

思考21世纪百项挑战 - 面对核心气候物理与环境需要

金安君^{1*}, 李 勇², 聂百胜¹, 许映军³

¹重庆大学资源与安全学院, 重庆

²中央财经大学智慧城市与智能决策实验室, 北京

³北京师范大学国家安全与应急管理学院, 北京

收稿日期: 2026年8月11日; 录用日期: 2026年9月4日; 发布日期: 2026年9月11日

摘 要

气候与能源体系是维系人类存续、支撑现代文明运转的底层基础。全球各类气候物理环境风险持续加剧, 直接动摇地球宜居性根基。本文以影响重大性、危机紧迫性、问题可解决性三大维度为评判标准, 对21世纪最突出的一百项气候物理环境挑战划分优先级, 所有应对方案均遵循SMART行动准则——具体性、可衡量性、可实现性、相关性、时限性。同时, 结合《大英百科全书》式完整的地球生态碳循环体系框架, 系统梳理能源-气候耦合脱碳等智慧, 应对极端气候, 为全球气候治理、低碳转型与生态修复提供科学依据。

关键词

能源安全, 物理环境, 生态韧性, 气候治理, 百项挑战, 减排脱碳, CBAM

Contemplating 100 Challenges of the 21st Century - Addressing Core Climate Physics and Environmental Needs

Anjun Jin^{1*}, Yong Li², Baisheng Nie¹, Yingjun Xu³

¹College of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing

²Smart City and Intelligent Decision Lab, Central University of Finance and Economics, Beijing

³School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing

Received: August 11, 2026; accepted: September 4, 2026; published: September 11, 2026

*通讯作者。

文章引用: 金安君, 李勇, 聂百胜, 许映军. 思考 21 世纪百项挑战-面对核心气候物理与环境需要[J]. 现代物理, 2026, 16(5): 185-194. DOI: 10.12677/mp.2026.165020

Abstract

The climate and energy system forms the foundational basis for sustaining human existence and supporting the operation of modern civilization. Various global climate physics and environmental risks are continuously intensifying, directly undermining the habitability of the earth. This paper employs three dimensions—significance of impact, urgency of crisis, and solvability—as evaluation criteria to prioritize the one hundred most prominent climate physics and environmental challenges of the 21st century. All proposed response strategies adhere to the SMART action criteria—specific, measurable, achievable, relevant, and time-bound. Meanwhile incorporating a comprehensive carbon-cycle model (like Britannica’s exhibits), this paper systematically reviews strategies such as energy climate coupled decarbonization to address extreme weather events, providing a scientific basis for global climate governance, low-carbon transition, and ecological restoration.

Keywords

Energy Security, Physical Environment, Ecological Resilience, Climate Governance, Top 100 Challenges, CBAM

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 评判框架与核心准则

通过三维综合加权排序框架，本文对 21 世纪 100 项核心气候物理环境挑战进行优先级判定。重大性衡量风险对全球宜居环境与文明体系的冲击规模及不可逆损害程度；紧迫性关注临界阈值逼近速度与短期灾害加剧趋势；可解决性评估现有技术、治理机制与经济成本下的干预可行性[1]。

1.1. 解决重要气候与能源挑战的方法

在此基础上，所有应对举措严格遵循 SMART。其中有五项落地原则的说明：目标具体明确、依托 MRV 体系可量化衡量、依托成熟技术可实现、直接对应气候风险根源且与能源安全需求相关，并设定 2030、2040、2050 等阶段性时限，确保治理路径可追踪、可问责。

- 具体：目标界定清晰，明确治理对象、覆盖区域、管控范围；
- 可衡量：依托监测、报告、核查(MRV)体系，设置量化观测指标；
- 可实现：依托现有成熟技术与全球合作机制，不存在无法突破的硬性壁垒；
- 相关：举措直接对应气候风险根源，关联人类生存与能源安全核心需求；
- 有时限：设定 2030、2040、2050 等阶段性里程碑，划定完成时段或周期。

以上三大指标通过综合加权排序，所有配套治理目标、减排行动、生态修复工程均需原则上严格落实 SMART 的五项落地，旨在有效面对气候变化挑战。

1.2. 底层逻辑：气候 – 能源系统是人类生存的前置条件

现代文明完全依托气候、能源耦合系统稳定运转过程，如图 1 所示。化石能源温室气体排放打破地球亿万年来形成的自然碳循环平衡，引发辐射强迫失衡、冰川消融、极端风暴、海洋酸化、冻土碳释放等连锁物理灾难。一旦多重气候临界点相继突破，全球将丧失稳定宜居环境，粮食生产、淡水供给、沿

