

北极气候和陆地环境变化对第一产业影响研究进展

赵涔良^{1,2}, 朱文泉^{1,2}, 郭红翔^{1,2}, 陈力原^{1,2}, 谢志英³

(1. 北京师范大学地理科学学部 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学地理科学学部 遥感科学与工程研究院 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心, 北京 100875; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 北极地区正在经历前所未有的气候及陆地环境变化, 气温升高、植被绿化、冻土融化以及野火频发等因素已经对北极地区的第一产业产生了广泛而深远的影响。为了支撑气候变化背景下北极第一产业的可持续发展与相关政策的制定, 有必要加强北极气候及陆地环境变化对第一产业影响的整体性认识。本文针对北极地区的种植业、畜牧业、林业以及渔业4个第一产业部门, 系统梳理了它们受到气候及陆地环境变化影响的类型与程度。同时, 本文基于跨部门视角总结了当前北极环境变化对第一产业影响的相关研究, 并从5个方面进行了分析与展望: ① 气候及陆地环境变化对第一产业的具体影响方式; ② 整合局域性科学认识的挑战; ③ 气候变化适应策略的制定与实施; ④ 数据与方法层面的整合与创新; ⑤ 气候变化影响下北极第一产业变化对中国的启示。本文总结了未来气候变化背景下北极第一产业研究的重点领域, 可为中国参与北极第一产业资源的可持续利用与开发提供参考。

关键词: 北极; 气候变化; 陆地环境变化; 第一产业

DOI: 10.11821/dlxb202211010

1 引言

泛北极区域 (> 50°N) 内主要有8个国家和地区, 包括美国阿拉斯加地区、加拿大、丹麦、冰岛、挪威、瑞典、芬兰和俄罗斯 (也称“北极八国”), 其主要气候类型为寒带冰原气候、寒带苔原气候、亚寒带大陆性湿润气候和温带大陆性湿润气候^[1], 主要土地覆盖类型为永久冰雪、苔原、北方针叶林 (又称泰加林) 和耕地 (图1)。在全球气候变暖背景下, 气候变化在北极呈现出了放大效应^[2], 一些预计本应在21世纪中后叶发生的现象目前已在北极地区出现^[3-4], 使得北极地区成为了研究气候变化及其影响的天然实验场^[5-6]。同时, 北极气候放大效应也加剧了北极陆地环境变化——植被大规模变绿^[7]、冻土加剧融化^[8]、野火频繁发生^[9-10]等, 进而对当地的种植业^[11]、畜牧业^[12]、林业^[13]以及渔业生产^[14-15]造成广泛而深远的影响, 并对北极地区的可持续发展及人类福祉构成挑战^[16]。

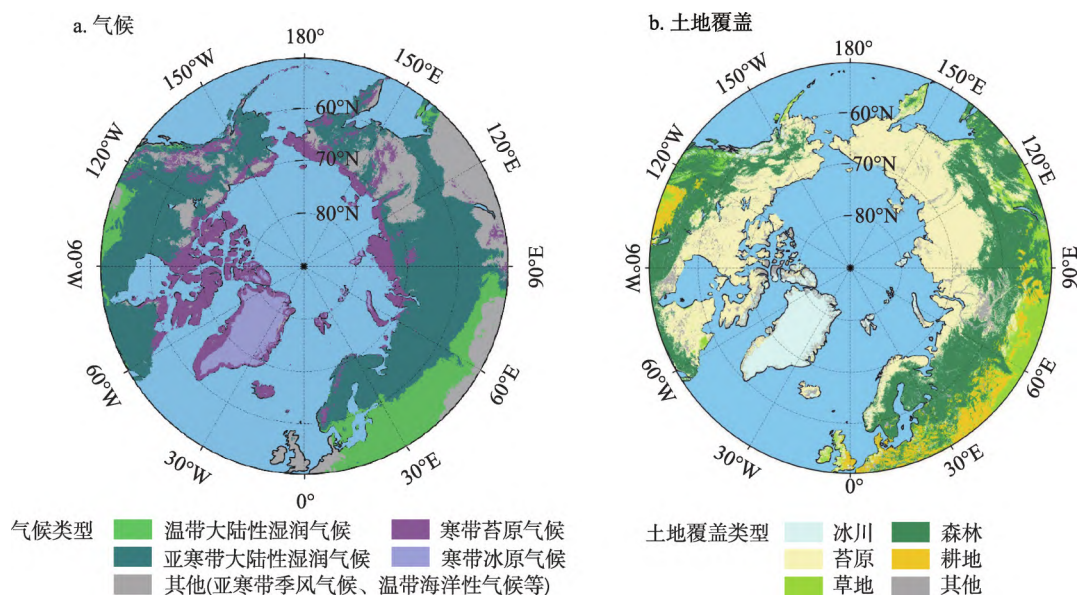
目前, 已有一系列综合科学报告对北极第一产业 (种植业、畜牧业、林业以及渔业) 受气候及陆地环境变化的影响进行了评估与分析, 这些综合报告主要包括《北极气候影响评估》^[17-18]《北极恢复力报告》^[19], 以及联合国政府间气候变化专门委员会第五、第六次 (IPCC AR5、IPCC AR6) 综合评估报告^[20-21]及其《极地区域》章节的专项报告^[22]

收稿日期: 2022-06-23; 修订日期: 2022-08-22

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0608504) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2020YFA0608504]

作者简介: 赵涔良(1997-), 男, 四川阿坝州人, 博士生, 主要从事气候变化研究。E-mail: zhao.cl@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 朱文泉(1975-), 男, 湖南永兴人, 博士, 教授, 主要从事植被与生态遥感研究。E-mail: zhuwq75@bnu.edu.cn
2838-2861 页



注: 图a根据Beck等^[1]在2018年更新的柯本气候分区产品整理制作; 图b根据2020年的MCD12Q1土地覆盖分类产品(IGBP分类系统)整理制作, IGBP分类系统本身不含苔原等综合类型, 因而图b中的苔原类型合并自高纬度的稀疏灌丛、郁闭灌丛、稀树草原、草地类型, 森林类型合并自高纬度的常绿针叶林、落叶针叶林、混交林、落叶阔叶林和多树草原类型。

图1 泛北极区域(>50°N)的主要气候类型及土地覆盖类型

Fig. 1 The main types of climate and land cover in pan-Arctic region (>50°N)

等。2004年出版的《北极气候影响评估》报告指出, 气候变暖背景下的种植业存在着北向扩张的潜力, 但是高纬度地区的冬季低温(农作物难以越冬)、土壤水分亏缺, 以及农业基础设施缺乏等因素则会限制种植业的北扩趋势^[17-18]; 同时其也列举了多种影响北极驯鹿养殖的气候变化类型, 并大致总结了环境变化对北极地区渔业及林业生产的积极效应。2011年北极监测和评估计划(AMAP)的后续综合报告着重强调了变化最为剧烈的冰冻圈所带来的影响^[23], 其中有关农林牧渔业的评估结论与《北极气候影响评估》相似, 但对前期的数据、方法和环境因子进行了修正和拓展(例如新增了有关冻雨天气、交通可达性等影响因素的描述)。此后, IPCC AR5报告^[20]、《北极恢复力报告》^[19]、AMAP SWIPA报告^[24]以及IPCC AR6报告^[22]中涉及北极的内容都已不再有按照农、林、牧、渔业划分的独立章节, 相关内容被整合进北极环境以及生态系统服务等框架, 或跨部门专项报告^[25]中。可以看出, 气候变化背景下第一产业的变化一直是北极地区的重要研究内容之一, 并且在综合科学报告的层面经历了从部门到跨部门的视角转变。不过, 虽然气候及陆地环境变化对北极种植业、畜牧业、水产养殖业以及林业的积极影响得到了进一步肯定, 但这些评估往往仅基于区域性的科学认识^[17, 14, 26]。因而, 有关北极环境变化对整个北极第一产业影响的整体性、系统性评估仍较为匮乏。

同时, 除了上述北极综合报告以外, 也有一些综述性或研究性论文部分涉及了北极气候和陆地环境变化对第一产业的影响。Ito等^[27]基于模型模拟的结果指出, 虽然种植业和林业生产力将会在未来提高, 但野火^[10]、病虫害事件^[28-29]以及冻土融化^[8, 24]等因素在模型过程中的缺失在一定程度上削弱了定量评估结果的可靠性, 致使其结果高度依赖于对未来情景的假设。另外, 有关气候变暖背景下林木线扩张的研究发现, 林木线在西伯利亚地区北移迅速^[30], 而在在加拿大地区则停滞不前^[31]。这些研究作为综合科学报告的补充, 揭示了当前定量评估结果的不确定性以及显著的区域间差异。

总的来说，虽然已有的全球性综合报告和区域性研究都对气候及陆地环境变化对北极地区第一产业的影响进行了评述，但这些研究的分析视角、详尽程度、研究区域各不相同，导致目前仍缺乏有关北极气候和陆地环境变化对第一产业影响的整体性认识。因此，本文希望结合已有的全球性综合报告和近年来出现的新研究成果，整理分析北极气候和陆地环境变化对种植业、畜牧业、渔业及林业的影响方式及程度，梳理环境变化对各第一产业部门影响的研究进展。最后，本文基于跨部门视角总结了当前气候变化对北极第一产业影响的研究中所存在的问题，并对未来研究趋势以及气候和陆地环境变化影响下北极第一产业变化对中国的启示进行了展望。

2 研究进展

2.1 种植业

泛北极地区主要的农作物类型有小麦、甜菜、玉米、大麦、土豆、向日葵和油菜等，其中小麦是最为主要的农作物。2020年联合国粮农组织的统计数据显示^[32]，整个北极8国耕地面积占全球24%，并且这8个地区种植业商品年产量总和占据了全球年产量总和的20%以上（以重量单位统计），2020年俄罗斯一国就生产了全球11%的小麦并供给了18%的全球出口市场。可见，以北极8国为代表的整个北极地区为全球贡献了相当一部分种植业商品，是全球粮食安全和生态系统供给服务的重要组成部分。

北极气候及陆地环境变化对种植业的影响可分为其对农作物、种植业设施、从业人员、病虫害等生产相关要素的影响（图2、表1）。这些种植业要素中，研究者关注最多的是气候及陆地环境变化对农作物的影响，而对有关种植业基础设施^[33]、从业人员^[34]等要素的关注较少，其中有关农作物长势的研究最多。另外，从研究的范围为看，有关农作物长势的研究多为涵盖整个北极或较大区域的系统性研究^[27]，而涉及农作物育种^[35]、

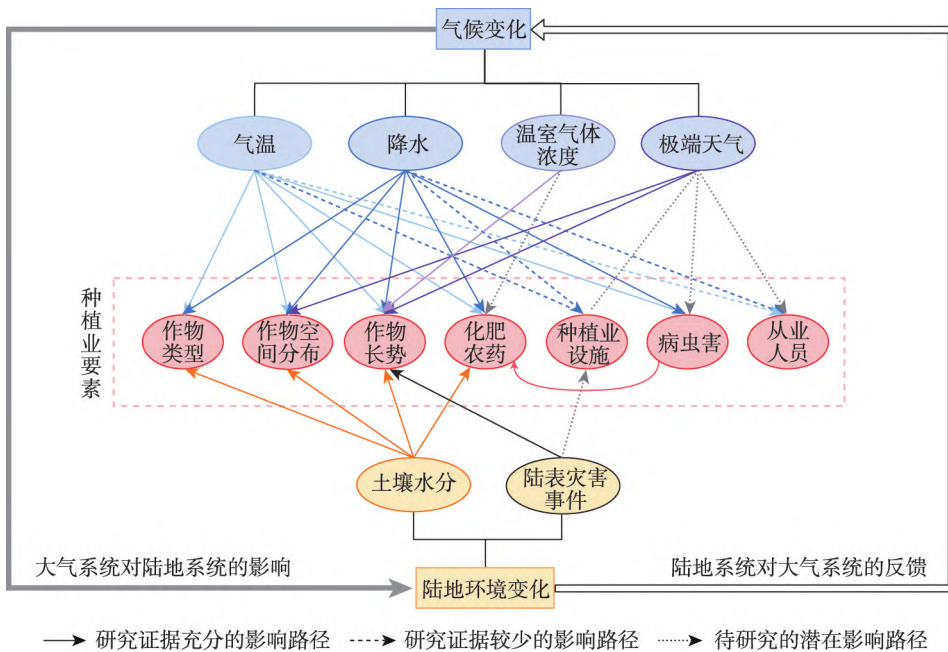


图2 气候及陆地环境变化对北极种植业主要要素的影响

Fig. 2 The predominant effects of climatic and terrestrial environmental variations on the main elements of Arctic plant cultivation

