

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.12.001

潘志华,黄娜,郑大玮.气候变化影响链的形成机制及其应对[J].中国农业气象,2021,42(12):985-997

气候变化影响链的形成机制及其应对*

潘志华, 黄 娜, 郑大玮

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 目前气候变化的影响研究多集中在直接影响, 间接影响考虑较少。对气候变化影响传递认识的不全面是应对气候变化的盲点之一, 探讨气候变化影响链的形成机制对应对气候变化具有重要意义。本研究基于对气候变化影响特征的分析, 探讨气候变化影响链的形成机制, 界定了气候变化影响链的内涵, 明确了气候变化的影响层级, 并提出气候变化影响链的应对途径。研究表明, 气候变化影响具有广泛性、差异性、持续性、突发性、传递性及可转化性等特征。气候变化及其带来的各种胁迫与干扰作用于受体系统之后, 受体系统与其它系统联系, 把这种胁迫与干扰传递到其它系统, 导致气候变化的影响在时间上和空间上不断延伸, 形成复杂的气候变化影响链。气候变化作用于直接受体后, 其影响在生态系统中会沿着食物链传递, 在经济系统中沿着产业链传递, 在社会系统中沿着社会关系链传递; 影响链的传递以物质流、能量流、信息流的形式进行。气候变化的影响总是从低层级到高层级, 沿着资源禀赋的变化上升到自然生产系统、经济生产系统直至社会系统。研究认为, 有效阻隔或切断气候变化不利影响的传递, 能够有效降低气候变化影响的风险与损失。气候变化影响链及其形成机制为全面应对气候变化提供了思路与途径。

关键词: 气候变化影响链; 形成机制; 内涵; 分类; 影响层级; 气候变化应对

Mechanism on the Formation of Climate Change Impact Chain and Its Responses

PAN Zhi-hua, HUANG Na, ZHENG Da-wei

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Once climate change brings various stresses and disturbances on the receptor system, the receptor system will transfer these stresses and disturbances to other systems through its connection with them, resulting in the continuous extension of climate change effects in time and space, forming a complex climate change impact chain. At present, studies on the impacts of climate change mostly focus on the direct impacts, while the indirect impacts are rarely considered. The incomplete understanding of the impact transmission of climate change is one of the main constraints in addressing climate change. It is of great significance to explore the formation mechanism of the impact chain of climate change. This research analyzed the characteristics of climate change impacts, explored the formation mechanism of climate change impact chains, defined the connotation and classification of climate change impact chains, clarified the impact levels of climate change, and proposed ways to cope with climate change impact chains. The results showed that the impacts of climate change were extensive, different, persistent, transferable, transformable, and sometime sudden. When climate change acted on the direct receptors, the impacts of climate change would be transmitted along the food chain in the ecosystem, along the industrial chain in the economic

* 收稿日期: 2021-03-31

基金项目: 国家重点研发计划项目“京津冀地区适应增暖路径及社会经济代价综合评估研究”(2018YFD0606303);
“黄淮海北部小麦-玉米重要灾害绿色防控与减灾关键技术研究”(2017YFD0300906)

第一作者联系方式: 潘志华, 教授, 研究方向为气候变化影响与适应、旱地农业可持续发展, E-mail: panzhihua@cau.edu.cn

system, and along the social relationship chain in the social system. The transmission of impact chain took the form of material flow, energy flow and information flow. The impacts of climate change always rose from low to high levels, along changes in resource endowments to natural production, economic production systems and social systems. It is believed that the effective control or cutting off of the transmission of adverse impacts of climate change can effectively reduce the impact risks and losses of climate change. The impact chain of climate change and its formation mechanism provide ideas and approaches for people to deal with climate change comprehensively.

Key words: Climate change impact chain; Formation mechanism; Connotation; Classification; Impact hierarchy; Climate change response

气候变暖是不争的事实,气候变化对全球自然生态和社会经济产生了重大影响,并将对未来人类社会可持续发展构成严重威胁,积极应对气候变化已成为人类社会当前面临的重大任务^[1-3]。应对气候变化的首要问题是弄清楚气候变化产生了什么影响,产生了多大影响。近几十年来,特别是IPCC第一次评估报告发布以来,科学家们围绕气候变化及其影响开展了大量研究^[4-17],研究范围非常广泛,从自然到社会经济领域;研究方法有定性的,也有定量的;研究结果表明,气候变化的影响有有利的,也有不利的^[18-20]。所有这些研究对认识气候变化影响规律、采取应对气候变化措施起到了重要作用。然而,气候变化的影响非常复杂。一方面其影响非常广泛,几乎所有的自然经济社会系统都暴露于气候环境中,气候发生变化必然对这些系统产生直接影响^[1, 3];另一方面影响具有间接性,受影响对象不是孤立单一的,不同的受影响对象总是相互关联,使得影响逐步传递^[3, 21]。如气候变化对农业生产产生影响后,将进一步影响到粮食的供应与运输、加工与营养等,进而影响人类生活与健康。随着气候变化影响在空间和时间上的传递,影响程度也将发生变化。目前,评估气候变化影响时主要考虑其直接影响,通过分析受体的敏感性、暴露度以及脆弱性来实现^[22-28]。在国外已有研究关注气候变化的间接影响,以及气候变化影响在不同系统内的蔓延和传递效应等方面^[29-32],IPCC报告中也已有关于气候变化间接影响的表述,如关于级联的概念。但目前对于气候变化间接影响的研究还非常少,间接影响的界定非常模糊。

当今气候变化在加剧,其影响的范围从自然系统上升到了人类系统,影响的程度也在加深。深入了解气候变化对自然生态和社会经济的影响程度和大小,能够帮助决策者更好地应对和管理气候变化风险。加强气候变化间接影响研究是深入研究气候

变化影响并主动应对气候变化影响的迫切需要。中国对气候变化非常敏感,受气候变化影响程度更加剧烈,深入了解气候变化影响对应气候变化更为迫切。本文拟基于对气候变化影响特征的分析,研究气候变化影响链的形成机制,探讨气候变化影响链的内涵和气候变化影响的层级,提出气候变化影响链的应对途径,以期对深入认识气候变化影响规律起到积极作用,为制定更全面的气候变化应对策略提供科学的理论支撑。

1 气候变化的影响对象与影响特征

1.1 影响对象

在灾害学领域,灾害作用的对象为承灾体^[33-34]。气候变化影响与灾害的影响不同,气候变化影响有负面效应也有正面效应。考虑到气候变化影响的特征,把气候变化的影响对象称之为“受体”。气候变化对几乎所有暴露于其中的系统均会产生影响,气候变化影响的受体十分广泛,涉及自然、经济和人类社会等系统。

1.2 影响特征

(1) 广泛性。大气圈存在于地球表层,与岩石圈、水圈、生物圈相互作用、相互影响。气候的普遍存在性决定了其影响的广泛性,气候的变化将广泛影响到各个圈层。气候变暖使全球海平面上升,海温及洋流异常。温度升高会增强大气的水分保持能力,加剧水文循环^[35],这就会导致降水极端事件的增加。气候变化(如海洋酸化和大气二氧化碳浓度的增加)会破坏生物与其当地环境之间的匹配,对某些生物有利,但会造成一些物种的灭绝^[36-37]。全球变暖和极端气候事件的频繁出现,降低了人体舒适度的同时也增加了某些疾病的发病率^[38]。

