

## 中国气候变化的植物信号和生态证据

袁婧薇<sup>1,2,3</sup>, 倪健<sup>1</sup>

(1 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

**摘要:** 全球平均气温上升、降水格局变化、极端天气事件发生的频率和强度增大等气候变化现象已经对陆地生态系统产生了影响,物种、群落和生态系统响应于气候变化而发生的改变,可以作为气候变化的间接生物学和生态学证据,对未来气候变化的影响评价有重要的价值,尤其是对减缓和适应全球气候变化的“地球系统科学”研究以及可持续生态系统管理与发展对策的制订,具有重要的意义。在国际气候变化的生物学证据研究的大背景下,总结了中国陆地生态系统响应过去气候变化的植物学信号和生态学证据:(1)物种水平:气候变暖导致中国 33°N 以北大部分地区植物春季物候期包括萌芽、展叶、开花期等显著提前,植被生长季延长;(2)群落水平:群落物种组成和分布发生改变,主要表现在长白山等高山群落交错带物种组成和林线位置的变化以及青藏高原高寒草甸的退化;(3)生态系统水平:全国总体植被盖度增加,植被活动加强,生产力增加;北方和西部地区农业植被的耕作制度、种植结构、耕种面积和产量发生变化,东北地区水稻种植面积和产量增加,但全国大部分地区农作物产量和温度呈负相关,这将威胁到未来的粮食安全。

**关键词:** 气候变化 物候期提前 生长季延长 物种替代 地理分布迁移 林线上移 净第一性生产力增加

**中图分类号:** P467 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6060(2007)04-0465-09(465~473)

观测记录证实,在过去的 100 年间,随着全球大气中 CO<sub>2</sub> (从工业革命前的 280 ppm 增加到 2000 年的 367 ppm)、甲烷和其它温室气体浓度的升高,地球表面平均温度上升了 0.6 ± 0.2 °C,降水和云量格局发生了改变,极端天气事件发生的频度和强度增加,海水变暖,全球海平面上升,冰川退缩,大型湖泊正在消失<sup>[1]</sup>。而这些变化还在持续发生,如果在未来 CO<sub>2</sub> 浓度加倍的情况下,大气环流模式的模拟和预测表明:到 2100 年全球平均温度将增加 1.5 ~ 5.8 °C<sup>[1]</sup>。

全球变暖已经是一个不争的事实!包括大气成分改变、气候变化和土地利用格局改变的全球变化对陆地和海洋生物圈的影响不断增加,一旦突破生态系统的忍耐阈值,将会对人类生存环境和可持续发展产生深远的影响。虽然众多控制实验和全球变化模型对全球变化的影响和生物响应及其未来变

化趋势进行了大量的实验和模拟研究,但其中存在很多的不确定性,因此,掌握过去几十年至百年间气候变化对生物圈不同层次的影响,揭示生物个体、种群和群落以及生态系统响应全球变暖所实际发生的变化,对于我们改进实验和模型以及正确和更加精确地预测和评价未来气候变化对生态系统的影响,推进“地球系统科学”(Earth System Science)的发展,具有重要的理论和现实意义。全球变化是有区域差异的,在全球变暖的大背景下,不同地区的气候变化又呈现出地域的独特性,不同生态系统类型的响应也因此而存在差异,揭示全球变化的区域影响和响应,也是当前全球变化研究的一个极其重要的方面。

那么,在全球生态系统响应气候变化的大背景下,中国陆地生态系统的变化特征如何?是否有其全球共性和区域独特性?我们通过搜集过去几十年

收稿日期: 2006-10-16; 修订日期: 2007-01-19

基金项目: 中国气象局气候变化专项 (CCSF2006-33)

作者简介: 袁婧薇 (1983-), 女, 湖南省资兴市人, 研究方向: 全球变化生态学. Email: yuanjw@ibcas.ac.cn

通讯作者: 倪健, 博士, 博导, 主要研究方向为全球变化生态学. Email: jni@ibcas.ac.cn

来气候变化在中国留下的大量植物信号和生态证据(不包括任何控制实验和模拟结果),从植物物候、物种的分布和范围以及生态系统变化等诸方面分析气候变化的真实影响,并对这些结果进行综合集成,以期利用观测到的证据和气候变化留下的“指纹”,为进一步研究植被响应的过程和机理提供信息,达到准确评估气候变化对中国生态系统影响的目的。

