

甘琦杰, 刘建亮, 陈槐. 野外增温方法研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (4): 1092-1101

Gan QJ, Liu JL, Chen H. Progress in research on field warming methods [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2021, 27 (4): 1092-1101

野外增温方法研究进展

甘琦杰^{1,2} 刘建亮¹✉ 陈槐¹✉¹中国科学院成都生物研究所 成都 610041²中国科学院大学 北京 100049

摘 要 全球变暖是目前人类面临的主要环境问题之一, 过快的温度增幅对于植物生理、植被分布、土壤微生物活性、土壤有机物矿化和物质循环等将产生深远的影响, 因此全球变暖的相关研究近几十年来一直是各国科学家研究的热点. 野外增温实验是研究全球变暖最常用的手段之一, 因研究区地理环境、植被类型特征和研究目标的不同, 增温实验中根据增温设备增温效果及实验需求衍生出了各种不同的类型, 对于空气增温、植被增温和土壤增温, 在不同研究中各种设备的适用性有所差异. 本文总体将增温装置归纳为减少太阳辐射能量耗散的被动增温和依赖电力进行能量输入的主动增温两大类, 从增温装置增温原理及方法、野外实验中实际增温效果以及野外气候条件下实施难度及维护等方面, 重点论述了各种增温设备的优缺点及适用性, 并归纳总结了增温设备在使用过程中的局限性. 湿地生态系统暂时或长期地表淹水及土壤高湿和水的高比热容带来的增温难度与森林生态系统高大树冠增温的实施难度是未来增温需要解决的问题. 此外, 建议对未来增温采用大规模长周期变温实验, 结合模型预测, 实现更准确的增温模拟, 以获取更加真实的生态系统响应. (图1 表1 参100)

关键词 野外增温装置; 主动增温; 被动增温; 土柱移地; 长期增温实验

Progress in research on field warming methods

GAN Qijie^{1,2}, LIU Jianliang¹✉ & CHEN Huai¹✉¹ Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Global warming is one of the main environmental challenges faced by humans. An extremely fast temperature increase will have a profound effect on plant physiology, vegetation distribution, soil microbial activity, soil organic matter mineralization, and material cycling. Therefore, research on global warming has been a popular topic for scientists worldwide in recent decades. Field warming experiments are one of the most commonly used methods for studying global warming. Owing to the different geographical environments, vegetation type characteristics, and research objectives in the study area, various types of warming experiments have been designed according to the warming effect of warming equipment and experimental requirements. The heating effects and applicability of different research equipment are different. In this study, warming devices were classified into two categories: passive warming, which reduces the energy dissipation of solar radiation, and active warming, which depends on the power input. This review discusses the advantages, disadvantages, and applicability of all types of temperature increasing equipment from the principle and method of the device, the actual warming effect, and the implementation difficulty and maintenance under field climate conditions and summarizes the limitations of the heating equipment during use. The challenges to be solved in the future are the difficulty in temperature increase caused by temporary or long-term surface flooding, high soil moisture in wetland ecosystems, and high specific heat capacity of water, as well as the difficulty in implementing high canopy temperature increases in forest ecosystems. In addition, it is suggested that large-scale, long-term temperature change experiments should be adopted for future warming in order to achieve accurate warming simulations and obtain real ecosystem responses.

Keywords field warming device; active warming; passive warming; soil column moving; long-term warming experiment

收稿日期 Received: 2020-09-27 接受日期 Accepted: 2020-11-05

中国科学院战略性先导科技专项 (XDA2005010404) 和四川省科技计划 (2020YFS0020) 资助 Supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA2005010404) and the Sichuan Science and Technology Program (2020YFS0020)

✉ 通讯作者 Corresponding author (E-mail: liujianliang@cib.ac.cn; chenhuai@cib.ac.cn)

地球各生态系统目前正在经历着全球变暖的影响,这主要是由于工业革命以来人类排放的大量温室气体导致。从1750年到2011年,人类排放到大气中的CO₂累积量为2 040 ± 310 Gt^[1]。人类活动造成的温室气体排放总量持续增长,尤其从2000-2010年绝对增长幅度更大,其间化石燃料燃烧和工业过程排放的CO₂约占温室气体总排放量的78%,这直接导致自1880年至2012年期间全球平均温度上升了0.85 °C^[1]。全球变暖已经影响了地理分布不同的各种生物^[2-3]。物候也随气候变暖发生着变化,植物返青开花时间等都逐渐提前^[4],在过去的50年里,一些地区的生长季节长度每10年增加了3.6 d^[5]。气候条件影响物种的分布,气候变暖将生态位向高纬度高海拔地区推移,导致物种的分布也发生相应的改变^[2-4, 6]。快速的气候变化或极端的气候事件可以改变群落的组成^[4]。生态系统中碳循环过程也会因温度急剧变暖受到影响,土壤中含有大量的有机碳,土壤有机碳在30 cm以上估计为684-724 Pg,在100 cm以上估计为1 462-1 548 Pg,在200 cm以上估计为2 376-2 456 Pg^[7]。土壤有机碳分解释放的CO₂可占到大气CO₂储量的10%^[8]。根据模型预测气候变暖可能导致在高纬度和高海拔地区土壤的有机碳大量损失^[9]。土壤微生物直接参与土壤有机物的矿化循环,且是土壤中最活跃的组分之一^[10],土壤微生物丰度、微生物群落结构以及微生物的活性容易受到土壤温湿度变化的影响,进而影响土壤碳排放^[11],土壤微生物矿化循环速率随气候变暖响应的研究对于未来气候有着重要的意义和作用^[12]。

由于全球过快的增温对生态系统结构、功能、过程产生广泛及长远的影响,因此需要依赖野外增温实验来探究生态系统发生的变化,为模型预测提供数据基础,进而指导人类通过生态环境保护、自然资源及能源的合理利用等有效措施缓解增温加剧的现状,达到人类可持续发展的目标。全球科学家采用的野外增温实验种类繁多,需要借助一定的措施来达到温度对照,本文将生态学中常用的野外增温实验方法从增温模拟效果、适用对象、观测实施难度等方面进行详尽的介绍,并归纳总结生态学增温实验中难点以及对于开展野外增温实验的一些建议。

1 增温装置演化

人类对于环境温度有意识的改变,最早要从人类学会使用火开始,燃料燃烧发出的红外辐射增加了周围温度,提高了人类的适应能力,保障了人类生存。但人类对于环境温度的控制不仅限于火,后来产生的温室对人类的生产生活产生了巨大影响。世界范围内温室起源最早可追溯到秦汉年间,东汉学者卫宏《诏定古文尚书序》记载“乃密种瓜于骊山陵谷中温处,瓜实成”,说的是秦始皇在冬季种瓜成功,《汉书·召信臣传》记载“太官园种冬生葱、韭、菜茹,覆以屋庑,昼夜燃蕴火,待温气乃生^[13]”。温室技术的出现使反季节蔬菜应运而生。温室除了在农业方面发挥作用,还在园艺栽培中起着重要作用,其中最有名的要属英国皇家植物园林——邱园,邱园中自1844年以来陆续建成了4座温室,有棕榈室,创造了与热带雨林相似的气候条件,有温带植物温室,展示了1 666种亚热带植物,还有睡莲温室和高山植物温室,邱园通过温室打造的人工小环境,使各种植物离开原有生境得以存活。

随着生态学家对自然生态系统变化的关注,以及全球变暖导致的全球性生态问题风险的增加,各国科学家开始陆续采用不同的增温装置来改变环境温度,用以研究动植物生理

变化、微生物生理变化、土壤化学循环、温度敏感性、生态系统响应等生态学相关问题。1973年Mandl首次在生态学野外试验中采用OTC,他们改进了封闭式的温室,降低了温室封闭环境带来的影响^[14];1994年Zeihner等人在棉花田上设置红外反射窗帘,被反射的夜间长波辐射有效增加了棉田温度^[15];1993年和1994年夏天Walker等人在图里克湖(Toolik Lake)尼沃特山脊(Niwot Ridge)雪栅栏增加的积雪使土壤产生明显增温^[16]。初期增温试验装置都以降低来自太阳能量耗散为主,只能被动依赖自然能量。