(2) 差异性。不同区域的气候变化特征不同。如,近几十年来,中国北部地区气候呈现暖干化特征,而南部地区呈现暖湿化特征^[39]。同样的气候变

化特征对于不同受体的影响不同，如高寒地区普遍受益于气候变暖，而气候变暖对炎热地区则多为不利影响。

(3) 持续性。人类活动的持续影响，使气候呈现趋势性的变化，这种趋势虽然较为缓慢，但一直在持续，如近百年来，全球温度升高 0.85°C ，表现为缓慢的升高趋势^[3]。自气候变化发生以来，缓慢的升温趋势已经对自然生态、社会经济产生了不同程度的持续影响，而且这种影响仍在持续。

(4) 突发性。当前，随着气候变暖加剧，极端天气气候事件发生频率增加，强度加强，相应也造成某些影响的突发性增强。即使是趋势性的气候演变，也存在发生气候突变的可能性，20 世纪 90 年代初，全球气温变化趋势已经发生了突变^[3]。另外，随着极端热浪频率和严重性增加，21 世纪初陆地和海洋生态系统中的动物以及人类的死亡率上升^[40]。

(5) 传递性。气候变化影响的受体并不是孤立单一的，不同受体之间总是相互关联，使得气候变化影响逐步传递。气候变化的影响可通过物质循环、能量转化和信息传输等方式传递。在社会经济领域，气候变化影响先通过产业链传递，再通过信息链传递，影响产品的流通与消费。如由于极端干旱和高温使得全球大麦产量急剧下降，给啤酒生产带来影响，啤酒产量减少，进而导致啤酒价格上涨，消费减少^[41]。

(6) 可转化性。目前气候变化的影响总体以负面为主，主要是由于在气候变化背景下，自然生态系统和社会经济系统与变化了的气候环境不相适应，导致系统的功能下降甚至结构破坏。如能通过对受体系统的结构与功能进行调整，使之与变化了的气候环境及其它相关环境条件相适应，就有可能使气候变化影响的有利因素超过不利因素，甚至形成某些新的发展机遇。当然，这种转化是有条件的，是在人类力所能及和适应成本能被承受的前提下。如针对气候变化对农业生产的影响，考虑 CO_2 的施肥作用能明显消除升温对作物产量的负面作用^[42]，通过品种选育、调整播期以及其它适应措施，均能有效消除气候变化的不利影响^[43-45]。

2 气候变化对自然生态和社会系统的影响机制与影响链的形成

2.1 影响机制

地球系统可分为自然系统和人类系统两大类。

自然和人类系统之间相互联系、相互影响，其中一个系统成分的变化可能会引起本系统及另一个系统内其它成分的变化。特别地，当气候发生变化后，暴露在气候环境中的事物将会受到直接影响，这些事物称之为直接受体。直接受体受到影响后，会影响到以它为资源或环境的事物，即间接受体。

气候变化首先意味着气候资源禀赋（数量和质量）发生变化，这将导致环境条件与生态关系发生变化，这会直接影响：(1) 对气候资源敏感的产业部门，如自然系统的生产；(2) 对气候环境敏感的产业部门，如社会经济系统的建筑业、电力、人体健康等。

对气候资源敏感的产业部门及对气候环境敏感的产业部门受到影响后，会进一步波及以这些部门的产品为原料的其它产业部门。如，受气候变化的影响，自然生产的产品会受到影响，这会进一步影响产品加工业，然后进一步影响到产品的流通与消费。从这个角度看，自然生产受到气候变化影响后，会进一步影响到经济生产、社会生产，最终影响社会稳定与人类福祉。为此，从产品的层级角度看，气候变化对社会经济系统具有间接影响作用。当然，经济生产、社会生产也在气候环境中进行，气候变化也会直接对社会经济生产过程的人和物直接产生影响。

2.2 影响链的形成

2.2.1 影响链

分析影响机制可以发现，气候变化作用于直接受体后，在生态系统中会沿着食物链继续传递，在经济系统中则会沿着产业链传递，在社会系统中主要是沿着社会关系链传递（图 1）。

影响链的传递有的是以物质流的形式，有的以能量流的形式，有的以信息流的形式。在自然系统中，气候变化影响主要通过物质循环与能量转化的方式，尤其是通过生物地球化学循环不断传递，食物链是一种常见的物质循环与能量流动链。在经济系统中，物质、能量流通常表现为商品—货币流。在社会形态中，社会关系链以信息流的方式传递。由此可知，气候变化影响具有传递效应。伴随着气候变化影响的传递，形成了气候变化影响链。

图 1 中的影响链是对气候变化对自然系统到人类社会经济系统影响的总结和简化。由图可见，由

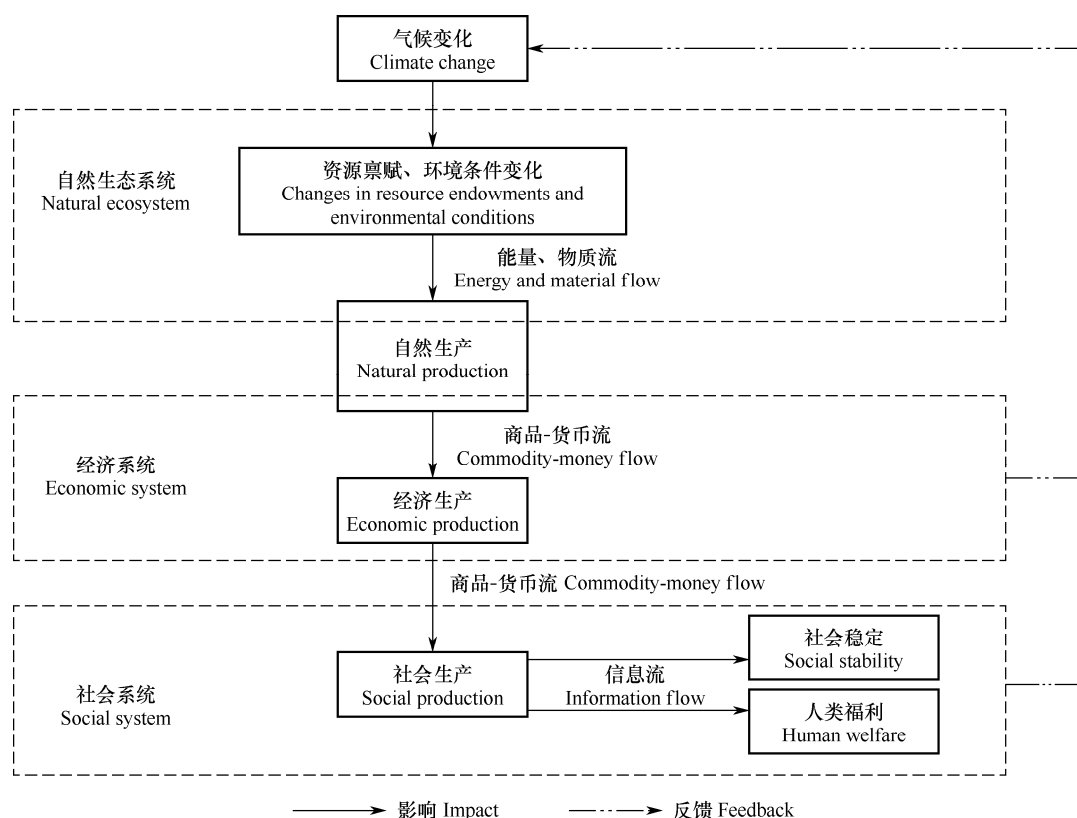


图 1 气候变化对自然生态、社会经济系统的影响链

Fig. 1 The impact chain of climate change on natural ecology and social economic system