需要说明的是,全文所涉及到的研究对象仅限于植物,没有涉及到动物及其群落和生态系统;由于降水的时空变化和对生物的影响比温度更复杂,难以清晰判断其对植物的影响后果,因此气候变量在此主要指温度。而且研究表明,气候变化的最终结果将导致地球上物种减少或消失以及生物多样性的变化,这不仅与气候变化有关,也与人类活动和土地利用密切相关[参看政府间气候变化专门委员会(IPCC)和千年生态系统评估(MA)的总结和论述:www.ipcc.ch;www.maveh.org];除了气候变化之外,CO<sub>2</sub>的增肥效应、大气氮沉降的增加、人类活动如放牧管理、城市化等也会影响到植物物候和生产力的变化。为了剔除伪信号和伪证据,我们选用的植物信号和生态证据至少满足两条标准:(1)植物的响应结果和气候变化之间的相关关系通过显著性检验,或者分析证明气候变量是主导因子;(2)原始数据的时间跨度尽可能地长,一般应在5-10年以上。

## 1 物 候

全球陆地和海洋生态系统响应过去的气候变化已经发生了不同程度的改变,其中一个重要的方面是动植物物候期的变化,如植物的展叶期提前和叶片变色、脱落期推迟<sup>[2-5]</sup>、生长季节延长<sup>[6-7]</sup>、花期提前<sup>[8-9]</sup>、动物中鸟类<sup>[10]</sup>产卵时间提前、两栖动物繁殖提前<sup>[11]</sup>、部分鸟类和哺乳类迁徙时间改变等<sup>[12-13]</sup>。多时间和空间尺度的遥感数据(主要是1982-1999年的归一化差异植被指数NDVI)分析也证实了全球不同地区植被生长季的延长,尤其是北半球中、高纬度地区,如欧洲和亚洲延长了多达18天,北美延长了12天<sup>[14]</sup>。这些证据都揭示出在过去的20年里动植物种的物候期发生了显著的改变,但改变的程度因物种、地点和调查时间的长短而异<sup>[15-17]</sup>。

但是这些研究通常都集中在一个特定的区域或只检验了有限的物种,Parnesan<sup>[18]</sup>和Root<sup>[19]</sup>分别采用不同的集群分析(meta-analyses)方法,试图检验气候变化导致的物候和物种分布变化在全球尺度上的一致性。但是受发表的文献资料的限制,从他们搜集的数据来看,绝大多数都来源于欧洲和北美,极少数涉及到亚洲,关于亚洲的数据也仅限于日本少数物种,这样的结果势必有所偏差。

通过文献资料收集分析发现,我国春季物候(芽萌动期、展叶期、始花期)提前的地区(图1)主要集中在东北、华北以及长江下游等地区,变化显著的物种包括38种木本植物<sup>[20-25]</sup>和6种草本植物<sup>[26-28]</sup>,这均与这些地区近几十年气温的上升有良好的对应关系,但提早程度存在地区差异;相反,秦岭以南广大地区、西南东部、长江中游等地区有春季物候推迟的现象。这与北方冬季(0.5~0.7℃/10a)和春季(0.2~0.3℃/10a)升温明显,而长江流域春季以-0.13℃/10a的速率降温相一致<sup>[29]</sup>。全球物候数据分析也表明,气候变冷会导致动植物物种物候期的推迟<sup>[18]</sup>。

北京是全国物候观测资料最丰富的地区之一,春季物候的指示种-山桃(*Prunus davidina*)始花的物候数据可以追溯到1850年,山桃始花日期(1952-2002年统计结果)在1988年以前呈不规则波动状况,1988年之后平均比1988年之前提前了9.63天;1990-2000年比过去140年提前了8.8天<sup>[25]</sup>。而苏州东山地区随着气候的变暖秋季首日明显偏晚,秋季开花的银桂(*Osmanthus fragrans*)初花期也推迟明显,1999-2003年银桂初花期平均比1956-1984年晚7~8天<sup>[30]</sup>。

地面物候观测具有较高的时间分辨率,并可提供单个物种的详细信息,但是空间覆盖度差,由卫星获得的物候信息恰好可以弥补这一不足。众多利用NDVI遥感数据的分析也证实了全国<sup>[31]</sup>,尤其是东部和季节性明显的温带地区(30°N以北)植物生长季的延长<sup>[32-34]</sup>;1982-1999年温带植被生长季每年平均延长了1.16天(春季叶片变绿提前0.79天、秋季休眠落叶推迟0.37天),这比欧洲(1天/年)和北美(0.7天/年)的变化幅度大<sup>[14]</sup>。

春季物候期的提前与生长季的延长应该是一致的<sup>[35]</sup>,但是贵阳和桂林地区春季温度降低,春季物候推迟,生长季却延长了,这是由于夏季增温和秋季

结束的推迟影响了生长季的延长<sup>[21]</sup>。内蒙古锡林郭勒典型草原的优势种羊草 (*Leymus chinensis*) 在 1985 - 1993 年也响应春季变暖而展叶期提前,但是其生长季呈缩短趋势,可能与生长期间的风速减弱相关<sup>[27]</sup>。

