

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2020.002

赵励耘, John C. Moore, Mike Wolovick. 针对冰盖的定向地球工程研究 [J]. 气候变化研究进展, 2020, 16 (5): 564-569

Zhao L Y, Moore J C, Wolovick M. Targeted geoengineering for ice sheets [J]. Climate Change Research, 2020, 16 (5): 564-569



针对冰盖的定向地球工程研究

赵励耘^{1,2}, John C. MOORE^{1,3}, Mike WOLOVICK¹¹ 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875;² 南方海洋科学与工程广东实验室(珠海), 珠海 519082;³ 拉普兰大学北极中心, 罗瓦涅米 96101, 芬兰

摘要: 针对冰盖的定向地球工程研究旨在增强冰盖稳定性和减缓冰盖物质流失, 从源头上减少冰盖对海平面上升的贡献, 有望为应对气候变化和保护海岸线争取几百年的时间。冰盖地球工程主要作用在冰底和冰架-海洋界面上, 主要途径如下: (1) 排干或冻结冰盖底部水来干燥冰床, 增强冰盖底部摩擦力; (2) 在海洋中建造人造岛来支撑漂浮的冰架; (3) 在冰架前端建造水下隔离墙, 阻止温暖的海水到达冰川底部以减缓其融化。冰盖地球工程包括数值模拟、方案设计、工程试验和政治法律等诸多方面的研究。国际上的研究团队正在开展数值模拟和方案设计方面的研究, 工程试验和政治法律等方面的研究尚未起步。预计工程试验的难度阶梯很可能是从实验室试验开始, 到小尺度的野外试验, 接着到格陵兰冰盖的入海冰川, 最后到南极冰盖的入海冰川。针对冰盖的定向地球工程研究很有可能成为21世纪全球变化领域新兴的研究方向。

关键词: 海平面上升; 冰盖; 地球工程

引言

全球气候变暖造成的海平面上升, 将给全世界沿海国家和城市造成社会和经济方面的显著影响。为了应对全球气候变暖, 在人类努力减少温室气体排放量的同时, 一些学者提出了人工影响太阳辐射的地球工程^[1-2]: 通过向平流层注入气溶胶^[3]或者增亮海云^[4]等手段人工为地球降温。近十几年来, 国内外对人工影响太阳辐射的地球工程的学术研究日益活跃, 在自然科学和社会科学领域都开展了广泛的研究^[5-10], 引起了学术界、

政界和公众的广泛关注和讨论。同时也带来了激烈的争议, 面临着很多方面的挑战, 其中全球治理是一个焦点问题, 因为涉及世界各国政治和社会的选择^[9]。因此, 地球工程很可能长期停留在“纸上谈兵”上, 很难在21世纪达成共识并付诸实施。

2019年Lenton等^[11]在*Nature*评述文章中发出警示: 气候系统比我们想象的更敏感, 当前人类已经越过了气候系统的几个临界点(9个临界点中的5个在冰冻圈), 留给人类进行气候干预的时间几乎为零。然而, 气候谈判举步维艰, 进展缓慢, 21世纪2℃温控目标很难实现。鉴于温室

收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-02-23

资助项目: 国家自然科学基金(41941006); 国家重点研发计划(2018YFC1406104)

作者简介: 赵励耘, 女, 副教授, zhaoliyun@bnu.edu.cn

效应的长期滞后性和后果的严重性, 应该提出、制定并在可能的情况下实施新的适应措施来应对气候变化带来的后果。海平面上升是全球变暖造成的严重后果之一, 应对其影响也应考虑新的措施。包括 IPCC 第五次科学评估报告 (AR5) 在内的诸多研究表明, 未来两极冰盖 (特别是南极冰盖) 的物质损失是未来海平面上升预估量的最大不确定性来源。2018 年地球工程领域的部分学者将地球工程研究聚焦到两极冰盖上, 明确提出了针对冰盖的定向地球工程研究^[12]。

冰盖物质平衡受到大气和海洋的作用而发生改变: 冰盖在冰面受到大气的强迫, 气候增暖会使冰面消融加剧; 冰盖在冰架—海洋界面处受到海洋环流的强迫, 暖水会导致冰架的消融和崩解。人工影响太阳辐射给大气降温几乎遥不可及, 科学家们更多地考虑在冰架—海洋界面处采取增强冰盖稳定性的措施, 从源头上减少冰盖物质流失及其对海平面上升的贡献, 预防冰盖崩塌造成大幅度的海平面上升。