于气候变化影响的传递性，气候变化首先对自然生态系统的资源、环境及自然生产产生影响，然后进一步影响到经济系统的经济生产，并最终影响人类社会系统。可以发现，气候变化影响在传递过程中，层次从低到高，首先通过自然系统表现出来，随后进入社会经济系统，对社会经济系统不同领域产生程度各异的影响。但实际影响链的构成非常复杂。某种气候变化趋势会产生多种影响，形成若干影响支链；环境条件变化的影响、各个受影响系统及系统的组成部分之间又会相互影响，使各支链之间也出现交叉，从而形成更加复杂的影响链网。

2.2.2 典型影响链

气候变暖后，环境条件将发生变化，对产业部门产生影响。以全球变暖带来的海平面升高为例（图 2），海平面升高后将会带来一系列影响。在受影响的每个领域或产业部门内部还会发生一系列的影响传递，如航运安全受到影响后，又会影响到商品或旅客输出地和目的地的经济与社会，再沿着商品链和社会关系链进一步传递。

多个影响因素可以产生协同影响，如华北暖干

化对农业的影响（图 3）。气候暖干化对于华北地区有利有弊，但总体上不利因素较多，最大的不利因素是造成水资源短缺。

以常见的食物链为例（图 4），气候变化将直接影响到植物生长，间接影响到动物生长及人类食品供应，食品供应状况直接影响着人类生活质量，进而影响人类福祉。图 4 中以食物链为传递方式的气候变化影响链中，还可以具体细分为种植业和养殖业的影响链，其中对种植业的影响更为显著且影响更具多样性。

经济社会系统非常庞大，除了直接受到气候变化影响外，也受到气候变化的间接影响。以气候变暖对电力部门的影响为例（图 5），气候变暖后，电力生产、电力输送、电力消费都将发生相应的变化，也会进一步影响到人类生产与生活消费。

值得注意的是，在传递的过程中，由于直接受体与间接受体之间的相互作用，会产生一系列正反馈或负反馈。正反馈机制起到放大作用，或使不利影响雪上加霜，或对有利影响锦上添花；负反馈起到遏制作用，或使得负面影响得到抑制，或使得正面影响受到限制。