值得注意的是,温度变化和物候期的相互作用有一定的时滞,物候期的提前与推迟对温度上升与下降的响应是非线性的<sup>[20]</sup>。而且,物候变化显示的部分气候信息是过去若干季节的总和,这在一定程度上影响了运用物候证据反映气候变化的精确度。

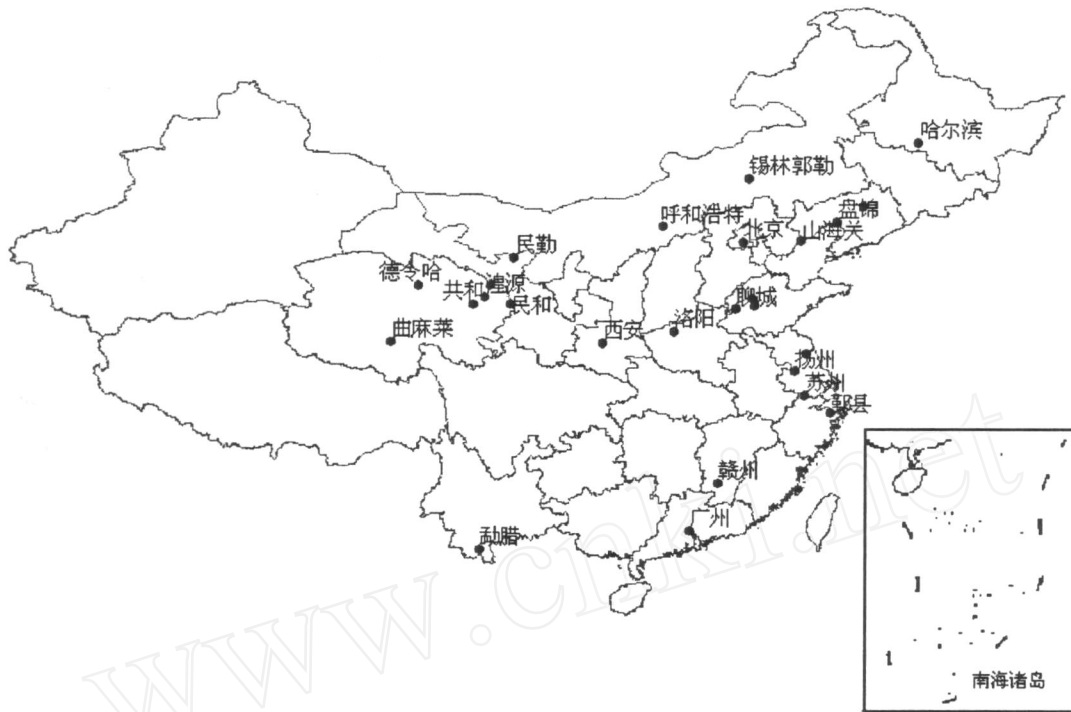


图 1 春季物候显著提前的站点分布图

Fig 1 Map of sites with advanced spring phenology

## 2 群落组成和结构

气候变化影响的另一个重要方面是物种和生态系统分布格局的改变,比如蝴蝶<sup>[36]</sup>、鸟类<sup>[37]</sup>和许多动物分布范围北移<sup>[38]</sup>,北半球高纬度地区苔原(阿拉斯加北部、加拿大、斯堪的纳维亚和俄罗斯部分地区)灌木扩张<sup>[39-40]</sup>,阿尔卑斯山植物分布上移<sup>[41]</sup>,极地林线植物生长变化<sup>[16,42]</sup>、高山林线上升<sup>[16,43]</sup>及地中海和北美山区植被分布上移及替代<sup>[44-45]</sup>等。在中国,气候变化影响植物群落的物种组成和多样性,从而可能改变群落的结构和功能特征,这在不同植被类型间的过渡带或交错带表现得比较敏感(表 1)。

高山林线是气候变化的最敏感响应区之一。在云南西北部的干旱河谷地区,通过对 1868 - 1949 年间有关干旱河谷植被的历史资料和 10 幅清晰反映干旱河谷植被范围和状况的照片,与 2001 - 2005 年间相同地区和范围的植被现状以及 10 幅与上述照

片取景完全相同的重复照片的比较,发现虽然植被的总体格局变化不大,但仍因气候变暖而引起冰川退缩,灌木种类入侵到高山草甸,林线海拔增加,大约每 10 年上移 8.5 m<sup>[46]</sup>。