海人居、工业体系全面崩塌。因此，化解五十项气候物理环境挑战，本质是守护人类文明存续的基础生存条件。以下图示说明。

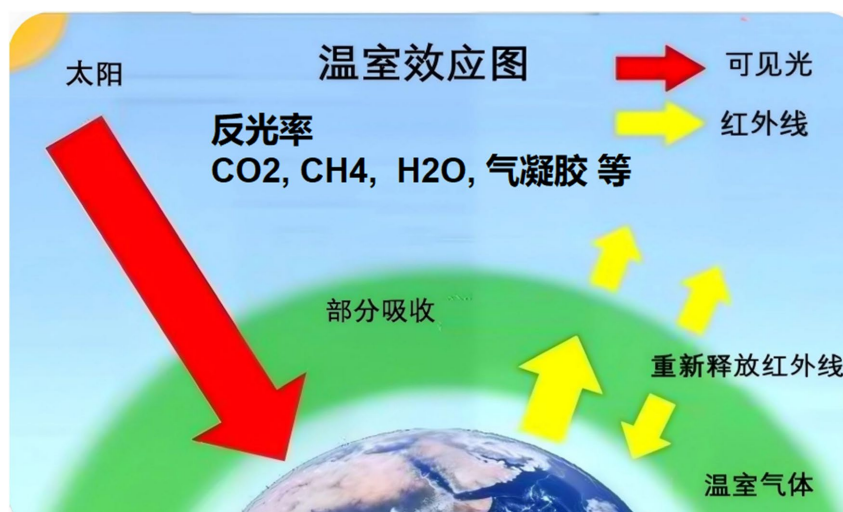


Figure 1. Interactions between solar radiation absorption/reflection and the climate-energy versus GHG feedback loop
图 1. 太阳辐射吸收/反射与气候 - 能源与 GHG 反馈环的相互作用

地球气候系统依赖于生态系统中复杂的太阳辐射吸收及反射；其中二氧化碳等温室气体在其中对于气候敏感度及人为相关气温变化的循环过程影响很大。现代的人类活动排放，使地球大气中存在着大量温室气体，包括如二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、臭氧(O_3)、氧化亚氮(N_2O)、氢氟氯碳化物类(CFCs, CFCs)等。减排脱碳凸显了重要性。

平衡气候敏感度(ECS)仍然是气候科学中最关键但又最不确定的参数之一。它简明地量化了与人为温室气体排放相关的长期增暖承诺，构成了《巴黎协定》等国际气候目标的科学基石。尽管其定义简单，ECS 并非一个可直接测量的常数，而是地球气候系统的一个涌现属性。该系统是一个由大气、海洋、冰冻圈和生物圈组成的紧密耦合的非线性耦合体，它们在一个巨大的时空尺度范围内相互作用。

锁定 ECS 的核心挑战在于气候反馈。二氧化碳翻倍产生的初始辐射强迫相对而言已被充分理解。然而，随后的温度变化改变了系统本身，触发了反馈回路。关键的正反馈包括：

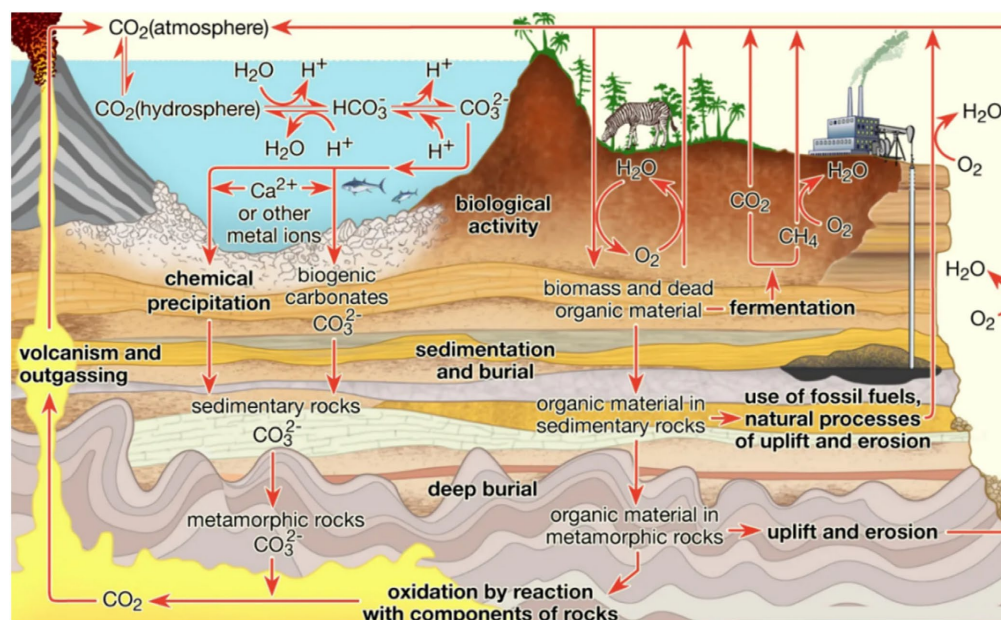
水汽反馈：较暖的大气容纳更多的水汽，而水汽本身就是一种强效温室气体，从而放大初始增温。