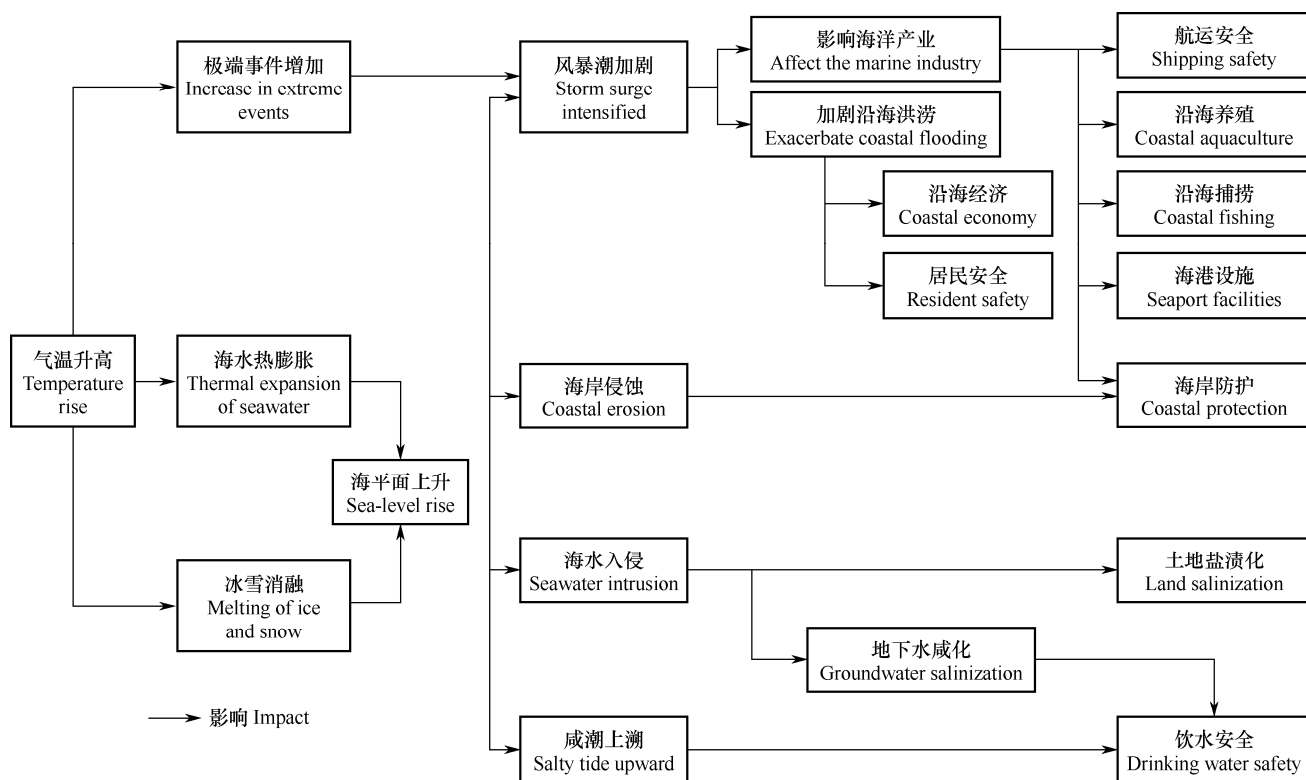


图 2 气温升高导致海平面上升的影响链

Fig. 2 The impact chain of sea-level rise led by temperature rise

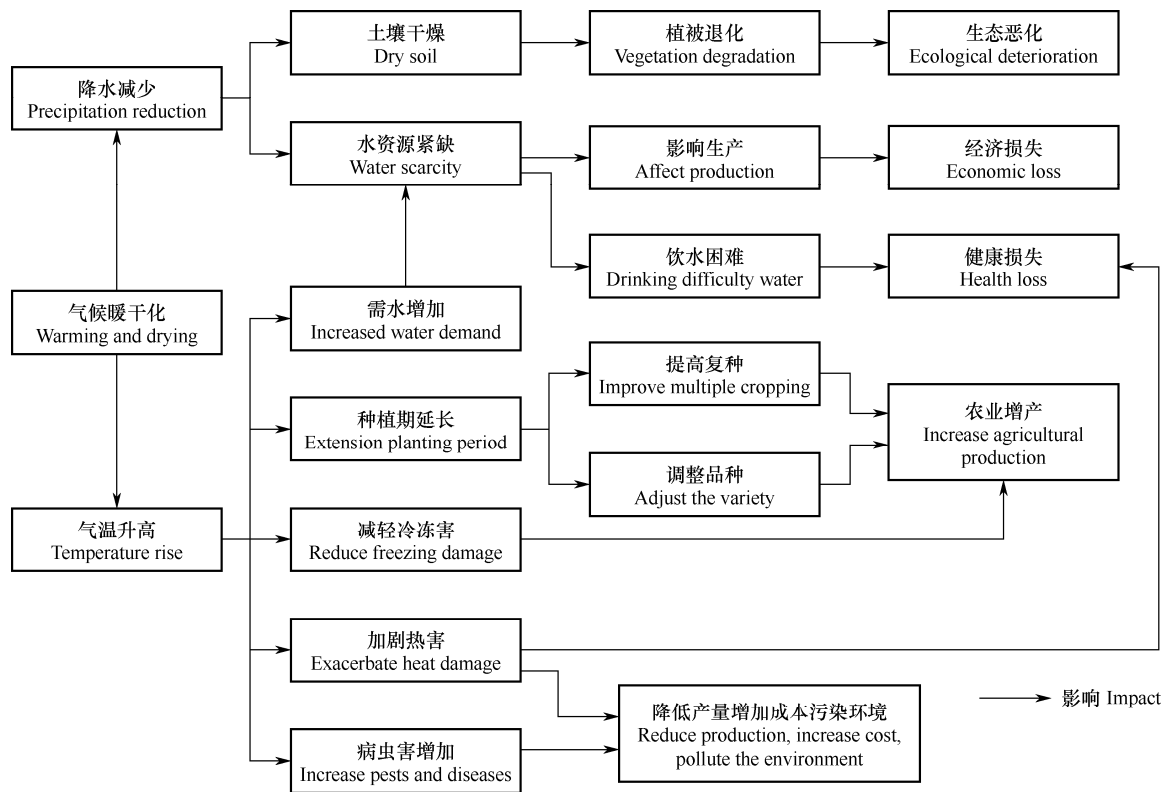


图 3 华北气候暖干化的影响链

Fig. 3 The impact chain of climate warming and drying in North China

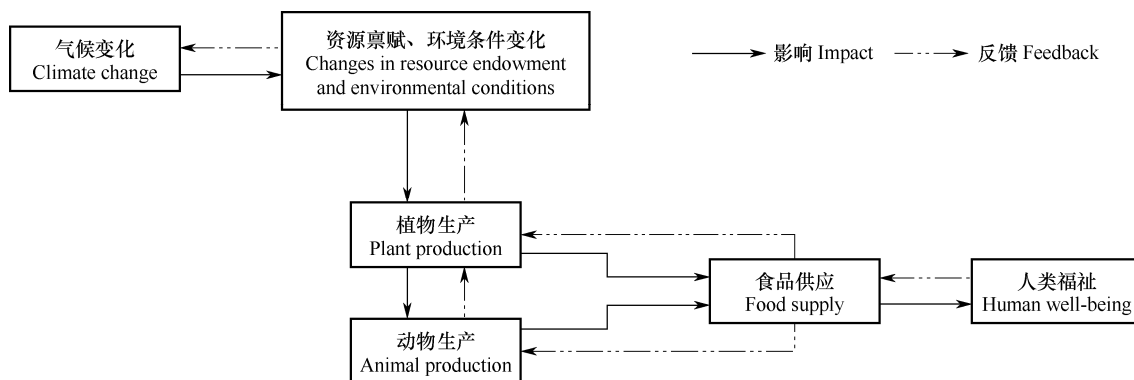


图 4 以食物链传递的气候变化影响链

Fig. 4 The impact chain of climate change through the food chain

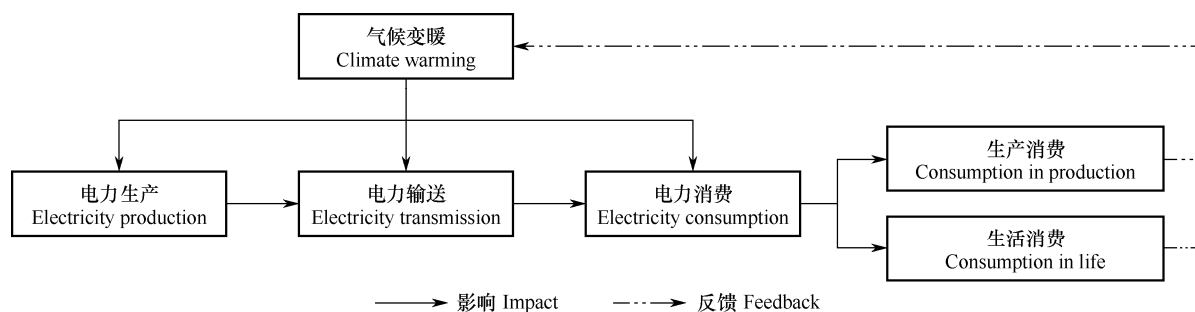


图 5 气候变化对电力部门的影响链

Fig. 5 The impact chain of climate change on the power sector

3 气候变化影响链的内涵与分类

3.1 内涵

气候变化影响链的概念源于对灾害链概念的扩展。灾害链的概念最早由地震学家郭增建等提出^[33]。郑大玮将这一概念加以引申和扩展,指出灾害链是孕灾环境中致灾因子与承灾体相互作用,诱发或酿成原生灾害及其同源灾害,并相继引发一系列次生或衍生灾害,以及灾害后果在时间和空间上链式传递的过程^[34]。灾害链理论的提出有助于深入了解灾害的演变规律和灾害损失的放大过程,为采取断链减灾措施提供了科学依据。

基于上述对气候变化影响特征和影响机制的讨论,气候变化对于受体系统的影响同样存在着受体之间的相互作用,存在时间和空间上的链式传递过程。为此,气候变化影响链可以定义为,气候变化及其带来的各种胁迫和干扰作用于受体系统之后,受体系统通过与其它系统的联系,把这种胁迫与干扰传递到其它系统,导致气候变化的影响在时间和空间上不断延伸,形成复杂的链式传递效应。由于气候变化的影响有利有弊,不能简单地与灾害链等同,但无论气候变化的正面影响和负面影响都同

样存在链式传递的现象,即存在气候变化影响链。

3.2 分类

基于气候变化影响链的内涵,在研究气候变化影响及其传递时,首先要以哪个系统受气候变化直接影响为出发点,即明确气候变化影响链的起点即直接受体。根据气候变化的主体与客体,可以对气候变化影响链进行多种分类。

(1) 气候要素主要包括温度、降水、光照、风速、水汽压等,气候变化主要表现为某一个或多个气候要素的趋势变化。据此,根据气候因子可分为温度变化影响链、降水变化影响链、光照变化影响链、风速变化影响链等。根据气候要素的不同变化,又可将气候变化影响链进行细分,如:温度变化影响链可分为温度升高影响链和温度降低影响链;降水变化影响链可分为降水增加影响链和降水减少影响链;光照变化影响链可分为光照增加影响链和光照减少影响链。