为了避免误解, 特别要强调, 针对冰盖的地球工程不能缓解温室气体造成的全球变暖, 更不能作为借口放缓控制全球变暖。冰盖地球工程研究的目的是为了给应对气候变化和保护海岸线争取宝贵的百年尺度的时间。

针对冰盖的定向地球工程获益面覆盖全球, 而实施区域仅在极地, 对全球环境的影响相对较小, 比全球范围的治理更有希望达成共识, 在可预见的未来为人类应对气候变化的后果提供可行的措施。在加强海岸线防护建设的同时, 开展增强冰盖稳定性的冰盖地球工程研究, 预防冰盖崩塌造成的大幅度的海平面上升, 具有重大的科学意义和现实意义。本文就研究背景、国内外研究现状和未来的展望综述针对冰盖的地球工程研究进展。

1 海平面上升与极地冰盖的物质损失

不同研究对 21 世纪海平面上升的预估结果存在较大差异。有研究预估, 在 21 世纪中叶, 2℃

的升温预计将导致全球海平面平均上升 20 cm, 到 2100 年 5℃ 的升温将导致全球海平面平均上升 0.9 m, 并且在全球 80% 的海岸线上, 海平面上升的 95% 信度区间的上限将超过 1.8 m^[13]。DeConto 等^[14] 的研究表明如果排放量继续有增无减, 全球海平面到 2100 年预计上升将超过 1 m。

IPCC 《全球升温 1.5℃ 特别报告》再次强调, 即使在 21 世纪可以将全球升温限制在 1.5℃ 内, 2100 年之后海平面仍将继续上升 (高信度)^[15]。即使是小幅的海平面上升, 其造成的破坏也将是巨大的。Hinkel 等^[16] 在未来多种气候情景下, 预测在没有海岸线防护的情况下, 每年将有多达 100 万人被迫迁移, 1 亿~5 亿人口需要临时性转移安置, 这些迁移的人口将会间接影响到全世界的大多数人口; 同时, 海平面上升将造成全球每年高达 50 万亿美元的经济损失, 沿海城市和岛屿国家将被破坏。即使在有海岸防护的情况下, 每年用于防护的费用预计将高达 200 亿~700 亿美元, 每年仍有多达 10 万人被迫迁移。无法承担实施保护和适应措施费用的城市将不得被放弃, 造成社会、经济和环境的严重损失。研究预测海平面升高 0.5 m 将迫使中国广州至少 100 万人口进行迁移, 而升高 2 m 将影响超过 200 万人口^[13]。因此, 应对海平面上升是应对气候变化的紧迫任务。

IPCC AR5 指出, 全球海平面最大的不确定性是极地冰盖对未来海平面上升的贡献量^[17]。在加强海岸线防护建设的同时, 在源头上加强极地冰盖的稳定性, 减少极地冰盖对未来海平面上升的贡献量, 是应对海平面上升的重要研究方向。

近几十年来, 格陵兰冰盖的表面物质平衡呈现负增长的趋势: 北极气温的加速增暖导致格陵兰冰盖消融速度加快, 入海冰川的冰架前端多次崩解和后撤。格陵兰冰盖物质流失大约一半来自表面消融, 另一半来自冰盖边缘快速冰流的动力过程和冰架的崩解^[18]。格陵兰冰盖在 21 世纪对海平面上升的贡献预计为 10~20 cm^[13]。更长远地来看, 在冰盖夏季气温高于工业革命前 1.8℃ 的情形下, 预计格陵兰冰盖将至少损失目前冰储量

的90%^[19]。

南极冰盖表面气温很低，表面消融极少。南极冰盖物质损失主要发生在边缘的冰架地区，途径是冰架的前端崩解和底部融化。与格陵兰冰盖基岩不同，西南极冰盖很多区域的基岩在海平面以下，部分区域的地形是逆向基岩坡（即基岩高程在朝向内陆的方向降低），冰架的崩解和消融导致冰架对着地冰的支持力减弱和冰盖的接地线后撤，新的接地线处的冰比以前的接地线处更厚，通过接地线的冰流速更快，从而导致更多的冰流向海洋，造成更多的冰盖物质损失。该过程被称为海洋性冰盖的不稳定性（Marine Ice-Sheet Instability）。研究发现海洋性冰盖不稳定过程在 Thwaites 冰川、松岛冰川等快速冰流区域^[20-22]已经开始。IPCC《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》^[23]指出，西南极冰盖受温暖海水入侵加速流失；南极冰盖物质损失增速明显，在2012—2016年的损失量是1992—2001年的3倍。

