

北极研究,从梦想走向辉煌

赵进平^① 王勇^② 卞林根^③ 陈立奇^④ 史久新^⑤ 陈建芳^⑥ 陈波^⑦
邹捍^⑧ 效存德^⑨ 王汝健^⑩

①⑤教授,中国海洋大学,青岛 266100;②国家海洋局极地考察办公室,北京 100860;③研究员,中国气象科学研究院,北京 100081;④研究员,国家海洋局第三海洋研究所,厦门 361005;⑥研究员,国家海洋局第二海洋研究所,杭州 310012;⑦研究员,中国极地研究中心,上海 200136;⑧研究员,中国科学院大气物理研究所,北京 100029;⑨研究员,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,兰州 730000;⑩教授,同济大学,上海 200092

关键词 北极 北极科学 快速变化 海冰 海洋生态系统 气候变化

走向南极和北极,是多少代中国人的两大梦想。1984年,中国第一次南极考察,将走向南极的梦想变成现实,并延续成长达28年的美丽画卷。然而,虽然北极距离中国更近,但走向北极的梦想实现起来要困难得多,北极科学考察的起步整整晚了11年。今天中国的北极研究与南极研究一样,正在走向辉煌。

1 中国的北极研究之路

在20世纪以前漫长的极地探险时代,北极的先驱们以生命为代价了解北极,完成了北极的地理发现,使那银色的冰天雪海展现在世人面前。19世纪末20世纪初,科学家广泛参与北极探险,人们对北极的兴趣越来越浓郁,第1个国际极地年(1882—1883年)划时代地将科学引入北极,北极的探险时代逐渐让位于科学时代,对北极的科学研究逐渐展开。当中国准备开展北极研究时,国外已经有70多年的北极研究历史,科学上已经有大量骄人的进展,而初出茅庐的中国人对北极近乎无知。然而,中国北极探索的先驱者没有选择,只能知难而进,冲出去,走向那狂暴寒冷、与世隔绝的世界,向北极的科学前沿发起冲击。

1995年春季,由中国科学院组织的远征北极点科学考察队,是中国第一次派往北极的科学考察队,7名冰上队员乘飞机到达北极冰面,并靠滑雪和狗拉雪橇到达北极点。那时,中国人对北极很不了解,在科学上进行了一系列探索,并总结了北极生存与考察的经验,为未来的北极考察奠定了基础。由于进行了这次北极考察,中国顺利加入了国际北极科学委员会,成为第15个成员国。这次考察也被评为中国10大科技新闻之首,体现了中国人民对考察北极的强烈愿望和高度评价。然而,靠滑雪行进的方式运输重量有限、没有电源、缺乏油料、不能使用先进设备、没有良好的通信设施、后勤补给困难,从而使科学考察的能力受到很大限制。考察队员最

大的感受是,北极需要破冰船,没有破冰船,北极研究将永远停留在梦想之中。

1999年7月,中国购置不久的极地破冰船“雪龙”号承载着一支120人的考察队前往北冰洋,标志着中国大规模北极考察时代的开启。那一年,中国的北极考察队伍还没有建立,对北极的科学问题了解甚少,考察北极的队员都是从南极研究领域转向过来的,对北极的环境和气候条件也不清楚。1999年是北极冰情较重的年份,碍于重冰,考察的海域只进入北冰洋边缘,纬度只达到 75°N ,主要的考察集中在白令海和楚科奇海。但是,那次的考察是一次宝贵的尝试,取得了大量宝贵数据,并开始实质性地认识北极,进入北极科学领域,北极的科学队伍开始成长壮大。

2003年7月,中国第2次北极考察成行。经过4年的发展,对北极的科学问题有了清楚的认识,确定了明确的科学目标,在考察项目设置上进行了较大的调整,确定了中国第2次北极科学考察的总体目标:探寻北极海洋、海冰和大气的主要变异现象和规律,研究这些变异过程与全球和区域气候变化的因果关系;开展北极地区变异对中国影响的可预测性研究。由于冰情减轻,“雪龙”船最终到达了 80°N 的纬度,考察站位覆盖了加拿大海盆南部的大部分海域。这次考察全面了解了北极正在发生的变化,取得了大量宝贵的数据,使中国的北极研究进入了新的历史时期。

2004年,中国在北极斯匹茨卑尔根群岛上建立了中国第一个北极科学考察站——黄河站。从此开始了定点的北极长期连续观测研究。在黄河站,已经开展了气

象、天文、冰川、生物等科学领域的研究。黄河站的位置得天独厚,邻近北极海冰与北大西洋研究的关键海域,未来将在中国的北极研究中发挥重要作用。

2008年第3次北极考察是中国北极研究的重要里程碑,经过近10年的发展,中国在北极研究中取得了大量成果,凝聚了一系列重要的科学问题,在若干学科跟上了国际北极的研究步伐。2008年的考察是北极科学队伍盼望多年的考察机会,在科学计划的制定上突出了“北极快速变化及其对中国气候影响的研究”这一科学主题,实现了多学科密切合作的综合考察研究。考察站位覆盖了太平洋扇区的大部分海域,最远到达 85.5°N 的纬度,形成了纵贯加拿大海盆南北的大剖面。这次考察针对的科学问题具体,涉及了北极变化研究中的若干核心研究方向,采用了大量先进观测手段。2008年正值第四次国际极地年期间,中国的北极考察成为国际北极考察体系的一部分,对全面认识北极的变化做出了重要贡献。

在已经开展的3次北极考察期间,中国都提供了一定数量的国际合作名额,增进了中国科学家与国际研究力量的融合,促进了中国研究水平的提高。此外,中国科学家广泛参与了北极的国际合作,多次搭载外国考察船考察北极,与美国、加拿大、德国、挪威、芬兰、法国有密切的合作。国际合作考察缓解了考察航次不足的问题,已经成为中国北极研究的重要内容和数据来源,保证了北极科学的进步。

在地理学上,南极是“海包陆”,北极是“陆包海”,这个差别导致南极与北极研究的领域有很大的不同。北极周边的陆地都是别国的领土,有关地理、地质、地球物理、冰川冻土、天文等领域的研究受到极大的限制,主要集中在海洋、海冰与大气的研究。