(2) 极端事件发生频率增加是当前气候变化的一大特点,可根据极端气候事件(灾害)发生分类。通常极端事件的发生也意味着灾害的出现,因此根据极端气候事件发生分类时可参考灾害链的分类方

法进行。

(3) 根据气候变化的受体可分为气候变化农业影响链、气候变化工业影响链、气候变化服务业影响链；或分为气候变化城市影响链、气候变化农村影响链、气候变化海岸带影响链等。

(4) 根据气候变化影响的效果可分为正影响链、负影响链。但一种气候变化趋势对某个区域或产业影响的利和弊通常是同时存在的，且有利影响链与不利影响链交织在一起。

(5) 根据气候变化影响传递的形式可分为物质流传递影响链、能量流传递影响链、经济流传递影响链、信息流传递影响链。

4 气候变化的影响层级

4.1 第一个层次：原生影响，直接影响

气候发生变化，即气候要素发生变化，如温度的升降、降水的增减、太阳辐射的变化等，这就意味着气候资源数量或质量与环境条件的变化。气候变化将引起某些气候因素的增加或减少，改变自然灾害的发生频率与强度，改变气候资源承载力与大气环境容量，如增温导致高温天气容易发生，风速减弱不利于城市大气污染物扩散稀释。气候变化也将导致自然生态或人类社会对资源需求发生变化，改变气候资源的供需平衡关系，引起更高层级的变化。

4.2 第二个层次：次生一级影响

气候变化后，基于气候资源发展的生产系统将直接受到影响。如，气候变化将直接引起农业、林业、渔业等生产系统的生产能力、生产水平、生产结构发生变化。以气候变化对农业生产的影响为例，气候变化意味着气候条件的变化，农作物的生长发育、产量形成及适宜种植区范围、耕作制度等将受到直接影响^[46-48]。另一方面，气候变化将通过改变运行的边界条件对生产系统产生间接影响，人类需要适当增加或减少有关投入维持系统的正常运转。例如，气候变暖后，高寒地区的道路建设需要考虑冻土融化问题^[49]；海平面上升对沿海地区的生产、生活构成威胁，需要加强沿海防护堤的建设^[50]。气候变化的间接影响也包括气候变化引起的产业结构的调整，如近年来黑龙江水稻种植面积的增加、新疆地区棉花种植面积的增加^[51-52]等。

4.3 第三个层次：次生二级影响

生产能力的改变，必将影响到业已存在的社会供给与消费需求平衡，对经济发展产生影响。当一个地区社会供给不足时，该地区就想办法采取一定的技术投入与政策措施提高生产能力；如果该地区生产能力不能满足消费，就会想办法进行地区间贸易，进而使得地区间的市场价格发生变化，最终社会供给和消费需求间将建立起新的平衡关系。

4.4 第四个层次：次生三级影响

社会供给、消费需求平衡被打破，将进一步影响到人类健康和社会稳定。如果气候变化幅度大，发生较大的自然灾害，将会影响灾害发生地区的保暖安康，情况严重时将导致社会动荡。中外历史上，因气候变化导致经济衰退、引起社会变革的事例不胜枚举，如西汉末年发生的绿林赤眉起义、唐末发生的黄巢起义、元末发生的红巾军起义、明末发生的李自成与张献忠起义等，这些大规模起义都与大灾大饥事件联系在一起，与气候变化影响直接相关^[53-54]。

在影响传递过程中，人类会采取一定的应对措施，减轻这种影响。然而当影响程度超出某一层次所能承受的范围或应对能力时，这种影响就会往上传递到更高的层次。气候变化的幅度越大，其影响的层次就会越高。值得注意的是，气候变化影响程度和应对能力与社会经济发展水平有着直接联系。社会经济发展水平越高，气候变化的应对能力就越强，气候变化的影响程度就有可能受到控制。但相应地，一旦气候变化超过应对范围，所造成的影响也会更大。

5 自然、经济社会系统对气候变化影响链的应对

5.1 应对策略

尽可能减少气候变化的不利影响，增强有利影响是气候变化应对的最终目的。减缓和适应是当前全球应对气候变化及其影响的两大主题。图 6 展示了从减缓和适应两个角度出发，受体系统应对气候变化的基本决策方向。减缓气候变化是应对气候变化的长久和最终目标，可以从减排和增汇两个方面入手。而适应则是应对短期气候变化更迫切的任务，可以考虑增量适应和转型适应^[55-56]。

