系统线性渐变、非线性突变的驱动机制？

气候-生态系统突变是多重压力长期共同作用下的结果。理论上多种驱动力相互作用对系统起到三种不同效果：相加（additive），协同（synergistic）或者抵消（antagonistic）关系。例如温度和营养盐共同作用下，可能会对水生生态群落起到叠加、放大、甚至减弱的不同影响。因此，厘清生态系统对不同驱动力的响应关系具有重要作用。另外，多重驱动作用下为何有些系统呈现线性渐变特征，而有的系统呈现突变特征，导致渐变和突变的根本原因是什么？哪些突变是由外部驱动力的快速变化引起的，哪些是由系统内部结构和功能的改变引起的，这些都是当前相关领域亟需回答的根本性问题。尤其是在气候和生态系统重建过程中，如何充分考虑这种非线性驱动-响应关系，避免过于单一的线性重建和反演，系统全面地推演气候-生态系统的复杂动态关系。

（2）多重驱动力长期相互作用下系统发生突变的过程是怎样的？

研究表明快速驱动（fast driver）和慢速驱动（slow driver）共同作用会导致生态系统发生突变。例如逐渐升高的营养盐和温度会导致生态系统弹性下降，但快速驱动力（如极端天气、洪水或者建坝）等极端事件往往成为导致系统突变的最后“一根稻草”。另外，不同系统响应在时间上会存在滞后效应（time-lag），连锁反应（cascades effect）等，使得在研究气候-生态突变的机理变得复杂，需要足够长的时间尺度更准确地阐明不同驱动力和系统响应的复杂关系，从而深入揭示突变的过程和机理。

2、反馈机制与系统突变

如何厘清不同气候-生态系统反馈及互馈关系，尤其是长期变化过程中，系统正负反馈机制的改变过程和机理？

气候-生态系统内部正负反馈机制的改变是导致系统发生状态改变的核心要素。负反馈会使系统趋于稳定，而正反馈增强将导致系统的不稳定，系统的状态是系统内部正负反馈机制长期共同作用的结果。当气候-生态系统在驱动力作用下发生突变或者状态转换时，系统内部新的正反馈作用超过负反馈作用，从而加速系统状态的改变。例如，温度降低加速冰川形成，进而导致地表反射率增强，会进一步促使气温的下降，从而形成正反馈的回路。同样，生态系统内部发生稳态转换时，其结构和功能的概念，也会改变系统内部原有的反馈机制，从而触发系统跨过阈值，发生突变。因此，如何基于观测实验、实验室操控实验、模型模拟以及长时间序列分析，深入揭示系统内部与系统之间反馈机制的改变至关重要。

（三）识别气候-生态系统关键的突变要素

1、临界要素

如何准确识别地球系统临界要素？如何确定临界要素的阈值？

当前，地球系统突变成为应对全球气候变化问题的关键要素之一，而受到国际社会的高度关注。*PNAS* 曾提出当前气候变化背景下地球气候系统存在 9 个潜在突变的临界要素。随后 *Nature*、*Science* 发表文章进一步将气候临界要素增加到 16 个，并指出亚马逊雨林、北极海冰、大西洋环流、澳大利亚珊瑚礁、格陵兰岛冰原等要素的临界点或已经被触发。临界要素并非一成不变，而是随着气候、生态

系统的变化而动态变化，如何识别地球系统临界要素成为一个关键问题。此外，如何确定这些临界要素的温度阈值也至关重要。

2、我国的关键临界要素

如何识别我国的关键临界要素，并揭示其突变机制？如何评估当前系统的突变风险？

临界要素（临界点）的理论方法由西方科学家提出，未对中国等其它关键区域地球系统进行充分考量。问卷调查结果显示，较具共识的我国地球系统临界要素主要包括青藏高原、人类活动、干旱半干旱区、东亚季风等，其中青藏高原涉及到冰川、冻土等相关内容，人类活动聚焦比较多的在于城镇化、工业化等方面，干旱半干旱区主要是考虑到土壤的沙化或者荒漠化问题，而东亚季风指在夏季风和冬季风的快速变化，带来极端的气候事件。此外，也有个别的受访者认为森林的生态系统、生物多样性、湖泊的生态系统也是我国地球系统临界要素。

课题组在此基础上展开了进一步研究，认为目前我国地球系统的临界要素主要有：永久冻土融化、高山冰川快速融化、东亚季风的变化、西太平洋暖池、西北干旱半干旱区的绿化、北方森林的转变、蒙古大草原的荒漠化、红树林的退化。对于这些临界要素，它们变化的阈值具体在哪里，它们的突变机制是什么，值得进一步探究。