目前,北极的快速变化导致北极成为全球气候变化最显著的地区,北极的变化和对气候系统的反馈导致北极在气候科学中具有重要的地位。通过长达10年的研究和积累,我们认识到,北极正在发生的快速变化不是地球一隅的孤立事件,而是与全球变化密切相关,直接或间接地影响中国的气候过程,关系到13亿中国人的生存环境的演化和大型灾害的发生。从更广的角度看,北极的变化表明我们居住的星球正处于显著的变化过程之中,其发展趋势还不清楚,很可能涉及到气候的变迁和人类的未来,是我们不得不关注和研究的区域。

2 北极海冰的快速减退

北极是全球气候系统运转的巨大冷源之一,对全球

大气和海洋环流有重要和长期的影响,其中,海冰是北极冰雪盖最活跃易变的成分,是最重要的影响因素之一。在全球显著增暖之前,北极气候寒冷、海冰厚重、年际变化微弱,海冰对全球气候变化的贡献不大。可是,在过去30年,北极海冰正在发生着巨大的变化。

全球变暖对北极海域最直接的影响就是海冰覆盖面积的减少。北极永久冰盖的变化大约为每10年减少10%。北冰洋的多年冰覆盖从820万 km^2 退缩为670万 km^2 。北极夏季的平均冰厚减少了43%。进入21世纪以来,北极海冰的减退大大加速。2002年9月份,北冰洋的冰面为1978年以来最小。嗣后,在2004,2005,2006,2007年,夏季海冰范围一次次刷新海冰面积最小的记录。其中,最为显著的是2007年,海冰的范围比2006年锐减27%,海冰覆盖面积达到360万 km^2 的最低值。科学界确认,海冰的变化已经是不争的事实,海冰的变化速度已经大大超过了人们的预期。

海冰的变化具有明显的气候效应。冬季,穿透厚冰进入大气的海洋热量只有 $2\sim 3\text{ W/m}^2$,而开阔海水水面提供的热量可以达到 300 W/m^2 以上,海冰减薄和消退直接影响海洋对大气的热贡献。夏季,海冰面积的大小直接影响海洋吸收的太阳能,原因是冰雪面和水面的反照率不同,冰雪表面的反照率高达80%~90%,而海水反照率只有5%~9%。冰雪将大量太阳辐射能反射回太空,而海水将太阳能的绝大部分吸收,用于融化海冰和加热大气。海水吸收的太阳辐射能是海冰的10余倍,海冰面积每增加10%,北冰洋吸收的总能量增加100%。这么多能量进入北冰洋,势必对北极气候产生显著影响。海冰自身的季节变化和年际变化都明显,特别是海冰密集度变化,直接影响到海洋和大气热交换,所以海冰的异常对气候的影响很大。

除了大尺度风场和全球增暖的因素之外,还有很多因素影响海冰的生成。例如:北极陆地冰川融化导致径流加大,使结冰量受到显著影响;来自大西洋的暖水温度和流量的变化对北极海冰过程影响很大;来自太平洋水温度较高,影响夏季海冰的融化过程;北极风场趋于减弱,显著地影响海冰的输出,对北冰洋的总冰量产生影响等等。这些因素直接导致北冰洋海冰面积的急剧变化,使北冰洋成为对全球气候变化有显著贡献的海域之一。

海冰的变化不是一个孤立的事件,而是一个导火索,引发了海洋和大气的一系列变化,从而使得北极对气候变化产生显著的反馈作用,诱发北极海洋、海冰、大气系统的快速变化。然而,由于历史的原因,人们对海冰变化的观测和认识都不够完善,需要更多的研究来揭

示海冰变化过程中的热量传递、能量分配和海洋对大气贡献的机理。

3 北极气候变化及其对我国气候的影响

IPCC 于 2007 年发布的关于气候变化的第 4 次评估报告明确指出,近 100 年(1906—2005 年)地球表面平均气温上升了 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$,比 2001 年发布的第 3 次评估报告给出的近 100 年(1901—2000 年)气温上升 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有所提高,全球变暖已经是不争的科学事实。海洋温度上升、海平面升高、冰川融化、北极海冰减少和北半球积雪减少等现象也证实了全球变暖。

(1) 北极气候增暖

全球变暖并不是全球一致的,近 30 年来北极地区是全球增暖最显著的区域,最大增温发生在北半球冬季(12, 1, 2 月平均)和春季(3, 4, 5 月平均)。近 100 年来,北极平均温度几乎以两倍于全球平均速率的速度升高。不过,北极气温具有很高的变率。在 1925—1945 年期间也观测到一个较长的暖期,该时段内北极变暖的幅度几乎和现在一样。但是由于那次变暖范围不是全球性的,主要出现在北半球,所以增温区的地理分布和近年来的全球增暖不一样。

(2) 冰冻圈的急剧变化

最近 30 年,北极地区冰冻圈环境发生了近 400 年以来最快速的变化,引起全球科学家的关注。这些变化主要表现为:

① 格陵兰冰盖南部边缘的冰盖消融十分显著。1993—1999 年间格陵兰冰盖边缘区以每年以 50 km^3 的速度融化,对海平面的贡献率达每年 0.13 mm 。

② 大陆雪盖和冻土覆盖面积减小。1972 年以来春季欧亚雪盖减少 10%。20 世纪后半叶,北半球季节性冻土覆盖的最大面积减少了约 7%。自 20 世纪中叶以来,冻土层最大深度在欧亚地区减少了约 0.3 m ,冻土消融,冻土带北移;常年冻土层、季节性冻土和河湖冰在减少。

③ 淡水径流、雨量和融雪增加,降低了海水盐度,海冰以及低盐度海水输出量明显增加;北冰洋低盐水输出减缓北大西洋垂向热盐环流,进而影响世界大洋深层水循环;

(3) 对生态系统和人类社会的影响

极地环境的变化与地球其他区域的变化息息相关。近几十年来发生在北极地区大气、海洋、陆地领域中的各种重要的环境变化,对北极环境的各个方面产生影响,并正在影响生态系统、生物资源并反馈到人类社会,

进而影响区域的乃至北半球的经济活动。

海冰、海洋变化影响海洋生态和基本营养盐、溶解有机物的生物地球化学循环,对生物、生态系统和社会经济产生重要影响。北极海冰的不断消退,使海冰之间的水域逐渐扩大,给北极熊、海豹、海象等北极动物的栖息地带来很大的威胁。

永冻土也是冰的一种形式,冻土的消融不仅改变了当地的生态和水文,也使得土壤的结构稳定性发生改变,在此过程中,也会释放出的一部分冷冻的碳,例如,甲烷等温室气体。多年冻土层条件的变化对基础设施造成损坏,导致一些建筑物、道路和管道的基础开始松动,对当地的野生动物和居民都有不同程度的影响。

