

气候变化对不同种类地质灾害的作用

——以全球变暖为例

范存豫

同济大学 上海 200092

【摘要】：全球变暖作为当前最显著的气候变化特征，正深刻影响地球系统的各个圈层，并成为诱发地质灾害的关键驱动因素。本文系统探讨了全球变暖背景下不同气候变化类型对地质灾害的影响机制。首先从气候系统视角出发，阐释了气温升高如何加速水循环，并增强大气持水能力，从而提升极端降水的发生频率与强度。然后从海岸崩塌和冰岩崩塌两方面阐述了极端降水对地质灾害的驱动机制。最后聚焦北极圈内永久冻土泥炭地对全球变暖的响应，阐释了冻土融化释放温室气体的过程。研究表明，气候变化通过影响气温、降水格局及冰冻圈要素，以复杂且系统性的方式作用于地质灾害的发生与发展过程，呈现“牵一发而动全身”的显著特征。

【关键词】：全球变暖；极端降水；地质灾害；海岸崩塌；冰岩崩塌；永久冻土

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.003

气候变化对自然系统的影响范围广泛且表现形式多样，已是普遍认知的科学事实。本文聚焦于全球变暖这一核心议题，旨在系统探讨不同气候变化类型对地质灾害的影响机制。

全球气候变暖主要由温室效应的持续累积所致，这打破了地气系统能量吸收与发射的原有平衡。根据世界多家权威气象机构对全球平均气温距平的监测，如图1所示，2025年的全球年均气温已较工业革命前水平高出1°C以上。

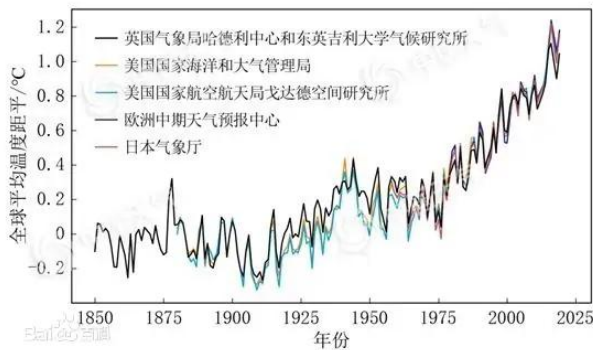


图1 全球平均温度距平

全球气温的持续攀升对地质灾害的诱发机制值得深入探讨，尤其是气温变化与降水格局之间的内在关联。

1 温度与降水

在全球变暖的宏观背景下，水资源管理已成为人类社会面临的重大挑战之一。自20世纪90年代以来，气候变暖趋势的加剧深刻影响了人类生产生活的各个层面，导致干旱与洪涝灾害频发。因此，如何科学、精准地评估极端气候事件，是当前亟待解决的难题。从气候系统的视角解析水循环演变过程可知，全球变暖加速了水循环速率。由于陆地和海洋蒸发量增加，可用淡水资源总量减少，极端干旱事件因此更为频繁。同时，

大气持水能力随气温升高而增强，意味着降水形成需要更高的水汽饱和度。近年来的研究也证实了极端降水对全球变暖的响应机制：尽管全球降水总量呈上升趋势，但降水强度的增幅更为显著，即极端降水事件的发生频率增加，这给水资源的合理调配带来了更大压力。

我国气温分布呈现出显著的空间异质性，即“南高北低”的基本格局^[1]。随着全球变暖的持续，我国气温亦表现出整体上升的趋势。通过对比分析1960-1989年与1990-2013年两个时段的气温数据，可以发现前一阶段全国年均气温为10.85°C，而后一阶段升至11.66°C，累计升幅达0.81°C。这一显著差异为探讨不同气候背景下极端降水与增温的响应规律提供了重要参考^[2]。

降水的形成以水汽达到饱和为前提^[3]。在理想条件下，年均气温较高的区域，其饱和水汽压对温度升高的敏感度更强。这既说明极端降水随温度变化的速率与可能降水量随温度变化的趋势相符，也反映出不同温度条件下极端降水变化率在温度敏感性上存在差异。而极端降水的变化特征与饱和水汽压变化率的空间分布基本吻合，即在气温较高的区域，两者的变化率均较大。

在明确气温升高会同步提升极端降水变化率与饱和水汽压变化率的基础上，本文后续将聚焦于海岸崩塌与永久冻土融化两个典型案例，剖析气温与降水变化对地质灾害的具体影响机制。

2 极端降水与海岸崩塌

东山县地处福建省漳州市南部沿海，该区域主要的海洋地质灾害类型为海岸崩塌。当地海岸线的岩石表面经长时间暴晒后温度升高，再受海浪冲刷，易因热应力变化而产生表层脆化，类似“淬火”效应^[4]。随着风化作用持续，岩质海岸裂隙逐渐

发育。由于下部岩体长期受海水侵蚀与海浪剥蚀，常形成陡峭的倾斜海岸。岩质海岸的崩塌主要源于裂隙的扩展，这些裂隙切割岩体，易诱发楔形滑落。当岩体后缘裂隙形成后，若遭遇极端降水引发海平面暂时性上升，海水将灌入裂隙^[5]。海水进入后，不仅削弱了裂隙面的抗剪强度，还增加了静水压力，从而推动岩体沿不利结构面发生滑动，加速海岸崩塌进程。