毋庸置疑的是，临界要素的变化会对我国乃至全球生态系统带来巨大影响。在全球变暖背景下，亚洲季风气候系统未来是否会发生突变，这对东亚温度和降水格局将产生什么样的影响？尤其是增温 1.5 度后，我国可能发生突变风险的生态敏感区有哪些？如何甄别我国生态环境和气候系统的关键突变要素？例如青藏高原系统、西北干旱草原生态系统、淡水生态系统等，这些生态系统当前处在什么样的历史相位，未来潜在的突变风险有多大？哪些系统最有可能发生系统性突变？如何科学回答这些问题对于我国生态安全、水安全及粮食安全具有重要的科学价值和战略意义。因此，亟需通过开展古-今结合研究，揭示不同时空尺度下亚洲季风气候以及我国典型生态系统突变的历史，结合现代观测、遥感数据及模型模拟分析，识别我国的关键临界要素，并评估当前系统的突变风险。

（四）评估与预测气候变暖背景下生态系统安全及突变风险

1、生态系统突变模拟及风险预警

如何科学预测未来气候和生态突变事件风险，进而采取相应的措施？

2022 年联合国气候变化大会 COP27 上发布的《全民早期预警倡议执行计划（2023-2027）》强调，需要弥补全球气候观测系统的现有差距，提高为减缓、适应气候变化和早期预警系统提供有用的和可采取行动的气候信息的能力。气候系统是一个非线性动力学系统，其具有复杂性和开放性等特点，致使对气候突变的预测十分困难。我国现有的气候、生态系统模型的模拟能力显著不足。如何充分考虑多重的驱动-相应关系、正负反馈机制、时滞效应、连锁反应、涌现等复杂系统变化特点，发展耦合的系统动力学模型；从气候-生态-社会不同层面开展模拟，揭示复杂系统内突变的过程和机制；预估未来气候和生态系统的突变风险；这些都是下一步亟需解决的关键技术问题。

总的来说，气候-生态模拟与预警是近十年兴起的新的研究方向，正在快速发展。它涉及多个时间尺度（几百万年到几天）和三个层面——气候、生态、社会。与国际相比，在我国气候、植被生态模拟能力基本同步，亟需加强的是动态植被、海洋生物地球化学和人口经济社会模型的发展。气候-生态模拟与预警真正的难点不在于技术，而在于如何实现学科交叉，打破学科壁垒。

2、确立我国典型生态系统的安全空间

如何确立不同生态系统在气候和人类活动驱动下的突变阈值和边界范围以及典型系统的生态安全空间？

针对全球生态系统突变风险加大的事实，制定科学的生态系统保护和管理对策，规避可能的灾变风险并保障生态服务功能，是科学界和政策制定者面临的重大挑战。同时，亟需探索并建立系统突变的早期预警信号指标体系，进而有效预测灾变事件的发生。对于已经跨过阈值发生突变的生态系统，如何基于长期动态变化轨迹和特征，并结合驱动-响应关系，将系统恢复到安全的边界范围内，对于生态环境的修复和治理具有重要的指导意义。因此，在制定政策过程中，应积极探索如何基于复杂系统的视角，充分考虑突变和阈值的因素，从传统的静态管理转变到维护系统弹性和阈值的动态管理。

3、气候-生态突变的应对及可持续发展

（1）如何应对气候-生态突变？

中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区之一。气候变化对中国粮食安全、人体健康、水资源、生态环境、能源、重大工程、社会经济发展等诸多领域构成严峻挑战，气候风险水平趋高^[58]。2022年6月，中国发布的《国家适应气候变化战略2035》中指出适应气候变化应坚持“主动适应、预防为主，科学适应、顺应自然，系统适应、突出重点，协同适应、联动共治”。目前，对于气候变化，减缓和适应是两条基本路径。减缓气候变化，是通过减排与增汇，控制大气中温室气体净排放量，是解决气候变化问题的根本途径。适应气候变化，是通过调整自然和人类系统，以应对实际发生或预估的气候变化及其影响，减轻或避免气候变化所产生的危害，如建设“海绵城市”等措施。那么，对于更加剧烈、能带来更大影响的气候-生态突变，我们应积极探索应对路径。

（2）如何利用突变的积极影响，规避消极影响？

突变并非只有消极影响，同一突变可能会对不同区域带来不同的影响，对于其中的积极部分，我们应该如何利用，而对于消极影响，应该如何规避，都是我们下一步研究应当积极关注的。

^[58] 中国气象局气候变化中心.中国气候变化蓝皮书（2021），北京：科学出版社.2021.