极地的改变发生在有着 4 百万居民生活的北极圈。当地居民正面临着自然环境、资源和食物的急剧变化,变化的速度和幅度超过以往经验和传统知识。除此之外,北极居民还要面对由于大气和海洋的搬用作用,从全球各地输送和汇集到这里的污染物对他们健康产生的威胁;气候快速变化,对健康产生的一些未知的风险。

极地气候和大气环境变化对全球大气环流,特别是我国天气气候也会发生影响。我国位于北半球,北极冷空气对我国的影响早为人熟知,对我国造成灾害的旱、涝、风、雹等天气气候事件也大多与冷、暖空气及其活动异常有关。北极区域是我国冷空气的主要源地,来自北极地区的寒流,一般是经西北部、北部和东部三条路径进入我国境内;冷空气路径不同,对我国天气的影响也不同。例如,2008 年春季,中国南方低温雨雪冰冻天气灾害,就与冷空气活动频繁,路径偏西和来自青藏高原南侧和西太平洋的暖湿空气活跃等有关。

4 太平洋入流水对北极过程的影响

如果没有白令海峡,北冰洋将是大西洋水的世界,形成完全不同的水团和环流结构。然而,白令海峡的存在改变了这一切。白令海峡水深不超过 60 m ,连接了其南部的白令海和北部的楚科奇海两个陆架海域,是北冰洋与太平洋连通的唯一通道。由于太平洋与大西洋之间存在 0.65 m 的海面高度差,驱动太平洋的海水穿越白令海峡进入北冰洋,形成白令海峡贯通流。虽然白令海峡很狭窄,只有 30 km 宽,却有三支海流并行进入北冰洋,一支来自白令海深海盆,一支来自白令海陆架,还有一支是辗转而来的北太平洋的阿拉斯加沿岸流。这三支海流的强度有明显的季节变化,呈现此消彼长的互动。

因太平洋水密度小于大西洋水,进入北冰洋后保持

在海洋上层。进入北冰洋的太平洋水主要有两个作用。一个是太平洋水携带大量热量,加快北冰洋海冰的融化速度,形成大范围的无冰区。海冰覆盖面积的变化直接影响海洋对大气的热贡献,成为形成北冰洋气候的重要因素。太平洋水的另一个作用是将太平洋的物质和物种带入北冰洋,影响当地的物质成分,造成生态系统的演化。从已有的研究来看,北冰洋太平洋扇区的海水成分受太平洋很大的影响。

北冰洋的海水结构敏感地依赖太平洋水的供给;一旦太平洋入流发生变化,北冰洋的海冰融化速度、海冰覆盖面积、上层海洋物质结构、海气交换量、淡水平衡等都将发生显著的变化。在过去的10年中,北极地区发生了一系列的异常变化,其中一些与太平洋入流水有关。因此,研究经白令海峡进入北冰洋的水体结构是了解太平洋对北冰洋影响的重要科学内容。

5 北极环极边界流与全球海洋输送带

南极是孤立的大陆,海水没有经向约束,自然形成环绕南极大陆的南极环极流,形成了南极三大洋海水的交换和沟通,对全球海水循环有着非常重要的作用。而北冰洋是个半封闭的海洋,海水的流动要比南极复杂得多,与南极的海洋环流几乎没有可比之处。然而,最近的研究表明,尽管北极上层与中层的流动看来完全不一样,但是如果把来自大西洋的海水运移路线作为判断的依据,北冰洋的海流却有着封闭的绕极循环,即北极环极边界流。

向北流动的大西洋表层海水进入北冰洋后迅速冷却下沉,形成北极中层水。中层水沿俄罗斯大陆坡向北冰洋纵深伸展,可以一直抵达北冰洋最里面的楚科奇海和波弗特海陆坡,然后沿着加拿大北部和格陵兰东部流出北冰洋。如果跟随着大西洋水升沉,就会发现确实存在一个稳定的、长期存在的环绕北极的流动。

提出北极环极边界流概念的最大价值在于,可以从整体上研究北冰洋的海洋循环。北极环极边界流除了表征了北冰洋的整体循环之外,其与全球海洋输送带的联系日益被人们关注。全球海洋输送带是新近认识的全球热盐环流的整体循环,沿大西洋东海岸北上的大西洋暖流在格陵兰海、挪威海和冰岛海下沉,通过深层水向全球海底扩展。海洋输送带是全球气候系统的重要组成部分,也是全球海洋研究的热点科学问题。

然而,由于北大西洋水温度相对较高,近年来人们开始怀疑全球海洋输送带的下沉水不是由于冷却直接形成的,有人提出在GIN海潜沉的水体很可能是由北极

环极边界流从北冰洋输出的冷而咸的高密度水体,来自北冰洋的水有可能是大输送带的真正水源。这样,北极环极边界流很可能是全球海洋输送带的发动机。基于这个联系,北极环极边界流的意义已经超出北冰洋的范畴,成为全球海洋系统的重要组成部分,对全球气候变化产生不可低估的影响。

近年来,北冰洋发生了显著的变化,北极海冰的面积减少10%,海冰的厚度减少40%,北极的气温增幅为世界之最,成为在全球气候变化中最明显的海域。最近的研究表明,由于冰川融化,淡水增加,上层水体不容易下沉。如果大输送带停止,北大西洋暖流将不进入北大西洋,整个欧洲将变的非常寒冷,甚至导致全球气候的巨变。

6 北极冬季冰间湖的气候效应

冬季,整个北冰洋进入海冰覆盖的冰封期。然而,即使在最寒冷的季节,北冰洋的海冰也不是严丝合缝的完整冰盖,仍有少量的无冰水域存在,这些水域是冰下海洋与大气之间直接沟通的窗口,对冬季的海-气间的热量交换有着决定性的作用。通常将北极海冰间的无冰水域分为冰间水道(lead)和冰间湖(polynya)两种。冰间水道是由于浮冰的运动而形成的狭长裂缝,长度一般为几公里至几十公里,宽度为几米至几公里。冰间湖通常指各种形状的无冰区域,持续的时间在几天以上,有些甚至整个冬季都不关闭。冰间湖分为潜热冰间湖和感热冰间湖两种。潜热冰间湖是由于动力作用(风或海流)不断将冰移走而形成的无冰水域;感热冰间湖是由海面下海洋输送的热量来维持。