上述依赖太阳辐射为能量来源的增温装置都无法精确控制温度,为了能主动控制温度增幅,科学家在野外陆续采用加热线缆等需要电力供应的主动增温设备,加热线缆、增温棒以及红外线加热器的基本原理是电流热效应,该原理最早是由英国物理学家焦耳在1841年发现,到了19世纪后期Simpson制造出了世界上第一支电加热线,随着技术工艺的发展成熟,20世纪末电热线已经被广泛应用,也正是这个时期,电加热的相关方法被应用于生态学试验中,如Cleve为了研究土壤温度对土壤过程的控制,在1977年用电缆加热阿拉斯加内陆森林生态系统土壤,使加热区温度升高8-10 °C^[17];红外线加热器是1990年Harte等人在美国科罗拉多州亚高山草甸上首次用^[18]。上述增温装置自出现以来就被各国科学家广泛用于各种类型生态系统的研究中,在生态学野外实验中发挥着不可替代的作用(图1)。

2 气候变暖野外增温试验的研究方法

生态系统模拟增温实验是研究全球变化影响较为合适的方法之一。通过对不同生态系统和不同实验对象长期或短期的模拟增温实验,不仅可以有效地反映出生态系统及各组成部分对全球变暖的响应,而且长期的观测数据对于生态系统模型的建立以及对未来生态系统状况的预测至关重要。

全球气候变暖的温度特征可以简单描述为:高纬度地区增温幅度相较于低纬度地区更明显;就日变化来说,日低温的增幅大于日高温的增幅^[19];极端低温减少,极端高温增加^[1]。为了准确模拟全球变暖,同时考虑到可行性、易用性、运行成本和数据采集等因素,国内外科学家目前采用的主要增温方式从温度控制的角度可分为被动增温和主动增温两大类^[20-21],被动增温包括温室、开顶箱、降雪栅栏、红外线反射器,主动增温包括加热线缆、红外线辐射器,此外,土柱移地培养和土壤移地重填用以辅助增温试验。

2.1 被动增温装置

2.1.1 温室和开顶箱 在生态学增温实验中温室和开顶箱很早就被采用^[22-24],在野外长期增温实验中起着重要的作用。温室增温原理主要是使用高透射率材料,允许太阳短波辐射进入,而阻挡了地表反射的长波辐射,使能量收支改变,从而达到增温的效果。温室结构完全阻挡了空气流通,使其形成了封闭环境,虽然封闭系统增温效果更好,但是并不能很好地模拟自然环境。基于国际苔原试验(ITEEX)项目的要求,温室增温的设计优化为开顶箱方式,将封闭温室造成的生态影响降到最低,并从20世纪90年代开始兴起^[20]。开顶箱从设计之初就是为了长期、有效、低成本的高纬度寒冷地区野外增温使用。因此这种增温平台被广泛用于高纬度温度敏感区和高海拔地区,如极地苔原、青藏高原等地^[25-26]。开顶箱形制多种多样,根据不同实验需求和样点所处自然气候条件,底面积大小、箱体高低、开口大小、挡板倾斜角度均有所不同,但挡板所采用的

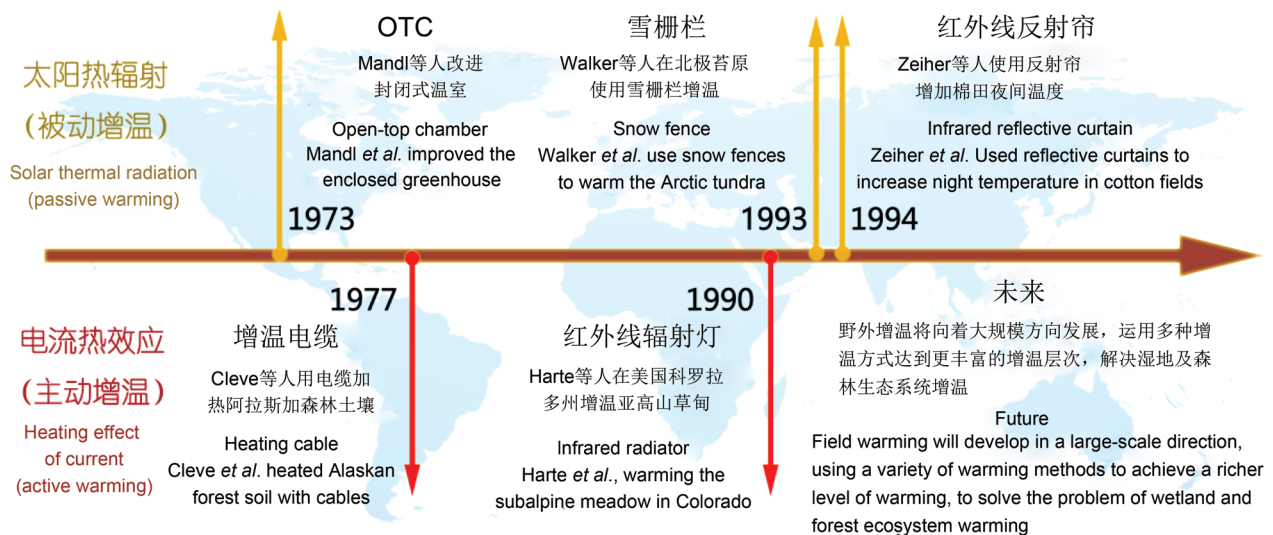


图1 野外增温装置发展过程

Fig. 1 Development process of field warming device

材料基本都以不阻挡或少阻挡太阳短波辐射的高透射材料为主。

虽然开顶箱的增温效果能够达到开顶箱内空气1-5℃升温, 土壤增温1.4-2℃, 深度3-5cm^[24-27], 增温效果明显, 但是增温主要集中在白天, 夜间无增温效果甚至会导致降温, 这与IPCC报告中的气温升高特征并不一致, 并不能有效模拟未来可能的增温趋势。开顶箱的弊端在学界早有讨论, 开顶箱围成的空间, 不仅仅提升了温度, 还直接影响了样点上方空气的横向流动和纵向流动, 致使水分、空气成分、风速与外界不同, 形成了独特的小气候, 挡板还会对降雨降雪产生一定程度的遮挡, 因此研究结果不能准确反映生态系统对增温的响应。温室、开顶箱造价相比于其他增温方式经济, 而且无需电力供应, 适合人烟稀少偏远地区的长期增温实验, 如Wahren等人于1994年在阿拉斯加苔原设立的为期8年的实验, 用很少的维护成本就可以支持长期实验^[28]。

2.1.2 雪栅栏 雪栅栏也是增温方法的一种, 长期的雪栅栏显著地提高了冬季地表和深层土壤的温度^[16, 29-30]。根据盛行风向设置雪栅栏, 使积雪在雪栅栏背风处产生明显的堆积, 来改变冬季积雪层厚度, 这种方法可以达到增温目的。雪是一种有效的保温材料, 被雪覆盖地区的土壤温度通常高于无雪地区, 这一效应随着雪的深度而增加^[31], 冬季积雪将保护植物免受风和极端温度的影响^[32]。雪栅栏增温主要用于高纬度高海拔区域, 该区域地表温度更容易受到降雪影响, 如北极地区一年有2/3的时间被雪覆盖, 生长季节的温度很低, 生态过程和植被模式都受到温度和雪的强烈影响^[32], 雪和温度共同决定了北极和阿尔卑斯生态系统的景观尺度模式^[16], 温度的改变将决定永冻层的融化, 进而影响地表植被^[33]。Natali等人于阿拉斯加山脉德纳里国家公园和保护区(Denali National Park and Preserve)开展的实验表明, 雪栅栏使12月至次年4月积雪厚度增加到135cm, 是对照区38cm的3.5倍, 平均土壤温度升高 1.6 ± 0.3 ℃, 增温区域土壤温度维持在-10℃以上, 而在对照样地中, 5cm深处的最低温度达到-18℃^[34]; Walker在北极地区图里克湖(Toolik Lake)和尼沃特山脊(Niwot Ridge)的长期实验中, 2-3m厚的冬季深雪区与周围

积雪区土壤温度(2cm)的差异约为15℃^[16]。

雪栅栏的增温属于被动增温, 管理投入较少, 适合长期野外实验。虽然无法做到温度的精确调控, 但是在不同的增温实验研究中增温效果显著。雪栅栏的使用也存在一些缺点, 首先, 单独从温度控制的角度来说额外堆积的降雪直接导致了积雪期的延长, 并且在消融后改变了水分输入, 这种改变可能抵消冬季土壤温度增加的效应^[30, 35], 若想要消除上述问题带来的影响, 可将除雪措施和雪栅栏一起采用, 在早春时节人工除去额外的积雪^[34]。但是从模拟全球气候变化的角度, 上述缺点也恰恰是气候变化的实际情况, 有研究表明, 20世纪中期以来北极变暖, 降水在秋冬季节增加^[36], 此外, 北极地区灌木丰度的增加是一种明显的趋势^[37], 而灌木影响地表空气流动, 产生了类似于雪栅栏的作用^[38], 因此改变的积雪期和额外水分输入并不一定是缺点, 是否采取除雪措施要根据实验地区实际情况和实验所需而定。其次, 雪栅栏的阻挡作用会在背风处产生枯落物堆积的现象^[16], 雪栅栏阻挡的额外枯落物堆积在多大程度上导致土壤养分的增加, 目前仍不清楚。