冰雪反照率反馈：冰雪融化暴露出更暗的陆地或海洋表面，降低行星反照率并增加吸收的太阳辐射。

云反馈：云量、云高和云光学性质的变化可以放大或抑制增温，代表了最大的不确定性来源。

这些反馈涉及从微观(如水分子对光子的吸收、冰晶形成)到宏观(如哈德莱环流等行星尺度环流型的位移)的过程。为了应对这种复杂性，气候科学采用了一系列模型和近似方法[1]。本文在大尺度上探讨了能量、温室气体和气候之间的基本关系，以及对用于建立健康环境模型的宏大/复杂方法进行分类；它为分类和评估用近似 ECS 的各种方法而构建较理想的平台[2]。

气候敏感度在气候科学中占据核心地位，因为它将辐射强迫转化为温度变化——这是最具社会相关性的量。平衡气候敏感度定义为，大气 CO_2 相对于工业化前浓度(约 280 ppm 至 560 ppm)持续翻倍后，达到平衡时全球平均地表气温的变化量。图 2 为地球气候系统中复杂温室气体(尤其是 CO_2)过程示意图[3]，展示了大气、陆地生物圈、海洋、土壤、化石燃料、火山活动等之间的碳循环(包括光合作用、呼吸作用、分解、扩散、燃烧等)。文献为来自大英百科全书的图片原图，具体参考图 2 如下。



注：本图展示了二氧化碳在生态系统中如何运作[3，按照大英百科全书的说明]。

Figure 2. Earth's climate system depends on ecosystem processes that includes the greenhouse gas cycle
图 2. 地球气候系统依赖于生态系统中复杂的温室气体过程

气候变化与能源系统之间存在着紧密的双向反馈机制。一方面，化石能源燃烧排放的大量二氧化碳进入大气，增强温室效应，导致全球气温上升；升温又进一步加速冻土融化、森林退化等自然碳释放过程，形成正反馈循环，加剧气候系统失衡。另一方面，气候变化引发的极端温度、干旱、风暴等物理事件，直接冲击能源生产、输配和消费环节——例如水电因干旱减供、风电因极端风速停机、输电设施因冰灾或飓风损毁，从而削弱能源系统的可靠性与韧性。这种“排放驱动变暖 - 变暖损害能源”的耦合回路，使得气候与能源不再孤立，而成为互为因果的复合风险系统[4]。通过 ESG 体系从 E 环境、S 社会和 G 治理三个维度评估企业的长期价值和可持续发展能力。

图 2 及图 3 中以生态系统中的二氧化碳循环为中心，清晰展示了人类活动排放、自然碳汇吸收、气候反馈放大以及能源基础设施脆弱性之间的交互链条[4]。下面图 3 简单说明有关的气候变化与能源双向反馈。生态系统中的二氧化碳循环联接了化石能源、ESG 及碳中和等多种反馈方式对于气候的作用。

台风是极端气候的典型表现形式之一，其生命周期中螺旋结构可展开描述。台风形成、发展、登陆及眼区演化阶段的过程如图 4 所示，概括如下(相关细节参见已有文献)。

台风简化眼区示意图：当海表温度超过约 26.5℃、垂直风切变低、科里奥利参数足够且存在预先存在的气旋性扰动时，生成开始。一旦建立起闭合环流，地表焓通量(由风速和海温驱动)使系统增强。眼区通过中心下沉气流清除云层(深度异常)而形成，同时眼壁在角动量守恒下收缩。

生成初始，需同时满足海表温度高于 26.5℃、垂直风切变较弱、科里奥利参数足够以及存在预先气旋性扰动等条件。在二维球面模型中，该阶段表现为在有利的大尺度位涡环境背景下，流体层局部加深，形成暖心异常。

一旦闭合环流建立，由风速和海表温度共同驱动的地表焓通量将促进系统进一步增强。眼区则通过中心下沉气流清除云层而形成，同时眼壁在角动量守恒约束下持续收缩。物理展示参考图 4 如下。

眼区演化过程中可能出现眼壁置换周期，即高位涡次级环形成并向内传播，暂时削弱主眼壁，之后风暴可能重新增强。此外，较高的背景海温(与较大的气候敏感度相关)将扩大台风的生成区域范围。