北冰洋的冰间湖多为潜热冰间湖,是在风和特殊地形的共同作用下形成的。风将新生成的海冰吹向外海,而海岸、岛屿等特殊地形使外面的海冰不能补充进来,形成无冰水域。由于冬季严寒的气象条件,水域中实际上不停地会有海冰生成,结冰释放的潜热对无冰水域的存在有重要的贡献。冬季,北冰洋中心漂移的浮冰与沿岸固定冰之间形成了近乎连续的、环极存在的水道,被称为环北极冰间水道。沿岸冰间湖与冰间水道一同构成了冬季北冰洋与大气交换的直接通道。

冬季,北冰洋的气温一般在零下几十度,而冰间湖中海水的温度则保持在冰点附近。冰间湖中,在几米之内海气间温度的差异可达 $20 \sim 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于海气间的热通量主要是由海气间的温差决定的,因此冰间湖中存在非常强的热量交换过程。冰间湖中的显热通量超过 400 W/m^2 ,潜热通量超过 130 W/m^2 ,而海冰的年平均

显热通量只有 3 W/m^2 左右, 因此, 就对大气的热力作用而言, 冰间湖的贡献比海冰的贡献大两个量级。冬季, 虽然冰间湖和冰间水道仅占北冰洋面积的 1%, 但其间的海气热量交换却占整个北冰洋海气热量交换的 50%。

冰间湖和冰间水道因其特殊的性质和对海气交换的重要作用, 一直是北冰洋考察和研究的热点。但是, 由于冬季在北冰洋进行实地观测存在很大的困难, 有关冰间湖研究的实测数据还比较少, 特别是缺乏冰间湖中的海洋观测资料。

7 北极海洋生态系统的演化

海洋生态系统是指海洋生物(群落)与非生物环境通过能量流动和物质循环所形成的自然整体, 海冰是北冰洋生态系统中一个最为显著的环境特征。北冰洋的特殊环境孕育了一个与海冰关系密切的生态系统。

在全球变暖背景下, 北冰洋正经历着明显的环境变化。海冰覆盖面积以每 10 年约 3% 的速率在减少, 气温升高变暖导致冰川融化, 北冰洋 6 大河流年平均淡水输运量增加了 7%。北冰洋的水团结构也在发生显著的变化, 导致冷盐跃层变薄, 而楚科奇海台的中、深层水均发现了增暖现象。作为北冰洋营养盐重要来源的北太平洋入流水水量在减少。这一系列物理场的变化导致北冰洋生源要素循环发生的变化, 进而导致北冰洋生态系统发生相应的改变。

海冰覆盖面积减少、水温升高会导致进入水柱的光照增强以及浮游植物生长速率的提高, 使北冰洋的初级生产力大幅增加。由于春、夏、秋季的表面气温在上升, 融冰时间延长, 导致生物生长季节延长, 加剧了初级生产力的增加, 从而提高整个北冰洋的生物总量。

淡水径流增加, 将更多的淡水种类带入北冰洋。海冰中占优势的硅藻丰度连年下降、种类减少; 反之, 淡水绿藻在海冰内部和冰-水界面的优势性增加。同时随着水温的升高, 亚极区种类的分布将逐渐向北扩展, 海冰消退海域原有的海冰生物群落将被置换。

北极的部分大型海洋哺乳动物, 如北极熊、环海豹和海象等, 均适应了以北极浮冰为栖息、捕食或繁殖平台的生活习性。海冰的消退, 无疑会影响这些北极海洋哺乳动物的生存。例如, 无冰期的延长造成北极熊的食物匮乏, 导致北极熊体重和出生率的下降, 危及种群生存。海象以海冰作为平台捕食陆架浅水海域贝类, 海冰退缩到深水区将使海象居食无所。尽管随着海洋环境的变化和浮冰的进一步消融, 北冰洋的初级生产力有望

增加, 但是对以海冰作为栖息和捕食场所的北极大型哺乳动物却会产生灾难性的后果。

人类活动对北冰洋的影响也在加剧, 大气中温室气体浓度的增加以及低层大气的增温阻碍热量向高层大气的传输, 北极上空较低的平流层温度加速臭氧的损耗和延缓恢复。此外, 放射性物质、重金属、农药和其他各种污染物由径流携带进入北冰洋, 溶解性污染物会通过北冰洋海洋环流影响整个北冰洋。北冰洋环境污染的加剧损害哺乳动物的繁殖、发育和免疫功能。沿岸海冰的减少加剧了污染物的扩散和进入食物链的速度。

正如人们对生态系统越来越深刻的认识, 区域性生态系统快速变化将通过食物链结构变化、物种转移、种群更替以及对人类生存环境的反作用, 深刻地影响更大范围的生物结构。随着北极变化的持续, 北极生态系统将发生更深刻的演变, 改变人类的生存环境。人类对即将面临的变化认识还很不充分, 迫切需要加速相关研究, 以保证人类社会的持续发展。

8 北极海洋微生物多样性与气候环境演化

北极海洋微生物广泛生存于北极海冰、海水、沉积环境中, 参与并推动着北极海洋系统的氧、碳和其他必需元素的循环。据估算地球深海沉积物中蕴藏着大量的细菌生物量, 其包含的细菌超过全部表面生物圈的 10%。此外, 生活在极地海洋特殊生境中的微生物蕴涵着生命进化历程的丰富信息, 代表着生命对于环境的适应能力, 是生物遗传和功能多样性非常丰富的资源宝藏。

过去的 10 年中, ODP 和 IODP 计划的重要研究结果表明, 原先认为贫瘠的洋中脊、深海沉积物(深度可达洋底以下 800 m)中都活跃着大量的微生物。它们被认为在硫不同形式的生物转化、有机磷转化成可溶性的无机磷、难溶性无机磷转化为可溶性无机磷、可溶性无机磷变成有机磷的生物固磷、矿物中钾的释放等一系列硫、磷、钾等生源要素的生物地球化学循环中发挥了重要作用, 使得深海微生物在海洋深部地球化学过程中的作用引人注目。

自从 2004 年 IODP 计划首次从北冰洋的罗蒙诺索夫海脊上钻探的沉积柱中发现大量的微生物群落以来, 与过去数千万以来的气候环境演化与深海微生物的关系研究被推到的北极演化历史研究的最前沿, 其中微生物多样性、微生物的地球化学过程及微生物分子信息学所蕴含的丰富信息对深入揭示北极不同历史时期的气