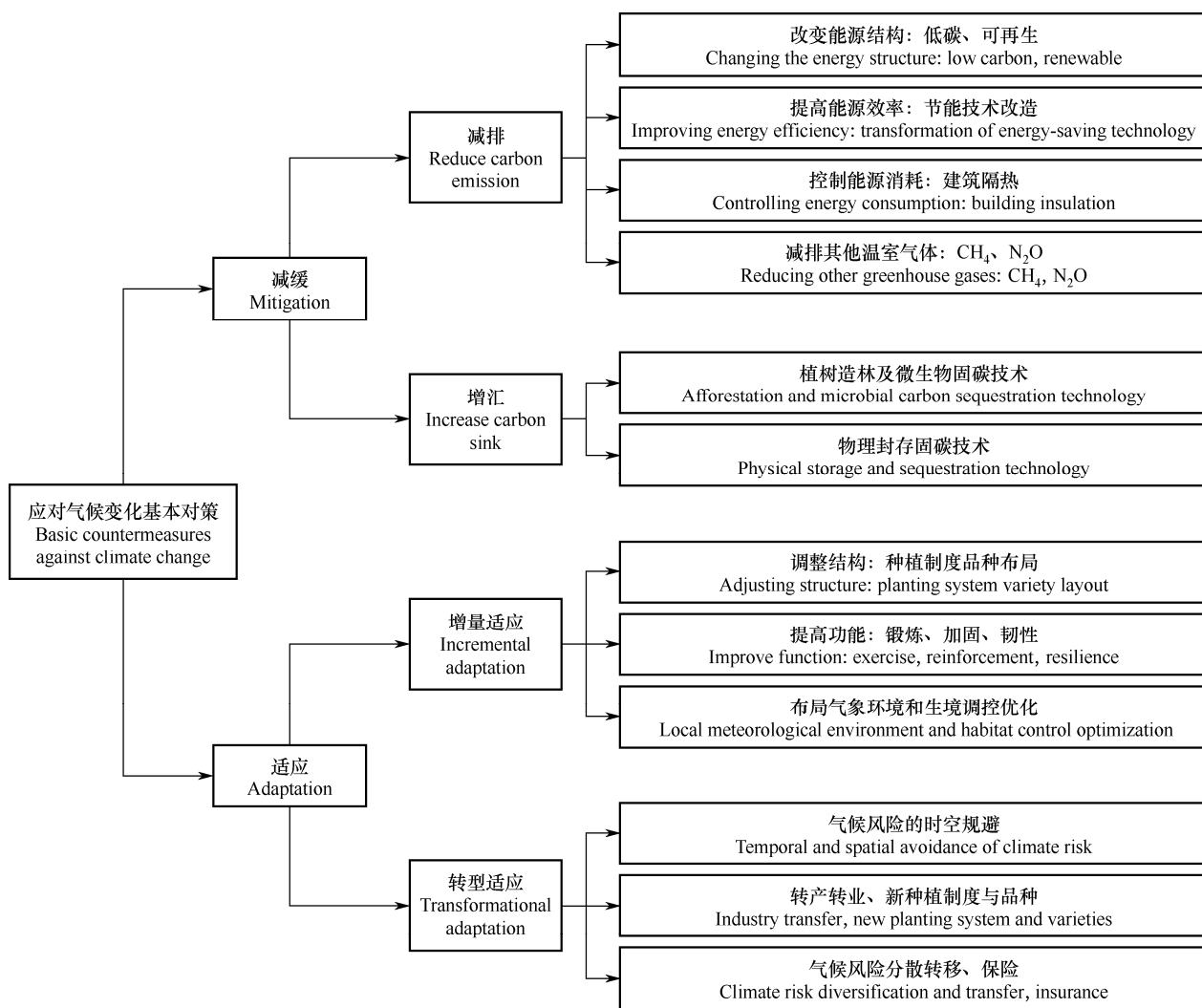


图 6 受体系统应对气候变化的基本策略

Fig. 6 The basic countermeasures for the receptor system to cope with climate change

5.2 应对途径

气候变化影响的受体系统有不同层级，层级之间互相作用，形成了复杂的气候变化影响链。应对气候变化影响的关键是搞清楚气候变化影响因素与受体之间的相互关系、作用方式及传递过程。基于对气候变化影响链的科学分析，能够及时阻控甚至切断气候变化不利影响的传递，降低气候变化的影响风险与损失，更高效地应对气候变化。

自然系统是气候变化影响的第一层次，最先受到其影响。自然系统本身具有一定的弹性，即自然系统对一定范围内的气候波动有自适应能力。但面对较大程度气候变化影响时，需要借助

人为辅助应对措施（图 7）。一方面，自然生态系统本身对气候变化做出趋利避害的调整外，还需要人为减排来降低气候变化程度，从源头减缓气候变化影响。另一方面，人为辅助措施也能增加自然系统应对气候变化的能力，更好地服务经济社会系统的发展。

与自然系统显著不同的是，人类经济社会系统是建立在人为控制的、大量的物质和能量输入与输出基础之上的人工系统，其平衡机制与自然生态系统有明显的差别。人类可以采取政策与技术手段，通过增加物质和能量的输入与输出进行调控（图 7），从而实现有效应对气候变化的目的。

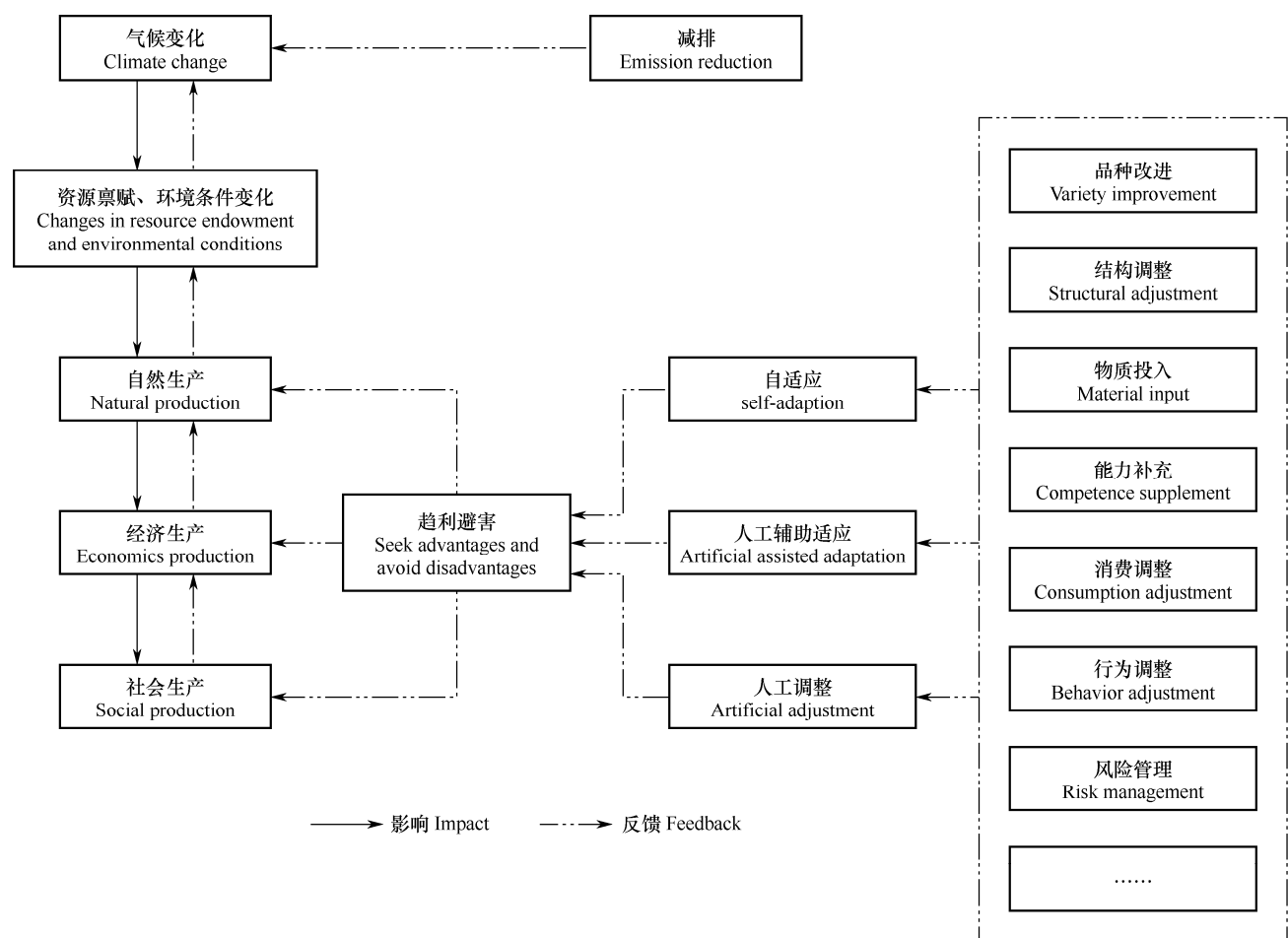


图 7 自然及经济社会系统应对气候变化影响链的途径

Fig. 7 Response ways of natural and socio-economic systems to the impact chain of climate change

6 展望

气候变化已经发生，且会继续加强，应对气候变化是人类社会面临的紧迫任务。气候变化意味着资源、环境条件的变化，将会影响自然与社会之间本来存在的平衡关系，产生有利或不利的影 响。气候变化的影响非常复杂，间接影响更为复杂。要科学评估气候变化影响，不但要评估气候变化的直接影响，还要考虑其间接影响与传递效应。气候变化影响链的提出为人类全面应对气候变化提供了思路与途径。

人类需要科学认识气候变化及其影响，采取可能的措施把气候变化及其不利影响控制在一定范围内，同时在可接受的变化幅度内采取可能的措施趋利避害。一方面，要科学认识和把握气候变化影响链，在生产、流通、消费等各个领域采取一系列的应对措施，形成气候变化应对链，有效控制气候变

化的影响。另一方面，合理利用气候变化影响的正负反馈机制调控气候变化影响。在有利影响链中的关键环节采取促进正反馈和遏制负反馈的措施，或在不利影响链的关键环节采取促进负反馈和抑制正反馈的措施，都可以取得显著的适应效果。

参考文献 References

[1] IPCC. Climate change 2007: impacts, adaptation, and vulnerability[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007:1-976.