东山县土质海岸多位于岩岸向砂岸的过渡地带或砂岸后缘，整体岸线较长。土岸的破坏模式虽与一般土坡失稳有相似之处，但也因其与海平面变动的紧密关联而具有特殊性。当极端降水导致海平面短时抬升，沿岸土体逐渐趋于饱和。饱和状态下，土体自重增加，抗剪强度显著降低。待极端降水过程结束、海平面回落时，岸坡土体内水分难以迅速排出，致使坡肩部位荷载较大，而坡脚仍浸没于水中，抗剪强度进一步劣化。在此条件下，沉重的坡肩部分在重力作用下，易沿坡脚土体的软弱结构面或剪切带发生滑塌。

本节从岩岸与土岸两个维度，阐释了极端降水引发的海平面暂时性抬升对海岸崩塌的驱动机制。针对此类海岸灾害，除采用耐腐蚀材料的传统锚杆支护配合裂缝填埋外，还可辅以人工护岸措施。常见做法包括修建丁坝以消减波能，使海岸线免受海浪直接冲击。条件允许的地区，可种植红树林、芦苇等适生植被进行生态护岸；或通过投放人工鱼礁，在保护海岸的同时，亦有助于修复与维持海洋生态系统平衡。

3 温度，降水和冰岩崩塌

冰岩崩塌作为冰-岩体快速失稳的自然过程，是破坏力最强的山地灾害之一。因其具有极强的流动性，可对下游数十公里范围内的区域造成深远影响，严重威胁周边居民及基础设施安全。针对2021年发生于印度查莫里地区的冬季山洪事件，后续调查分析表明，该次灾害由上游高山区冰川与岩石的整体崩塌触发。事发地点位于喜马拉雅山脉西段、南达昆提峰邻近区域，地形条件极为复杂。从地表形态演变特征判断，此次事件属于冰川-岩石复合型滑坡，即冰川下覆基岩发生滑动，带动上部冰体与岩体整体崩落^[6]。崩塌源区海拔介于5000至5600米之间。源区水平长度约794米，顶部最宽处约608米，总面积达 2.89×10^6 平方米。经测算，崩塌区流失物质总体积约为 2.46×10^7 立方米，源区范围内平均地表高程下降85米。此外，源区高程变化呈现出明显的空间规律：崩塌体厚度自两侧向中部、自低海拔向高海拔逐渐递增，并在崩塌区中部及上部达到最大变化值。

崩塌区及其邻近区域的冰川在崩塌前经历了持续且加速的减薄过程。这一减薄趋势延伸至近似对应于冰川物质平衡线的海拔高度，且恰好横向穿过冰岩体。这表明冰岩体的几何形态在过去一段时间内持续发生改变，导致沿下坡方向的驱动力不断增加，同时冰川前端或底部的支撑力相应减弱。事实上，冰川减薄现象并非孤立存在，整个西喜马拉雅山脉广阔区域内

的冰川均表现出长期的地表减薄趋势。1981至2020年间部分地区地升温速率达 $0.14^\circ\text{C}/\text{年}$ 。据此推断，全球变暖驱动的温度上升是促使崩塌区冰岩几何形态改变的关键背景因素。

此外，天气过程分析表明，在冰岩滑动启动期间，崩塌区累积降水量高达127.41毫米，意味着此时有大量液态水输入冰岩系统，提供了强大的外部驱动力。而在崩塌触发前的6个月内，累积降水异常值为-108.37毫米，反映出2020至2021年冬季相对干燥，并伴随异常增温现象，因此产生出的冬季融水在冰岩蠕变过程中可能发挥了基底润滑或冻胀效应等复杂作用，成为最终触发崩塌的直接诱因。

综上所述，查莫利冰岩崩塌事件很可能是长期气候变化与短期天气异常共同作用于陡峭地形与脆弱地质条件的综合结果。具体而言，长期气候变暖导致崩塌体形成“头重脚轻”的几何失稳结构；随后，异常强降雨诱发冰岩体启动滑动；最终，冬季异常升温事件在持续滑动过程中引发整体崩解。

4 全球变暖，永久冻土和泥炭地

2020年夏季，北极圈内爆发了大规模野火。通常情况下，北极夏季气温应维持在 10°C 上下，但如图2所示，肆虐的野火使得该区域大面积地表温度飙升至 30°C 以上。这种极端异常的高温，势必加剧冰川消融与海平面上升，并诱发一系列连锁地质灾害。而这一野火现象频发的原因也将永久冻土泥炭地的演变与全球气候变暖紧密联系起来^[7]。