候变化和演化具有极高的科学意义和价值,其中同时还可能蕴含的独特的生命进化历程信息和新奇的基因结构和功能信息是当前地球科学和生命科学交叉合作研究领域的一项重大科学和技术挑战。我国需要发挥过去若干年来有关地质和生物科学研究的基础积累效应,加强这一重要前沿研究,以期在未来几年的北极科学考察研究中获得在此领域及其相关研究中的重大突破性进展。

9 北极开阔海域的碳吸收

由于北冰洋中心地区长期被冰覆盖,北极海区的碳吸收在全球碳预算中经常被忽略或者简单处理。但在全球变化背景下,北极地区发生快速变化,北极碳循环及其对全球变化的响应与反馈受到广泛关注,北极开阔海域的碳吸收状况也因此越来越为全球变化的研究者所重视。

同样位于极区,同样作为高纬度大洋,南大洋与北冰洋在碳循环性质上有相同点,也有显著差异。在夏季高生产力季节,南、北极海冰区都发展成显著的大气 CO_2 的汇区,但其分布特征及其主要控制因子却显著不同。在南大洋,夏季生物影响通常都能够发展成 $p\text{CO}_2$ 的主要调控因子,并成为 CO_2 的一个强汇区。在北半球夏季,北极海区 $p\text{CO}_2$ 分布规律却并不简单地与生物生产力相关,而是受到很多因素的强烈影响,并且区域变化性很大。整体而言,陆架区 $p\text{CO}_2$ 值很低,海盆区 $p\text{CO}_2$ 值较高。深入研究发现,北冰洋 $p\text{CO}_2$ 值的时空特征极大程度地取决于海冰的分布状况。在密集海冰区, $p\text{CO}_2$ 值随纬度升高而增加,可能是由于生物吸收能力的变化影响,在无冰区, $p\text{CO}_2$ 值明显受到生物泵作用与白令海峡入流水影响。在密集海冰区与无冰区的中间地带,是面积广大的边缘海冰区,海冰融化水对 $p\text{CO}_2$ 值的主控作用。

由于全球变化造成北极海冰迅速减薄,开阔海域面积增大,无冰时间增长,这些都相对有利于增加海-气 CO_2 交换而增加碳吸收。同时,由于北极陆架海区的高生产力,北极快速变化中生物吸收的增强也明显有助于北极开阔海区的碳吸收通量增大。从历史数据分析结果来看,北冰洋的碳吸收总量在持续增大,科学界倾向于认为现在和未来北极碳汇的变化呈现增大的趋势。

但是,这种趋势只能理解为短期变化的趋势,短期内北极碳汇的变化趋势将与大气 CO_2 浓度升高以及全球变暖同步,呈逐渐增强的趋势。而在更遥远的将来,北极碳汇的发展将明显受到许多因素正反两方面的相

互的制约和影响,呈现出很大的复杂性。比如,升温有利于无冰面积和无冰时间的增加,使得海气交换增强,但同时,表层海水水温增加会降低 CO_2 在海水中的溶解度,相应地降低 CO_2 的海-气交换速率,从而减少北冰洋对大气 CO_2 的吸收,局部地区还可能向大气释放 CO_2 。

因此,对未来北极碳汇的总体评估是:在短期未来的北极快速变化中,北极碳汇呈现增长的趋势;但是,如果全球变暖加剧, CO_2 浓度持续上升的话,北极碳汇可能会向着相反的方向变化。也就是说,随着海冰大面积地消融,及至整个夏季北冰洋无冰的话,北极碳汇可能就会不再继续增强,而是开始逐渐减小。更准确预测北极碳汇在全球变化中的响应与反馈,需要有更全面的数据资料,以及要深入了解北冰洋内部控制北极碳吸收的各种过程和控制因素。

10 北极大气臭氧低值和变化趋势

臭氧由 3 个氧原子组成,主要产生于低纬度平流层高层的光化学过程。臭氧是大气中的痕量气体,如果将大气中的臭氧收集到地面,它只有大约 3 mm 的厚度。大气臭氧的 90% 分布于 12~40 km 高度中,最大浓度在 22~28 km。然而,大气臭氧对人类的影响极其显著,在全球气候和环境变化中起着重要作用:①大气臭氧吸收太阳紫外辐射加热平流层大气(约 10~55 km 高度),成为该层大气运动的主要驱动力,并降低到达地面的太阳紫外辐射,减缓全球变暖;②在大约 10 km 高度以下的对流层中,大气臭氧吸收太阳紫外辐射加热大气,加速全球变暖进程;③平流层臭氧与人类生存直接相关,它可以有效吸收太阳有害紫外辐射(UV-B),保护地球生物圈。

全球大气臭氧总量低值地区依次包括,南极、北极和青藏高原。这些臭氧低值区的形成与大气化学和大气动力学过程相关。北极地区是继南极臭氧洞以后全球第二大臭氧低值区,臭氧含量最小值位于北大西洋地区。最近 10 年北极春季平均臭氧总量低于 20 世纪 80 年代,但略高于 90 年代。自 20 世纪 90 年代中期以来,北极大气臭氧亏损引起国际社会的高度重视,对其可能引起的环境效应深表忧虑。北极臭氧层如果遭到破坏,将对人类的生存产生灾难性的后果。

人类对北极大气臭氧的认识非常有限,近 10 年的研究表明,北极大气臭氧含量的年际变化非常明显,并与北极极涡、北极涛动、以及北半球中低纬度大气环流系统相关联。但是,对于人们最关注的问题,例如,北极大气臭氧低值形成过程和机制,以及未来恢复的可能

性; 北极臭氧变化与中低纬度大气过程相联系的途径和机制, 至今尚未解决。

北极臭氧含量的变化与人类的生存环境密切相关, 对我国天气、气候和环境的影响, 是关系到国民经济可持续性发展的重大科学问题。北极大气臭氧变化的众多基本问题尚未解决, 特别是北极臭氧变化对中国气候、环境的影响基本没有系统研究, 观测与资料严重不足, 有必要引起政府的足够重视。

11 北极冰芯中的气候记录

在冰川获取的冰芯记录以其较长的时间序列 (~ 百万年以来)、高分辨率 (可达季节、年)、高保真性 (次生变化微弱)、多参数 (多种代用指标) 等优势, 在气候变化、环境变迁、人类活动等领域都揭示了许多鲜为人知的科学事实, 尤其冰芯内封存的气泡更为研究古大气成分提供了唯一的和直接的证据。20 世纪 50 年代科学家首次提出通过钻取冰芯研究气候变化, 并成功地应用到北极格陵兰冰盖的研究中。半个世纪以来, 从格陵兰冰芯反演的古气候变化革新了一系列关于地球气候演变的认识, 对当代地球科学产生了深远影响。