[2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[3] IPCC. Climate change 2014: impact, adaptation, and vulnerability[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[4] 《国家气候变化评估报告》编写委员会.国家气候变化评

- 估报告[R].北京:科学出版社,2007.
- Committee of “China’s National Assessment Report on Climate Change”. China’s national assessment report on climate change[R]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [5] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会.第二次国家气候变化评估报告[R].北京:科学出版社,2011.
- Committee of “The second China’s National Assessment Report on Climate Change”. The second China’s national assessment report on climate change[R]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [6] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会.第三次国家气候变化评估报告[R].北京:科学出版社,2015.
- Committee of “The third China’s National Assessment Report on Climate Change”. The third China’s national assessment report on climate change[R]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [7] 姜彤,李修仓,巢清尘,等.《气候变化 2014:影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知[J].气候变化研究进展,2014,10(3):157-166.
- Jiang T, Li X C, Chao Q C, et al. Highlights and understanding of climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 10(3):157-166. (in Chinese)
- [8] 潘志华,郑大玮.气候变化科学导论[M].北京:气象出版社,2015:180-207.
- Pan Z H, Zheng D W. Introduction to climate change science [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015: 180-207. (in Chinese)
- [9] 郑大玮,潘志华,潘学标,等.气候变化适应 200 问[M].北京:气象出版社,2016:20-59.
- Zheng D W, Pan Z H, Pan X B, et al. 200 questions of adaptation to climate change [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016:20-59. (in Chinese)
- [10] 郭建平.气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J].应用气象学报,2015,26(1):1-11.
- Guo J P. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1):1-11. (in Chinese)
- [11] 周广胜.气候变化对中国农业生产影响研究展望[J].气象与环境科学,2015,38(1):80-94
- Zhou G S. Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2015, 38(1):80-94. (in Chinese)
- [12] 杨建明.全球气候变化对旅游业发展影响研究综述[J].地理科学进展,2010,29(8):997-1004.
- Yang J M. A review of the researches on the impacts of global climate change on tourism [J]. Progress in Geography, 2010, 29(8):997-1004. (in Chinese)
- [13] 巢清尘,刘昌义,袁佳双.气候变化影响和适应认知的演进及对气候政策的影响[J].气候变化研究进展,2014,10(3):167-174.
- Chao Q C, Liu C Y, Yuan J S. The evolvement of impact and adaptation on climate change and their implications on climate policies[J]. Climate Change Research, 2014, 10(3): 167-174. (in Chinese)
- [14] 谢立勇,李悦,徐玉秀,等.气候变化对农业生产与粮食安全影响的新认知[J].气候变化研究进展,2014,10(4):235-239.
- Xie L Y, Li Y, Xu Y X, et al. Updated understanding on the impacts of climate change on food production and food security[J]. Climate Change Research, 2014, 10(4): 235-239. (in Chinese)
- [15] 方建,杜鹃,徐伟,等.气候变化对洪水灾害影响研究进展[J].地球科学进展,2014,29(9):1085-1093.
- Fang J, Du J, Xu W, et al. Advances in the study of climate change impacts on flood disaster[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(9):1085-1093. (in Chinese)
- [16] 许迪,李益农,龚时宏,等.气候变化对农业水管理的影响及应对策略研究[J].农业工程学报,2019,35(14):79-89.
- Xu D, Li Y N, Gong S H, et al. Impacts of climate change on agricultural water management and its coping strategies[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14):79-89. (in Chinese)
- [17] 韩会庆,张娇艳,马庚,等.气候变化对生态系统服务影响的研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(2):184-190.
- Han H Q, Zhang J Y, Ma G, et al. Advances on impact of climate change on ecosystem services [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 42(2):184-190. (in Chinese)
- [18] 蔡运龙.全球气候变化下中国农业的脆弱性与应对策略[J].地理学报,1996,63(3):202-210.
- Cai Y L. Sensitivity and adaptation of Chinese agriculture

- under global climate change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(3):202-212.(in Chinese)
- [19] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311):43-51.
- [20] Asseng S, Ewert F, Martre P, et al. Rising temperatures reduce global wheat production [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(2):143-147.
- [21] Lawrence J, Blackett P, Craddock-Henry N. Cascading climate change impacts and implications [J]. *Climate Risk Management*, 2020, 29: 100234.
- [22] 孙芳, 杨修. 农业气候变化脆弱性评估研究进展[J]. *中国农业气象*, 2005, 26(3):170-173.
- Yang F, Yang X. Research progress on vulnerability of agriculture to climate change [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(3):170-173.(in Chinese)
- [23] 段兴武, 谢云, 刘刚, 等. 黑龙江省粮食生产对气候变化影响的脆弱性分析[J]. *中国农业气象*, 2008, 29(1):405-407.
- Duan X W, Xie Y, Liu G, et al. Analysis of vulnerability of grain crop yields to impacts of climate change in Heilongjiang Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(1):405-407.(in Chinese)
- [24] Dong Z Q, Pan Z H, An P L, et al. A novel method for quantitatively evaluating agricultural vulnerability to climate change[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48:49-54.
- [25] Dong Z Q, Pan Z H, He Q J, et al. Vulnerability assessment of spring wheat production to climate change in the Inner Mongolia region of China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 85:67-78.
- [26] Liu Y L, Zhuang Q L, Pan Z H, et al. Response of evapotranspiration and water availability to the changing climate in Northern Eurasia[J]. *Climatic Change*, 2014, 126(3-40):413-427.
- [27] He D, Wang J, Dai T, et al. Impact of climate change on maize potential productivity and the potential productivity gap in Southwest China[J]. *J. Meteor. Res.*, 2014, 28(6): 1155-1167.
- [28] Zhang J T, Ren W, An P L, et al. Responses of crop water use efficiency to climate change and agronomic measures in the semiarid area of Northern China [J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(9): e0137409.DOI:10.1371/journal.pone.0137409
- [29] Pescaroli G, Alexander D. Understanding compound, interconnected, interacting, and cascading risks: a holistic framework [J]. *Risk Analysis*, 2018, 38(11):2245-2257.
- [30] Pescaroli G, Alexander D. Critical infrastructure panarchies and the vulnerability paths of cascading disasters [J]. *Natural Hazards*, 2016, 82:175-192.
- [31] Pescaroli G, Nones M, Galbusera L, et al. Understanding and mitigating cascading crises in the global interconnected system[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 30:159-163.
- [32] Huang C, Li N, Zhang Z, et al. Assessment of the economic cascading effect on future climate change in China: evidence from agricultural direct damage [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276:123951.
- [33] 郭增建, 秦保燕. 灾害物理学简论[J]. *灾害学*, 1987(2): 25-33.
- Guo Z J, Qin B Y. Brief discussion on disaster physics [J]. *Journal of Catastrophology*, 1987 (2):25-33.(in Chinese)
- [34] 郑大玮. 灾害链概念的扩展及其在农业减灾中的应用[J]. *中国人口资源与环境*, 2008(18):653-657.
- Zheng D W. Extension of the concept of disaster chain and its application to disaster reduction in agriculture [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2008(18):653-657.(in Chinese)
- [35] Stagl J, Mayr E, Koch H, et al. Effects of climate change on the hydrological cycle in central and eastern Europe[M]//Rannow S, Neubert M. Managing protected areas in central and eastern Europe under climate change. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014:31-43.
- [36] Dan Osborn. The breadth of climate change impacts on biological systems [J]. *Emerging Topics in Life Sciences*, 2019, 3(2):107-113. DOI:https://doi.org/10.1042/ETLS20180114.
- [37] Malhi Y, Franklin J, Seddon N, et al. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (Series B, Biological sciences)*, 2020, 375(1794): 20190104.DOI:10.1098/rstb.2019.0104.
- [38] Liu S, Long B, Pan Z, et al. Evaluation of climatic comfort of living environment based on age differentials in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6(1):1843371.
- [39] Chou J, Xu Y, Dong W, et al. Research on the variation characteristics of climatic elements from April to