2.1.3 红外线反射帘 除了温室、开顶箱和雪栅栏, 红外线反射帘也可以达到被动增温的效果。这种方法模拟了由于云层增加和温室气体排放增加引起的气候变化导致生态系统热量平衡发生改变的方式, 夜间将反射帘设置于植被上方, 而四周通透可以保持空气流通, Beier等人于灌丛生态系统中设置的反射帘可反射97%的直接辐射和96%的散射辐射, 使空气和土壤的最低温度提高了0.4-1.2℃, 月平均气温和土壤温度升高0.5-2℃^[39]; 森林生态系统中, 在无云的夜晚冠层升温3-5℃, 在多云的夜晚升温1-3℃^[40]。

红外线反射帘虽然可以阻止长波辐射的耗散, 但是无法长期放置, 为确保日间来自太阳的正常短波辐射必须在日间收回, 巨大的反射帘也增加了受风面积, 需在雨雪大风天气收回, 降低对降水的干扰, 同时保护装置, 这就需要一套自动化控制系统来进行每日调整。在Luxmoore等人于Beier等人的红外线反射增温装置中, 均安装了光控传感器、雨水传感器和风传感器, 当光照强度、降水量、风速达到一定水平后, 系统会自动收回反射帘^[39-40]。

2.2 主动增温装置

2.2.1 加热电缆和增温棒 温室、开顶箱以及反射帘等,在高大乔木分布的森林生态系统中不便于安置,若要安置于森林系统设备规模将随之变大、投入随之增加。而且上述增温装置以及后文将提起的红外线辐射器对土壤的增温深度不足,增温效果往往停留在表层5 cm左右,为加热深层土壤温度,生态学家开始采用加热电缆。加热电缆最初针对于森林生态系统的土壤增温, Peterjohn等人设计的电缆增温装置能够有效地使森林土壤高于周围未加热土壤5 °C^[41], Melillo 等人从1991年开始用电缆加热的方式在马萨诸塞州中部的哈佛森林(Harvard Forest)进行了为期10年增温实验^[42]。这种增温方式将用于加热的电缆直接埋藏于土壤中,不受限于地表的高大植被,因埋藏电缆对土壤扰动较高,为避免开挖回填带来巨大扰动的影响,在以往研究中均设置埋藏电缆但不加热的扰动型对照区^[41-42]。埋藏的电缆或增温棒可加热土壤深层,因此这种加热方式在土壤深层有机碳温度稳定性的相关研究中发挥着重要的作用。Hanson等人在美国田纳西州橡树岭的一个温带落叶林中使用了低瓦数3 m深加热器用于模拟未来地下温度的增加^[43]。

主动增温与被动增温最大的区别在于,能量可由增温设备主动输入,因此温度变化变得可控,加热效果、温度梯度都能根据实验设计所需进行控制。虽说温度可控但电缆加热有两方面的缺点。(1)从设备本身的运营来说,电缆加热的方式能量来自电力,因此加热设备需要有电力设施支撑,这种加热方式在野外往往也受限于电力设施无法到达;此外加热设备的长期运营需要资金保障,运营成本相较于其他设备偏高。(2)从电缆的加热效果来说,电缆加热区域不均匀,在加热电缆外围会形成温度梯度,增温小区中温度稳定的区域较小;电缆加热只能加热地表以下,地表植物及空气部分并不会受到增温影响;电缆增温模式由于土壤响应缓慢,不能很好地模拟日间和夜间增温幅度不同的非对称性增温^[44]。

2.2.2 红外线辐射器 与加热电缆开始应用的几乎同一时期,红外辐射加热器也被应用于生态学野外增温实验模拟全球变暖。Harte等人于1990年在美国科罗拉多州亚高山草甸上首次用红外辐射器模拟全球增温^[18],后来这种加热方式被各国生态学家广泛采用^[11, 45-47]。其原理是直接模拟太阳红外辐射,红外线辐射器根据地表植被状况一般被悬挂于实验样地上方1-3 m处,根据实验增温需求设置恒定输出功率保持长期增温。红外线辐射器不仅仅在野外环境使用,在一些大型的土柱移地培养中也往往采用红外线辐射器来模拟土柱增温^[48-49]。红外线辐射器虽说可以应用于森林生态系统^[47],但加热效果仅限于土壤,依然无法对高大冠层进行红外线加热。

红外线辐射器布置及运行的优点在于对地表干扰小,能很完好地保持地表土壤植被原有状态,且四周无遮挡,不影响空气流通,不改变微环境。缺点类似于加热电缆,一方面需要电力设施支持,运行投入较高,另一方面仍然无法加热空气^[21],此外辐射器能量输入稳定不能准确模拟日变化。

2.3 土柱移位增温方法

2.3.1 土柱移地、土壤移地重填 与土壤密切相关的全球变暖研究中,一类增温措施是将原位土柱含地表植被或幼苗移植于不同海拔条件的地区采用不同的环境温度梯度来进行培养,将原始样地土壤用一定的容器(隔热塑料箱、PVC管等),将其整块取出然后放置在不同温度环境中,马胜兰和吴鹏飞为研究增温与森林土壤有机碳的关系,将贡嘎山土柱移

植于不同海拔来模拟增温^[50],常晨晖等人通过采掘土柱降低海拔的方式研究增温对高山森林土壤的影响^[51]。另一类是将不同温度环境中的土柱降至相对低海拔同一地点进行增温培养,根据研究需要可采用原位土柱或重新装填土柱,重填过程是将采集的样地土壤,经过筛分按比例混匀后,在培养地区的土柱中重新装填,如黄锦学等人采集不同地方的土壤通过重新装填,将不同土壤置于同一环境条件^[52]。为了使筛分、填塞和再润湿对土柱中土壤矿化循环过程的初始扰动效应最小化,实验设置预培养阶段^[53]除此之外,土壤移位的集中培养中也可结合红外线增温等其他增温措施^[48-49, 54-55]。

土柱的移地培养这种方式在实际操作中费时费力,尤其规模较大原位土柱的移地培养成本投入也相对较高,对于处在不同地点的土柱,因降水差异需要进行降水量的控制。但是土柱移地培养的最大优势在于:置于不同温度环境中的土柱温度无需人为能量控制且日变化和年变化符合自然节律,对增温的模拟效果极佳;若采用不同温度地区土柱集中培养,可保证数据采集的统一性,使实验数据的可比性更强。因此,研究人员在相关研究中是否采取土柱的移地培养,就需要对增温模拟精度、样地分布范围和土柱移地培养成本做出权衡。

目前野外增温装置基本为上述类型,规模大小有所不同,此外考虑到各种增温实验装置的优缺点(表1),研究人员往往还采取多种装置并用的方案,以实现增温效果。

2.4 增温装置适用性

2.4.1 适用于植物增温的研究装置 针对植被的增温实验中,在不同的生态系统中研究增温所采用的装置也有所不同,在草地和农田生态系统中,常采用温室开顶箱、红外辐射器^[25-27, 47-48],而在森林生态系统中,由于树冠部分比较庞大,很难采用温室、开顶箱,通常的全球变暖增温研究围绕森林土壤和凋落物展开^[43, 56-58],常常采用电缆加热的方式。森林生态系统中高大冠层在光合作用中起主要作用,对温度的响应可能直接影响森林生态系统的固碳能力,考虑到树冠层、根和土壤功能之间在净碳交换方面存在强烈反馈的潜力,理想的实验设计应该包括操纵整个生态系统^[59],使植物在增温实验中的响应更贴近于未来增温的实际情况。