格陵兰 GRIP 和 GISP2 冰芯是一对在格陵兰冰盖顶部钻取的“姊妹”冰芯, 钻孔相距仅 30 km, 分别由欧共体和美国执行。两支冰芯均钻透到基岩, 年代跨度从未次间冰期至今。两支冰芯清楚地显示了一个完整的冰期旋回, 除距今 12 万年前的 Eemian 时期二者记录不一致以外, 其余阶段则完全吻合。格陵兰冰芯清晰地显现 8 200 年前的冷事件, 使得人们对北大西洋地区在全球海洋传送带中起“开关”作用的认识更加明朗。冰芯研究的优势在于, 其表征的气候变化不是温度一项指标, 而是冰芯内多种代用指标同时发生了变化, 因此, 科学家对之确信不疑。而且, 冰芯中的这些往事的记录与北大西洋海底冰筏沉积物记录的往事是完全一致的, 冰芯的研究为气候预测提供了有力的科学依据。

冰芯温室气体记录揭示气温变化与主要温室气体变化、尤其是 CO₂ 变化是同步的, 对温室气体在全球气候变化中的重要性提到前所未有的认识水平。格陵兰冰芯中有关痕量有毒重金属 (如铅 Pb, 镉 Cd) 的研究证实了工业革命对大气的污染。历史时期 Pb 含量的高值期与特定时期的冶炼活动有良好对应。自 20 世纪 80 年代以来由于欧美国家先后放弃使用含铅汽油, 北极雪层中的铅含量相应地急剧下降。采用冰芯记录的钾的奇异值可以很好地恢复了历史时期北半球主要森林火灾的发生强度。格陵兰冰芯的海盐离子忠实地反映了

冰岛低压的长期变化。阿拉斯加山地冰川冰芯反映了阿留申低压变化的年际、年代际特征、以及太平洋年代际振荡。火山事件被完整地记录到格陵兰冰芯中, 对过去数千年来火山活动的记录非常详尽, 将其作为一个气候强迫因子输入到气候模式模拟过去千年期气候变化, 得到非常好的结果。

根据各种证据推算, 距今约 12 万年的末次冰期间冰期 (Eemian) 时期, 当时的大气温度比现在约高 5 °C, 格陵兰冰盖规模比当今小 2/3。且 Eemian 这样的暖期也可能存在快速的气候冷暖振荡。可惜的是, GISP2 和 GRIP 两支冰芯在这个时段上的记录并不一致, 其中一方认为另一方的冰芯底部冰发生了褶皱, 产生了气候突变的假象。为澄清事实, 欧盟各国又开展了 NGRIP 冰芯钻探, 但钻透冰层后, 却发现 Eemian 时期的冰层因冰盖底部发生融化而不复存在, 这样就死无对证了。当前, 全球冰川学家又联合在格陵兰北部开展 NEEM 的冰芯钻探, 目的还是揭开 Eemian 时期气候变化的精细特征。问题在于, 如果 Eemian 时期温度果真比当今高 5 °C, 怎么解释当时的冰盖并没有完全消失? 所以, 需要对当时的气候系统做进一步详细研究。

从北极冰芯长序列变化角度研究北极对中国气候的影响的研究还寥寥无几。因此, 这方面的研究应该作为一个重要的方向引起重视。从长期气候变化视角研究北极气候与中国气候的内在联系显得十分紧迫。

12 北极沉积记录中的古气候

对古气候变化研究将增加人类对于地球演变的了解, 对当今的气候变化和未来的变化趋势给出启发性的依据。北冰洋是地球沉积记录丰富的海域, 近年来的研究正在取得长足的进展。

在地球漫长的历史中, 北极并不总是荒芜的冰封世界, 地球已经经历了一次从暖室气候到现今冷室气候的重大转变。在数千万年甚至更长的年代之前, 地球曾经是一个无冰的世界。在几千万年的时间里, 南极大陆和北极格陵兰岛逐渐形成了厚达几千米的冰川。大洋钻探计划是人类大幅度增加对地球历史了解的转折点。以往我们是从岩芯和数十至数千米厚的地质剖面中了解古气候的演变, 大洋钻探计划的实施在全球海洋中钻取大深度沉积物样品, 这些样品成为年代更加久远、信息更加丰富的数据源, 大大提高了人类对古气候研究的能力。

对大洋钻探的样品分析得出, 在大约 4 500 ~ 2 500 万年之间, 大气 CO₂ 出现了一次明显的下降, 被视为地

球气候逐渐变冷的根本原因。气候变冷导致地球上形成了北极的格陵兰冰盖和南极大陆的冰盖,两极成为更加寒冷的世界。

对北极年代久远的沉积物研究得出一些更加宝贵的认识。在 5 500 万年前,北极夏季海水表层温度高达 18 °C。显然,CO₂ 不是北极地区温暖气候的唯一驱动力,这个认识推动了更加深入的研究。首先考虑到的因素是冻水蒸汽在极地地区平流层上形成的云层。就像大气中的温室气体,这些冰晶体能够捕获地球返回太空的部分能量,维持两极地区温暖的地表。

近年来,北极温度的变化至少是热带地区的两倍,与古气候记录中古新世超级温室时期的情况几乎完全一致,这种不均衡的升温显然不是由于 CO₂ 含量的原因。近来的研究工作表明,北极雪和海冰覆盖面积的减少对气候变化有显著的正反馈作用,导致全球增暖在极地被放大。与古气候记录对比表明,未来高纬地区的升温仍然会高于中低纬度地区。

北冰洋的古气候记录表明,在 4 900 万年前的 80 万年时间里,来自低纬度地区的温暖洋流没有进入北冰洋,由于北冰洋有大量陆源淡水注入,在北冰洋形成了淡水环境。在这段独特的时间里,淡水从北极地区向外扩散,直到 4 830 万年前北冰洋的盐度再度增大时才告一段落。这段历史表明,北冰洋的现状与全球热盐环流有关,一旦来自热带的暖流中止,北极的海水结构将发生沧桑巨变。