国际上的冰盖模式正在针对冰架的崩解和底部消融等关键过程进行改进并提升模式的模拟能力^[24-26]。利用冰盖模式对关键流域和整个南极冰盖开展模拟，估算南极冰盖对未来海平面上升的贡献是国际的研究热点^[22,27]。由于冰盖模式对不稳定性过程模拟能力的局限性和不可预测的气候变化，预测未来的海平面上升仍存在相当大的不确定性^[28-29]。

无论数值模拟的不确定性有多大，海洋性冰盖的不稳定性决定了冰盖动力系统一旦跨过临界点，仅依靠降低冰面气温无法阻止冰川的退缩，海洋对冰架的强迫将成为决定因素，必须要干预冰盖—海洋界面、改变海洋对冰架的强迫才可能使这一过程减速。

2 针对冰盖的地球工程研究现状

针对冰盖的地球工程研究是近几年的新兴研究方向。2018年 Moore 等^[12]在 *Nature* 评述文章中正式提出了方案设计。该文给出了增强冰盖稳定性和减缓冰盖物质损失的3种途径（图1）：（1）

通过排干或冻结冰川底部水来干燥冰床，增强冰川底部摩擦力，减缓冰流速度；（2）在海洋中建造人造岛来支撑漂浮的冰架；（3）在冰架前端建造水下隔离墙，阻止温暖的海水到达冰架底部以减缓其融化。格陵兰冰盖边缘基岩高程基本在海平面上，只有少数入海冰川与海洋接触，其动力过程和冰架的崩解造成了冰盖近一半的物质损失。南极冰盖大部分区域冰流缓慢，仅在几个冰川处流速很快，对整个冰盖的物质损失起主要贡献^[30]。因此，两大冰盖快速的入海冰川是开展针对冰盖的地球工程研究的关键区域。

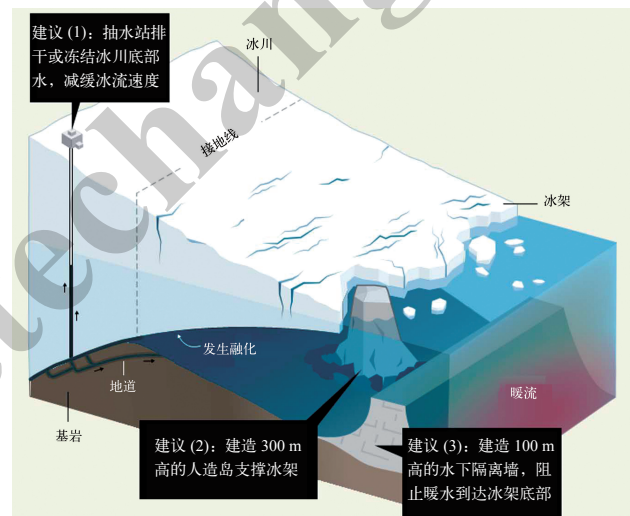


图1 增强冰盖稳定性和减缓冰盖物质损失的3种途径^[12]
Fig. 1 Three ways to enhance ice sheets stability and delay the loss of ice sheets^[12]

Wolovick 等^[31]利用冰盖模型对 Thwaites 冰川开展动力学模拟，模拟该冰川在冰架前端有阻隔墙的情形下的动力学过程，模拟结果显示当阻隔墙阻止深层暖水到达冰架前端时，冰架底部停止消融，冰川前端和接地线位置都会前进；在建造人工隔离墙或者支撑点的情形下，Thwaites 冰川的崩解有望被推迟、减缓甚至逆转。Gürses 等^[32]在水下隔离墙方案下对西南极阿蒙森海进行了数值模拟，发现保护阿蒙森海区冰川的隔离墙可以成功地抑制暖水的流入和减少冰架的融化，这些暖水团会转向到邻近的被认为是西南极最稳定的 Getz 冰架，尽管 Getz 冰架的底部融化有所增加，但是整个西南极冰盖的稳定性得到增强。