2.4.2 适用于土壤增温研究装置 在土壤碳氮循环、温室气体排放的相关研究中,土壤中难分解稳定碳和微生物矿化速率的变化一直是研究热点。野外原位土壤增温实验一般包括温室、开顶箱、红外线辐射器和埋藏于土壤中的电缆、加热棒,其中温室、开顶箱、红外线辐射器对于土壤能够有效加热但是加热深度大约在5 cm深处^[24, 26-27, 47-48],但是对于土壤有机物的研究5 cm深度远远不够,如草地腐殖质层约为30-70 cm,个别地区深度在1 m以上^[60],泥炭地富含大量有机碳,若尔盖地区泥炭深度可达6 m^[61],因此,要想对深层土壤性质及微生物展开研究,采用埋藏式电缆、加热棒进行增温控制实验就更加适用^[43-45]。

3 未来发展方向和展望

3.1 气候变暖研究的重点关注方向

3.1.1 湿地增温研究的机遇 湿地的CH₄排放过去一直对气候有强烈的反应,并可能在未来继续对人为驱动的气候变化有反应^[62-63]。湿地中由于水的存在降低了有机物的分解速率使有机物质大量的积累,在未来变暖情形下,湿地可能引起的温室气体排放问题主要有两个方面,一方面是自然湿地排放的CH₄是大气CH₄水平升高的主要原因之一^[64-66],另一方面

表1 生态学野外增温实验装置及优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of ecological field warming experimental devices

增温装置 Warming device	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	参考文献 Reference
温室、开顶箱 Greenhouse, open-top chamber	装置简易, 维护简单, 适合偏远地区长期实验 The device is simple. The equipment maintenance is simple. It is suitable for long-term experiments in remote areas.	增温效果白天增幅大、夜间增幅小, 影响装置内小气候 The warming effect increased greatly in daytime and small in night. The microclimate is affected in the device	[20, 25-27]
雪栅栏 Snow fence	装置简易, 维护简单, 适合偏远地区长期实验 The device is simple. The equipment maintenance is simple. It is suitable for long-term experiments in remote areas.	改变水分输入, 可能增加枯落物积累 The water input will change. Litter accumulation may increase	[16, 31, 36]
红外线反射帘 Infrared reflective curtain	有效增加夜间温度 The device can effectively increase the night temperature	无法在白天增温, 需在白天、雨天和大风天收回反射帘防止损坏 The device cannot warm up during the day. It is necessary to retract the reflective curtain in the daytime, rainy days and windy days to prevent damage	[40-41]
加热电缆、增温棒 Heating cable, heating rod	温度可控, 增温效果可达到土壤深处 The equipment can control the temperature. The warming effect can reach the depth of soil	需电力供应, 土壤扰动大, 土壤局部温度不均匀, 无法加热空气和地表植被 The equipment needs power supply. The soil is disturbed greatly in the process of layout. Local soil temperature is not uniform. The device cannot heat the air and vegetation	[43-45]
红外线辐射器 Infrared radiator	温度可控, 对地表植被和土壤干扰小, 不影响空气流动 The equipment can control the temperature. It has little disturbance to surface vegetation and soil. The equipment does not affect the air flow	需电力供应, 无法加热空气 The equipment needs power supply. The device cannot heat the air	[11, 46-48]
土柱移地、土壤移地重填 Soil column moving, soil column refilling	模拟增温符合自然节律, 可将不同地点土壤和植被集中培养, 数据可比性和重复性高 The simulated warming accords with the natural rhythm. This method can concentrate the cultivation of soil and vegetation in different sites. The data obtained from soil column experiments are of high comparability and repeatability	影响水分养分输入输出, 重填土柱土壤物理性质有所改变 Soil column affects the input and output of water and nutrients. The physical properties of heavy fill column soil changed	[50-52]

是湿地退化导致水位下降, 使经过长期积累的有机物质加速分解释放 CO_2 ^[67-69], 因此湿地相关的增温模拟实验非常必要, 但是在实际研究中, 湿地的野外原位增温实验较难开展, 主要是由于水的高比热容致使空气增温和水面以下增温的水热平衡很难保持, 使增温效果难以达到预期目标。最近Davenport在北极地区边缘湿地水体中蛙类和藻类研究中采用了不同功率水族加热棒直接加热水体的方法, 使水温增加1℃和3℃^[70], 在研究湿地土壤有机物矿化循环中也可借鉴该方法, 达到湿地水体、土壤、植被和空气的整体增温。

3.1.2 雨林及森林增温的难点 热带雨林是地球上最活跃的生态系统之一, 尽管地球上只有15%的陆地表面分布热带森林, 但热带森林却占到了陆地植物生物量的2/3以上^[71], 土壤碳占总量的近1/3^[72], 与大气的 CO_2 交换量比其他生物群落更多^[73]。在未来20年内, 预计所有热带陆地表面的温度都将迅速上升, 季节性最低温度将高于当前的季节性最高温度^[74-75]。而且, 热带物种可能比其他生物群落的物种更容易受到变暖的影响, 这是在相对稳定的窄温域下数百万年进化的结果^[76-77]。因此, 人为升温实验对于准确预测未来热带森林动态及碳平衡至关重要, 对于热带雨林的增温建议是增加温度最高地区温度以研究热带雨林生态系统的响应。

在研究森林植被方面虽然可以进行植物幼苗移栽来改变植物环境温度^[78], 观测不同海拔相同树种森林^[79], 增温高度相对较低的幼龄树木^[80]等措施, 但在成熟乔木组成的森林中, 由于高大乔木的存在, 都没有进行过包括巨大树冠部分的整体原位生态增温实验^[81], 同样在热带雨林地区的任何地方都没有成功地进行过整体的野外变暖实验^[18]。这里我们的建议是在科研条件允许的情况下加热方式尽量采用立体结构, 架设红外线辐射灯架与埋藏土壤加热棒结合的方式, 确保树

木的地上地下的综合响应。开发和实施这种实验耗资巨大, 实际实施还根据实验目标作出取舍。

3.2 方法的改进建议

3.2.1 开展长期增温实验的必要性 增温实验中的增温相较于气候变暖的增温是一个很迅速的过程, 从某种程度上来说也可以认为是对自然生态系统的一种扰动, 因此生态系统中的生物在前期和后期可能会产生不同的响应。Melillo等人从1991年开始开展的为期10年的哈佛森林增温实验中^[43], 在研究的前6年, 气候变暖导致的二氧化碳流量增加平均约为28%, 在后4年中, 升温对土壤呼吸的促进作用明显减弱, 甚至在最后一年土壤呼吸对气候变暖的反应不明显, 同时净氮矿化增幅在研究初期最大随后减弱。在北极地区国际冻土带实验(ITE)中, 增温前期与后期北极物种也展现了不同的生理特征^[82]。北极地区植被在气候变暖实验初期的2-4年, 植被丰度、凋落物、植被多样性、植被覆盖度及植被高度会经历较大变化, 但之后将维持在较稳定的水平^[83]。野外增温实验需要长期开展的原因一方面是上述生物适应性问题, 另一方面是生态系统响应的滞后性问题, 在美国SPRUCE研究项目中发现前期原位增温中大于50 cm深度的 CO_2 和 CH_4 产生不随温度变化, 而经过长期增温发现深层泥炭地仍然对温度做出响应^[84], 这种生态系统响应的滞后性也强调了开展长期实验的必要性。

野外增温实验在保证长期开展的同时, 建议野外增温实验开展初期设置待稳定阶段或称之为预培养阶段, 此段观测结果酌情考虑用于生物适应性的研究, 但不建议作为时间尺度较大的模型模拟预测结果的数据使用, 在增温实验生物适应期内所得数据若用于模型模拟预测, 模拟结果可能高估或低估未来变化趋势, 短期实验的结果通常不能很好地预测长

期变化^[84-85]。

3.2.2 增温实验增温幅度建议 增温实验的根本目的有两方面,一方面是研究全球变暖情况下未来各种生态系统的响应与温室气体排放的反馈,另一方面是研究特定生物在原位情况下对温度的响应。根据研究目的不同,增温装置选取的增温幅度有所不同,前者更倾向于采用研究地区模型模拟的增温预期结果来确定实际增温幅度,然后通过长期模拟来研究各种响应及反馈,而后者可以根据增温趋势和研究目标适应性来设计温度梯度,在生物生理及实际环境条件的参考下设置合理的增温幅度。全球平均地表温度到2100年根据不同的排放情景,预测结果显示增幅在0.3-4.8 °C^[1], IPCC的不同排放情形下的增温预测是普遍采用的增温幅度及梯度的参考。