因此,北极的沉积记录非常宝贵,解决了一些关于北极气候演化的谜题,大大拓展了我们的研究视野,对现代和未来气候变化问题的研究提供了珍稀的线索。但是,北极古气候研究中还有很多没有解决的问题,需要开展更多的研究工作。

13 后记

北极科学的历史,也是英雄辈出的编年史。北极恶劣复杂的自然条件、艰苦卓绝的生存环境,险象环生的考察作业,使北极的科学平添悲壮的色彩。北极科学家们挑战死神、挑战大自然,锲而不舍地努力,才创造了北极科学的今天。

人类的绝大部分生活在北半球的中纬度地带,受到北极过程的影响,对北极的科学研究实在是太重要了。现在,不仅在北极有领土的 8 国努力研究北极,更多在北极没有疆土的国家也加入北极探索的行列。目前,北极研究达到了史无前例的顶峰,并还在快速的上升之中。以上是中国目前在北极开展的主要研究工作。随

着对北极研究的深入,中国科学家正在涉猎更多的领域,形成了北极科学繁荣发展的局面。

发生在北极的快速变化使科学界惊呼:人类对北极的研究速度赶不上北极的变化速度。人们越来越认识到,随着北极发生显著变化,北极在全球变化中的地位越来越重要。北极的科学是涉及中国长远发展和国民生存环境的重要科学领域,需要迎头赶上国际的研究水平,深入研究与北极有关的重大科学问题,为解决人类现在和不久的将来的生存和发展问题做出贡献。

本文插图见彩插一和彩插二。

(2009 年 1 月 8 日收到)

Research in Arctic, a Coming True Dream

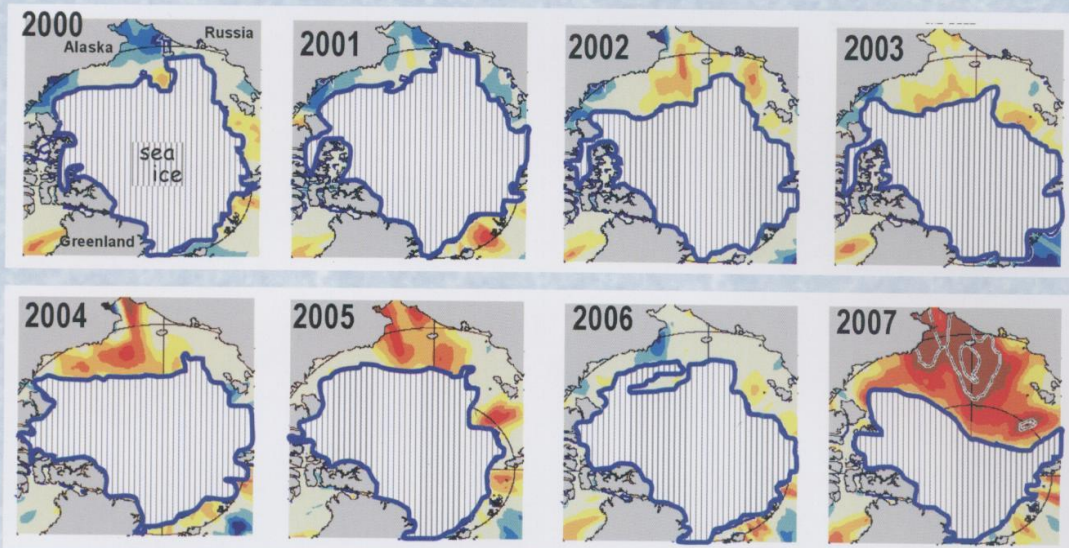
ZHAO Jin-ping^①, WANG Yong^②, BIAN Lin-gen^③, CHEN Li-qi^④, SHI Jiu-xin^⑤, CHEN Jian-fang^⑥, CHEN Bo^⑦, ZOU Han^⑧, XIAO Cun-de^⑨, WANG Ru-jian^⑩

①⑤ Professor, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; ② Chinese Arctic and Antarctic Administration, Beijing 100860, China; ③ Professor, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; ④ Professor, The Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China; ⑥ Professor, The second Institute of Oceanography State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; ⑦ Professor, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China; ⑧ Professor, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; ⑨ Professor, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; ⑩ Professor, Tongji University, Shanghai 200092, China

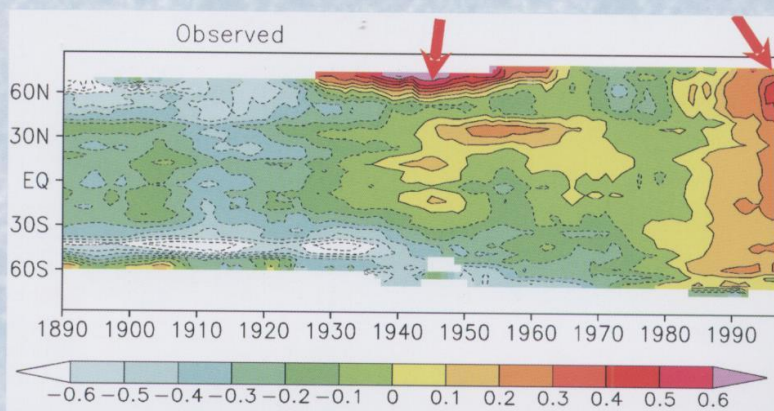
Abstract As the “top” of the earth, the Arctic is a remote and strange place. What we only know about the Arctic is the boundless ice and snow, the oppressive chilliness, the gleaming aurora, and the unbeatable polar bear. Marching to the Arctic, the charming world, Chinese scientists went well up to bridle with ancient dreams and grand expectation. During the past ten years, they focused themselves on the Arctic sciences and achieved the significant results. It is identified that the changes in Arctic is inevitably impacted onto the global climate and our living condition, which might be linked to the future of the earth. In this article, the research works of Chinese scientists are highlighted in the comprehensible words to show the present hope and future prosper in Arctic.