林线位置的变化与气候变化直接相关,但这种变化主要在长时间尺度上才能表现出来;在最近 100 年的短时间尺度上,林线位置的变化虽然不能清晰地体现出来,但林线树木密度的增加却已有清楚地显示。例如在黑龙江张广才岭南坡老秃顶子地区<sup>[51]</sup>、长白山北坡的岳桦 - 苔原过渡带<sup>[48]</sup>、五台山高山带<sup>[52]</sup>,林线结构特征产生了很大的变化,林线上部更新增加,树木种随着气候变暖有一种整体向上迁移的趋势。长白山 U 型峡谷<sup>[49]</sup>也有类似的现象,岳桦林和草地向 U 型谷两侧的山坡继续向上延伸,最前沿部位延伸出近 30 m 左右。

在高山生态系统中,除林线的变化外,其他群落交替处群落组成和结构也发生了显著的变化。在长

白山海拔 450 - 750 m 山坡下部的落叶松 (*Larix olgensis*) 和白桦 (*Betula platyphlla*) - 沼泽交错带, 气候变暖加强了沼泽水分的蒸发过程, 导致生境趋于旱化, 为森林树种的侵入创造了条件, 森林建群种分别在 1945 - 1970 年和 1985 - 1990 年侵入沼泽, 森林沼泽交错群落随着气候变暖正在向沼泽推进<sup>[50]</sup>。1972 - 1995 年来大兴安岭北部地区气候趋于变暖, 低海拔地带蒙古栎呈现明显的进展趋势, 兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 则趋于衰退, 演替趋于以蒙古栎为优势种的阔叶林, 海拔较高处蒙古栎更新不良, 演替趋于兴安落叶松和几种阔叶树的混生林<sup>[47]</sup>。

表 1 气候变化引起的植物种和群落变化

Tab 1 Changes of plant species and communities responding to climate change

地点	观察到的变化	资料来源 (参考文献)
云南西北部干旱河谷地区	灌木入侵高山草甸, 林线上移	46
大兴安岭北部	阔叶树种蒙古栎 ( <i>Quercus mongolica</i> ) 呈进展趋势	47
长白山北坡 1900 - 2150 m 处	岳桦 ( <i>Betula emani</i> ) 入侵苔原	48, 49
长白山 450 - 750 m 处	森林树种入侵沼泽	50
黑龙江张广才岭老秃顶子	林线向山顶裸地上升	51
五台山	木本植物和高山草甸植物分布上移	52
内蒙古典型草原	最优建群种羊草 ( <i>Leymus chinensis</i> ) 重要值和生产力降低	53
内蒙古典型草原	糙隐子草 ( <i>Cleistogenes squarrosa</i> ) 生物量增加	54
羌塘盆地	高寒草甸植被过渡到高寒草原植被	55
青藏公路 124 道班	群落取代	56
若尔盖地区	沼泽植被转变为草甸, 阳坡草甸向草原转变	57
青海海北	牧草产量下降, 沼泽化草甸消失, 中生性禾草占主导地位	58
青海中南部青南高原	蒿草 ( <i>Kobresia</i> ) 生长高度下降, 产量减少	59

干旱 - 半干旱区也是响应气候变化的敏感、脆弱地区。在内蒙古典型草原<sup>[53-54]</sup>、青藏高原腹地的羌塘盆地<sup>[55]</sup>、青藏公路 124 道班<sup>[56]</sup>、青藏高原多年冻土区东部边缘地带的若尔盖<sup>[57]</sup>、青海省海北生态站<sup>[58]</sup>、青海省中南部的青南高原<sup>[59]</sup>均发现建群种的重要值和生物量下降, 群落结构和类型发生改变。近 20 年以来, 中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站所在地区以冬季增温为标志的气候变暖加剧了春季干旱, 使得典型草原的最优建群种羊草的重要值和生产力有所下降<sup>[53]</sup>, 而作为次优建群种

的大针茅 (*Stipa grandis*) 重要值和地上初级生产力表现为某种程度上升, 这种种群的彼此消长可能造成物种的替代, 进而使得草原群落的结构和功能发生改变。在青藏高原, 羌塘盆地中较湿润的高寒草甸植被逐渐过渡为较干旱的高寒草原植被; 青藏公路 124 道班湿中生的华扁穗草 (*Blysmus sinocompressus*) 群落在气候变暖、冻土消融的过程中, 被中生型的矮蒿草 (*Kobresia humilis*) 群落替代, 而矮蒿草群落为高山嵩草 (*K. pygmaea*) 群落取代, 高山嵩草则进一步干旱化演变为沙生苔草 (*Carex praeclear*) 群落<sup>[56]</sup>; 若尔盖地区多年冻土的退化, 沼泽湿地变干、面积缩小, 土壤的结构和营养成分发生变化, 导致沼泽植被转变为草甸, 一些阳坡草甸向草原转变; 青海海北站高寒矮蒿草草甸牧草年产量下降, 西部的沼泽化草甸因地下水位下降, 中生多年生的禾草类占据了主导地位, 原来的沼泽化草甸不复存在<sup>[57]</sup>。