表1 气候及陆地环境变化对北极种植业主要要素的具体影响
 Tab. 1 The specific effects of climatic and terrestrial environmental variations on the main elements of arctic plant cultivation

种植业要素	气候及陆地环境变化	气候及陆地环境变化的影响	研究区域
作物类型	气候适宜区北移	部分南方作物开始在北方地区进行实验性种植 ^[35, 41]	加拿大 欧洲
	温度、干旱胁迫以及病虫害风险增加	能抵御高温、干旱以及病虫害事件, 并能适应新光—热周期的作物育种及基因实验等进程加快 ^[47-48]	欧洲 冰岛
	平均气温增加 平均降水增加	苔原牧区及牧草种植区灌木化 ^[49]	北半球高纬度
作物空间分布	平均气温升高 平均降水增加 极端事件频发	农业气候适宜区显著且大范围的北扩 ^[11, 50] , 但部分作物的气候适宜区(例如硬质小麦)缩减 ^[51]	美国阿拉斯加 欧洲 北半球中高纬度
作物长势	极端事件频发	极端事件的频发(包括冻雨天气、野火灾害等), 增加了作物生长受到毁灭性打击的风险 ^[22]	北半球高纬度
	平均气温升高	环境温度超过了部分植物的最佳生长阈值 ^[44]	格陵兰岛
	平均气温升高 干旱风险增加	作物的生长季延长, 表现为春季物候提前和秋季物候推迟 ^[17, 52] 。同时, 部分地区的植被物候主要受水分条件驱动, 而非温度 ^[53]	北半球高纬度 格陵兰岛
	平均气温升高	作物在生长季的光能利用率增加 ^[54]	北半球高纬度
	平均气温升高 病虫害风险增加	作物对病虫害的抵抗能力发生变化, 多表现为降低, 病虫害限制了作物的生产力 ^[56]	欧洲
	冬季雪情变化	未来更多的“低降雪且霜冻”情景会对种植业生产造成负面影响 ^[55]	挪威
	CO ₂ 浓度上升	CO ₂ 施肥效应增加了北极植被的生产力 ^[56]	全球
	气候模式变化	AO(北极涛动)和PDO(太平洋年代际振荡)分别调节低温和水分限制, 显著影响农业系统。AO对生产力的影响呈现降低趋势, 而PDO则表现为增加 ^[57]	北半球高纬度
	气候适宜区北移	若不考虑冻土、野火等因素对种植业的影响, 模型显示未来北极种植业的生产力会整体提高 ^[27]	北半球中高纬度
化肥农药	气候适宜区北移 干旱风险增加 病虫害风险增加	化肥和农药的施用量增加 ^[52]	北半球高纬度
种植业设施	气候适宜区北移 降水模式变化	土著社区种植业模式的革新 ^[53, 58] 对水利设施进行调整的需求增加, 并且雨养和半干旱地区都需要在夏季进行更多的补充灌溉 ^[59]	加拿大 加拿大
病虫害	平均气温升高 气候适宜区北移	种植业病虫害的种类增加, 其范围也不断北扩 ^[28-29]	北半球高纬度
从业人员	气候适宜区北移	由社会经济因素驱动, 在气候适宜区北移的支撑下, 部分原驯鹿养殖从业者转变为种植业从业者 ^[34]	俄罗斯

种植业基础设施^[33]、病虫害类型^[36]的研究则多为特定区域内的个案研究。该领域内的定量研究主要集中于农作物生产力的变化和气候适宜区的北移, 而对种植业管理、种植业基础设施以及从业人员等方面则多为基于相关定量数据的定性分析。此外, 研究者对各种种植业要素受气候及陆地环境变化的影响, 多数仅考虑单一环境因素变化对种植业要素的直接影响, 例如, 气候适宜区北移导致的农作物抗逆性和光合作用能力变化^[27, 37]。

北极地区的种植业对气候及陆地环境变化较为敏感, 以温度为代表的气候适宜区北移是其最主要的影响因素。虽然北极逐渐作为一个潜在的粮食生产区域得到了广泛关注^[11, 38], 并且也有相关研究预测农业气候适宜区会在21世纪末平均北移500 km^[39]。但

是,目前人类垦殖系统尚未跟随气候区北移进行大范围地同步北扩^[40],并且与种植业北移相关的研究也尚处在模型模拟^[27]或是区域实验阶段^[35,41]。未来,为了能够更好地处理当前气候及陆地环境变化背景下北极种植业发展所面临的挑战与机遇,需要在下述领域中进一步开展研究。

(1) 服务于北极种植业的陆地环境影响因素观测系统。得益于气候模式模拟技术的发展,基于各类生态模型、作物模型以及遥感观测的结果都显示了北极范围内农业适宜区的北移^[11]。不过,农作物种植高度依赖于土壤、地形等陆地环境条件,然而有关气候变化背景下北极土壤性质、储水能力以及营养元素等方面的长时序研究较为缺乏。未来的研究要求建立空间覆盖范围更为广泛的陆地环境观测系统,并进一步发展符合北极情况的土壤及陆表过程模拟模型。

(2) 表征北极种植业生产力的模型与指标。目前,遥感植被指数(如NDVI)是北极植被研究中使用最为广泛的生产力指标^[7,42],然而已有许多研究指出了高纬度地区NDVI和植被生产力间的非线性关系^[43],暗示其在北极地区作为生产力指标使用时存在一定的适用性缺陷。此外,虽然生态模型、遥感模型在北极范围内已得到了广泛的使用^[27],但其基于植被总初级生产力(GPP)、净初级生产力(NPP)等参数的指标体系并不能够完全满足北极种植业发展需要。因此,未来气候变化背景下的北极种植业研究,需要在北极植被研究的基础上进行特化,并结合适应策略等人文社会经济因素(如播种期调整、水利设施、肥料施用等)进行综合考量。

(3) 气候变化背景下北极种植业的环境反馈效应。当前大多数有关环境变化对北极种植业影响的研究都仅考虑单一环境因素直接且单向的作用,例如温度对农作物生长阈值的影响^[44]以及病虫害频发对农作物生长的抑制效应^[28-29]等。这种缺乏对种植业环境反馈效应的考虑,一定程度上引发了水体富营养化^[45]、缺乏管理的泥炭地开垦和土壤碳流失^[5]等现象。未来的研究需要将种植业纳入整个北极环境进行综合考量,充分认识各环节间的级联与综合影响机制,实施科学的种植业管理措施,以适应并且调节北极环境变化。

(4) 气候变化背景下人文社会经济因素对北极种植业的作用。北极种植业的发展不仅取决于农作物的适宜性和生产力,人类活动及社会经济要素也是重要的一环^[46]。然而,相比于环境变化类型的研究,目前这一领域的研究较为匮乏。未来,有关气候变化背景下人文社会经济因素对北极种植业作用机制的研究,需要更多研究者参与其中以丰富其内涵^[5]。

2.2 畜牧业

北半球中高纬度主要的畜牧业产品有牛奶、鸡蛋等,并有着独特的驯鹿养殖业门类。北半球高纬度的牛奶年产量约占全世界牛奶产量的10%,鸡蛋产量的4%^[32];同时,欧盟也有超过1/3的畜牧业产品来自北半球高纬度地区。可见,北极畜牧业是地区食品供给和食品安全的重要组成部分。

北极气候及陆地环境变化对畜牧业的影响可分为其对牲畜、牧场、疾病以及从业人员等要素的影响(图3、表2)。这些畜牧业要素中,研究者关注最多的是气候变化及陆地环境变化对牲畜生产力的影响^[60]。同时,由于驯鹿是北极—高山景观的生态基石^[61],并且除驯鹿养殖业以外的其余北极畜牧业门类通常被认为对气候变化相对不敏感^[17],因而多数有关气候变化与北极畜牧业相互作用的研究都仅针对驯鹿养殖业。其次,由于驯鹿养殖空间分布数据的局域性,多数研究是基于某一特定区域的个案(通常限定在某一个国家内部),仅有部分与地衣(驯鹿的主要食物来源)相关的研究是涵盖整个北极范围的系统性研究。另外,该领域内有许多讨论驯鹿养殖和社会系统关系的定性研究,尤其是气候变化通过驯鹿养殖业对土著文化造成的影响^[62]。

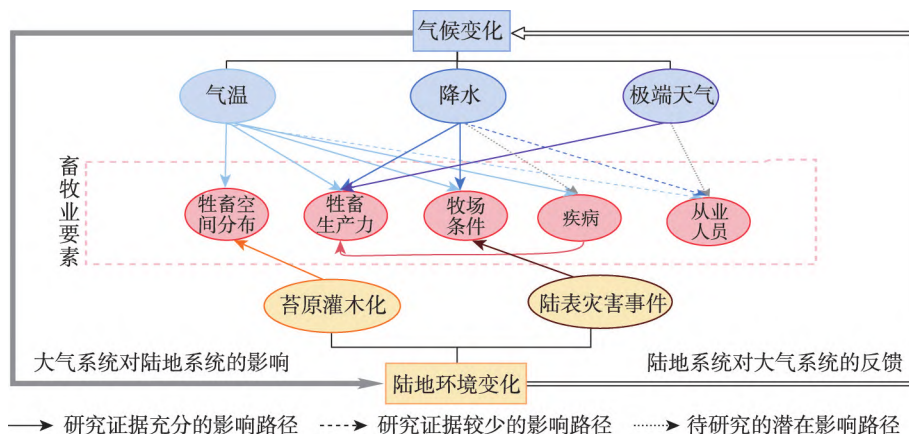


图3 气候及陆地环境变化对北极畜牧业主要要素的影响

Fig. 3 The predominant effects of climatic and terrestrial environmental variations on the main elements of Arctic livestock husbandry

表2 气候及陆地环境变化对北极畜牧业主要要素的具体影响

Tab. 2 The specific effects of climatic and terrestrial environmental variations on the main elements of Arctic livestock husbandry

畜牧业要素	气候及陆地环境变化	气候及陆地环境变化的影响	研究区域
牲畜空间分布	平均气温升高 灌木北向扩张	驯鹿活动范围的北移受到气候变暖和灌木化栖息地增大的驱动 ^[71] 。同时，驯鹿开放栖息地减少，并伴随着放牧可达性的降低 ^[63]	北半球高纬度
牲畜生产力	苔原及草地生产力提升	部分区域驯鹿的生产力提升，并伴随驯鹿群运动模式(例如在某一栖息地的停留时长)的变化 ^[72]	加拿大
	草场面积变化 平均气温升高 更温暖的冬季	芬兰的驯鹿管理已达到“社会-生态系统”的临界点 ^[62]	芬兰
牧场条件	平均降水增加 再冻结事件频发	冰雪完全融化然后再重新冻结会对地衣生态系统造成损害，影响驯鹿冬季食物来源 ^[73]	北半球高纬度
	冬季气温升高 再冻结事件频发	驯鹿繁殖率会降低，同时冬季死亡率会升高 ^[74]	芬兰
疾病	平均气温升高	地衣的生产力提高，放牧后地衣覆盖的恢复更加迅速 ^[75]	挪威
从业人员	平均气温升高	模型模拟结果显示，支撑驯鹿生存的地衣在野火扰动后的土地上恢复需要超过50年的时间 ^[76]	美国阿拉斯加
	气候适宜区北移	原南方/亚北极区域人畜共患病的北向扩张 ^[77] ，同时驯鹿患脑虫等疾病的风险也上升 ^[78]	北美 芬兰
		由社会经济因素驱动，在气候适宜区北移的支撑下，部分原驯鹿养殖人员转变为种植业人员 ^[34]	俄罗斯

相较于北极第一产业中的种植业与林业，北极畜牧业对气候变化相对不敏感。同时，不论是驯鹿养殖业还是北极畜牧业的其他门类，相比人类活动造成的影响而言，气候及陆地环境变化造成的影响相对较小。具体来说，边境封锁、开垦与伐木等导致的牧区间连通性降低和栖息地的缩减都是较气候及陆地环境变化而言更为显著的影响^[63-64]。此外，传统畜牧业门类对气候及陆地环境变化更加不敏感，其反而对市场需求与贸易政策变化的响应更为迅速^[65-66]。未来，为了进一步实现可持续发展目标和提升人类福祉，当前气候及陆地环境变化下的北极畜牧业（主要是驯鹿养殖业）仍需在上述方面进一步展开研究。