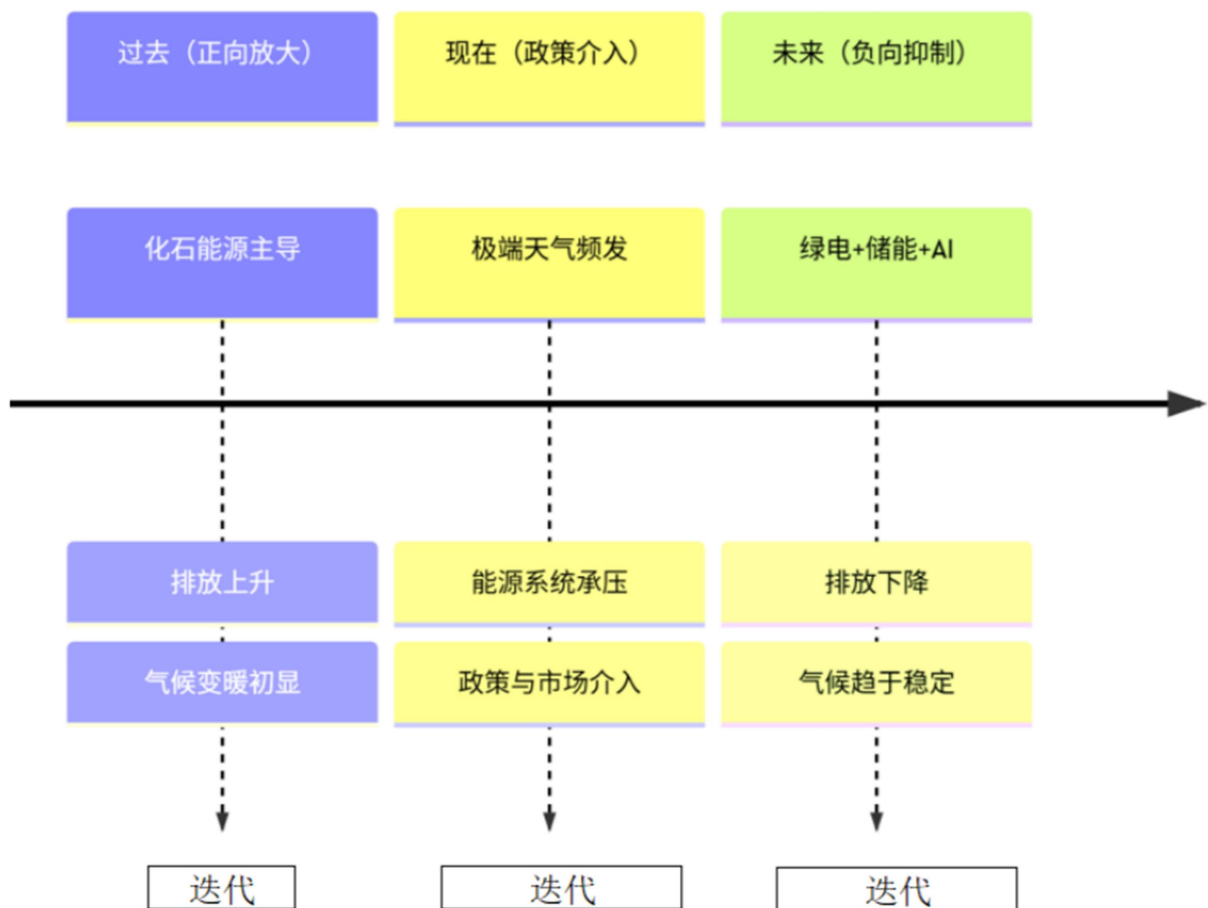


Figure 3. Brief illustration (from left to right) of the two-way scenarios and feedback within the ecosystem that link fossil energy, ESG, and carbon neutrality [4]

图 3. 生态系统内连接化石能源、ESG 与碳中和的双向场景与反馈的简要说明(从左到右) [4]

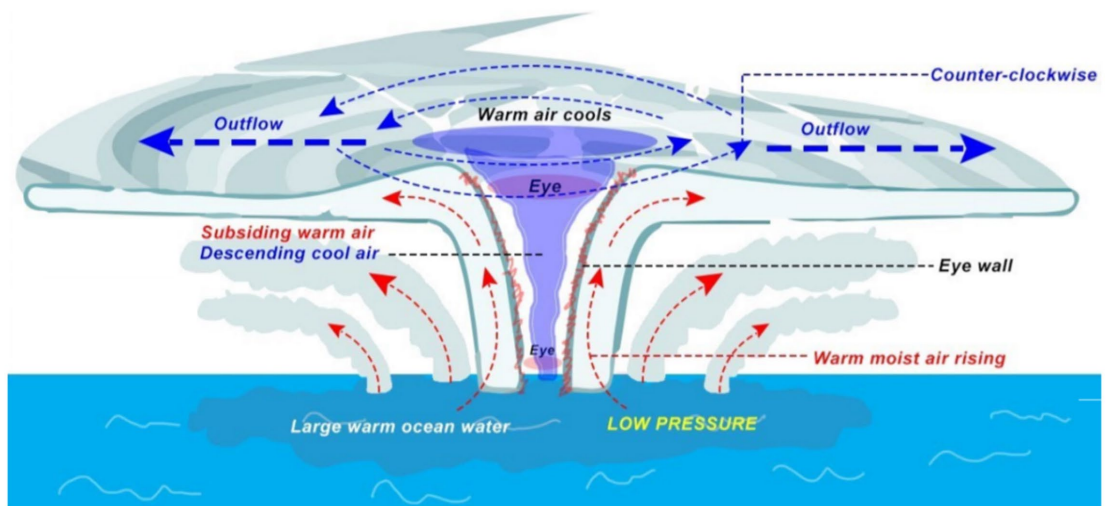


Figure 4. Simplified diagram of the typhoon eye zone. Generation initiates under the following conditions: sea-surface temperature $> \sim 26.5^{\circ}\text{C}$, low vertical wind shear, adequate Coriolis parameter, and an existing cyclonic disturbance