### 3 生态系统分布格局与生产力

植被生长季节的延长、植物生长的增加必然导致全球植被生产力的增加<sup>[60-61]</sup>, 这也是生态系统响应气候变化的另一明显证据。1982 - 1999 年我国大多数地区的 NDVI 都呈现不同程度的增加趋势, 与 20 世纪 80 年代初相比, 90 年代末有植被覆盖地区的面积 (NDVI > 0.1) 增加 3.5%, 植被稀少地区 (NDVI < 0.1) 的面积下降了 18.1%, 全国年平均则增加了 7.4%, 表明植被活动在增强<sup>[62-64]</sup>; 大部分地区 (研究区面积的 86%) 净第一性生产力 (Net Primary Production, NPP) 都有所增长, 年平均增长率为 1.03%<sup>[64]</sup>; 但 NDVI 变化趋势不仅显示出较大的空间异质性: 东部沿海地区呈下降趋势或变化不明显, 农业产区和西部地区增加显著<sup>[62]</sup>, 也存在植被类型和季节的差异<sup>[62-65]</sup>, 这种空间和时间异质性是由于城市化过程、农业生产活动、区域气候特征以及植被对气候变化的区域响应等综合因素作用的结果<sup>[62]</sup>。研究表明, 生长季延长一天, 美国东部落叶林平均净生产力增加 0.5%<sup>[66]</sup>, 生长季节的延长和生长加速是我国 NDVI 增加的主要原因, 而温度上升和夏季降水量的增加以及农业活动的加强可能是其主要的驱动因子<sup>[62-64]</sup>。

区域 NDVI 响应气候变暖的长期变化也证明我国不同地区不同程度的植被盖度增加、生产力增加

趋势,植被的总体生长状况变好,如新疆天山北坡<sup>[67]</sup>、北方荒漠<sup>[68]</sup>、温带草原<sup>[69]</sup>、温带草原与落叶和针叶林<sup>[70]</sup>、锡林郭勒典型草原<sup>[71]</sup>、呼伦贝尔草原<sup>[72]</sup>、长江流域<sup>[73]</sup>和青藏高原<sup>[74]</sup>。但也有部分地区例外,如长江黄河源区高寒植被覆盖总体保持原状,局部继续退化,主要是该地区冻土退化影响地温进而对植被的生长产生影响<sup>[75]</sup>。

## 4 农业植被

气候变化对农业植被的影响意义重大,因为涉及到粮食产量和粮食安全,是与人类的生存和社会的可持续发展息息相关的。气温的上升会改变果树和农作物的物候,变化趋势和自然植被基本一致,但在德国升温引起的作物物候变化还不足以对产量造成显著的影响<sup>[76]</sup>,在美国持续的升温却已经影响到了大豆和玉米的产量<sup>[77]</sup>。显然,持续升温对农作物生长发育及产量的影响因时因地而异。为了准确评估气候变化对我国农作物的影响,揭示地域差异,我们选择了种植制度典型、地域代表性强的哈尔滨、天水、郑州、长沙和绍兴进行重点分析,分别代表东北、西北、中部、南部和东部地区。

哈尔滨(1981-2000年)玉米种植期、开花期显著提前,成熟期延迟,产量明显上升<sup>[78]</sup>。气候变暖也有利于喜温作物水稻的种植,黑龙江的水稻种植面积呈现出随气温增加而增加的趋势,整个东北地区水稻单产也有大幅度提高<sup>[79]</sup>。在其他地区,温度和产量呈现负相关,天水水稻、小麦产量均有减少<sup>[78]</sup>,但是增温明显的西北地区有利于品质优良的冬小麦种植界限西扩,减少相对低产低品的春小麦种植面积。郑州小麦和玉米产量也有所减少。过去20年长沙温度呈下降趋势,水稻产量反而有所增加<sup>[78]</sup>。浙江绍兴近20年来气候的变化已经降低了早稻结实率<sup>[80]</sup>。可见,除以哈尔滨为代表的东北地区外,温度大多与产量呈负相关,这有可能对未来粮食安全造成一定威胁。

现有的农作物耕作制度、种植结构、耕种面积和产量随着气候变化也发生了改变,但是影响单产的其他因素如耕作技术、施肥、病虫害等使得其与气候变化的关系更为复杂。这就迫切地需要集成不同地区更多的作物产量和气候数据,更好地预测气候变化和管理措施对未来粮食产量的影响<sup>[77]</sup>。

## 5 讨论与展望

通过上述总结可以看出,在我国植物对最近几十年气候变化的响应已经不是个别现象,全国范围内、各个层次水平上的植被变化均证明气候变化已经产生了很大的影响。物候期提前、生长季节延长的地区涵盖了东北、华北、西北及长江下游,涉及到的物种除了大量木本植物,还包括一些报道较少的草本植物;一些生态过渡带地区的植物群落组成和结构改变,部分物种替代,包括发生在高山地区的阔叶树种取代落叶针叶树种,林木向苔原入侵,灌木入侵到高山草甸以及植物群落内部优势种的变化;全国总体植被盖度增加,植被活动加强,生产力增加。喜温的水稻和玉米种植面积有所扩大,冬小麦的发育期提前,对产量的影响因地而异。