(1) 气候变化背景下驯鹿养殖的适宜生境条件。驯鹿养殖业作为一种半驯化的养殖行业,不同于有着稳定的商业草料或饲料供应(地衣是驯鹿的主要食物来源)的一般畜牧业(猪、牛、羊、禽类等),因而其对气候及陆地环境变化较为敏感^[7],并也同时调控着陆地环境,例如抑制灌木的北移^[67-68]。目前驯鹿的种群数量变化存在区域差异,既有增加^[60, 69]也有降低^[61, 70],需要进一步探究差异背后的原因以及未来适宜驯鹿养殖的生境条件。

(2) 社会—生态系统耦合的驯鹿养殖业发展路径。驯鹿养殖业与土著居民的身份认同、文化传承高度绑定,在当前牧区间连通性下降和栖息地缩减的发展趋势下^[63],以销售驯鹿相关畜牧业产品的传统模式面临巨大的发展挑战。目前,已有许多结合当地文化产业的地区试点^[62],但多为地方自发组织的形式,缺乏统一的方向性指导,加快探索耦合社会—生态系统的驯鹿养殖业发展路径的需求已迫在眉睫。

2.3 林业

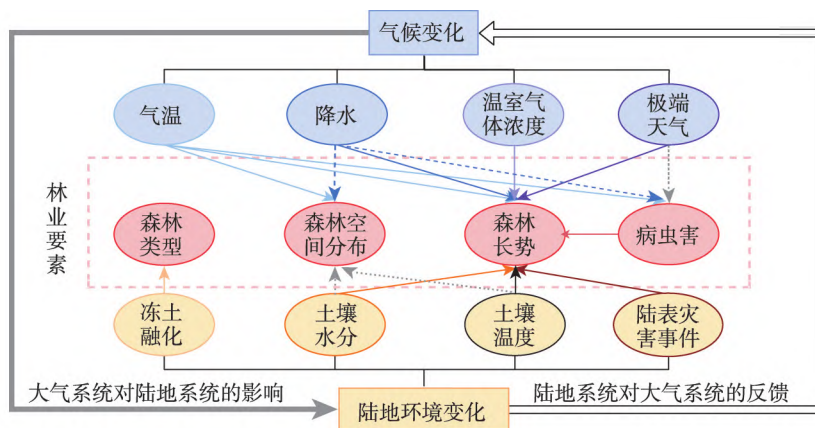
北半球高纬度地区广泛分布着针叶林与针阔叶混交林,占据了北半球高纬度($>50^{\circ}\text{N}$)地区陆地面积的一半以上(图1)。林业部门生产的原木、树皮等产品是造纸、建筑板材、家具以及生物质燃料等行业的重要原材料。2020年北极7国(不含美国阿拉斯加地区)的针叶原木产量占全球产量的31.6%,其产量的71.6%均用于出口并占据了世界出口市场份额的60.4%^[32]。北极拥有丰富的林业资源,是世界林业相关加工产业的重要组成部分之一。

北极气候及陆地环境变化对林业的影响可分为其对森林类型、森林空间分布、森林长势及病虫害等要素的影响(图4、表3)。这些林业要素中,研究者关注最多的是气候及陆地环境变化对森林长势的影响^[28, 79],尤其是其中碳循环方面的内容^[80]。另外,由于研究的手段不同(例如利用遥感、年轮、通量观测等),该领域内既有区域性的个案研究也有涵盖整个北极范围的系统性研究。同时,该领域内的定量研究基本集中在碳循环或植被生产力方面^[81],而与林业生产直接相关的内容则较少(例如蓄积量、木质部材质、林分密度等)。

林业生产本身具有长周期性,因而目前观测到的气候及陆地环境变化对林业的影响多体现为对植物本身生产力(尤其是区域整体碳汇能力)的短期直接影响,但长期来看,气候适宜区的北移总体上会对北极林业生产起到积极作用。一棵树从幼苗到成材,往往需要十几年或更长的时间,故当前气候及陆地环境变化对林业部门的木质部材质、自疏距离等要素的影响难以在当下得到清晰地判别。同时,虽然干旱、火灾以及病虫害所带来的短期直接作用已经对林业资源带来了十分显著且程度颇深的影响^[10, 29],但由于此类事件多发于缺乏林业管理的区域,故当前气候及陆地环境变化对林业木料生产的影响并不明显,北极国家近20年间的原木产量依旧在显著增加^[32]。未来,为了进一步实现北极林业的可持续发展,仍需在下述方面进一步开展研究。

(1) 丰富北极林业研究的内容。虽然气候及陆地环境变化已经对北半球高纬度的森林生态系统造成了显著的影响^[13],但是并未对以木料生产为主的林业部门产生决定性的影响。未来的北极林业研究不仅需要关注北方森林在碳源和碳汇方面的转变,也要进一步关注气候及陆地环境变化对林业产品的影响。

(2) 气候变化背景下北极林业管理的适应性策略。虽然气候及陆地环境变化对木质部材质的影响是慢性且长期的,但是短期的极端事件(干旱、火灾等)可能直接导致大面积森林的死亡。未来这种极端事件的影响范围和程度预计将不断增加^[10, 82],造成林业资源的大量损失。因此,采取相应的林业管理措施不仅可以减少林业系统因气候及陆地



——> 研究证据充分的影响路径 - - - -> 研究证据较少的影响路径 ·····> 待研究的潜在影响路径

图4 气候及陆地环境变化对北极林业主要要素的影响

Fig. 4 The predominant effects of climatic and terrestrial environmental variations on the main elements of Arctic forestry

表3 气候及陆地环境变化对北极林业主要要素的具体影响

Tab. 3 The specific effects of climatic and terrestrial environmental variations on the main elements of Arctic forestry

林业要素	气候及陆地环境变化	气候及陆地环境变化的影响	研究区域
森林类型	冻土融化	热喀斯特滑坡后的区域植被组成会发生变化, 已观测到柳木与滑坡的强相关关系 ^[86]	俄罗斯西伯利亚
森林空间分布	平均气温升高 平均降水增加	北极范围内观测到林木的明显北扩, 并且森林的北扩速度比灌木慢 ^[90] 。不过, 部分区域的森林北扩不明显 ^[91] 。这一演替过程更容易发生在冻土寒冰量较低的高地 ^[87]	俄罗斯西伯利亚 加拿大
森林长势	土壤温度升高	连续冻土区域的森林生产力呈现增长趋势, 而非连续冻土区域的趋势则不确定 ^[88]	西伯利亚
	热事件	特定生长时期内的热事件会引起乔灌木 NDVI 的提升 ^[89]	加拿大
	平均气温升高	作物的生长季延长, 表现为春季物候提前和秋季物候推迟 ^[17]	北半球中高纬度
	平均气温升高	树木年轮宽度的波动性增大 ^[90]	美国阿拉斯加
	平均气温升高	气温升高与森林生产力增加的关系在不同植被类型间存在差异, 其中落叶松与夏季气温的正相关关系尤其显著 ^[79] 。同时, 部分区域研究显示温暖的冬季将不利于原北方被子植物的生长 ^[91]	俄罗斯 加拿大
	平均气温升高 干旱风险增加	北极最为温暖和干燥的地区, 落叶灌木(例如桦树和柳树)的生长速率降低 ^[92]	格陵兰岛
	CO ₂ 浓度升高	CO ₂ 施肥效应增加了北极植被的生产力 ^[56]	全球
	平均气温升高	北方森林的火灾风险增加 ^[10, 93]	美国阿拉斯加 北半球中高纬度
	病虫害增加	病虫害增加限制了林木的生产力, 同时一些新兴的病虫害类别可与林木的物候结合, 并进一步放大负面影响 ^[28, 94]	格陵兰岛 挪威
	气候及陆地环境的整体变化	云杉和松木林场的承载能力增加, 主要表现为林分密度增加 ^[95]	德国、挪威和芬兰
病虫害	气候适宜区北移	病虫害的影响范围北扩, 并伴随着病虫害类型多样性的增加 ^[28]	挪威

环境变化造成的损失,还能进一步促进陆地碳汇增加以实现“气候中和”^[83-84],避免升温幅度达到抑制树木生长的水平^[85]。

2.4 渔业

北半球高纬度地区渔业可大致分为野生捕捞和水产养殖,野生捕捞的主要区域位于巴伦支海,而水产养殖的主要产区则位于挪威^[96]。欧盟一半以上的鱼类产品来自北半球高纬度地区的捕捞或养殖,是欧洲食品安全的重要组成部分^[97];同时,渔业也是当地经济的重要组成部分,其在格陵兰岛和冰岛分别贡献了15%和10%的国内生产总值^[96]。虽然北极地区的大西洋鲑鱼的水产养殖业在产量方面仅占世界水产养殖业的2%,但是其凭借极高的经济价值,占据了世界水产养殖25%以上的经济收益^[98]。此外,由于北极淡水系统内的野生捕捞活动极少,而远海野生捕捞不直接受到陆地环境变化的影响,因此本文主要关注淡水及近岸水产养殖业。

北极气候及陆地环境对渔业的影响可分为其对水产品、水产饲料、病原体与寄生虫等要素的影响(图5、表4)。这些渔业要素中,研究者关注最多的是水产数量与质量要素^[99],而对水产饲料等要素的关注较少^[100]。另外,由于鱼群分布的地域性差异,基于观测的研究只能是区域性的个案研究^[101],因而该领域的许多研究都基于实验室的控制变量试验,例如,升温对鱼类生长速率的影响^[102]。这些试验研究占据了该领域内定量研究的主要内容,理论上这些基于实验室的研究结果可适用于整个高纬度海域。

气候及陆地环境变化对水产养殖业同时存在着促进与抑制作用,虽然其负面效应在全球范围内占主导^[103],但在北极地区其积极效应也十分明显。气候及陆地环境变化对渔业的影响主要来自于水体温度升高,升温将促进更多种类的鱼类能够在北极地区生存^[104],并且也能够加速原北极地区鱼类的生长速度^[105-106]。此外,降水、径流及融水增加会导致峡湾水体的表面淡水层变得更厚(水体盐度也进一步下降),并进一步增加水体温度^[97]。地表径流的增加也会在固定时节促进特定种类鱼群的生产^[97],并加强峡湾表层水体的流动性。同时,温室气体增加等因素导致的水体酸度提升则会对特定的水产品类产生负面影响^[107]。另外,风暴天气、波浪、生物入侵、病原体与寄生虫等风险的增加^[96,108],也对未来北极渔业的发展构成了挑战,其中部分环境因素变化的影响甚至难以系统性地定量评估。渔业作为北极地区的特色支柱产业,为了实现其可持续发展,需要对以下关键问题进一步开展研究。

(1) 全球气候及陆地环境变化对北极渔业的系统性影响。鱼类对于环境变化较为敏感,因而已经从实验室、淡水系统和海水系统中都发现了鱼类在生长发育、种群空间分布等方面的变化^[101,109]。然而,虽然对于单个物种在环境变化下的生理变化已有较多的了解,但受限于渔业研究的地域性以及观测手段的限制性,来自经验证据的支持较为薄弱^[110];加之气候变化还会对北极渔业供应链产生影响,例如北极水产养殖业的饲料用鱼——秘鲁鳀鱼,其产量会受到全球气候变化的影响^[96]。因此,有关北极渔业受全球气候及陆地环境变化影响的系统性认识仍需进一步探索。

(2) 环境污染条件下的北极渔业发展路径。由于人类活动和气候变化的影响,北极环境的污染状况不断加剧^[59]。不仅全球范围的大部分汞元素会在北极汇集^[124],并且也存在北极陆地系统过量的碳、氮、磷等元素输入水体的情况^[45]。过量的金属元素、藻类爆发及其诱发的水体缺氧等后果都为北极鱼业的未来发展增添了新的不确定性^[96]。未来需要新的气候及陆地环境背景下,进一步结合当地文化和经济条件以探索跨部门、跨行业的发展路径以及对于气候变化的适应策略^[103],从而推进北极渔业的可持续发展。