增温实验中建议采用合理的温度增幅日变化、年际变化和增幅波动,气候变暖导致的增温并不统一,在全球范围内,寒冷的白天和夜晚的数量很可能已经减少,而温暖的白天和夜晚的数量却有所增加,大多数地区的永久冻土层温度都有所上升,在欧洲、亚洲和澳大利亚的大部分地区,热浪的频率也有增加趋势^[1]。非对称性增温的长期研究很有必要,在各种生态系统中研究者已经有所涉及,如农田系统的非对称性增温^[45],温带草原生态系统的非对称性增温^[86]等。此外,全球变暖的增温程度在同一地点的空气、植被、水体及不同深度土壤中不尽相同^[87],根据研究区可能存在的温度变化规律,在野外原位增温实验中尽量做到分段增温控制,分段增温既包括地表空气、植被和地下土壤的不同增温幅度,也包括日变化年际变化中的不同温度增幅规律,在科研条件允许的情况下,采用科学的控制管理系统,保证长期稳定的运行,使装置增温效果能够更好地模拟气候变暖的真实效果。

3.2.3 增温实验与计算机模型融合 计算机模型在预测未来气候中起着重要的作用,野外实验由于地理空间的限制无法覆盖大面积区域,因此只能依赖相关模型开展更加宏观的大尺度研究。全球大气环流模型(IPSL-CM5),用于研究气候系统对自然和人为作用力的长期响应,它可以代表与气候系统有关的主要动力学、物理和生物地球化学过程^[88],第二代地球系统模型(CNRM-ESM 2-1)通过增加相互作用的地球系统成分,如碳循环、气溶胶和大气化学,达到更好的耦合和预测^[89],此类计算机模型均可用于模拟未来气候变化的情景,通过预测结果可以发现急需研究的区域、现象等,并对生态学相关实验起指导性作用。

一方面计算机模型的预测结果为生态学研究目标及变暖实验提供了相关指导,另一方面野外观测及增温实验为模型提供了数据的保障。计算机模型的建模中非常依赖野外台站长期观测数据,原位实验的长期观测可以极大地改进高度复杂系统的模型表示,并提供了一个难得的机会来测试模型是否准确地捕获了在该研究方向中观察到的现象^[90],这些观测数据一部分可用于模型的建立,另一部分可用于模型的验证,因此增温装置的稳定性和数据真实性直接关系到模型模拟结果的有效性,这就要求野外增温实验具备两个重要的条件,一是长期、稳定、有效的增温效果,二是稳定可靠的数据记录与收集。

我们能否准确依靠模型预测气候变暖情形下的植物、微

生物变化以及碳平衡和温室气体排放,很大程度上取决于各类增温实验的模拟精度和尺度。不同地点不同规格增温设备之间的实验结果数据不便于整合到模型中使用,不同的增温机制和不同的增温效果,对于模型模拟来说会引入很大的不确定性^[21]。此外由于不同植物对于增温响应的不同导致地表植被种类的不同也可能对增温后结果产生差异,不同地点微环境所带来的特异性,也可能掩盖增温实验结果。未来野外实验数据与计算机模型融合是研究的必然趋势,但难以整合的增温实验观测结果是未来大尺度模型模拟中的难点问题。

3.3 展望

野外增温试验已经开展数十年之久,随着相关野外观测的开展与研究,自然生态系统中温度变化规律渐渐被人了解,但是想要很好的模拟自然界增温,来预测未来的变化趋势,困难仍然存在,一方面来自设备本身能量传输、耗散和可控性的局限,另一方面来自生态系统各因素之间的相互制约和生态系统中的温度不对称性。

全球变暖情况下由土壤微生物及植物介导的土壤稳定化学组分的变化及温室气体的排放,和全球变暖带来的湿地退化、永冻层消融等^[91-93]土壤环境变化,使原本被环境条件保护的土壤有机碳得以有机会再次进入全球碳循环。在土壤有机碳增温研究中,由于底土碳具有较长的周转时间和较好的温度稳定性,因此传统上认为底土碳相对稳定且对空气变暖反应缓慢^[94],但科学家最近的研究发现上述可能引起大量土壤有机碳释放的土壤变化主要集中在土壤深层,而不仅仅在表层^[95],对土壤深层有机物的研究还需更加深入。

此外,全球变暖将通过直接温度效应对凋落物质量和土壤生物的间接影响,导致凋落物分解速率的增加^[96-97],但并不是所有生态系统分解速率都增加,Moore等人在加拿大森林的凋落物分解研究中发现增温使凋落物分解率增加4%-7%^[98],在湿地生态系统中,增温使凋落物的分解速率也有所增加^[99],而在温带森林生态系统研究中,凋落物分解率随着温度升高出现了明显降低,这主要受到水分的影响^[100],野外增温条件下不同生态系统中受多因素影响的凋落物分解的动态平衡也值得我们进一步研究。

未来适用于野外的增温装置本身或将向着大规模的方向发展,来模拟整个生态系统的增温。现阶段各种生态学野外增温只是在很小范围内有针对性的局部增温,很难做到整个生态系统的增温,然而自然界中各种生态系统成分之间相互联系相互制约,各种因子的多样性与各因子之间联系的复杂性共同造就了生态系统对环境的响应结果,此外,全球气候变暖的不对称性和生态系统中各个变化过程的温度不对称性,使复杂生态系统的预测变得困难^[4]。若未来增温达到一定规模,用一种或多种能量输入方式,使实验装置中生态系统各个元素按照各自不同的理化特征产生预期的不对称增温,届时增温模拟效果会更加接近自然增温状况,各种生态系统元素对温度的响应也更加真实,会对未来全球变暖情况下生态学相关研究和未来全球变暖的预测产生更大的价值。

参考文献 [References]

- IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change). Climate Change 2014 Synthesis Report: Summary for Policymakers [M]. 2014: 4-6
- McCarty JP. Ecological consequences of recent climate change [J]. *Conserv Biol*, 2001, **15** (2): 320-331
- Hughes L. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? [J]. *Trends Ecol Evol*, 2000, **15** (2): 56-61
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin JM, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F. Ecological responses to recent climate change [J]. *Nature*, 2002, **416** (6879): 389-395
- Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe [J]. *Nature*, 1999, **397** (6721): 659-659
- Easterling DR, Meehl GA, Parmesan C, Changnon SA, Karl TR, Mearns LO. Climate extremes: observations, modeling, and impacts [J]. *Science*, 2000, **289** (5487): 2068-2074
- Batjes NH. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *Eur J Soil Sci*, 1996, **47** (2): 151-163
- Raich JW, Potter CS. Global patterns of carbon-dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1995, **9** (1): 23-36
- Crowther TW, Todd-Brown KEO, Rowe CW, Wieder WR, Carey JC, Machmuller MB, Snoek BL, Fang S, Zhou G, Allison SD, Blair JM, Bridgman SD, Burton AJ, Carrillo Y, Reich PB, Clark JS, Classen AT, Dijkstra FA, Elberling B, Emmett BA, Estiarte M, Frey SD, Guo J, Harte J, Jiang L, Johnson BR, Kroel-Dulay G, Larsen KS, Laudon H, Lavallee JM, Luo Y, Lupascu M, Ma LN, Marhan S, Michelsen A, Mohan J, Niu S, Pendall E, Penuelas J, Pfeifer-Meister L, Poll C, Reinsch S, Reynolds LL, Schmidt IK, Sistla S, Sokol NW, Templer PH, Treseder KK, Welker JM, Bradford MA. Quantifying global soil carbon losses in response to warming [J]. *Nature*, 2016, **540** (7631): 104
- 卫云燕, 尹华军, 刘庆, 黎云祥. 气候变暖背景下森林土壤碳循环研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2009, **15** (6): 888-894 [Wei YY, Yin HJ, Liu Q, Li YX. Advance in research of forest carbon cycling under climate warming [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2009, **15** (6): 888-894]
- Luo YQ, Wan SQ, Hui DF, Wallace LL. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, **413** (6856): 622-625
- Zhang W, Parker KM, Luo Y, Wan S, Wallace LL, Hu S. Soil microbial responses to experimental warming and clipping in a tallgrass prairie [J]. *Glob Chang Biol*, 2005, **11** (2): 266-277
- 智慧温室. 世界温室发展史[EB/OL]. (2019-06-21) [2020-09-26] https://www.sohu.com/a/322052660_567506. [Zhihui Greenhouse. Development history of greenhouse worldwide [EB/OL]. (2019-06-21)[2020-09-26]. https://www.sohu.com/a/322052660_567506
- Mandl RH, Weinstein LH, McCune DC, Keveny M. A cylindrical, open-top chamber for the exposure of plants to air pollutants in the field [J]. *J Environ Qual*, 1973, **2** (3): 371
- Zeiher CA, Brown PW, Silvertooth JC, Matumba N, Mitton N. The effect of night temperature on cotton reproductive development [R]//Cotton J. Silvertooth College of Agriculture Report, The University of Arizona, Tucson, 1994: 89-96
- Walker MD, Walker DA, Welker JM, Arft AM, Bardsley T, Brooks PD, Fahnestock JT, Jones MH, Losleben M, Parsons AN, Seastedt TR, Turner PL. Long-term experimental manipulation of winter snow regime and summer temperature in arctic and alpine tundra [J]. *Hydrol Process*, 1999, **13** (14-15): 2315-2330
- Vancleve K, Oechel WC, Hom JL. Response of black spruce (Picea mariana) ecosystems to soil temperature modification in interior Alaska [J]. *Can J For Res*, 1990, **20** (9): 1530-1535
- Harte J, Torn MS, Chang FR, Feifarek B, Kinzig AP, Shaw R, Shen K. Global warming and soil microclimate: results from a meadow-warming experiment [J]. *Ecol Appl*, 1995, **5** (1): 132-150
- IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change). Climate change 2001: The Scientific Basis. The Third Assessment Report of Working Group [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- Marion GM, Henry GHR, Freckman DW, Johnstone J, Jones G, Jones MH, Levesque E, Molau U, Molgaard P, Parsons AN, Svoboda J, Virginia RA. Open-top designs for manipulating field temperature in high-latitude ecosystems [J]. *Glob Chang Biol*, 1997, **3**: 20-32
- 牛书丽, 韩兴国, 马克平, 万师强. 全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置[J]. 植物生态学报, 2007, **31** (2): 94-103 [Niu SL, Han XG, Ma KP, Wan SQ. Field facilities in global warming and terrestrial ecosystem research [J]. *J Plant Ecol*, 2007, **31** (2): 262-271]
- Chapin FS, Shaver GR. Individualistic Growth Response of Tundra Plant Species to Environmental Manipulations in the Field [J]. *Ecology*, 1985, **66** (2): 564-576
- Wookey PA, Parsons AN, Welker JM, Potter JA, Callaghan TV, Lee JA, Press MC. Comparative responses of phenology and reproductive development to simulated environmental change in sub-arctic and high arctic plants [J]. *Oikos*, 1993, **67** (3): 490-502
- Coulson S, Hodkinson ID, Strathdee A, Bale JS, Block W, Worland MR, Webb NR. Simulated climate change: the interaction between vegetation type and microhabitat temperature at Ny Alesund, Svalbard [J]. *Polar Biol*, 1993, **13** (1): 67-70
- Henry GHR, Molau U. Tundra plants and climate change: The international tundra experiment (ITEX) [J]. *Glob Chang Biol*, 1997, **3**: 1-9
- Li N, Wang G, Yang Y, Gao Y, Liu G. Plant production, and carbon and nitrogen source pools, are strongly intensified by experimental warming in alpine ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, **43** (5): 942-953
- 宗宁, 石培礼. 模拟增温对西藏高原高寒草甸土壤供氮潜力的影响[J]. 生态学报, 2019, **39** (12): 4356-4365 [Zong N, Shi P. Effects of simulated warming on soil nitrogen supply potential in an alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (12): 4356-4365]
- Wahren CHA, Walker MD, Bret-Harte MS. Vegetation responses in Alaskan arctic tundra after 8 years of a summer warming and

- winter snow manipulation experiment [J]. *Glob Chang Biol*, 2005, **11** (4): 537-552
- 29 Schimel JP, Bilbrough C, Welker JA. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36** (2): 217-227
 - 30 Hinkel KM, Jr Hurd JK. Permafrost destabilization and thermokarst following snow fence installation, Barrow, Alaska, USA [J]. *Arct Antarct Alp Res*, 2006, **38** (4): 530-539
 - 31 Pomeroy JW, Brun E. Physical properties of snow. *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 45-126
 - 32 Walker DA, Billings WD, de Molenaar JG. Snow-vegetation interactions in tundra environments [M]//*Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
 - 33 Schuur EAG, McGuire AD, Schädel C, Grosse G, Harden JW, Hayes DJ, Hugelius G, Koven CD, Kuhry P, Lawrence DM, Natali SM, Olefeldt D, Romanovsky VE, Schaefer K, Turetsky MR, Treat CC, Vonk JE. Climate change and the permafrost carbon feedback [J]. *Nature*, 2015, **520** (7546): 171-179
 - 34 Natali SM, Schuur EAG, Trucco C, Pries CEH, Crummer KG, Lopez AFB. Effects of experimental warming of air, soil and permafrost on carbon balance in Alaskan tundra [J]. *Glob Chang Biol*, 2011, **17** (3): 1394-1407
 - 35 Nobrega S, Grogan P. Deeper snow enhances winter respiration from both plant-associated and bulk soil carbon pools in birch hummock tundra [J]. *Ecosystems*, 2007, **10** (3): 419-431
 - 36 Serreze MC, Walsh JE, Chapin FS, Osterkamp T, Dyurgerov M, Romanovsky V, Oechel WC, Morison J, Zhang T, Barry RG. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment [J]. *Clim Change*, 2000, **46** (1-2): 159-207
 - 37 Sturm M, Racine C, Tape K. Climate change - Increasing shrub abundance in the Arctic [J]. *Nature*, 2001, **411** (6837): 546-547
 - 38 Liston GE, McFadden JP, Sturm M, Pielke RA. Modelled changes in arctic tundra snow, energy and moisture fluxes due to increased shrubs [J]. *Glob Chang Biol*, 2002, **8** (1): 17-32
 - 39 Beier C, Emmett B, Gundersen P, Tietema A, Penuelas J, Estiarte M, Gordon C, Gorissen A, Llorens L, Roda F, Williams D. Novel approaches to study climate change effects on terrestrial ecosystems in the field: drought and passive nighttime warming [J]. *Ecosystems*, 2004, **7** (6): 583-597
 - 40 Luxmoore RJ, Hanson PJ, Beauchamp JJ, Joslin JD. Passive nighttime warming facility for forest ecosystem research [J]. *Tree Physiol*, 1998, **18** (8-9): 615-623
 - 41 Peterjohn WT, Melillo JM, Bowles FP, Steudler PA. Soil warming and trace gas fluxes: experimental design and preliminary flux results [J]. *Oecologia*, 1993, **93** (1): 18-24
 - 42 Melillo JM, Steudler PA, Aber JD, Newkirk K, Lux H, Bowles FP, Catricala C, Magill A, Ahrens T, Morrisseau S. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, **298** (5601): 2173-2176
 - 43 Hanson PJ, Childs KW, Wullschlegel SD, Riggs JS, Thomas WK, Todd DE, Warren JM. A method for experimental heating of intact soil profiles for application to climate change experiments [J]. *Glob Chang Biol*, 2011, **17** (2): 1083-1096
 - 44 谭凯炎, 房世波, 任三学, 张新时. 非对称性增温对农业生态系统影响研究进展[J]. *应用气象学报*, 2009 (5): 634-641 [Tan KY, Fang SB, Ren SX, Zhang XS. Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature in global warming and its effects on agriculture ecosystems [J]. *J Appl Meteorol Sci*, 2009 (5): 634-641]
 - 45 Saleska SR, Harte J, Torn MS. The effect of experimental ecosystem warming on CO₂ fluxes in a montane meadow [J]. *Glob Chang Biol*, 1999, **5** (2): 125-141
 - 46 Xu M, Peng F, You Q, Guo J, Tian X, Liu M, Xue X. Effects of warming and clipping on plant and soil properties of an alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *J Arid Land*, 2015, **7** (2): 189-204
 - 47 Wang Y, Liu S, Wang J, Chang SX, Luan J, Liu Y, Lu H, Liu X. Microbe-mediated attenuation of soil respiration in response to soil warming in a temperate oak forest [J]. *Sci Total Environ*, 2020: 711-718
 - 48 Zhu B, Cheng W. Constant and diurnally-varying temperature regimes lead to different temperature sensitivities of soil organic carbon decomposition [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, **43** (4): 866-869
 - 49 Weltzin JF, Pastor J, Harth C, Bridgman SD, Updegraff K, Chapin CT. Response of bog and fen plant communities to warming and water-table manipulations [J]. *Ecology*, 2000, **81** (12): 3464-3478
 - 50 马胜兰, 吴鹏飞. 增温对森林土壤有机碳含量的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, **32** (6): 1335-1339 [Ma SL, Wu PF. Effects of temperature increasing on soil organic carbon contents in forest ecosystems [J]. *SW Chin J Agric Sci*, 2019, **32** (6): 1335-1339]
 - 51 常晨晖, 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 殷睿, 熊莉, 肖洒. 利用海拔差异模拟增温对高山森林土壤溶解性有机碳和有机氮含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, **27** (3): 663-671 [Chang CH, Gou XL, Wu FZ, Yang WQ, Yin R, Xiong L, Xiao S. Effects of simulated warming on soil DOC and DON concentrations in the alpine forest of western Sichuan based on altitudinal gradient experiment [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27** (3): 663-671]
 - 52 黄锦学, 熊德成, 刘小飞, 杨智杰, 谢锦升, 杨玉盛. 增温对土壤有机碳矿化的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2017, **37** (1): 12-24 [Huang JX, Xiong DC, Liu XF, Yang ZJ, Xie JS, Yang YS. Effects of warming on soil organic carbon mineralization: a review [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (1): 12-24]
 - 53 Bridgman SD, Pastor J, Dewey B, Weltzin JF, Updegraff K. Rapid carbon response of peatlands to climate change [J]. *Ecology*, 2008, **89** (11): 3041-3048
 - 54 Sun S, Liu J, Chang SX. Temperature sensitivity of soil carbon and nitrogen mineralization: impacts of nitrogen species and land use type [J]. *Plant Soil*, 2013, **372** (1-2): 597-608
 - 55 Iglesias Briones MJ, Ostle NJ, McNamara NR, Poskitt J. Functional shifts of grassland soil communities in response to soil warming [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, **41** (2): 315-322
 - 56 Melillo JM, Frey SD, DeAngelis KM, Werner WJ, Bernard MJ, Bowles FP, Pold G, Knorr MA, Grandy AS. Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world [J]. *Science*, 2017, **358** (6359): 101-104