- September in China's main grain-producing areas[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(3): 3197-3207.
- [40] Stillman J H. Heat waves, the new normal: summertime temperature extremes will impact animals, ecosystems, and human communities[J]. Physiology (Bethesda), 2019, 34(2): 86-100. DOI: 10.1152/physiol.00040.2018. PMID: 30724132.
- [41] Xie W, Xiong W, Pan J, et al. Decreases in global beer supply due to extreme drought and heat [J]. Nature Plants, 2018, 4(11): 964-973.
- [42] Bouras E, Jarlan L, Khabba S, et al. Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 19142.
- [43] 李阔, 许吟隆. 适应气候变化的中国农业种植结构调整研究[J]. 中国农业科技导报, 2017(1): 8-17.
- Li K, Xu Y L. Study on adjustment of agricultural planting structures in China for adapting to climate change[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(1): 8-17. (in Chinese)
- [44] 张俊灵, 闫金龙, 张东旭, 等. 北部冬麦区旱地小麦品种的演变规律[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(8): 1017-1024.
- Zhang J L, Yan J L, Zhang D X, et al. Evolution rule of wheat varieties in dryland of northern winter wheat zone[J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(8): 1017-1024. (in Chinese)
- [45] 李扬, 王靖, 唐建昭, 等. 播期和品种变化对马铃薯产量的耦合效应[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(2): 138-146.
- Li Y, Wang J, Tang J Z, et al. Coupling impacts of planting date and cultivar on potato yield [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(2): 138-146. (in Chinese)
- [46] 张厚瑄. 中国种植制度对全球气候变化响应的有关问题 II: 我国种植制度对气候变化响应的主要问题[J]. 中国农业气象, 2000, 21(2): 11-14.
- Zhang H X. Response of cropping system in China to global climatic changes II: effect of cropping system in China to global climatic change [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2000, 21(2): 11-14. (in Chinese)
- [47] 张玥滢, 刘布春, 邱美娟, 等. 气候变化背景下中国苹果适宜种植区北移西扩: 基于高分辨率格点气象数据的区划分析[J]. 中国农业气象, 2019, 40(11): 678-691.
- Zhang Y Y, Liu B C, Qiu M J, et al. Areas suitable for growing apples moved northward and westward in China under the background of climate change: climatic regionalization of apple based on high-resolution meteorological grid data[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(11): 678-691. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2019.11.002. (in Chinese)
- [48] 王鸣雷, 史文娇. 中国北方新增耕地的时空变化及驱动因素分区[J]. 中国农业科学, 2020(12): 2435-2449.
- Wang M L, Shi W J. Spatial-temporal changes of newly cultivated land in northern China and its zoning based on driving factors [J]. Scientia Agricultura Sinica 2020(12): 2435-2449. (in Chinese)
- [49] 董元宏, 彭惠, 罗滔, 等. 气候变暖背景下拟建青藏高原公路沿线典型区段多年冻土未来 50 年退化特征[J]. 灾害学, 2019, 34(z1): 20-25.
- Dong Y H, Peng H, Luo T, et al. Degradation characteristics of the permafrost at typical site along Qinghai-Tibet expressway in the next 50 years under climate warming background[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(z1): 20-25. (in Chinese)
- [50] 蔡榕硕, 谭红建. 海平面加速上升对低海拔岛屿、沿海地区及社会的影响和风险[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 163-171.
- Cai R S, Tan H J. Impacts and risks of accelerating sea level rise on low lying islands, coasts and communities[J]. Climate Change Research, 2020, 16(2): 163-171. (in Chinese)
- [51] 蔡少杰, 徐峰增, 张晓勇, 等. 气候变暖背景下黑龙江省水稻适宜种植区时空变化特征[J]. 中国农村水利水电, 2020, 448(2): 138-142.
- Cai S J, Xu F Z, Zhang X Y, et al. Temporal and spatial variation of rice suitable growing region in Heilongjiang Province under climate warming [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, 448(2): 138-142. (in Chinese)
- [52] 胡莉婷, 胡琦, 潘学标, 等. 气候变暖和覆膜对新疆不同熟性棉花种植区划的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 90-99.
- Hu L T, Hu Q, Pan X B, et al. Effects of global warming and plastic mulching on cotton-planting zoning with different matures in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 90-99. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.012 (in Chinese)
- [53] 葛全胜. 中国历朝气候变化[J]. 科学出版社, 2011.

- Ge Q S. Climate change in China [M]. Science Press, 2011.(in Chinese)
- [54] 孙程九,张勤勤. 气候变迁、政府能力与王朝兴衰: 基于中国两千年来历史经验的实证研究[J]. 经济学, 2019, 18(1): 311-336.
- Sun C J, Zhang Q Q. Climate change, state capacity, and the rise and fall of dynasties: an empirical study based on Chinese historical experience in the past 2000 years[J]. China Economic Quarterly, 2019, 18(1): 311-336.(in Chinese)
- [55] 潘志华, 郑大玮. 适应气候变化的内涵、机制与理论研究框架初探[J]. 农业资源与区划, 2013, 34(6): 1-5.
- Pan Z H, Zheng D W. Preliminary study on the connotation mechanism and theoretical research framework of climate change adaptation [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013, 34(6): 1-5.(in Chinese)
- [56] 吴绍洪, 罗勇, 王浩, 等. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望[J]. 科学通报, 2016, 61: 1042-1054.
- Wu S H, Luo Y, Wang H, et al. Climate change impacts and adaptation in China: current situation and future prospect [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61: 1042-1054. (in Chinese)