四、保障措施

对于气候-生态突变领域的研究来说，长期的综合观测能力、资料和数据共享机制、学科间的交叉协作以及创新型人才的培养，是实现领域突破的保障措施。

（一）数据观测平台与数据分析技术

在气候-生态突变领域，要建立长期、稳定的数据观测平台。加强观测系统部署，建立长期定位观测站，加强实证数据的观测，进一步增强用于气候和生态变化监测的可靠遥感数据源。明确现有针对各圈层观测系统中的不足，建立相互关联、内部协调一致，相连成网、统一规范的针对海-陆-气相互作用的一体化观测系统；推动物联网、传感器、遥感观测等新一代地球观测技术的发展和运用，实现对地球系统多圈层、多要素的全天候连续观测体系。针对气候及生态突变及其风险过程的系统性、非线性、复杂性和不确定性等特点，充分利用“深空”、“深地”、“深海”探测技术和现代电子传感技术，研发针对不同类型突变风险的“天-空-地-海”立体协同、多维耦合、智能耦合的风险感知识别和动态监测关键技术，攻克风险感知识别监测的科技瓶颈，提供突变风险防范信息基础保障。

气候-生态突变涉及不同时空尺度下的多源数据，通过实验室、野外观测台站、航空飞行器、对地观测卫星等获得多源大数据，亟需建立气候-生态突变基础数据库，联合国内各家优势单位，形成长期稳定的数据共享平台，以便共享长时间序列的观测数据。

观测平台的建设为气候-生态突变研究带来了海量数据，但如何从海量数据中提取相关的变量并进行处理是当前研究面临的一大难题。亟需针对气候-生态监测系统和监测数据特点，结合数据通信及信息技术发展情况，以及实际需求，构建基于GIS的数据分析与运用系统，实现监测数据的自动分析、评价与模拟。

亟需发展大数据分析和人工智能预测方法，基于共识的大量实地调查、观测和分析测试结果大数据，探索气候变化与生态安全的关系；强化生态过程与环境指标在模型中的耦合，定量反演地球系统碳循环-气候变化-环境演变-生物多样性变化之间的作用过程与调节机制；研建“预防避灾”为主的生态系统突变风险防范体系。突出突变过程模型与模拟器研发，构建突变风险模拟系统与情景库，推进突变风险超前精准预测和评估；利用电子传感、现代通信、大数据、人工智能等新技术，研

建突变风险全天候、全时域动态监测与智能预警技术体系；研制适宜极端环境条件的专业化、功能化、便携化、智能化突变风险应急处置救援技术装备体系。

“气候-生态系统”是一个复杂系统，涉及不同时空尺度的不同要素，不同要素相互影响，不同尺度具有级联反馈，如何更好地去刻画这个复杂系统的特征，并预测它的变化需要我们开展多尺度多模态的研究。我国缺乏自己的地球系统模型，且现有的地球系统模型只实现了部分系统的耦合，未来亟需发展多系统耦合的本土模型。促进气候和生态变化大数据挖掘、融合、推理和同化等关键技术的协同攻关；攻克一体化耦合分析等关键技术，提升从问题诊断到控制机理分析乃至长期变化趋势预测能力。

（二）学科建设、人才培养以及国际合作

“气候-生态突变”是一个综合性研究，需要系统开展。学科间的交叉协作是研究开展的基本前提。需要构建跨学科的学术交流机制或组织，形成常态化的交流平台，积极促进气候学、生态学、地质学、地理学、数理科学、信息科学等学科的交叉融合，开展系统研究。在组织层面，建议由相关部门（如科技部、科学院、基金委）设立联合创新中心，统筹联合我国气候及生态领域的研究力量。在立项方面，建议设置相关重大项目，且申报时必须跨学科跨专业申报。

近年来，我国气候、生态等领域的科学研究取得了巨大的进步与发展。无论从科学研究覆盖的广度及其在国民经济建设中的地位和作用，还是从教育规模、从事研究的科学家规模等来看，中国都可称为气候、生态研究的大国，但还不能认为是相关领域的研究强国。因为我们在国际上领先的研究领域和方向还不多，国际影响力依然有限，独创性的高精尖理论、方法和技术也比较少。最主要的是，我国在相关领域缺乏战略科学家和创新型人才。

从气候-生态突变领域研究需求出发，应注重不同功能型人才的培养，有意识地培养把握学科前沿的战略科学家、开展前沿探索的战术科学家，以及保障学科长远健康发展的青年后备人才队伍。由于气候-生态突变的研究对象是一个复杂系统，应注重人才知识结构设计，培育新兴学科和交叉型研究人才，进一步促进相关学科的交叉与融合，形成国家战略科技力量。建设老中青合理搭配的人才梯队，特别是加强青年科学家的参与。加强气候-生态突变领域的国际合作，以国际性数据平台

为桥梁，面向“一带一路”国家战略需求，发起全球性气候-生态突变重大国际计划，广泛开展国际合作及联合技术攻关，促进重大基础理论和技术的原始创新，引领气候及生态领域的研究，推动相关技术向更深层次和更高水平发展，服务新时代生态文明建设。