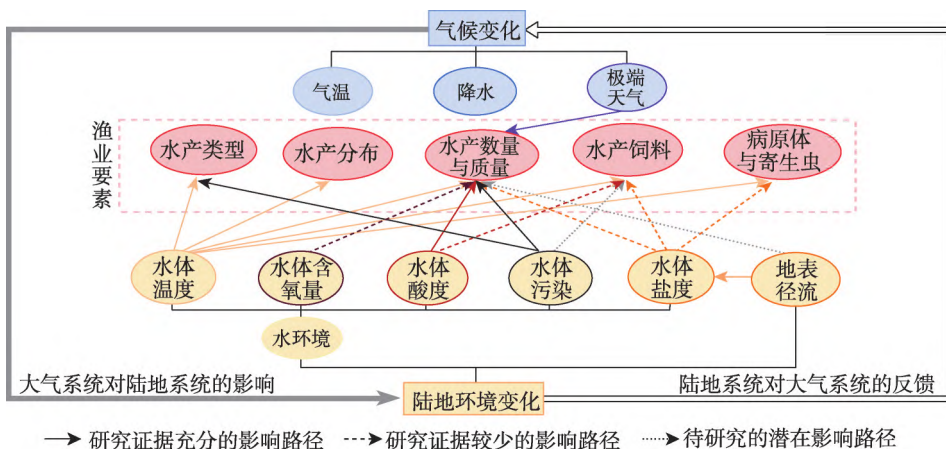


图5 气候及陆地环境变化对北极渔业主要要素的影响

Fig. 5 The predominant effects of climatic and terrestrial environmental variations on the main elements of Arctic aquaculture

表4 气候及陆地环境变化对北极渔业主要要素的具体影响

Tab. 4 The specific effects of climatic and terrestrial environmental variations on the main elements of Arctic aquaculture

渔业要素	气候及陆地环境变化	气候及陆地环境变化的影响	研究区域
水产类型	水体温度升高	有关北极渔业用鱼苗的基因研究不断推进 ^[111-113]	加拿大 大西洋东北部
水产分布	水体污染增加	部分湖泊种群消失或灭绝 ^[114]	冰岛
	水体温度升高	北极鳕鱼和北太平洋鳕鱼活动范围北移 ^[105]	太平洋东北部
水产数量与质量	水体温度升高	由于温度敏感性方面的差异，北极鳕鱼产区中大西洋鳕鱼的比例逐渐上升 ^[109]	实验室
	水体温度升高	鳕鱼养殖设施北向扩张 ^[115]	挪威
水产饲料	水体温度升高	北极鳕鱼和北太平洋鳕鱼的生长速度加快 ^[105-106]	太平洋东北部
	水体温度升高	北极鳕鱼的脂肪累积率发生改变 ^[102] ，其在夏季的脂肪含量可能会降低 ^[116]	实验室
病原体与寄生虫	水体温度升高	夏季和秋季的较高温度不利于红点鲑鱼卵化 ^[100] ，并且也不利于其生殖发育 ^[117]	瑞典
	地表径流增加 平均降水增加	鱼类对病原体和寄生虫的抵抗力发生变化 ^[115]	挪威
水产饲料	更多的有机物质进入水环境，增加了水体富营养化风险 ^[45] ，对水产养殖造成负面影响，例如藻类的大量繁殖 ^[118-119] 。同时，沿海水产养殖环境的盐度降低 ^[96]		冰岛 英国 大西洋东北部
	水体酸化	海水pH值降低显著影响贝类养殖，并可能通过增加藻类增殖对鳕鱼养殖造成负面影响 ^[120]	太平洋东北部
病原体与寄生虫	水体含氧量下降	网箱养殖的鱼群密度可能会下降 ^[99]	挪威
	极端天气	越加频繁的风暴天气预计会增加鱼群死亡与逃避的风险 ^[108]	英国 爱尔兰
病原体与寄生虫	水体温度升高	作为鱼类部分食物来源的浮游动植物生长受到影响 ^[119]	英国
	水体盐度下降 水体酸化		
病原体与寄生虫	气候综合变化	作为北极水产饲料来源的谷物、秘鲁鳀鱼等生产受到影响 ^[96, 121-122]	全球
	水体温度升高 北向淡水流增加 水体盐度下降	水温升高将导致病原体活动范围北扩 ^[123] ，北极鳕鱼种群可能会遭遇高感染压力 ^[115] ，且对于网箱养殖而言，“高温+病原体”的综合影响比“高温+缺氧”的综合影响要高 ^[99]	大西洋东北部 挪威

3 问题与展望

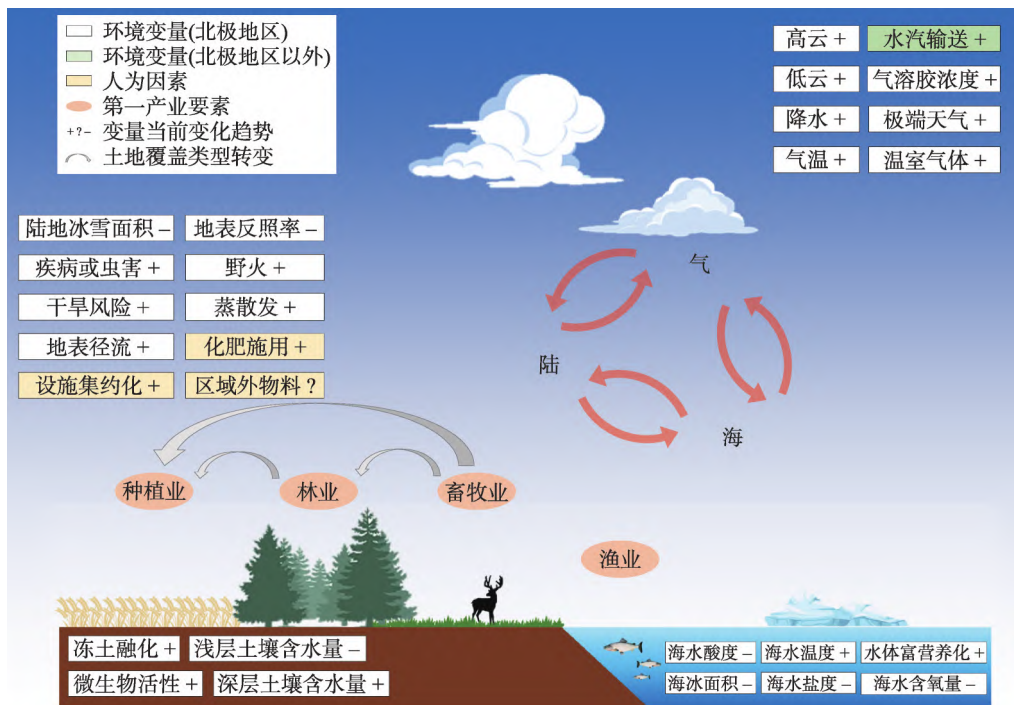
3.1 气候变化对北极地区第一产业的直接、级联和综合影响

当前有关气候变化对北极地区第一产业影响的研究多针对一些具体部门展开,且多数仅关注气候和陆地环境因素的直接影响,较少考虑多环境因素的综合影响以及各部门之间的交互作用^[125]。这带来了两个问题:① 缺乏科学规划的各部门产业发展所导致的负面交互作用影响,② 视野聚焦所导致的对部分影响要素的忽略。

部门间的负面交互作用。以种植业的粗放开发为例,其一定程度上引发了化肥农药用量增加^[32]、水体富营养化^[45],以及土壤碳流失^[5]等现象。另外,这种对负面交互作用影响考量的缺失也在相应的评估模型中体现。当前估算农作物、地衣以及森林生产力的模型^[27, 126],多数仅考虑了气候变量而忽视了野火^[10, 88]、冻融塌陷^[8]等陆地环境变化因素的影响,因而其对未来气候及陆地环境变化的积极效应存在一定程度的高估。此外,虽然也有部分研究对冻土融化以及地表反照率(如积雪融化)等因素进行了考虑,但并不是直接建立陆地环境变化对农作物、牲畜或林木的影响,而是通过将其纳入气候模型中参与气候变量的迭代计算^[3],致使难以从结果中区分气候的独立影响、气候介导陆地环境的级联影响以及气候与陆地环境的综合影响。

研究视野仅限于北极区域的局限性。第一产业供应链具有全球化的特征,气候变化对北极区域外的影响也会通过相应的载体传递至北极特定行业。以北极水产养殖业为例,其养殖所需的饲料主要来自于种植业谷类作物产品以及产自北极区域外的小型鱼类(例如秘鲁鳀鱼),其中小麦虽是北极区域最为主要的农作物,但是用于供给北极水产养殖的谷类产品并不完全来自于当地^[96, 103]。全球各地区产业在气候变化情景下的实际状况也会从侧面制约北极第一产业的发展。

总的来说,目前针对具体部门进行研究的思路存在系统性的局限,容易忽略气候及陆地环境变化的级联与综合影响,并缺乏对于跨部门交互作用的考量。因此,本文基于现有研究认识总结了一个涵盖各种级联影响和综合影响的跨部门框架,以便相关领域的研究人员全面地厘清研究对象与环境间的交互作用(图6)。北极地区第一产业的各部门间存在广泛的交互作用,这些交互作用通过物质流和能量流的形式对具体部门的生产过程产生影响。其中部分交互作用起到了调节作用,例如气候适宜区的北移虽然带来了灌木的迅速扩张^[49],但由于部分地区驯鹿养殖业采取的全年放牧模式(而非冬季放牧模式),这些地区的灌木北扩因而受到了抑制^[67]。此外,以营养元素的跨部门流动为主要特征的交互作用也是北极环境变化的主要驱动力之一,例如种植业与林业系统中的碳、氮等元素通过水为载体输送至水产养殖系统。目前由于化肥施用量增加(环境胁迫上升)、降水及径流量增加、土壤排水能力增加(冻融导致)等因素,该交互作用对北极第一产业的影响也在增强,类似水体富营养化以及藻类爆发等现象愈加明显^[45, 127]。另外,北极地区的各产业门类也会通过温室气体以及地表反照率对地表能量平衡造成影响。例如,对林地和苔原地区的开发(如开垦、伐木等)、愈加强烈和广泛的土壤冻融以及野火事件均会释放出大量的CO₂和CH₄等温室气体^[128],同时冰雪覆盖面积的缩减、冻融导致的地表塌陷等也会导致地表反射率的降低,从而增加地表的能量摄入^[129]。最后,能量平衡变化导致的气候变化又将反作用于北极第一产业的各个具体部门。简而言之,这些部门间的交互作用纷繁复杂,存在着明显的地区差异与区域特异性,并且部分作用过程及变量难以在当前的模型中予以量化和模拟,例如北极区域的植被春季物候提前现象在观测数据上体现出了水热双敏感性,而基于模型模拟的结果则多数仅体现出温度敏感性^[130]。



注：图中展示的各气候及陆地环境变化仅是与北极第一产业生产相关的主要因素，而非北极区域所有的环境变化要素。各产业受到的具体影响可参见本文研究进展部分；区域外物料指产自北极以外但用于北极第一产业生产活动的化肥、饲料等物资，是北极地区营养元素及污染的输入方式之一；+表示增多或升高，-表示减少或降低。

图6 北极第一产业与北极海—陆—气环境的相互作用

Fig. 6 The interaction between the sea-land-air environments and the Arctic primary industries

综上所述，北极地区正在受到极地内外气候及陆地环境变化的影响，并且其中仍有许多有关环境变量间因果关系以及交互作用影响机制的知识空白，从而进一步增添了定量评估北极地区实践生产活动受环境变化影响程度的难度。

3.2 整合气候变化背景下北极第一产业局域性科学认识的挑战

气候及陆地环境变化对北极地区第一产业影响的研究存在区域间的不平衡（图7）。本文在第2节中通过列举已有的研究证据总结了气候及陆地环境变化对北极第一产业的具体影响，其中多数研究均基于北极的特定研究区域，例如阿拉斯加^[50]、加拿大北部^[131]、格陵兰岛^[132]等。不同研究区域的研究数量有着明显的差异，总体上呈现出北

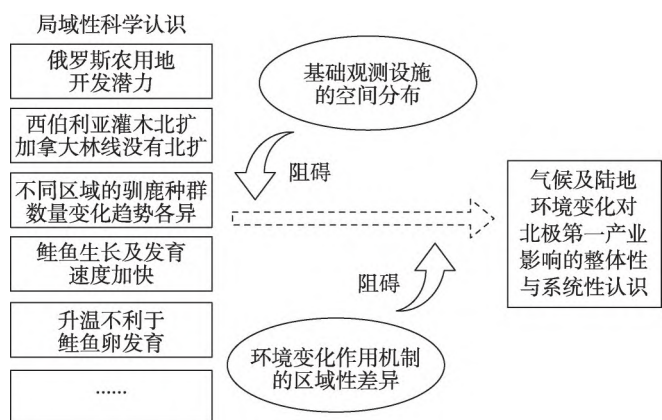


图7 气候变化背景下北极第一产业的局域性科学认识整合与凝练

Fig. 7 The local scientific knowledge of Arctic primary industries need to integrate and become succinct under the background of climate change