工程的可行性和成本是受关注的敏感问题。在工程可行性方面, Moore 等^[12]指出针对冰盖的地球工程项目的规模与当今大型土木工程项目相当: 人造岛(比如香港新机场)在世界上已经建成; 挪威的某条冰川底部水通过岩石隧道排出, 并为水电站提供动力; 在格陵兰流速最快的冰川前面建造的防护堤只需要长 5000 m 高 100 m。这些工程的规模都在可行范围以内, 但是遥远和恶劣的极地环境会带来额外的难度。工程的成本低于海岸线维护费用和全球因海平面上升带来的经济损失^[13], 并且可能随着设计的改进而降低^[33]。

干预的有效性强烈依赖于干预的成本; 与建造孤立的支撑点相比, 增大对暖水的阻断范围可以从根本上提高干预的有效性。Hunt 等^[33]提出了与“隔离墙”功能相同、但是轻薄可漂浮的水下隔离屏障设计, 该隔离屏障可以贯穿整个海水深度, 使用锚索来固定隔离屏障的位置和形状; 他们设计了多个隔离屏障来保护格陵兰的入海冰川, 预计成本为每年 2.75 亿美元, 但是该设计容易受到冰山碰撞、潮汐、海面波浪、风暴和海冰的影响。在 2019 年的美国地球物理联合会年会上, 北京师范大学和加拿大不列颠哥伦比亚大学的学者提出了灵活轻便的分段“窗帘”式设计^[34], “窗帘”的各节段可以通过铰接点从原来基础上拆下或更换, 窗帘上可以设置开口以控制暖水的流入和允许海洋生物通过。据了解, 新加坡科技设计大学的学者提出了使用隔离墙和“湍流制造器”来改变冰架前端的暖水方向, 达到保护不稳定冰川的目的, 此研究正在进展中。

针对冰盖的地球工程是很复杂的系统研究, 包括数值模拟、方案设计、工程试验和政治法律等诸多方面。国际上的研究团队正在开展数值模拟和方案设计的研 究。目前数值模拟的研究区域十分有限, 数值模拟的结果也有待用不同的模式去对比验证。方案设计对不同区域的适用性和稳定性尚未开展广泛和深入的研究。工程试验和政治法律等方面的研究尚未起步。总而言之, 冰盖地球工程的研究仍存在很大的提升空间, 正逐渐成为冰冻圈学科和全球变化领域新兴的研究方向。

3 未来研究的展望

针对冰盖的地球工程研究前景广阔, 目前的研究仍处于起步阶段, 未来需要做更深入的研究, 综合来看, 以下几个方面值得重视。

(1) 提高冰盖模式和气候模式的模拟能力: 国际上多个冰盖模式正在提升对影响冰盖不稳定性的过程的模拟能力, 将为研究冰盖地球工程的机制和影响提供更成熟的模拟技术。为了给冰盖模式提供更为准确的边界条件, 冰架附近的海底地形需要更细致的现场调研, 气候模式需要提高对南大洋的模拟的可信度和准确度。

(2) 加强方案设计的相关学科合作: 方案设计是将科学想法和工程实践联系的桥梁, 未来需要冰川学、海洋学、物理学和工程学等多学科的科研人员合作来共同设计。科学合理、详细精确的方案设计才能使开展工程试验成为可能。

(3) 探索工程试验的可行性: 工程试验的难度阶梯很可能是从实验室试验开始, 到小尺度的野外试验, 接着到格陵兰冰盖的入海冰川, 最后到南极冰盖的入海冰川。在格陵兰冰盖, 雅各布港 (Jakobshavn) 冰川是冰流速度最快、物质流失速率最大的冰川。针对格陵兰冰盖的入海冰川的地球工程可以优先选择 Jakobshavn 冰川, 其次是 Helheim/Kanger 冰川和 Petermann 冰川。这几个冰川入海口横截面较窄 (十几公里), 比南极冰盖更易到达, 在工程上比南极冰川的难度小。格陵兰冰盖地球工程的经验可以应用到南极冰盖的关键冰川上。对南极冰盖不稳定性有重要影响的入海冰川按照尺度大小可以依次选择 Totten 冰川、Pine Island (松岛) 冰川和 Thwaites 冰川。

(4) 开展潜在的风险研究: 针对冰盖的地球工程对生态系统具有潜在的风险, 也可能有目前未知的风险。但是, 无论是在全球范围内还是在西南极冰盖局部地区, 任何风险都可能远不及严重的冰盖崩塌带来的风险。