图 4. 台风简化眼区示意图：当海表温度超过约 26.5°C 、垂直风切变低、科里奥利参数足够且存在预先存在的气旋性扰动时，生成开始

一旦建立起闭合环流,地表焓通量(由风速和海温驱动)使系统增强。眼区通过中心下沉气流清除云层(深度异常)而形成,同时眼壁在角动量守恒下收缩。

2. 百项 21 世纪核心气候物理环境挑战(按优先级排序)

立足于 21 世纪人类生存所面临的严峻气候物理环境危机,通过系统调研与多轮德尔菲法专家研讨相结合的方式,构建了涵盖 100 项核心挑战的优先级清单。依据挑战属性差异,将其重新划分为四大类别:根本性物理挑战(40 项),聚焦地球系统能量收支与碳循环失衡等基础物理机制;关键科学问题(20 项),关注气候反馈、临界点动力学等尚待突破的认知前沿;关键技术瓶颈(20 项),涉及负排放、储能、模型计算等工程实现难点;治理制度需求(20 项),涵盖碳定价、公平核算、跨境协同等制度设计议题。

分类框架旨在为全球气候治理与科技攻关提供清晰的分层指引。

2.1. 根本性物理挑战(40 项)

2.1.1. 能源 - 气候耦合物理机制(10 项)

1. 大气 CO₂ 辐射强迫的物理锁定与多圈层响应失衡——地球系统能量收支的根本性扰动。
2. 化石燃料碳排放打破地球亿万年自然碳循环的物理平衡——碳循环扰动的物理基础。
3. 碳循环反馈的时间尺度错配(快排放 - 慢吸收)——碳循环动力学的基本矛盾。
4. 海洋碳汇的物理化学饱和度极限——碳汇容量有限性的物理约束。
5. 冰川 - 冰盖系统质量平衡的物理临界点——冰盖动力学的物理不稳定性。
6. 永久冻土碳库的相变正反馈——冻土碳释放的物理阈值。
7. 气候敏感度物理不确定性(ECS 2.5-4.0℃区), 气候系统响应物理不确定性的根源。
8. 地球反照率变化及辐射强迫累积的非线性加速效应——辐射强迫与物理反馈的耦合。
9. 应用多端过程的 EEE 模型及其解决有关能源产出、减排绩效与经济回报的最优平台。
10. 开发多种技术助力碳汇商业化——有效应对温室气体并成功地将碳捕获成果转化。

2.1.2. 气候系统临界点与突变动力学(10 项)

11. 大西洋经向翻转环流(AMOC)崩溃的物理触发阈值——海洋环流临界点的物理机制。
12. 西南极冰盖接地线后退的不可逆动力学——冰盖接地线后退的物理不稳定性。
13. 格陵兰冰盖表面融化℃高程反馈的物理正反馈——冰盖消融的物理加速机制。
14. 亚马孙雨林“碳源转碳汇”的临界点——热带雨林碳平衡的物理翻转。
15. 多年冻土大规模解冻的甲烷水合物释放——冻土甲烷释放的物理触发机制。
16. 北极海冰夏季全覆盖消失的冰℃反照率反馈——极地海冰的物理临界点。
17. 洋层结加强抑制垂向混合与营养盐输送——海洋物理层结的生态反馈。
18. 热带雨林水分循环崩溃的物理阈值——植被℃大气水分反馈的物理临界点。
19. 季风系统年代际突变的物理驱动力——季风系统多稳态的物理机制。
20. 海洋酸化叠加升温的钙化 - 溶解平衡移动——海洋碳化学的物理℃化学临界点。

2.1.3. 极端天气与气候动力学(20 项)

21. 台风/飓风最大潜在强度(MPI)对 SST 的热力学依赖——台风强度的热力学上限。
22. 台风多涡旋系统的拓扑相互作用与合并动力学——多涡旋系统的物理相互作用机制。
23. 台风登陆后眼墙结构的崩溃与重新组织动力学——登陆后台风结构演变的物理过程。
24. 炸弹气旋(爆发性温带气旋)的斜压 - 潜热耦合发展机制——温带气旋快速增强的物理驱动。