美、西欧较多而西伯利亚较少的格局, 北极区域野外观测设施分布的不均匀性会对研究类型造成限制, 从而提高整合各局域性科学认识的难度。

除去上述硬件层面的原因以外, 有关气候及陆地环境变化对北极地区第一产业的整体性认识也受到相应环境变化地域性特征的阻碍(图7)。例如, 有关北方泰加林以及灌丛北向扩张的研究, 在加拿大北部、北欧以及俄罗斯区域都有在进行, 然而研究结果却不尽相同。具体来说, 在加拿大地区未能观测到林木线的显著北移^[31], 而在俄罗斯、阿拉斯加等地区则发现了灌木的快速北扩与森林的缓慢北扩^[30, 133-134]。类似的情况在北极地区的研究中还有不少, 例如, 有研究认为北极地区的降水和夜间温度(而非白天温度)是促进植被生长的机理原因^[135], 但是与植被生产力关系密切的生长季提前却是由白天温度(而非夜间温度)所驱动^[136]。因此, 受制于北极环境变化作用机制的区域性差异与复杂性, 使得较难形成气候及陆地环境变化对北极地区第一产业影响的整体性认识。

3.3 北极第一产业对气候和陆地环境变化的响应滞后

气候变化及其介导的陆地非生物环境变化的速度高于自然动植物的适应速度^[85], 而人类对于这一系列变化的响应速度则进一步滞后^[46]。自工业革命以来, 人类化石燃料排放参与驱动全球气候变暖的过程已持续了相当长的一段时间, 但是人类对于气候变暖的原因以及影响直至2000年后才有比较确切的认识^[3, 17]。例如, 作为北极地区增温明显且最为干旱的地区——格陵兰岛, 近年的研究发现该地区的灌木早已在20世纪70年代就已经达到了生长速率的极大值, 并且随着气候变暖进程的不断推进, 其生长速率已转而减缓并逐渐受到高温的抑制^[44]。然而, 在其余区域尚未发现农作物及森林植被存在高温生长限制现象, 气温增加反而从物候、生长速率方面对高纬度植被的生长有着积极作用^[17, 137], 但也有研究认为在高排放情景(SSP2-4.5、SPP5-8.5)下升温对北极植被总初级生产力的促进作用会持续减弱, 并最迟在2070年由正转负^[85]。类似的情况还有很多, 甚至很多环境变化还未得到充分的认识, 相应的北极环境就已发生了系统性的转变, 因而较难在适宜的时间采取恰当的应对策略。

同时, 面对快速变化的北极环境, 当前北极的第一产业开发模式与策略缺乏相应的综合考量。虽然从《北极气候影响评估》^[17]发布以来, 各国确立了北极区域农业和林业的发展机遇并推行了部分涉及土地利用转变的政策^[5], 但是在具体的实施过程中却缺乏科学的规划与指导, 在开发过程中释放出了大量土壤碳到大气中^[5, 21], 进一步加剧了温室效应。同时, 一些气候变化的适应措施(如向农田施加硅酸盐岩粉^[138])多是生产行为体的自发行为而非自上而下的整体性措施, 因而应对措施在生产端的覆盖面较为有限。此外, 气候变暖带来的极地化石能源开采成本下降^[17], 随之而来的矿区粗犷扩张也对附近的自然环境造成了负面影响, 削弱了北极植被对气候变化的调节能力, 并阻碍了地区整体的气候适应策略。

总的来说, 虽然气温升高和北极区域正反馈的气候效应(温室气体及地表反照率)对北极环境造成了剧烈的影响, 但是以森林为代表的植物对气候变化的适应起到了关键的调节作用^[139]。不过, 有研究指出未来北极区域的气候变化将可能超过自然及人为适应的极限^[21], 并导致北极与全球环境发生不可逆转的系统性变化。因此, 需要更多的研究者投入到该领域中, 从快速变化的北极环境中不断发掘新的知识与机理, 并通过全球合作实施气候变化应对策略, 用以提高北极第一产业对气候变化的适应及恢复能力^[140](图8)。

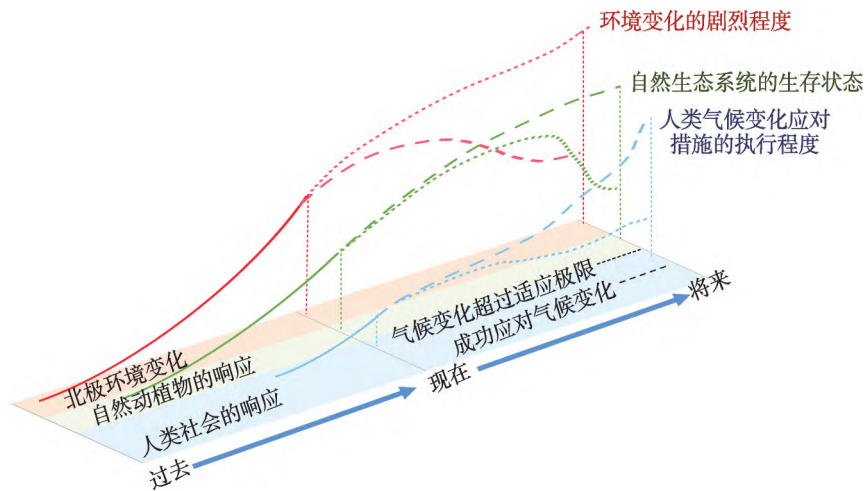


图8 北极环境变化与自然、人类社会系统响应时间不匹配的概念图

Fig. 8 A conceptual diagram showing the temporal mismatch of the response time of human society and natural ecosystem to the speed of environmental variations

3.4 北极第一产业研究的数据和方法需要整合与创新

有关北极气候及陆地环境变化对第一产业影响的定量评估仍存在较大的不确定性。温度是对北极区域第一产业生产最重要的影响因素,水温升高会促进多数鱼类的生长速率^[105-106],而气温升高也会增加植物的生长季长度并解除部分植物的低温生长限制^[17, 54]。因此,多数模型在中等排放情景下预测北极地区的植被生产力以及鱼类产量会有所增加。但是,这些模型往往过于简化了实际的生产过程,且忽略了(或是说难以量化)部分环境影响。例如,一些生态模型和作物模型在对未来进行预测时,往往仅基于现有的植被或农作物区域,亦或是简单地对区域进行基于气候条件的扩张,没有对土地利用转变的相关因素进行进一步的考虑(例如土壤碳的释放、冰雪融化带来的更多土地暴露、新开垦农用地更高的化肥与农业基础设施需求等)。同时,这些模型中往往缺乏对于地下部分的精确设计,例如土壤微生物的区域差异^[44]。具体来说,以被整合进许多气候系统模型与生态模型中的地表过程模型CLM4.5为例,其缺乏动态根模块的设计^[42],仅采用静态根廓线来模拟根系生长和分布,无法刻画根系对于气候变化的反馈,同时也削弱了使用这些模型刻画植物碳分配过程的研究结论的可靠性。因而,当前气候及陆地环境变化对北极第一产业在供给服务(第一产业产值)以及调节服务(碳汇能力)上的评估与模拟方面都有着较大的不确定性^[43]。

未来有关气候及陆地环境变化对北极地区第一产业影响的研究应该基于当前多类型数据的有机整合以及新兴的空间化数据。传统的第一产业基础数据多来自于基于行政区划的统计^[32, 98]以及相应农场或公司的年度清单,这些数据从基础上造成了当前研究的局域性。而且,不同来源的数据其数据结构也往往不尽相同,加之传统基础数据在空间化信息方面缺乏,这使得模型或遥感结果较难与其进行充分验证。不过,最近发布的ABCflux标准化通量数据集整合了北极范围内绝大多数的通量观测站点,是对北极范围内基础观测数据的一次有力整合^[44],此类历史数据的标准化整合将有助于对以往区域性科学认识的凝练与总结。同时,随着移动通信技术的发展,带有定位信息的社交媒体、论坛也会是一个重要的基础数据来源^[45],其将为气候变化背景下北极地区第一产业的灾害预警^[46]以及人类活动影响程度等研究提供新的视角。新兴的空间信息数据将与愈加成

熟的近地面^[52]及卫星遥感工具相结合,实现对农林牧渔业生产活动的高精度连续空间监测,从而获取更加全面与丰富的基础数据资料。

未来有关气候及陆地环境变化对北极地区第一产业影响的研究应该采取跨学科与跨领域视角,并广泛地结合新兴模型与方法。当前,研究者们已经发展出了许多针对各个部门不同实际需求的具体模型和方法,例如驯鹿养殖业中用于估算地衣生物量的模型^[126],以及结合基础设施分布与运输能力估算未来产值的经济模型^[147]等。然而,当下及未来的研究不能只关注监测与估算,需进一步探究各种环境变化之间的因果联系以及非线性作用^[148]。因此,在北极地区经历快速环境变化的当下,需要广泛进行多学科跨领域的学术交流与合作,发展能够更加精确描述现实变化的非线性方法,例如能够对两组互为因果的变量进行解耦合的收敛交叉映射方法^[149]、能够描述非线性系统微观状态的本征微观态方法等(已用于解析温度^[150]、臭氧^[151]等要素的时空分布与演化),并最终厘清环境变化对北极第一产业生产环节的作用机制。

总体而言,未来的研究需要在更充分的环境观测系统的基础上,结合更加全面且系统的模型方法,厘清环境变量间的相互关系及其对第一产业的具体影响方式(图9),从而发掘新的知识用于支撑北极第一产业的可持续发展与相关政策的制定。

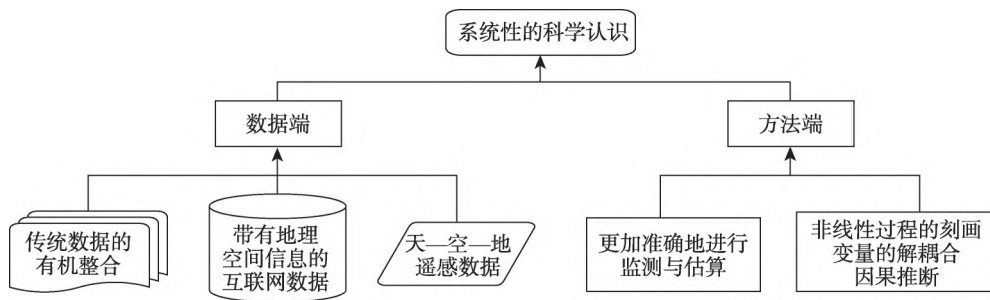


图9 研究所用的数据和方法需要整合与创新

Fig. 9 The data and methods for research need an integration and innovation

3.5 气候和陆地环境变化对北极第一产业影响给中国的启示

当前气候变化背景下北半球高海拔山地区域也经历着与北极地区相近的升温幅度^[152]和类似的陆地环境变化,推进气候变化对北极第一产业影响的研究对中国高寒冻土区域未来发展有着广泛的借鉴意义(图10)。当前北极冻土区域面临的诸多问题——致使大气二氧化碳浓度进一步上升的土壤碳释放过程^[153]、升温导致的蒸散增加、浅层土壤干旱、野火频发^[10],以及冰雪融化导致的农业水资源可用性变化等^[24],这些都可为中国高寒冻土区域在土地利用转变、农业基础设施建设以及产业布局调整等方面提供参考,从而制定出减轻气候及陆地环境变化的高寒冻土区第一产业科学发展策略。

气候变化为北极第一产业的发展带来了机遇,中国可以通过多种方式参与相应资源的可持续开发与利用,在达成国际合作的同时提升国家影响力(图10)。气候适宜区的北移为更多种类的农作物及自然植被的生长提供了条件^[54],中国可以通过输出种植业育种技术与相关种质产品助力北极种植的多样化发展。同时,冰雪面积、积雪时间以及永久冻土范围的缩减都降低了苔原冻土区域的开发成本^[17],其中部分区域十分适宜进行农林牧业化改造^[5],中国可以与相关国家构筑新的国际合作模式,通过各样的方式(如种质资源输出、劳动力派遣、租赁耕作、基础设施建设等)共同对气候变化背景下新增的自然资源进行可持续开发与利用。