(5) 开展政治法律方面的研究: 如果未来人类必须要实施针对冰盖的地球工程, 必须要征得国际社会和法律上的许可。因此, 预计随着冰盖地

球工程研究的进展,与之相关的社会科学的研究也会兴起。格陵兰冰盖所有权归格陵兰人,必须调查格陵兰人的意见和征求格陵兰人的许可。格陵兰人有可能倾向通过收取生态系统服务费的方式对冰盖进行维护,而不是通过出售采矿权和矿产资源权益的方式。南极冰盖的人类活动要遵守《南极条约》和马德里议定书等。《联合国气候变化框架公约》为人类应对气候变暖的国际谈判确立了一项重要原则,即共同但有区别的责任原则。在这一原则下,未来各国如何分摊针对冰盖的地球工程的费用也需要国际谈判。中国作为《南极条约》的成员国,中国沿海海平面的升高对中国有着重要的影响,因此中国必然要参与其中。

冰川的地球工程不能缓解温室气体造成的全球变暖。研究冰盖地球工程方案保护冰盖,决不意味着人类可以放松为控制全球变暖而做的努力。大气升温是导致冰盖物质损失的根本原因。海洋环流导致的冰盖消融也间接受到大气升温的影响。但是在大气升温对冰盖造成的影响到达临界点之前,可以通过冰盖地球工程降低海洋增暖造成的冰盖物质损失,为应对海平面上升赢得时间。冰盖的最终命运仍然取决于人类的碳排放。在千年和万年尺度上要保护冰盖,最终还是要控制全球增温。■

参考文献

- [1] National Academy of Sciences. Climate intervention: reflecting sunlight to cool Earth [M]. Washington DC: National Academies Press, 2015
- [2] Irvine P J, Kravitz B, Lawrence M G, *et al.* An overview of the Earth system science of solar geoengineering [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, 2016, 7: 815-833. DOI: 10.1002/wcc.423
- [3] Crutzen P J. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? [J]. *Climatic Change*, 2006, 77: 211-219
- [4] Latham J. Control of global warming? [J]. *Nature*, 1990, 347: 339-340
- [5] Kravitz B, Robock A, Tilmes S, *et al.* The Geoengineering Model Intercomparison Project phase 6 (GeoMIP6): simulation design and preliminary results [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8. DOI: 10.5194/gmd-8-3379-2015
- [6] Yu X, Moore J C, Cui X, *et al.* Impacts, effectiveness and regional inequalities of the GeoMIP G1 to G4 solar radiation management scenarios [J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 129. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.02.010
- [7] Moore J C, Grinsted A, Guo X, *et al.* Atlantic hurricane surge response to geoengineering [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112: 13794-13799
- [8] Cao L, Duan L, Bala G, *et al.* Simultaneous stabilization of global temperature and precipitation through cocktail geoengineering [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44. DOI: 10.1002/2017GL074281
- [9] 陈迎. 地球工程的国际争论与治理问题 [J]. *国外理论动态*, 2016 (3): 57-66. Chen Y. International debate and governance of geoengineering [J]. *Foreign Theoretical Trends*, 2016 (3): 57-66 (in Chinese)
- [10] 陈迎, 辛源. 1.5℃温控目标下地球工程问题剖析和应对政策建议 [J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13 (4): 337-345. Chen Y, Xin Y. Implications of geoengineering under 1.5℃ target: analysis and policy recommendations [J]. *Climate Change Research*, 2017, 13 (4): 337-345 (in Chinese)
- [11] Lenton T M, Rockström J, Gaffney O, *et al.* Climate tipping points: too risky to bet against [J]. *Nature*, 2019, 575: 592-595
- [12] Moore J C, Gladstone R, Zwinger T, *et al.* Geoengineer polar glaciers to slow sea-level rise [J]. *Nature*, 2018, 555: 303-305
- [13] Jevrejeva S, Jackson L P, Riva R E M, *et al.* Coastal sea level rise with warming above 2℃ [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113 (47): 201605312
- [14] DeConto R M, Pollard D. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise [J]. *Nature*, 2016, 531: 591-597
- [15] IPCC. Special report on global warming of 1.5℃ [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018
- [16] Hinkel J, Lincke D, Vafeidis A T, *et al.* Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111: 3292-3297
- [17] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [18] van den Broeke M, Bamber J, Ettema J, *et al.* Partitioning recent Greenland mass loss [J]. *Science*, 2009, 326 (5955): 984-986
- [19] Pattyn F, Ritz C, Hanna E, *et al.* The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5℃ global warming [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 1053-1061
- [20] Rignot E. Changes in West Antarctic ice stream dynamics observed with ALOS PALSAR data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L12505
- [21] Joughin I, Smith B E, Medley B. Marine ice sheet collapse potentially under way for the Thwaites glacier basin, West Antarctica [J]. *Science*, 2014, 344 (6185): 735-738
- [22] Favier L, Durand G, Cornford S L, *et al.* Retreat of Pine Island glacier controlled by marine ice-sheet instability [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 117-121
- [23] IPCC. Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate [M/OL]. 2019 [2019-12-10]. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- [24] Sun S, Cornford S, Gladstone R, *et al.* Ice shelf fracture parameterization in an ice sheet model [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11: 2543-2554
- [25] Guo X, Zhao L, Gladstone R, *et al.* Simulated retreat of Jakobshavn Isbræ