25. 大气河(Atmospheric River)的水汽输送物理通道与登陆突变——大气河物理输送与突变机制。
26. 超级单体雷暴的旋转上升气流(中气旋)维持动力学——强对流风暴的物理维持机制。
27. 干旱 - 热浪复合事件的陆 - 气耦合反馈强化——复合极端事件的物理耦合机制。
28. 短历时极端降水强度对 Clausius-Clapeyron 关系的超响应——极端降水物理对升温的超敏感性。
29. 城市热岛效应与热浪的物理叠加——城市热环境的物理放大机制。
30. ENSO 遥相关的非平稳性与极端事件调制——ENSO 物理遥相关的非平稳变化圈层相互作用与地球系统反馈。
31. 海平面上升的多源物理贡献(热膨胀、冰川、冰盖、地下水)——海平面变化的物理源汇平衡。
32. 海洋热含量增加的垂向分配物理效率——海洋热吸收的物理分配机制。
33. 永冻土解冻的侧向热侵蚀物理过程——冻土热侵蚀的物理机制。
34. 极地放大效应对中纬度急流和极端天气的物理调制——极地 - 中纬度物理耦合。
35. 甲烷水合物解离的物理阈值与释放速率——甲烷水合物的物理稳定性。
36. 土壤水分 - 温度耦合对干旱传播的物理控制——干旱传播的物理控制机制。
37. 云辐射反馈的物理参数化不确定性——云反馈物理的不确定性根源。
38. 平流层 - 对流层耦合对地表天气的物理影响——平流层 - 对流层物理耦合。
39. 海洋生物泵效率对表层升温的物理响应——海洋生物泵的物理敏感性。
40. 地球能量收支失衡的物理归因与演化——地球能量收支的物理不平衡。

2.2. 关键科学问题(20 项)

41. 碳移除技术(DACCS/BECCS)的规模化物理极限与地球系统反馈——负排放技术的物理可行性。
42. 气溶胶 - 云相互作用的物理机制与辐射强迫贡献——气溶胶物理效应的不确定性。
43. 北极 - 中纬度天气联动的物理因果链与可预测性——极地 - 中纬度物理因果。
44. 气候变率(ENSO、PDO、AMO)非平稳性物理驱动源——气候变率非平稳性的物理源。
45. 冰架 - 海洋相互作用的物理过程与接地线稳定性——冰 - 洋耦合的物理机制。
46. 云凝结核(CCN)来源变化的物理驱动与云物理响应——云凝结核物理变化的驱动。
47. 海洋混合层深度变化对海气通量的物理控制——混合层物理变率的控制。
48. 植被生理响应(气孔闭合)对蒸腾和地表水循环的物理反馈——植被生理的物理反馈。
49. 大气边界层高度变化对污染物和能量垂直交换的物理控制——边界层物理的控制。
50. 季节性冻土变化对高纬度碳通量的物理调控——季节性冻土的物理调控。
51. 海洋涡旋在热量和碳输运中的物理作用——海洋涡旋的物理输运作用。
52. 重力波在中高层大气能量传输中的物理作用——重力波的物理能量传输。
53. 平流层水汽变化对地表气候的物理影响——平流层水汽的物理气候效应。
54. 海洋脱氧的物理 - 生物耦合机制与扩大趋势——海洋脱氧的物理 - 生物耦合。
55. 热带气旋生成频数的物理环境控制因子——热带气旋物理环境的控制。
56. 臭氧层恢复对平流层动力和地表气候的物理影响——臭氧物理恢复的气候效应。
57. 亚洲季风与 ENSO 耦合的非平稳物理机制——季风 - ENSO 耦合的物理非平稳性。
58. 沙尘气溶胶长距离输送与生物地球物理化学效应——物理输送与生物地球化学效应。
59. 野火 - 气候反馈的物理机制与可燃物 - 气象耦合——野火 - 气候物理耦合。
60. 对流层顶折叠对平流层 - 对流层交换的物理驱动——对流层顶物理折叠的驱动。

2.3. 关键技术瓶颈(20 项)

61. 电网级长时储能(季节性储能)的物理与材料技术瓶颈——长时储能的物理 - 材料限制。
62. 绿氢制备的电解效率与规模化物理限制——绿氢制备的物理效率极限。
63. 直接空气碳捕集(DAC)的吸附 - 脱附能耗与物理效率极限——DAC 的物理能耗约束。
64. 超导储能与传输的物理材料瓶颈——超导储能的物理材料限制。
65. 碳捕集利用与封存(CCUS)的地质封存物理容量与泄漏风险——CCUS 物理封存安全性。
66. 高空间分辨率地球系统模型的物理参数化与计算复杂度——高分辨率物理模拟的算力约束。
67. 极端天气集合预报的物理不确定性量化方法——集合物理预报的不确定性量化。
68. 能源 - 粮食 - 水耦合系统的物理与工程规划方法——耦合系统物理规划的方法学。
69. 气候韧性关键基础设施的物理设计与百年一遇标准——气候韧性物理设计的标准。
70. 地球工程(太阳辐射管理 SRM)的物理副作用量化——SRM 物理副作用量化。
71. 生物质能碳捕集与封存(BECCS)的全生命周期物理效率——BECCS 物理全链条效率。
72. 核聚变能源的物理约束(托卡马克等离子体稳定性)——核聚变物理约束。
73. 钙钛矿太阳能电池的稳定性物理降解机制——钙钛矿物理稳定性。
74. 建筑节能材料的热物理性能与规模化物理制备——节能材料的物理制备。
75. 低成本高能量密度电池的物理化学极限——电池物理化学极限。
76. 氨作为氢载体的物理储运效率与裂解能耗——氨物理储运效率。
77. 地热资源开发的增强型地热系统(EGS)物理成网技术——EGS 物理成网。
78. 超临界二氧化碳布雷顿循环的物理热力学优化——超临界 CO₂ 物理热力学。
79. 人工智能气候模型的可解释性物理约束——AI 物理可解释性约束。
80. 数字孪生地球平台的物理数据同化与实时更新——数字孪生物理数据同化。