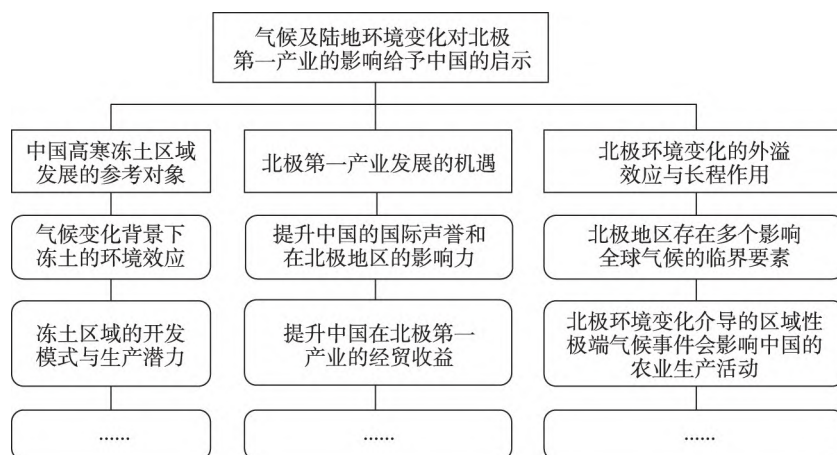


图10 气候及陆地环境变化对北极第一产业影响给中国的启示

Fig. 10 The impact on Arctic primary industries caused by the climatic and terrestrial environmental changes can enlighten China's development

北极作为地球三极之一驱动着全球气候，北极气候及陆地环境的变化也会对中国区域的降水、温度等环境因素造成长程影响，进而增加农林牧业生产风险（图10）。当前能够对全球气候系统造成不可逆影响的9~12个系统临界要素中有5个（北极海冰、格陵兰冰架、永久冻土、北方森林以及北大西洋径向翻转环流）都位于北半球高纬度区域^[154]。此外，已有研究指出北极海冰和北极涛动的变化会引起中国东北春季极端干旱^[155-157]，进而影响当地的农事活动。可见，量化北极气候及陆地环境变化对我中国第一产业生产活动具体影响的需求已十分迫切。因此，中国需要同国际社会一道进一步加强在北极地区的科研投入，解明北极环境变化对北极外地区尤其是东亚区域的影响机制与后果，同时积极参与相关北极事务以实现遏制全球气候变暖的总目标。

4 结论

气候及陆地环境变化对北极第一产业生产活动同时存在着积极影响与消极影响，并且在不同产业部门具有各异的表现形式与比重。积极影响多直接体现为相应产业部门下动植物生产力与活动范围的变化，而消极影响则多表现为不利于第一产业生产的各类风险增加。本文通过系统性梳理上述气候及陆地环境变化对北极陆地及近岸海域第一产业（种植业、畜牧业、林业以及水产养殖业）的具体影响方式，对气候变化背景下北极第一产业的发展现状与前景进行了总结。同时，本文还分析了北极地区第一产业与北极环境的相互作用，并对当前研究在科学认识、适应策略、基础数据以及模型方法等方面的机遇与挑战进行了阐述，大体上可归纳为以下5方面。

(1) 北极环境变化对第一产业影响的研究需要进一步丰富其研究内容。现有研究主要针对具体部门展开，并且多局限于各生产部门的少部分要素，同时还较少考虑北极环境变化对第一产业的级联与综合影响机制。未来需要综合考虑环境和各部门的多层级交互作用，扩展研究内容，以期能够更加全面地研究气候变化对北极第一产业的影响。

(2) 气候及陆地环境变化对北极第一产业影响的整体认识需要进一步凝练。北极地区基础观测设施的空间分布不均匀，加之北极环境变化作用机制的区域性差异，使得当

前对局域性科学认识的整合存在系统性的困难。未来需要厘清北极环境变化及其影响的因果机制,进一步整合气候及陆地环境变化对北极第一产业影响的研究结果。

(3) 急需实施恰当的气候变化应对措施。北极地区气候及陆地非生物环境的变化速度高于自然动植物的适应速度,而人类社会的响应速度则更为滞后。当前北极第一产业需要及时实施相应的气候变化应对措施(如针对性的产业管理改良、多产业部门的协调发展、全球合作框架下的跨地区资源调配等)以提升自然系统与人类社会系统面对气候变化的抵抗力与恢复力。

(4) 数据与方法层面需要进一步的整合与创新。传统的行政区划统计资料、不充分的基础观测设施,以及简化的模型设计限制了环境变化对北极第一产业影响研究的全局代表性。未来,经过整合的传统数据、带有空间信息的移动端数据,以及高精度的天空地遥感数据将为研究提供新的视角。同时,研究方法的创新将有助于厘清北极环境变化的影响机制。

(5) 中国需要关注北极气候和陆地环境变化所带来的发展机遇。气候及陆地环境变化总体上为北极第一产业的发展起到了积极作用,中国可以通过技术及劳力输出、物资供应、投资建设等多样化的方式参与北极第一产业资源的可持续开发。同时,其可为中国开发高寒冻土区提供经验参考,并有助于厘清北极环境变化对中国气候及环境变化的长程作用机制。

参考文献(References)

- [1] Beck H E, Zimmermann N E, McVicar T R, et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 180214. DOI: 10.1038/sdata.2018.214.
- [2] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 2010, 464(7293): 1334-1337.
- [3] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [4] Box J E, Colgan W T, Christensen T R, et al. Key indicators of Arctic climate change: 1971-2017. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(4): 045010. DOI: 10.1088/1748-9326/aafc1b.
- [5] Unc A, Altdorff D, Abakumov E, et al. Expansion of agriculture in northern cold-climate regions: A cross-sectoral perspective on opportunities and challenges. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5: 663448. DOI: 10.3389/fsufs.2021.663448.
- [6] Fang M, Li X, Chen H W, et al. Arctic amplification modulated by Atlantic Multidecadal Oscillation and greenhouse forcing on multidecadal to century scales. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1865. DOI: 10.1038/s41467-022-29523-x.
- [7] Myers-Smith I H, Kerby J T, Phoenix G K, et al. Complexity revealed in the greening of the Arctic. *Nature Climate Change*, 2020, 10(2): 106-117.
- [8] Smith S L, O'Neill H B, Isaksen K, et al. The changing thermal state of permafrost. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(1): 10-23.
- [9] Senande-Rivera M, Insua-Costa D, Miguez-Macho G. Spatial and temporal expansion of global wildland fire activity in response to climate change. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1208. DOI: 10.1038/s41467-022-28835-2.
- [10] Masrur A, Petrov A, DeGroot J. Circumpolar spatio-temporal patterns and contributing climatic factors of wildfire activity in the Arctic tundra from 2001-2015. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(1): 014019. DOI: 10.1088/1748-9326/aa9a76.
- [11] Ceglár A, Zampieri M, Toreti A, et al. Observed northward migration of agro-climate zones in Europe will further accelerate under climate change. *Earth's Future*, 2019, 7(9): 1088-1101.
- [12] Speed J D M, Chimal-Ballesteros J A, Martin M D, et al. Will borealization of Arctic tundra herbivore communities be driven by climate warming or vegetation change? *Global Change Biology*, 2021, 27(24): 6568-6577.
- [13] Gao S, Liang E Y, Liu R S, et al. An earlier start of the thermal growing season enhances tree growth in cold humid areas but not in dry areas. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(4): 397-404.
- [14] Zhang W B, Belton B, Edwards P, et al. Aquaculture will continue to depend more on land than sea. *Nature*, 2022, 603

- (7900): E2-E4. DOI: 10.1038/s41586-021-04331-3.
- [15] Osman M B, Das S B, Trusel L D, et al. Industrial-era decline in subarctic Atlantic productivity. *Nature*, 2019, 569 (7757): 551-555.
- [16] Ayanlade A, Sergi C M, Di Carlo P, et al. When climate turns nasty, what are recent and future implications? Ecological and human health review of climate change impacts. *Current Climate Change Reports*, 2020, 6(3): 55-65.
- [17] ACIA. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [18] ACIA. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [19] Arctic Council. Arctic resilience report. Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre, 2016.
- [20] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [21] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [22] Constable A J, Harper S, Dawson J, et al. Cross-Chapter Paper 6: Polar Regions//Pörtner H O, Roberts D C, Tignor M, et al. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022, 2319-2368.
- [23] AMAP. Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate change and the cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2011.
- [24] AMAP. Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017.
- [25] O'Neill B, van Aalst M, Zaiton Ibrahim Z, et al. Key Risks Across Sectors and Regions//Pörtner H O, Roberts D C, Tignor M, et al. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022, 2411-2538.
- [26] Xu L, Myneni R B, Chapin III F S, et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. *Nature Climate Change*, 2013, 3(6): 581-586.
- [27] Ito A, Reyer C P O, Gädeke A, et al. Pronounced and unavoidable impacts of low-end global warming on northern high-latitude land ecosystems. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(4): 044006. DOI: 10.1088/1748-9326/ab702b.
- [28] Jepsen J U, Kapari L, Hagen S B, et al. Rapid northwards expansion of a forest insect pest attributed to spring phenology matching with sub-Arctic birch. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2071-2083.
- [29] Bjerke J W, Karlsen S R, Høgda K A, et al. Record-low primary productivity and high plant damage in the Nordic Arctic Region in 2012 caused by multiple weather events and pest outbreaks. *Environmental Research Letters*, 2014, 9 (8): 084006. DOI: 10.1088/1748-9326/9/8/084006.
- [30] Frost G V, Epstein H E. Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s. *Global Change Biology*, 2014, 20(4): 1264-1277.
- [31] Timoney K P, Mamet S. No treeline advance over the last 50 years in subarctic western and central Canada and the problem of vegetation misclassification in remotely sensed data. *Écoscience*, 2020, 27(2): 93-106.
- [32] FAO. World food and agriculture: Statistical yearbook 2021. Rome, 2021.
- [33] Lamalice A, Haillet D, Lamontagne M-A, et al. Building food security in the Canadian Arctic through the development of sustainable community greenhouses and gardening. *Ecoscience*, 2018, 25(4): 325-341.
- [34] Yarzutkina A A. Vegetable and reindeer husbandry in the Chukotka village of Vaegi. *Siberian Historical Research-Sibirskie Istoricheskie Issledovaniya*, 2021(4): 94-111.
- [35] Barbeau C D, Oelbermann M, Karagatzides J D, et al. Sustainable agriculture and climate change: Producing potatoes (*Solanum tuberosum* L.) and bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) for improved food security and resilience in a Canadian subarctic First Nations community. *Sustainability*, 2015, 7(5): 5664-5681.
- [36] Miedaner T, Juroszek P. Global warming and increasing maize cultivation demand comprehensive efforts in disease and insect resistance breeding in north-western Europe. *Plant Pathology*, 2021, 70(5): 1032-1046.
- [37] Miedaner T, Juroszek P. Climate change will influence disease resistance breeding in wheat in Northwestern Europe. *Theoretical and Applied Genetics*, 2021, 134(6): 1771-1785.
- [38] Altdorff D, Borchard N, Young E H, et al. Agriculture in boreal and Arctic regions requires an integrated global approach for research and policy. *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, 41(2): 23. DOI: 10.1007/s13593-021-00676-1.
- [39] King M, Altdorff D, Li P, et al. Northward shift of the agricultural climate zone under 21st-century global climate change. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7904. DOI: 10.1038/s41598-018-26321-8.
- [40] Potapov P, Turubanova S, Hansen M C, et al. Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland

- expansion in the twenty-first century. *Nature Food*, 2022, 3(1): 19-28.
- [41] Carlson-Nilsson U, Aloisi K, Vagen I M, et al. Trait expression and environmental responses of pea (*Pisum sativum* L.) genetic resources targeting cultivation in the Arctic. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 688067. DOI: 10.3389/fpls.2021.688067.
- [42] Beck P S A, Goetz S J. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: Ecological variability and regional differences. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 045501. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045501.
- [43] Piao S L, Nan H J, Huntingford C, et al. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. *Nature Communications*, 2014, 5: 5018. DOI: 10.1038/ncomms6018.
- [44] Lu X M, Liang E Y, Babst F, et al. Warming-induced tipping points of Arctic and alpine shrub recruitment. *PNAS*, 2022, 119(9): e2118120119. DOI: 10.1073/pnas.2118120119.
- [45] Gudmundsdottir R, Olafsson J, Palsson S, et al. How will increased temperature and nutrient enrichment affect primary producers in sub-Arctic streams? *Freshwater Biology*, 2011, 56(10): 2045-2058.
- [46] Otto I M, Donges J F, Cremades R, et al. Social tipping dynamics for stabilizing Earth's climate by 2050. *PNAS*, 2020, 117(5): 2354-2365.
- [47] Hilmarsson H S, Goransson M, Lillemo M, et al. An overview of barley breeding and variety trials in Iceland in 1987-2014. *Icelandic Agricultural Sciences*, 2017, 30: 13-28.
- [48] Camargo A M, Andow D A, Castañera P, et al. First detection of a *Sesamia nonagrioides* resistance allele to Bt maize in Europe. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 3977. DOI: 10.1038/s41598-018-21943-4.
- [49] Martin A C, Jeffers E S, Petrokofsky G, et al. Shrub growth and expansion in the Arctic tundra: An assessment of controlling factors using an evidence-based approach. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(8): 085007. DOI: 10.1088/1748-9326/aa7989.
- [50] Lader R, Walsh J E, Bhatt U S, et al. Agro-climate projections for a warming Alaska. *Earth Interactions*, 2018, 22(18): 1-24.
- [51] Ceglár A, Toreti A, Zampieri M, et al. Global loss of climatically suitable areas for durum wheat growth in the future. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(10): 104049. DOI: 10.1088/1748-9326/ac2d68.
- [52] Assmann J J, Myers-Smith I H, Kerby J T, et al. Drone data reveal heterogeneity in tundra greenness and phenology not captured by satellites. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(12): 125002. DOI: 10.1088/1748-9326/abbf7d.
- [53] Westergaard-Nielsen A, Lund M, Pedersen S H, et al. Transitions in high-Arctic vegetation growth patterns and ecosystem productivity tracked with automated cameras from 2000 to 2013. *AMBIO*, 2017, 46(Suppl.1): 39-52.
- [54] Molmann J A B, Dalmannsdottir S, Hykkerud A L, et al. Influence of Arctic light conditions on crop production and quality. *Physiologia Plantarum*, 2021, 172(4): 1931-1940.
- [55] Bjerke J W, Tommervik H, Zielke M, et al. Impacts of snow season on ground-ice accumulation, soil frost and primary productivity in a grassland of sub-Arctic Norway. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(9): 095007. DOI: 10.1088/1748-9326/10/9/095007.
- [56] Ueyama M, Ichii K, Kobayashi H, et al. Inferring CO₂ fertilization effect based on global monitoring land-atmosphere exchange with a theoretical model. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(8): 084009. DOI: 10.1088/1748-9326/ab79e5.
- [57] Zhang K, Kimball J S, McDonald K C, et al. Impacts of large-scale oscillations on pan-Arctic terrestrial net primary production. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(21): L21403. DOI: 10.1029/2007GL031605.
- [58] Barbeau C D, Wilton M J, Oelbermann M, et al. Local food production in a subarctic indigenous community: The use of willow (*Salix* spp.) windbreaks to increase the yield of intercropped potatoes (*Solanum tuberosum*) and bush beans (*Phaseolus vulgaris*). *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2018, 16(1): 29-39.
- [59] Bhatti A Z, Farooque A A, Krouglicof N, et al. An overview of climate change induced hydrological variations in Canada for irrigation strategies. *Sustainability*, 2021, 13(9): 4833. DOI: 10.3390/su13094833.
- [60] Albon S D, Irvine R J, Halvorsen O, et al. Contrasting effects of summer and winter warming on body mass explain population dynamics in a food-limited Arctic herbivore. *Global Change Biology*, 2017, 23(4): 1374-1389.
- [61] Vors L S, Boyce M S. Global declines of caribou and reindeer. *Global Change Biology*, 2009, 15(11): 2626-2633.
- [62] Landauer M, Rasmus S, Forbes B C. What drives reindeer management in Finland towards social and ecological tipping points? *Regional Environmental Change*, 2021, 21(2): 32. DOI: 10.1007/s10113-021-01757-3.
- [63] Tommervik H, Johansen B, Riseth J A, et al. Above ground biomass changes in the mountain birch forests and mountain

- heaths of Finnmarksvidda, northern Norway, in the period 1957-2006. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(1): 244-257.
- [64] Rosqvist G C, Inga N, Eriksson P. Impacts of climate warming on reindeer herding require new land-use strategies. *AMBIO*, 2022, 51(5): 1247-1262.
- [65] Hennessy D, Delaby L, van den Pol-van Dasselaar A, et al. Increasing grazing in dairy cow milk production systems in Europe. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2443. DOI: 10.3390/su12062443.
- [66] Dýrmondsson Ó R. Sustainability of sheep and goat production in North European countries—From the Arctic to the Alps. *Small Ruminant Research*, 2006, 62(3): 151-157.
- [67] Biuw M, Jepsen J U, Cohen J, et al. Long-term impacts of contrasting management of large ungulates in the Arctic tundra-forest ecotone: Ecosystem structure and climate feedback. *Ecosystems*, 2014, 17(5): 890-905.
- [68] Verma M, Buchne H S T, Lopes M, et al. Can reindeer husbandry management slow down the shrubification of the Arctic? *Journal of Environmental Management*, 2020, 267: 110636. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110636.
- [69] Uboni A, Horstkotte T, Kaarlejärvi E, et al. Long-term trends and role of climate in the population dynamics of Eurasian reindeer. *PLoS ONE*, 2016, 11(6): e0158359. DOI: 10.1371/journal.pone.0158359.
- [70] Forbes B C, Kumpula T, Meschtyb N, et al. Sea ice, rain-on-snow and tundra reindeer nomadism in Arctic Russia. *Biology Letters*, 2016, 12(11): 20160466. DOI: 10.1098/rsbl.2016.0466.
- [71] Tape K D, Gustine D D, Ruess R W, et al. Range expansion of moose in Arctic Alaska linked to warming and increased shrub habitat. *PLoS ONE*, 2016, 11(7): e0152636. DOI: 10.1371/journal.pone.0152636.
- [72] Rickbeil G J M, Hermosilla T, Coops N C, et al. Changing northern vegetation conditions are influencing barren ground caribou (*Rangifer tarandus groenlandicus*) post-calving movement rates. *Journal of Biogeography*, 2018, 45(3): 702-712.
- [73] Bjerke J W. Ice encapsulation protects rather than disturbs the freezing lichen. *Plant Biology*, 2009, 11(2): 227-235.
- [74] Helle T, Kojola I. Demographics in an alpine reindeer herd: Effects of density and winter weather. *Ecography*, 2008, 31(2): 221-230.
- [75] Tommervik H, Bjerke J W, Gaare E, et al. Rapid recovery of recently overexploited winter grazing pastures for reindeer in northern Norway. *Fungal Ecology*, 2012, 5(1): 3-15.
- [76] Joly K, Duffy P A, Rupp T S. Simulating the effects of climate change on fire regimes in Arctic biomes: implications for caribou and moose habitat. *Ecosphere*, 2012, 3(5): 36. DOI: 10.1890/ES12-00012.1.
- [77] Jenkins E J, Schurer J M, Gesy K M. Old problems on a new playing field: Helminth zoonoses transmitted among dogs, wildlife, and people in a changing northern climate. *Veterinary Parasitology*, 2011, 182(1): 54-69.
- [78] Davidson R K, Mork T, Holmgren K E, et al. Infection with brainworm (*Elaphostrongylus rangiferi*) in reindeer (*Rangifer tarandus* ssp.) in Fennoscandia. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2020, 62(1): 24. DOI: 10.1186/s13028-020-00524-4.
- [79] Miles M W, Miles V V, Esau I. Varying climate response across the tundra, forest-tundra and boreal forest biomes in northern West Siberia. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(7): 075008. DOI: 10.1088/1748-9326/ab2364.
- [80] Phillips C A, Rogers B M, Elder M, et al. Escalating carbon emissions from North American boreal forest wildfires and the climate mitigation potential of fire management. *Science Advances*, 2022, 8(17): eabl7161. DOI: 10.1126/sciadv.abl7161.
- [81] Rogers A, Serbin S P, Way D A. Reducing model uncertainty of climate change impacts on high latitude carbon assimilation. *Global Change Biology*, 2022, 28(4): 1222-1247.
- [82] McDowell N G, Sapes G, Pivovarov A, et al. Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO₂ and vapour pressure deficit. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(5): 294-308.
- [83] Tian H Q, Lu C Q, Ciaia P, et al. The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere. *Nature*, 2016, 531(7593): 225-228.
- [84] Walker W S, Gorelik S R, Cook-Patton S C, et al. The global potential for increased storage of carbon on land. *PNAS*, 2022, 119(23): e2111312119. DOI: 10.1073/pnas.2111312119.
- [85] Zhang Y C, Piao S L, Sun Y, et al. Future reversal of warming-enhanced vegetation productivity in the Northern Hemisphere. *Nature Climate Change*, 2022, 12: 581-586.
- [86] Verdonen M, Berner L T, Forbes B C, et al. Periglacial vegetation dynamics in Arctic Russia: Decadal analysis of tundra regeneration on landslides with time series satellite imagery. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 105020. DOI: 10.1088/1748-9326/abb500.

- [87] Heijmans M M P D, Magnusson R I, Lara M J, et al. Tundra vegetation change and impacts on permafrost. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(1): 68-84.
- [88] Loranty M M, Lieberman-Cribbin W, Berner L T, et al. Spatial variation in vegetation productivity trends, fire disturbance, and soil carbon across Arctic-boreal permafrost ecosystems. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 095008. DOI: 10.1088/1748-9326/11/9/095008.
- [89] Olthof I, Latifovic R. Short-term response of Arctic vegetation NDVI to temperature anomalies. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(21): 4823-4840.
- [90] Andreu-Hayles L, D'Arrigo R, Anchukaitis K J, et al. Varying boreal forest response to Arctic environmental change at the Firth River, Alaska. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 045503. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045503.
- [91] Girardin M P, Guo X J, Gervais D, et al. Cold-season freeze frequency is a pervasive driver of subcontinental forest growth. *PNAS*, 2022, 119(18): e2117464119. DOI: 10.1073/pnas.2117464119.
- [92] Gamm C M, Sullivan P F, Buchwal A, et al. Declining growth of deciduous shrubs in the warming climate of continental western Greenland. *Journal of Ecology*, 2018, 106(2): 640-654.
- [93] Turetsky M R, Kane E S, Harden J W, et al. Recent acceleration of biomass burning and carbon losses in Alaskan forests and peatlands. *Nature Geoscience*, 2011, 4(1): 27-31.
- [94] Prendin A L, Carrer M, Karami M, et al. Immediate and carry-over effects of insect outbreaks on vegetation growth in West Greenland assessed from cells to satellite. *Journal of Biogeography*, 2020, 47(1): 87-100.
- [95] Mäkinen H, Henttonen H M, Kohnle U, et al. Site carrying capacity of Norway spruce and Scots pine stands has increased in Germany and northern Europe. *Forest Ecology and Management*, 2021, 492: 119214. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119214.
- [96] Troell M, Eide A, Isaksen J, et al. Seafood from a changing Arctic. *AMBIO*, 2017, 46(3): 368-386.
- [97] Oystein H, Max T. *Aquaculture in the Arctic: A review*. Tromsø: Nofima AS, 2012.
- [98] FAO. *Fishery and aquaculture statistics*. Rome, 2022.
- [99] Gamperl A K, Zrini Z A, Sandrelli R M. Atlantic salmon (*Salmo salar*) cage-site distribution, behavior, and physiology during a Newfoundland heat wave. *Frontiers in Physiology*, 2021, 12: 719594. DOI: 10.3389/fphys.2021.719594.
- [100] Klinger D, Naylor R. Searching for solutions in aquaculture: Charting a sustainable course. *Annual Review of Environment and Resources*, 2012, 37(1): 247-276.
- [101] Jeuthe H, Brännäs E, Nilsson J. Thermal stress in Arctic charr *Salvelinus alpinus* broodstock: A 28 years case study. *Journal of Fish Biology*, 2015, 86(3): 1139-1152.
- [102] Copeman L A, Laurel B J, Spencer M, et al. Temperature impacts on lipid allocation among juvenile gadid species at the Pacific Arctic-Boreal interface: An experimental laboratory approach. *Marine Ecology Progress Series*, 2017, 566: 183-198.
- [103] Maulu S, Hasimuna O J, Haambiya L H, et al. Climate change effects on aquaculture production: Sustainability implications, mitigation, and adaptations. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5: 609097. DOI: 10.3389/fsufs.2021.609097.
- [104] Chan F T, Stanislawczyk K, Sneekes A C, et al. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 25-38.
- [105] Laurel B J, Spencer M, Iseri P, et al. Temperature-dependent growth and behavior of juvenile Arctic cod (*Boreogadus saida*) and co-occurring North Pacific gadids. *Polar Biology*, 2016, 39(6): 1127-1135.
- [106] Koenker B L, Laurel B J, Copeman L A, et al. Effects of temperature and food availability on the survival and growth of larval Arctic cod (*Boreogadus saida*) and walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*). *ICES Journal of Marine Science*, 2018, 75(7): 2386-2402.
- [107] Andersson A J, MacKenzie F T, Bates N R. Life on the margin: Implications of ocean acidification on Mg-calcite, high latitude and cold-water marine calcifiers. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 373: 265-273.
- [108] Walker A M, Beveridge M C M, Crozier W, et al. Monitoring the incidence of escaped farmed Atlantic salmon, *Salmo salar* L, in rivers and fisheries of the United Kingdom and Ireland: Current progress and recommendations for future programmes. *ICES Journal of Marine Science*, 2006, 63(7): 1201-1210.
- [109] Penney C M, Nash G W, Gamperl A K. Cardiorespiratory responses of seawater-acclimated adult Arctic char (*Salvelinus alpinus*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) to an acute temperature increase. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2014, 71(7): 1096-1105.
- [110] Ashton G V, Freestone A L, Duffy J E, et al. Predator control of marine communities increases with temperature across