但是同欧洲和北美相比,我国的气候变化植物信号和生态证据表现出更强的空间异质性和复杂性。春季物候期大致以33°N为界,北方大部分地区有显著提前的趋势,而南方地区增温不明显,甚至在过去几十年有降温的趋势,春季物候推迟。而且由于地形、气候要素中其它因子的差异等原因,春季物候的提早并不总是导致生长季的延长。再如,青藏高原和青海省多处均有高寒草甸和沼泽面积减少,湿中生植物种类被中生或沙生的植物种取代的现象,致使三江源地区植被活动在全国整体增强的大背景下却表现出减弱的趋势,这主要是由于冻土的退化而造成的影响。而在内蒙古典型草原,植被覆盖和生产力却在增加。

已有的气候变化植物学和生态学证据大多数来自植被过渡带,也就是气候变化的敏感带地区,主要集中在青藏高原、西北内陆、内蒙古和东北地区,植物和植被对气候变暖的响应较早、较敏感。这些证据也可反映出植被面临的危险程度,多种证据均表明青藏高原的高寒草甸、青海的沼泽化草甸由于气候的暖干化,正面临着生存危机,危险性最高;东北地区的大兴安岭、长白山等地局部均有物种扩张、林线上升的现象,水稻面积和产量均有上升,在目前来看是一种正面的影响。

同时还需要注意,气候变化的同时伴随着强烈的人类活动干扰,尤其是在东部和北方地区,以及非气候因子的影响,如CO<sub>2</sub>的增肥效应、大气氮沉降等,这些变化在某种程度上可能会掩盖气候变化的

影响,多因子作用下植物的响应方式和变化方向将更加复杂。

同国外相比,我们的研究起步较晚,而且由于缺少长期的实地观测资料,使得许多研究还非常的不完善,大多数是站点的个例研究,还没有统一标准下的全国集成和整合,这需要众多科学工作者的长期、艰苦努力来逐步实现这一目标。同时,如何利用已经发生的植被变化来预测和评价未来的植被变化,以及如何将已经发生的变化纳入到全球变化模型或评价体系中,以更加精确地评估气候变化的长期影响,都是将来研究的难题。