2.4. 治理与制度需求(20 项)

81. 全球统一碳定价机制的物理与制度设计——碳定价制度的治理设计。
82. 碳边境调节机制(CBAM)的公平性物理核算与国际协调——CBAM 物理核算的公平性。
83. 监测、报告与核查(MRV)体系的物理数据互操作性——MRV 物理数据互操作性。
84. 气候 - 能源 - 粮食 - 水资源耦合系统的跨部门物理协同治理——耦合系统物理协同治理。
85. 气候移民的国际法律框架与物理迁移预测——气候移民物理预测与法律框架。
86. 气候 - 金融系统性风险的物理压力测试方法——金融气候物理压力测试。
87. 净零承诺的物理路径追踪与问责机制——净零物理路径问责。
88. 公正转型中的就业 - 能源物理经济模型——公正转型物理经济模型。
89. 低碳技术转移的物理适宜性评估——低碳技术物理适宜性评估。
90. 公众气候行动的物理认知与行为反馈——气候行动物理认知反馈。
91. 气候 - 冲突复合风险的物理驱动与预警机制——气候 - 冲突物理预警。
92. 海洋保护区的碳汇物理管理与非法捕捞——海洋碳汇物理管理。
93. 城市群气候韧性的物理规划标准——城市气候韧性物理规划。
94. 国际气候谈判的物理目标责任分配机制——气候谈判物理责任分配。
95. 气候科学与地方传统知识融合的物理适应性——气候融合物理适应性。
96. 气候损害的物理归因与法律追责框架——气候损害物理归责。
97. 低碳基础设施投资的物理风险评估——低碳基建物理风险评估。

98. 气候数据开放共享的物理标准化——气候数据物理标准化。

99. 多智能体系统在气候-能源协同治理中的物理部署——多智能体物理协同治理。

100. 全球气候治理机构改革的物理问责与执行力——气候治理物理执行力。

应对气候变化的技术有时限性，作者建议的完成时段如下。1-设定 2030 全球碳达峰；2-2040 基本去石化燃料；3-2050 全球碳中和等阶段性里程碑。

3. 技术创新应对气候变化及其趋势

气候变化对能源系统构成三重直接冲击如图 5 所示：极端温度加剧供需矛盾，干旱削减水电出力，复合灾害(如风暴潮与热浪并发)考验电网韧性。与此同时，能源系统排放的二氧化碳又反向驱动气候变暖，形成双向正反馈螺旋——若不干预，将自我强化至不可逆临界点[5] [6]。