- 57 Ngao J, Epron D, Brechet C, Granier A. Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO₂ efflux in a beech forest using C-13-depleted litter [J]. *Glob Chang Biol*, 2005, **11** (10): 1768-1776
- 58 宋新章, 江洪, 张慧玲, 余树全, 周国模, 马元丹, Chang SX. 全球环境变化对森林凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2008 (9): 4414-4423 [Song XZ, Jiang H, Zhang HL, Yu SQ, Zhou GM, Ma YD, Chang SX. A review on the effects of global environment change on litter decomposition [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008 (9): 4414-4423]
- 59 Wood TE, Cavaleri MA, Reed SC. Tropical forest carbon balance in a warmer world: a critical review spanning microbial- to ecosystem-scale processes [J]. *Biol Rev*, 2012, **87** (4): 912-927
- 60 比买热木·阿不都艾海提, 艾克拜尔·伊拉洪, 热依汗古丽·阿布力孜, 艾力江·买买提, 帕丽扎提·艾合买提. 新疆典型草原黑钙土腐殖质组分的垂直变化规律[J]. 新疆农业科学, 2012, **49** (5): 954-960 [Bimairemu A, Aikebaier Y, Reyihanguli A, Ailijiang Maimaiti, Palizati Aihemaiti. Study on the vertical distribution regularity of soil humus contents in typical grassland chernozem soil in Xinjiang, China [J]. *Xinjiang Agric Sci*, 2012, **49** (5): 954-960]
- 61 Chen H, Yang G, Peng C, Zhang Y, Zhu D, Zhu Q, Hu J, Wang M, Zhan W, Zhu E, Bai Z, Li W, Wu N, Wang Y, Gao Y, Tian J, Kang X, Zhao X, Wu J. The carbon stock of alpine peatlands on the Qinghai-Tibetan Plateau during the Holocene and their future fate [J]. *Quat Sci Rev*, 2014, **95**: 151-158
- 62 Bridgham SD, Cadillo-Quiroz H, Keller JK, Zhuang Q. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales [J]. *Glob Chang Biol*, 2013, **19** (5): 1325-1346
- 63 Mitsch WJ, Bernal B, Nahlik AM, Mander U, Zhang L, Anderson CJ, Jorgensen SE, Brix H. Wetlands, carbon, and climate change [J]. *Landsc Ecol*, 2013, **28** (4): 583-597
- 64 Kirschke S, Bousquet P, Ciais P, Saunio M, Canadell JG, Dlugokencky EJ, Bergamaschi P, Bergmann D, Blake DR, Bruhwiler L, Cameron-Smith P, Castaldi S, Chevallier F, Feng L, Fraser A, Heimann M, Hodson EL, Houweling S, Josse B, Fraser PJ, Krummel PB, Lamarque J-F, Langenfelds RL, Le Quere C, Naik V, O'Doherty S, Palmer PI, Pison I, Plummer D, Poulter B, Prinn RG, Rigby M, Ringeval B, Santini M, Schmidt M, Shindell DT, Simpson IJ, Spahn R, Steele LP, Strode SA, Sudo K, Szopa S, van der Werf GR, Voulgarakis A, van Weele M, Weiss RF, Williams JE, Zeng G. Three decades of global methane sources and sinks [J]. *Nat Geosci*, 2013, **6** (10): 813-823
- 65 Dlugokencky EJ, Nisbet EG, Fisher R, Lowry D. Global atmospheric methane: budget, changes and dangers [J]. *Philos Trans R Soc A: Math Phys Eng Sci*, 2011, **369** (1943): 2058-2072
- 66 Bousquet P, Ringeval B, Pison I, Dlugokencky EJ, Brunke EG, Carouge C, Chevallier F, Fortems-Cheiney A, Frankenberg C, Hauglustaine DA, Krummel PB, Langenfelds RL, Ramonet M, Schmidt M, Steele LP, Szopa S, Yver C, Viovy N, Ciais P. Source attribution of the changes in atmospheric methane for 2006-2008 [J]. *Atmospheric Chem. Phys.*, 2011, **11** (8): 3689-3700
- 67 Nykanen H, Alm J, Lang K, Silvola J, Martikainen PJ. Emissions of CH₄, N₂O and CO₂ from a virgin fen and a fen drained for grassland in Finland [J]. *J Biogeogr*, 1995, **22** (2-3): 351-357
- 68 Laine J, Silvola J, Tolonen K, Alm J, Nykanen H, Vasander H, Sallantausta T, Savolainen I, Sinisalo J, Martikainen PJ. Effect of water-level drawdown on global climatic warming: northern peatlands [J]. *Ambio*, 1996, **25** (3): 179-184
- 69 Yu L, Wang H, Wang Y, Zhang Z, Chen L, Liang N, He J-S. Temporal variation in soil respiration and its sensitivity to temperature along a hydrological gradient in an alpine wetland of the Tibetan Plateau [J]. *Agric For Meteorol*, 2020: 282-290
- 70 Davenport JM, Fishback L, Hossack BR. Effects of experimental warming and nutrient enrichment on wetland communities at the Arctic's edge [J]. *Hydrobiologia*, 2020, **847**: 3677-3690
- 71 Pan Y, Birdsey RA, Phillips OL, Jackson RB. The structure, distribution, and biomass of the world's forests [J]. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2013, **44** (1): 593
- 72 Jobbagy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecol Appl*, 2000, **10** (2): 423-436
- 73 Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, Ciais P, Jung M, Carvalhais N, Roedenbeck C, Arain MA, Baldocchi D, Bonan GB, Bondeau A, Cescatti A, Lasslop G, Lindroth A, Lomas M, Luyssaert S, Margolis H, Oleson KW, Rouspard O, Veenendaal E, Viovy N, Williams C, Woodward FI, Papale D. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate [J]. *Science*, 2010, **329** (5993): 834-838
- 74 IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change). Climate change 2007: The physical science basis. The Fourth Assessment Report of Working Group [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 75 Mora C, Frazier AG, Longman RJ, Dacks RS, Walton MM, Tong EJ, Sanchez JJ, Kaiser LR, Stender YO, Anderson JM, Ambrosino CM, Fernandez-Silva I, Giuseffi LM, Giambelluca TW. The projected timing of climate departure from recent variability [J]. *Nature*, 2013, **502** (7470): 183
- 76 Wright SJ, Muller-Landau HC, Schipper J. The future of tropical species on a warmer planet [J]. *Conserv Biol*, 2009, **23** (6): 1418-1426
- 77 Heinrich Krause G, Cheesman AW, Winter K, Krause B, Virgo A. Thermal tolerance, net CO₂ exchange and growth of a tropical tree species, *Ficus insipida*, cultivated at elevated daytime and nighttime temperatures [J]. *J Plant Physiol*, 2013, **170** (9): 822-827
- 78 Quan X, Wang N, Wang C. Thermal acclimation of leaf dark respiration of *Larix gmelinii*: A latitudinal transplant experiment [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 140634
- 79 Wu T, Thomas TD, Li X, Liu SZ, Chu GW, Zhou GY, Li YL, Zheng MH, Meng Z, Liu JX. Long-term effects of 7-year warming experiment in the field on leaf hydraulic and economic traits of subtropical tree species [J]. *Glob Chang Biol*, 2020: 153-155
- 80 Park HJ, Lim SS, Yang HI, Lee KS, Kwak JH, Park SI, Kim HY, Lee SM, Choi WJ. Nitrogen effects on quantity, chemistry, and decomposability of *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* litters under elevated CO₂ and warming [J]. *For Ecol Manag*, 2020, **473**: 118315
- 81 Norby RJ, Luo YQ. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO₂ and global warming in a multi-factor world [J].