### 参考文献 (References)

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al Climate Change 2001: The Scientific Basis [A] Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C] Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Chmielewski F - M, Rötter T. Response of tree phenology to climate change across Europe [J] Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108: 101 - 112.
- [3] Menzel A, Estrella N, Fabian P. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996 [J] Global Change Biology, 2001, 7: 657 - 666.
- [4] Matsumoto K, Ohta T, Iwasawa M, et al Climate change and extension of the *Ginkgo biloba* L. growing season in Japan [J] Global Change Biology, 2003, 9: 1634 - 1642.
- [5] Gordo O, Sanz J J. Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality [J] Oecologia, 2005, 146: 484 - 495.
- [6] Linderholm H W. Growing season changes in the last century [J] Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137: 1 - 14.
- [7] Schwartz M D, Ahas R, Aasa A. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere [J] Global Change Biology, 2006, 12: 343 - 351.
- [8] Abu-Arab M S, Peterson P M, Shetler S G, et al Earlier plant flowering in spring as a response to global warming in the Washington DC area [J] Biodiversity and Conservation, 2001, 10: 597 - 612.
- [9] Fitter A H, Fitter R S R. Rapid change in flowering time in British plants [J] Science, 2002, 296: 1689 - 1691.
- [10] Crick H Q P, Dudley C, Glue D E, et al UK birds are laying eggs earlier [J] Nature, 1997, 388: 526.
- [11] Beebe T. Amphibian breeding and climate [J] Nature, 1995, 374: 219 - 220.
- [12] Bradley N L, Leopold A C, Ross J, et al Phenological changes reflect climate change in Wisconsin [J] Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 1999, 96: 9701 - 9704.
- [13] Jonzán N, Lindén A, Ergon T, et al Rapid advance of spring arrival dates in long-distance migratory birds [J] Science, 2006, 312: 1959 - 1961.
- [14] Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R K, et al Variation in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 - 1999 [J] Journal Geophysical Research - Atmospheres, 2001, 106 (D17): 20069 - 20083.
- [15] McCarty J P. Ecological consequences of recent climate change [J] Conservation Biology, 2001, 15: 320 - 331.
- [16] Walther G R, Post E, Menzel A, et al Ecological responses to recent climate change [J] Nature, 2002, 416: 389 - 395.
- [17] Badeck F-W, Bondeau A, Böttcher K, et al Responses of spring phenology to climate change [J] New Phytologist, 2004, 162: 295 - 309.
- [18] Parmesan C, Yohe G A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J] Nature, 2003, 421: 37 - 42.
- [19] Root T L, Price J T, Hall K R, et al Fingerprint of global warming on wild animals and plants [J] Nature, 2003, 421: 57 - 60.
- [20] Zheng Jingyun, Ge Quansheng, Hao Zhixin. Impacts of climate warming on plants phenophases in China for the last 40 years [J] Chinese Science Bulletin, 2002, 47: 1582 - 1587. 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候增暖对我国近 40 年植物物候变化的影响 [J] 科学通报, 2002, 47: 1582 - 1587. ]
- [21] Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X, et al Spring phenophases in recent decades over eastern China and its possible link to climate changes [J] Climatic Change, 2006, 77: 449 - 462.
- [22] Wang Chuanhai, Wu Feiqian, Li Shujuan, et al Phenological changes of woody plants in Xi'an Botanical Garden in last 15 years [J] Chinese Journal of Agronomy, 2006, 27 (4): 261 - 264. 汪传海, 吴飞倩, 李淑娟, 等. 西安植物园木本植物近十余年物候变化的特征分析 [J] 中国农业气象, 2006, 27 (4): 261 - 264. ]
- [23] Qi Ruying, Yan Jinrui, Wang Qilan. Change of the phenological phase of *Populus tomentosa* and its response to climate change [J] Chinese Journal of Agronomy, 2006, 22: 41 - 45. 祁如英, 严进瑞, 王启兰. 青海小叶杨物候变化及其对气候变化的响应 [J] 中国农业气象, 2006, 22: 41 - 45. ]
- [24] Xu Wenduo, He Xingyuan, Chen Wei, et al Response of Shenyang urban tree phenology to climate warming [J] Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17 (10): 1777 - 1781. 徐文铎, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳城市森林主要树种物候对气候变暖的响应 [J] 应用生态学报, 2006, 17 (10): 1777 - 1781. ]
- [25] Zhang Xuexia, Ge Quansheng, Zheng Jingyun, et al Response of spring phenology to climate changes in Beijing in last 150 years [J] Chinese Journal of Agronomy, 2005, 26: 263 - 267. 张学霞, 葛全胜, 郑景云, 等. 近 150 年北京春季物候对气候变化的响应 [J] 中国农业气象, 2005, 26: 263 - 267. ]
- [26] Li Rongping, Liu Xiaomei, Zhou Guangsheng. The characteristics of