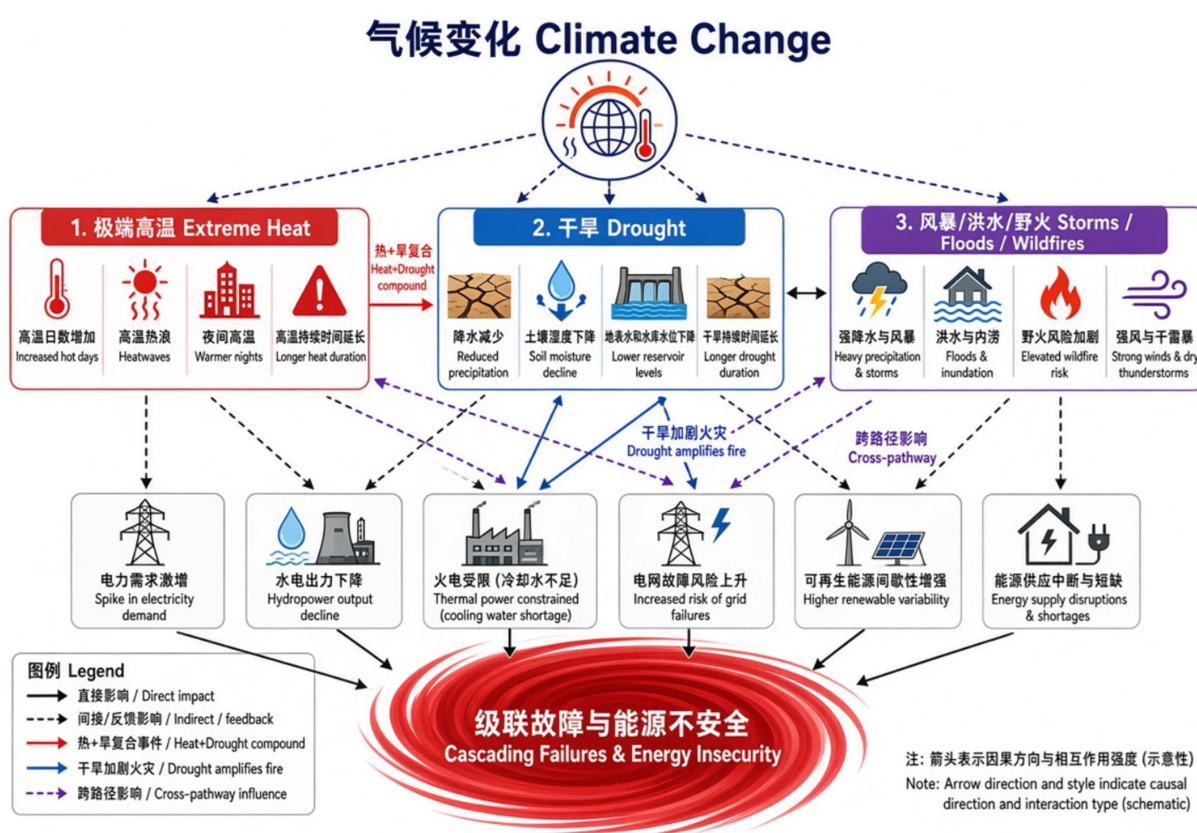


Figure 5. Potential cascading issues resulting from climate change and energy insecurity, which themselves may be exacerbated by traditional fossil-fueled energy and its GHG emissions

图 5. 由气候变化与能源不安全导致的潜在级联问题，而这两者本身可能因传统化石能源及其温室气体排放而加剧

本图描述气候变化可能带来的级联故障；传统能源及其 GHG 引起的能源不安全性。

面对这一挑战，以大模型智能体与数字孪生为核心的技术创新正在重塑能源系统的智能化范式。四大趋势尤为突出：大模型智能体赋予系统自主感知与通用决策能力；隐私计算协同打破数据孤岛，实现“数据可用不可见”；泛化能力跃升通过模块化组件库快速适配多元场景，大幅降低部署成本；虚实深度融合使数字孪生能够实时映射物理世界，构建“预测-响应-优化”闭环。

绿色清洁能源和人工智能(AI)能源系统的应用很重要[7]。此外，AI 应用于绿色清洁能源和智能能源

系统仍需跨越关键技术门槛：气象、负荷与电价的多重不确定性难以精准预测；毫秒级实时决策对算力与通信延迟提出极致要求；关键基础设施成为网络攻击目标，需构建主动防御体系；安全、低碳与经济等多目标常相互冲突，亟需多目标协同优化框架。

在安全性方面，应对策略强调“预测性治理”而非被动响应：通过 AI 增强的极端事件早期预警(如台风路径与强度概率预测)，提前识别脆弱节点。在能源调度中实时平衡供需与碳约束，确保系统在扰动中仍能维持稳定。最终，技术创新需嵌入“排放抑制-气候稳定-系统韧性增强”的负向抑制回路，使能源系统从气候问题的“受害者”和“推手”，成为有效应对气候变化的治理技术抓手或“调节器”。

4. 总结

本文讨论了气候变化对于可持续发展挑战的“重大性、紧迫性、可解决性”三维评判框架与 SMART 行动准则，系统梳理了 21 世纪面向人类生存基础的 100 项核心气候物理环境挑战，并将其重新划分为根本性物理挑战(40 项)、关键科学问题(20 项)、关键技术瓶颈(20 项)和治理制度需求(20 项)四大类别。研究表明，化解气候危机的根本路径在于从物理机制出发，依托耦合建模与智能治理工具，推动能源系统低碳转型与全球气候韧性协同，从而筑牢人类文明存续的宜居根基。

致 谢

感谢 Prof. A. Tiwari 的讨论，钱维宏老师对于本文提供了有效的建议。本研究致谢重庆大学的基金支持 03140021090001。

参考文献

- [1] MacMartin, D.G., Kravitz, B., Keith, D.W. and Jarvis, A. (2014) Dynamics of the Coupled Human-Climate System Resulting from Closed-Loop Control of Solar Geoengineering. *Climate Dynamics*, **43**, 243-258.
<https://doi.org/10.1007/s00382-013-1822-9>
- [2] 宋家冯, 杨之乐, 梁睿, 等. 耦合多源不确定性的虚拟电厂极端场景: 分类框架、生成机制与影响评估综述[J]. 集成技术, 2026, 15(2): 50-75.
- [3] Encyclopædia Britannica (2026) Typhoon. In Britannica Academic.
<https://www.britannica.com/science/tropical-cyclone#ref1>
- [4] 金安君, 李勇. 碳中和与绿色能源系统[M]. 北京: 北京大学出版社, 2025.
- [5] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. AR6.
- [6] IPCC (2022) Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. AR6.
- [7] Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., *et al.* (2020) The Role of Artificial Intelligence in Achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Communications*, **11**, Article No. 233.