- New Phytol*, 2004, **162** (2): 281-293
- 82 Arft AM, Walker MD, Gurevitch J, Alatalo JM, Bret-Harte MS, Dale M, Diemer M, Gugerli F, Henry GHR, Jones MH, Hollister RD, Jonsdottir IS, Laine K, Levesque E, Marion GM, Molau U, Molgaard P, Nordenhall U, Raszhivin V, Robinson CH, Starr G, Stenstrom A, Stenstrom M, Totland O, Turner PL, Walker LJ, Webber PJ, Welker JM, Wookey PA. Responses of tundra plants to experimental warming: Meta-analysis of the international tundra experiment [J]. *Ecol Monogr*, 1999, **69** (4): 491-511
 - 83 Walker MD, Wahren CH, Hollister RD, Henry GHR, Ahlquist LE, Alatalo JM, Bret-Harte MS, Calef MP, Callaghan TV, Carroll AB, Epstein HE, Jonsdottir IS, Klein JA, Magnusson B, Molau U, Oberbauer SF, Rewa SP, Robinson CH, Shaver GR, Suding KN, Thompson CC, Tolvanen A, Totland O, Turner PL, Tweedie CE, Webber PJ, Wookey PA. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome [J]. *PNAS*, 2006, **103** (5): 1342-1346
 - 84 Hopple AM, Wilson RM, Kolton M, Zalman CA, Chanton JP, Kostka J, Hanson PJ, Keller JK, Bridgman SD. Massive peatland carbon banks vulnerable to rising temperatures [J]. *Nat Commun*, 2020, **11** (1): 1-7
 - 85 Hollister RD, Webber PJ, Tweedie CE. The response of Alaskan arctic tundra to experimental warming: differences between short- and long-term responses [J]. *Glob Chang Biol*, 2005, **11** (4): 525-536
 - 86 Wang J, Zhang Q, Song J, Ru J, Zhou Z, Xia J, Dukes JS, Wan S. Nighttime warming enhances ecosystem carbon-use efficiency in a temperate steppe [J]. *Funct Ecol*, 2020: doi org/10.1111/1365-2435.13579
 - 87 Luo DL, Jin HJ, He RX, Wang XF, Muskett RR, Marchenko SS, Romanovsky VE. Characteristics of water-heat exchanges and inconsistent surface temperature changes at an elevational permafrost site on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2018, **123** (18): 10404-10422
 - 88 Dufresne JL, Foujols MA, Denvil S, Caubel A, Marti O, Aumont O, Balkanski Y, Bekki S, Bellenger H, Benshila R, Bony S, Bopp L, Braconnot P, Brockmann P, Cadule P, Cheruy F, Codron F, Cozic A, Cugnet D, de Noblet N, Duvel JP, Ethe C, Fairhead L, Fichefet T, Flavoni S, Friedlingstein P, Grandpeix JY, Guez L, Guilyardi E, Hauglustaine D, Hourdin F, Idelkadi A, Ghattas J, Joussaume S, Kageyama M, Krinner G, Labetoulle S, Lahellec A, Lefebvre MP, Lefevre F, Levy C, Li ZX, Lloyd J, Lott F, Madec G, Mancip M, Marchand M, Masson S, Meurdesoif Y, Mignot J, Musat I, Parouty S, Polcher J, Rio C, Schulz M, Swingedouw D, Szopa S, Talandier C, Terray P, Viovy N, Vuichard N. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5 [J]. *Clim Dyn*, 2013, **40** (9-10): 2123-2165
 - 89 Seferian R, Nabat P, Michou M, Saint-Martin D, Voldoire A, Colin J, Decharme B, Delire C, Berthet S, Chevallier M, Senesi S, Franchisteguy L, Vial J, Mallet M, Joetzjer E, Geoffroy O, Gueremy JF, Moine MP, Msadek R, Ribes A, Rocher M, Roehrig R, Salas-y-Melia D, Sanchez E, Terray L, Valcke S, Waldman R, Aumont O, Bopp L, Deshayes J, Ethe C, Madec G. Evaluation of cnrm earth system model, cnrm-esm2-1: role of earth system processes in present-day and future climate [J]. *J Adv Model Earth Syst*, 2019, **11** (12): 4182-4227
 - 90 Cavaleri MA, Reed SC, Smith WK, Wood TE. Urgent need for warming experiments in tropical forests [J]. *Glob Chang Biol*, 2015, **21** (6): 2111-2121
 - 91 Moreno-Mateos D, Power ME, Comin FA, Yockteng R. Structural and functional loss in restored wetland ecosystems [J]. *PLOS Biol*, 2012, **10** (1): e1001247
 - 92 Jorgenson MT, Racine CH, Walters JC, Osterkamp TE. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska [J]. *Clim Change*, 2001, **48** (4): 551-579
 - 93 Schuur EAG, McGuire AD, Schaedel C, Grosse G, Harden JW, Hayes DJ, Hugelius G, Koven CD, Kuhry P, Lawrence DM, Natali SM, Olefeldt D, Romanovsky VE, Schaefer K, Turetsky MR, Treat CC, Vonk JE. Climate change and the permafrost carbon feedback [J]. *Nature*, 2015, **520** (7546): 171-179
 - 94 Harrison RB, Footen PW, Strahm BD. Deep soil horizons: Contribution and importance to soil carbon pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change [J]. *For Sci*, 2011, **57** (1): 67-76
 - 95 Jia J, Cao Z, Liu C, Zhang Z, Lin L, Wang Y, Haghipour N, Wacker L, Bao H, Dittmar T, Simpson MJ, Yang H, Crowther TW, Eglinton TI, He J-S, Feng X. Climate warming alters subsoil but not topsoil carbon dynamics in alpine grassland [J]. *Glob Chang Biol*, 2019, **25** (12): 4383-4393
 - 96 Aerts R. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes [J]. *J Ecol*, 2006, **94** (4): 713-724
 - 97 Pausas JG. Litter fall and litter decomposition in *Pinus sylvestris* forests of the eastern Pyrenees [J]. *J Veg Sci*, 1997, **8** (5): 643-650
 - 98 Moore TR, Trofymow JA, Taylor B, Prescott C, Camire C, Duschene L, Fyles J, Kozak L, Kranabetter M, Morrison I, Siltanen M, Smith S, Titus B, Visser S, Wein R, Zoltai S. Litter decomposition rates in Canadian forests [J]. *Glob Chang Biol*, 1999, **5** (1): 75-82
 - 99 张晓宁, 刘振亚, 李丽萍, 王行, 张贇, 孙梅, 肖德荣. 大气增温对滇西北高原典型湿地湖滨带优势植物凋落物质量衰减的影响[J]. *生态学报*, 2017, **37** (23): 7811-7820 [Zhang XN, Liu ZY, Li LP, Wang H, Zhang Y, Sun M, Xiao DR. Effect of experimental warming on the decomposition of litter from dominant lakeside plants in a typical wetland of northwestern Yunnan Plateau, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (23): 7811-7820]
 - 100 O'Neill EG, Johnson D W, Ledford J, Todd DE. Acute seasonal drought does not permanently alter mass loss and nitrogen dynamics during decomposition of red maple (*Acer rubrum* L.) litter [J]. *Glob Chang Biol*, 2002, **9** (1): 117-123