Key words arctic, arctic science, quick change, sea ice, marine ecosystem, climate change

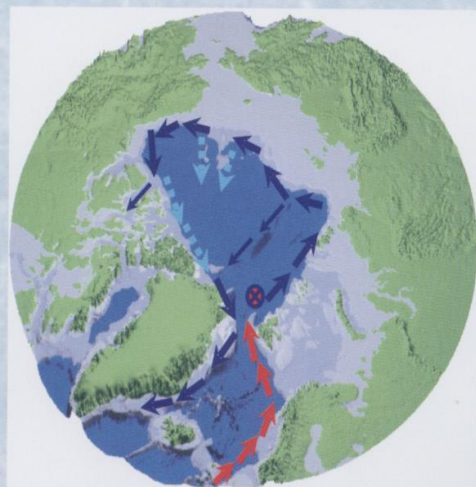
(责任编辑:温文)



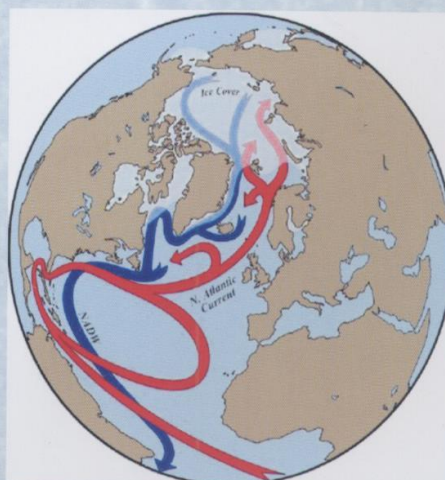
▲ 进入21世纪以来北极海冰覆盖范围的变化



▲ 近百年来观测到的全球温度变化

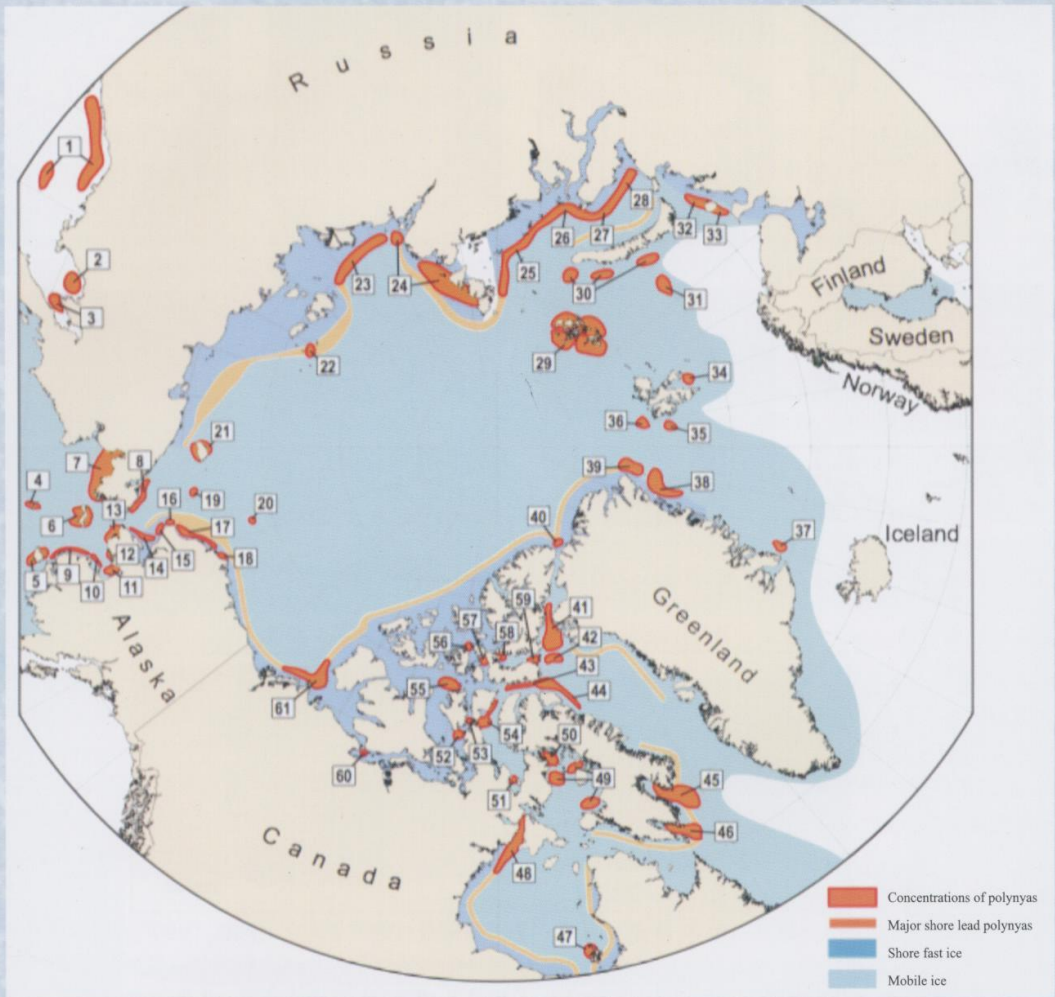


▲ 北极环极边界流示意图
红色为表层水，深蓝色为深层水，淡蓝色为不清楚流段



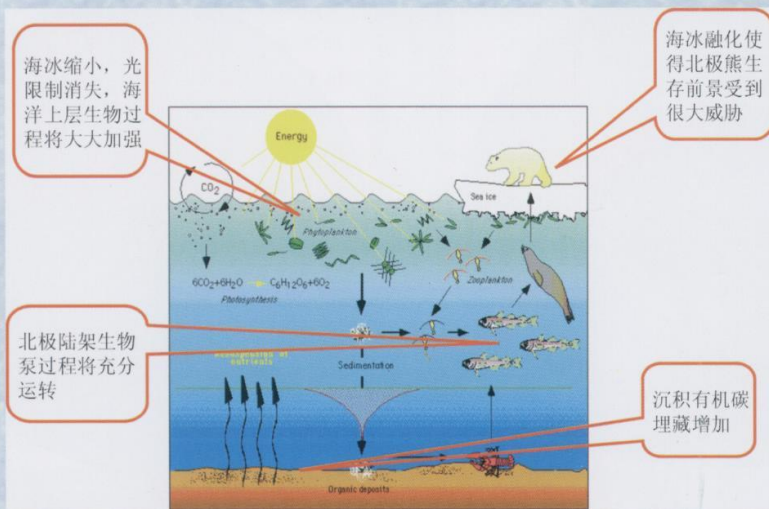
▲ 与北极环极边界流相联系的全球海洋输送带

参见本期“北极研究，从梦想走向辉煌”一文



▲ 北冰洋冰间湖及冰间水道分布示意图

深橙色为冰间湖，浅橙色为沿岸冰间水道，深蓝色为沿岸固定冰，浅蓝色为浮冰



▲ 占世界1/4面积的北极陆架生物泵过程的充分运转，将对全球碳的收支产生很大影响

参见本期“北极研究，从梦想走向辉煌”一文