- 115 degrees of latitude. *Science*, 2022, 376(6598): 1215-1219.
- [111] Nielsen J L, Pavey S A. Perspectives: Gene expression in fisheries management. *Current Zoology*, 2010, 56(1): 157-174.
- [112] Nicole L Q, Colin R M, Glenn A C, et al. Ribosomal genes and heat shock proteins as putative markers for chronic, sublethal heat stress in Arctic charr: Applications for aquaculture and wild fish. *Physiological Genomics*, 2011, 43(18): 1056-1064.
- [113] Mobley K B, Aykanat T, Czorlich Y, et al. Maturation in Atlantic salmon (*Salmo salar*, Salmonidae): A synthesis of ecological, genetic, and molecular processes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2021, 31(3): 523-571.
- [114] Maitland P S, Winfield I J, McCarthy I D, et al. The status of Arctic charr *Salvelinus alpinus* in Britain and Ireland. *Ecology of Freshwater Fish*, 2007, 16(1): 6-19.
- [115] Vollset K W, Lennox R J, Davidsen J G, et al. Wild salmonids are running the gauntlet of pathogens and climate as fish farms expand northwards. *ICES Journal of Marine Science*, 2021, 78(1): 388-401.
- [116] Koenker B L, Copeman L A, Laurel B J. Impacts of temperature and food availability on the condition of larval Arctic cod (*Boreogadus saida*) and walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*). *ICES Journal of Marine Science*, 2018, 75(7): 2370-2385.
- [117] Pankhurst N W, King H R. Temperature and salmonid reproduction: Implications for aquaculture. *Journal of Fish Biology*, 2010, 76(1): 69-85.
- [118] Fernández-Méndez M, Olsen L M, Kauko H M, et al. Algal hot spots in a changing Arctic ocean: Sea-ice ridges and the snow-ice interface. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5: 75. DOI: 10.3389/fmars.2018.00075.
- [119] Collins C, Bresnan E, Brown L, et al. Impacts of climate change on aquaculture. *MCCIP Science Review 2020*, 2020: 482-520.
- [120] Haigh R, Ianson D, Holt C A, et al. Effects of ocean acidification on temperate coastal marine ecosystems and fisheries in the northeast Pacific. *PLoS ONE*, 2015, 10(2): e0117533. DOI: 10.1371/journal.pone.0117533.
- [121] Troell M, Naylor R L, Metian M, et al. Does aquaculture add resilience to the global food system? *PNAS*, 2014, 111(37): 13257-13263.
- [122] Cao L, Naylor R, Henriksson P, et al. China's aquaculture and the world's wild fisheries. *Science*, 2015, 347(6218): 133-135.
- [123] Samuelsen O B, Nerland A H, Jørgensen T, et al. Viral and bacterial diseases of Atlantic cod *Gadus morhua*, their prophylaxis and treatment: A review. *Diseases of Aquatic Organisms*, 2006, 71(3): 239-254.
- [124] Dastoor A, Angot H, Bieser J, et al. Arctic mercury cycling. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(4): 270-286.
- [125] Cinner J E, Caldwell I R, Thiault L, et al. Potential impacts of climate change on agriculture and fisheries production in 72 tropical coastal communities. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3530. DOI: 10.1038/s41467-022-30991-4.
- [126] Uboni A, Blochel A, Kodnik D, et al. Modelling occurrence and status of mat-forming lichens in boreal forests to assess the past and current quality of reindeer winter pastures. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 99-106.
- [127] Hagen E M, McTammany M E, Webster J R, et al. Shifts in allochthonous input and autochthonous production in streams along an agricultural land-use gradient. *Hydrobiologia*, 2010, 655(1): 61-77.
- [128] Lara M J, Lin D H, Andresen C, et al. Nutrient release from permafrost thaw enhances CH₄ emissions from Arctic tundra wetlands. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2019, 124(6): 1560-1573.
- [129] Pearce F. The forest forecast. *Science*, 2022, 376(6595): 788-791.
- [130] Xu X Y, Riley W J, Koven C D, et al. Observed and simulated sensitivities of spring greenup to pre-season climate in northern temperate and boreal regions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(1): 60-78.
- [131] Chen A, Lantz T C, Hermosilla T, et al. Biophysical controls of increased tundra productivity in the western Canadian Arctic. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 258: 112358. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112358.
- [132] Westergaard-Nielsen A, Bjørnsson A B, Jepsen M R, et al. Greenlandic sheep farming controlled by vegetation response today and at the end of the 21st century. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 672-681.
- [133] Tape K, Sturm M, Racine C. The evidence for shrub expansion in northern Alaska and the pan-Arctic. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 686-702.
- [134] Kruse S, Gerdes A, Kath N J, et al. Dispersal distances and migration rates at the arctic treeline in Siberia: A genetic and simulation-based study. *Biogeosciences*, 2019, 16(6): 1211-1224.
- [135] Wu W J, Sun X H, Epstein H, et al. Spatial heterogeneity of climate variation and vegetation response for Arctic and

- high-elevation regions from 2001-2018. *Environmental Research Communications*, 2020, 2(1): 011007. DOI: 10.1088/2515-7620/ab6369.
- [136] Piao S L, Tan J G, Chen A P, et al. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6911. DOI: 10.1038/ncomms7911.
- [137] Uleberg E, Hanssen-Bauer I, van Oort B, et al. Impact of climate change on agriculture in northern Norway and potential strategies for adaptation. *Climatic Change*, 2014, 122: 27-39.
- [138] Beerling D J, Kantzas E P, Lomas M R, et al. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 2020, 583(7815): 242-248.
- [139] Zeng Z Z, Piao S L, Li L Z X, et al. Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 432-436.
- [140] Xiao Cunde, Su Bo, Dou Tingfeng, et al. Interpretation of IPCC SROCC on polar system changes and their impacts and adaptations. *Climate Change Research*, 2020, 16(2): 153-162. [效存德, 苏勃, 窦挺峰, 等. 极地系统变化及其影响与适应新认识. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2): 153-162.]
- [141] Bourquin M, Busi S B, Fodelianakis S, et al. The microbiome of cryospheric ecosystems. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3087. DOI: 10.1038/s41467-022-30816-4.
- [142] Lu H B, Yuan W P, Chen X Z. A processes-based dynamic root growth model integrated into the ecosystem model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, 11(12): 4614-4628.
- [143] Malinauskaite L, Cook D, Daviosdottir B, et al. Ecosystem services in the Arctic: A thematic review. *Ecosystem Services*, 2019, 36: 100898. DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.100898.
- [144] Virkkala A M, Natali S M, Rogers B M, et al. The ABCflux database: Arctic-boreal CO₂ flux observations and ancillary information aggregated to monthly time steps across terrestrial ecosystems. *Earth System Science Data*, 2022, 14(1): 179-208.
- [145] Li Meng, Yuan Wen, Yuan Wu, et al. Big data analysis on geographical relationship of the Arctic based on news reports. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1090-1104. [李萌, 袁文, 袁武, 等. 基于新闻大数据的北极地区地缘关系研究. *地理学报*, 2021, 76(5): 1090-1104.]
- [146] Klonner C, Marx S, Usón T, et al. Volunteered geographic information in natural hazard analysis: A systematic literature review of current approaches with a focus on preparedness and mitigation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(7): 103. DOI: 10.3390/ijgi5070103.
- [147] Kononov A M, Namsaraev Z B, Baturova G V. Evaluating the global climate change influence on the infrastructure development at the Arctic zone of the Russian Federation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, 200: 012044. DOI: 10.1088/1755-1315/200/1/012044.
- [148] Xiao Cunde, Su Bo, Wang Xiaoming, et al. Cascading risks to the deterioration in cryospheric functions and services. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(19): 1975-1984. [效存德, 苏勃, 王晓明, 等. 冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险. *科学通报*, 2019, 64(19): 1975-1984.]
- [149] van Nes E H, Scheffer M, Brovkin V, et al. Causal feedbacks in climate change. *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 445-448.
- [150] Sun Y, Hu G K, Zhang Y W, et al. Eigen microstates and their evolutions in complex systems. *Communications in Theoretical Physics*, 2021, 73(6): 065603. DOI: 10.1088/1572-9494/abf127.
- [151] Chen X, Ying N, Chen D, et al. Eigen microstates and their evolution of global ozone at different geopotential heights. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2021, 31(7): 071102. DOI: 10.1063/5.0058599.
- [152] Rumpf S B, Gravey M, Brönnimann O, et al. From white to green: Snow cover loss and increased vegetation productivity in the European Alps. *Science*, 2022, 376(6597): 1119-1122.
- [153] Leifeld J, Wüst-Galley C, Page S. Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 945-947.
- [154] Mackie E. Tipping points in the earth system. *COP26 Universities Network Climate Risk Note*, 2021. DOI: 10.33774/coe-2021-fvll2.
- [155] Gong Daoyi, Wang Shaowu, Zhu Jinhong. Arctic Oscillation influence on daily temperature variance in winter over China. *Chinese Science Bulletin*, 2004(5): 487-492. [龚道溢, 王绍武, 朱锦红. 北极涛动对我国冬季日气温方差的显著影响. *科学通报*, 2004(5): 487-492.]
- [156] Li Muyuan, Luo Dehai. Winter Arctic warming and its linkage with midlatitude atmospheric circulation and associated cold extremes: The key role of the meridional potential vorticity gradient. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 49(9):

1335-1345. [李牧原, 罗德海. 冬季北极增暖与中纬度环流和极寒天气之间的联系: 经向位涡梯度的关键作用. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(9): 1335-1345.]

[157] Du Y, Zhang J, Zhao S, et al. A mechanism of spring Barents Sea ice effect on the extreme summer droughts in northeastern China. *Climate Dynamics*, 2022, 58(3/4): 1033-1048.

The impact of Arctic climatic and terrestrial environmental changes on primary industry: A review

ZHAO Cenliang^{1,2}, ZHU Wenquan^{1,2}, GUO Hongxiang^{1,2}, CHEN Liyuan^{1,2}, XIE Zhiying³

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The Arctic is undergoing unprecedented climatic and terrestrial environmental changes. The Arctic primary industry has experienced a wide and significant effect from these shifting environmental factors, such as rising temperatures, greening vegetation, thawing permafrost, and frequent wildfires. It is essential to integrate the knowledge of impacts caused by climatic and terrestrial environmental changes on Arctic primary production in order to support the sustainable development of primary industry and inform the formulation of industrial policies. The four main sectors of primary industry (cultivation, livestock husbandry, forestry, fishery and aquaculture) were discussed in this work. This study synthesized the types and extent of the impacts caused by climatic and terrestrial environmental changes on each sector, and provided a summary and outlook from five aspects with a cross-sector perspective: (1) the specific ways of climate changes affecting primary production; (2) the challenges of integrating knowledge from local researches; (3) the enactment and implementation of adaptation strategies; (4) the demand for integration and innovation in data and methods; and (5) the inspiration of the climate change-induced alteration in Arctic primary industry for China. This study concluded the priorities of researching the impact of climate changes on Arctic primary industry, and the results would be capable to aid China's participation in the sustainable development of Arctic primary producing activities.

Keywords: Arctic; climate change; terrestrial environmental change; primary industry