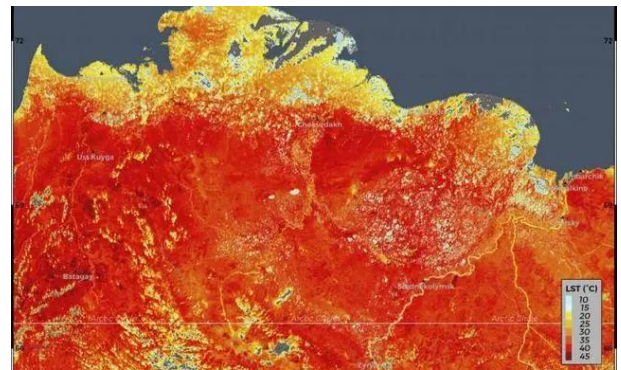


图2 2020年北极圈夏季某处温度监控图

永久冻土在北极圈内地泥炭地中占据较高的比例。据估算，北部泥炭地总面积约为370万平方公里，其中约170万平方公里为永久冻土区^[8]，且北部泥炭地的高碳汇区域与永久冻土分布区高度重合。

为评估冻土融化对泥炭地氮储量的影响，可将永久冻土泥炭地向非冻土泥炭地转化的过程划分为四个典型阶段^[9]：

(1) 初始冻结阶段：尚未融化的永久冻土泥炭地能够有效固定大气中的二氧化碳，发挥碳汇功能，同时甲烷与一氧化二氮的释放处于相对平衡状态。

(2) 初始融化阶段：永久冻土开始消融，活动层温度升高，导致活动层与新近融化的冻土层向大气释放二氧化碳和一

氧化二氮,但甲烷通量仍保持稳定。若融化层中含冰量较高,可能形成热喀斯特洼地或沼泽。

(3) 热喀斯特阶段:新形成的热喀斯特沼泽虽能重新固定部分大气二氧化碳形成临时碳汇,但同时会向大气释放大量的甲烷。对北极地区地层沉积记录的研究显示,历史上冻结泥炭曾发生大规模碳损失,研究人员推测可能是溶解性有机碳通过热喀斯特沼泽的水生态系统流失所致。同时,冻土融化亦可形成热喀斯特湖泊。这些湖泊不仅释放二氧化碳,也是甲烷的重要排放源。释放至大气的甲烷,最终为北极野火的持续燃烧提供了条件。

(4) 重新平衡阶段:历经数个世纪的漫长演化,完全融化的泥炭地中碳氮储存逐渐趋于稳定,达到新的平衡状态。此阶段,温室气体释放速率随系统稳定而减缓;原本释放二氧化碳的热喀斯特湖泊,也可能逐步转变为大气二氧化碳的碳汇。

需要指出的是,并非所有冻土区都会严格经历上述四个阶段,不同阶段的特征有时可能同一区域并存。

北方泥炭地储存了全球约80%的泥炭地碳氮储量,并在调节大气二氧化碳浓度方面发挥关键作用。若全球升温幅度控制在2°C以内,仅约相当于工业革命前一半面积的冻土泥炭地可能得以保存;而若升温达到6°C,泥炭地中的永久冻土层将基本消失殆尽^[10]。冻土融化还会促成一个不良循环:全球变暖驱动泥炭地永久冻土融化,后者释放的温室气体进一步加剧气候变暖,进而引发更大范围的冻土退化,如此循环往复。

5 总结

本文以全球变暖这一典型气候变化现象为切入点,首先探讨了其对极端降水格局的影响机制;进而选取两类崩塌灾害进行剖析,分别阐释了极端降水对海岸崩塌的独立作用,及其与温度升高因素共同对冰岩崩塌的诱发过程;最后,聚焦于全球变暖背景下泥炭地永久冻土的消融响应,揭示了由此引发的地质灾害可能通过温室气体释放对气候变暖产生反馈与强化效应。综上所述,气候变化对地质灾害的影响路径复杂多样,具有“牵一发而动全身”的系统性特征。

参考文献:

- [1] 章杰,鱼京善,来文立.全球变暖背景下极端降水变化率与气温的响应关系[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017-12 53(6):722.
- [2] 孔锋,史培军,方建,等.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J].灾害学,2017,32(2):165-174.
- [3] 张金堂,乔光建.气候变化对海河流域降水量影响机理分析[J].南水北调与水利科技,2009-6,7(3):1672-1683.
- [4] 董林鑫,郑艳霞,程冬兵,等.气候变化对降雨侵蚀力的影响研究综述[J].长江科学院院报,2015,32(03):59-63.
- [5] 陈晓伟.东山县海岸崩塌地质灾害成因初探及防治措施[J].四川建材,2023-5 49(5):98.
- [6] 周玉杉,李新,郑东海,等.气候变化和异常天气共同导致印度杰莫利冰-岩崩塌[J].中国科学:地球科学,2023 51(12):2112-2125.
- [7] 汪洋,朱建东.永久冻土融化将进一步加速气候变化[J].资源环境与工程,2020-12,34(4).
- [8] 陈哲,金艳霞,孙建,等.全球变暖对高寒冻土区温室气体通量影响研究进展[J].草地学报,2023,31(4):929-942.
- [9] G.Hugelius,J.Loisele,S.Chadburn et al.Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw[J].PNAS,2020-8,117(34):20438-20446.
- [10] B.K.Biskaborn et al.Permafrost is warming at a global scale[J].Nat.Commun,2019,10:264.