- during the 21st century [J]. *The Cryosphere*, 2019, 13: 3139-3153
- [26] Favier L, Jourdain N C, Jenkins A, *et al.* Assessment of sub-shelf melting parameterisations using the ocean–ice-sheet coupled model NEMO (v3.6)–Elmer/Ice (v8.3) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12: 2255-2283
- [27] Cornford S L, Martin D F, Payne A J, *et al.* Century-scale simulations of the response of the West Antarctic ice sheet to a warming climate [J]. *The Cryosphere*, 2015, 9: 1579-1600
- [28] Gladstone R M, Warner R C, Galton-Fenzi B K, *et al.* Marine ice sheet model performance depends on basal sliding physics and sub-shelf melting [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11: 319-329
- [29] Seroussi H, Nowicki S, Simo E, *et al.* InitMIP-Antarctica: an ice sheet model initialization experiment of ISMIP6 [J]. *The Cryosphere*, 2019, 13: 1441-1471
- [30] Pritchard H D, Arthern R J, Vaughan D G, *et al.* Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets [J]. *Nature*, 2009, 461: 971-975
- [31] Wolovick M, Moore J C. Stopping the flood: could we use targeted geoengineering to mitigate sea level rise? [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12: 2955-2967
- [32] Gürses Ö, Kolatschek V, Wang Q, *et al.* Brief communication: a submarine wall protecting the Amundsen Sea intensifies melting of neighboring ice shelves [J]. *The Cryosphere*, 2019, 13: 2317-2324
- [33] Hunt J D, Byer E. Reducing sea level rise with submerged barriers and dams in Greenland [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2019, 24 (5): 779-794
- [34] Moore J C, Wolovick M, Jaiman R, *et al.* Stopping the flood: continued progress in targeted glacial geoengineering [R/OL]. 2019 [2019-12-02]. <https://agu.confex.com/agu/fm19/webprogram/paper/Paper572152.html>

Targeted geoengineering for ice sheets

ZHAO Li-Yun^{1,2}, John C. MOORE^{1,3}, Mike WOLOVICK¹

¹ *Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

² *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China;*

³ *Arctic Centre, University of Lapland, Rovaniemi 96101, Finland*

Abstract: In recent years, scientists have proposed targeted geoengineering for ice sheets to enhance their stability and slow their mass loss, reducing their contribution to sea level rise at source. It promises to buy hundreds of years to combat climate change and protect coastlines. Ice sheet geoengineering works mainly on ice bottom and ice shelf–ocean interface. The main approaches include: 1) draining or freezing the water from the bottom of the glacier to dry the ice bed and enhance the friction of the glacier bottom; 2) making artificial islands in the sea to support floating ice shelves; 3) building an underwater barrier in front of the ice shelf to keep warm water from reaching the ice bottom to slow its melting. Ice sheet geoengineering includes numerical simulation, scheme design, engineering test, and political and legal research. International research teams have been carrying on numerical simulation and scheme design research. The research of engineering experiment and politics and law has not started yet. This paper predicts that the difficulty ladder of engineering test may be from laboratory test to small scale field test, then to outlet glaciers of Greenland ice sheet, and finally to outlet glaciers of Antarctic ice sheet. Targeted geoengineering for ice sheets is likely to become a new field of global change research in 21st century.

Keywords: Sea level rise; Ice sheet; Geoengineering