- Phragmites* phenology in Panjin wetland and its responses to climatic change [J] Journal of Meteorology and Environment, 2006, 22: 30 - 34. 李荣平, 刘晓梅, 周广胜. 盘锦湿地芦苇物候特征及其对其后变化的响应 [J] 气象与环境学报, 2006, 22: 30 - 34. ]
- [27] Li Rongping, Zhou Guangsheng, Wang Yuhui, et al Phenological responses of *Leymus chinensis* to climate factors [J] Chinese Journal of Ecology, 2006, 25: 277 - 280. 李荣平, 周广胜, 王玉辉. 羊草物候特征对其后因子的响应 [J] 生态学杂志, 2006, 25: 277 - 280. ]
- [28] Qi Ruying, Wang Qilan, Shen Hongyan. Analysis of phenological phase variation of herbage plants over Qinghai and impact of meteorological conditions [J] Meteorological Science and Technology, 2006, 34: 306 - 310. 祁如英, 王启兰, 申红艳. 青海草本植物物候期变化与气象条件影响分析 [J] 气象科技, 2006, 34: 306 - 310. ]
- [29] Qian W, Qian A. Spatio-temporal characteristics of temperature variation in China [J] Meteorology and Atmospheric Physics, 2006, 93: 1 - 16.
- [30] Li Jun, Yang Qizhen, Yang Kangning. Climatic indices for initial flowering in *Osmanthus fragrans* [J] Journal of Plant Ecology, 2006, 30: 421 - 425. 李军, 杨秋珍, 杨康民. 银桂初花物候期的气候条件 [J] 植物生态学报, 2006, 30: 421 - 425. ]
- [31] Piao S L, Fang J Y, Ji W, et al Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China [J] Journal of Vegetation Science, 2004, 15: 219 - 226.
- [32] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation [J] Global Change Biology, 2006, 12: 672 - 685.
- [33] Chen X Q, Pan W F. Relationships among phenological growing season, time-integrated Normalized Difference Vegetation Index and climate forcing in the temperate region of eastern China [J] International Journal of Climatology, 2002, 22: 1781 - 1792.
- [34] Chen X Q, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China [J] Global Change Biology, 2005, 11: 1118 - 1130.
- [35] Penuelas J, Filella I. Phenology: response to a warming world [J] Science, 2001, 294: 793 - 795.
- [36] Parnason C, Ryrholm N, Stefanescu C, et al Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming [J] Nature, 1999, 399: 579 - 583.
- [37] Thomas C D, Lennon J J. Birds extend their ranges northwards [J] Nature, 1999, 399: 213.
- [38] Hickling R, Roy D B, Hill J K, et al The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards [J] Global Change Biology, 2006, 12: 450 - 455.
- [39] Stum M, Racine C, Tape K. Increasing shrub abundance in the Arctic [J] Nature, 2001, 411: 546.
- [40] Tape K, Stum M, Racine C. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic [J] Global Change Biology, 2006, 12: 686 - 702.
- [41] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. Climate effects on mountain plants [J] Nature, 1994, 369: 448.
- [42] Winkling M, Juday GP, Barber VA, et al Recent climate warming forces contrasting growth responses of white spruce at treeline in Alaska through temperature thresholds [J] Global Change Biology, 2004, 10: 1724 - 1736.
- [43] Beniston M. Climatic change in mountain regions: A review of possible impacts [J] Climatic Change, 2003, 59, 5 - 31.
- [44] Penuelas J, Boada M. A global change-induced biome shift in the Montseny Mountains (NE Spain) [J] Global Change Biology, 2003, 9: 131 - 140.
- [45] Zier J L, Baker W L. A century of vegetation change in the San Juan Mountains, Colorado: An analysis using repeat photography [J] Forest Ecology and Management, 2006, 228: 251 - 262.
- [46] Moseley R K. Historical landscape change in northwestern Yunnan, China [J] Mountain Research and Development, 2006, 26: 214 - 219.
- [47] Zhou Xiaofeng, Zhang Yuandong, Sun Huizhen, et al The effect on climate change on population dynamics of *Quercus mongolica* in north Greater Xing'an Mountain [J] Acta Ecologica Sinica, 2002, 22: 1035 - 1040. 周晓峰, 张远东, 孙慧珍, 等. 气候变化对大兴安岭北部蒙古栎种群动态的影响 [J] 生态学报, 2002, 22: 1035 - 1040. ]
- [48] Zhou Xiaofeng, Wang Xiaochun, Han Shijie, et al The effect of global climate change on the dynamics of *Betula emani*-tundra ecotone in the Changbai Mountains [J] Earth Science Frontiers, 2002, 9: 227 - 231. 周晓峰, 王晓春, 韩士杰, 等. 长白山岳桦-苔原过渡带动态与气候变化 [J] 地学前缘, 2002, 9: 227 - 231. ]
- [49] Li Y. The impacts of climate change and human disturbance on eco-environment of the Changbai Mountain Biosphere Reserve [D] Dissertation, Northeast China Normal University, Changchun, 2006. 李扬. 气候变化与人为干扰对长白山生物圈保护区生态环境的影响 [D] 东北师范大学学位论文, 长春, 2006.]
- [50] Mu Changcheng. Succession of *Larix olgensis* and *Betula platyphlla* marsh ecotone communities in Changbai Mountain [J] Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14: 1813 - 1819. 牟长城. 长白山落叶松和白桦-沼泽生态交错带群落演替规律研究 [J] 应用生态学报, 2003, 14: 1813 - 1819. ]
- [51] Wang Xiaochun, Zhou Xiaofeng, Li Shujuan, et al The effect of climate warming on the structure characteristic of the timberline in Laotudingzi Mountain [J] Acta Ecologica Sinica, 2004, 24: 2412 - 2421. 王晓春, 周晓峰, 李淑娟, 等. 气候变暖对老秃顶子林线结构特征的影响 [J] 生态学报, 2004, 24: 2412 - 2421. ]
- [52] Dai Junhu, Pan Yuan, Cui Haiting, et al Impacts of climate change on alpine vegetation on Wutai Mountains [J] Quaternary Science,

- 2005, 25: 216 - 223. 戴君虎, 潘源, 崔海亭, 等. 五台山高山带植被对气候变化的响应 [J] 第四纪研究, 2005, 25: 216 - 223. ]
- [53] Liu Qinqu, Lin Zhenshan. Response of six dominant species of *Leymus chinensis* grassland in Inner Mongolia to the climate change [J] Progress in Geography, 2006, 25: 63 - 71. 刘钦普, 林振山. 内蒙古草原羊草群落优势物种对气候变化的响应 [J] 地理科学进展, 2006, 25: 63 - 71. ]
- [54] Wang Shiping, Wang Yanfen, Chen Zuozhong. Effect of climate change and grazing on populations of *Cleistogenes squarrosa* in Inner Mongolia steppe [J] Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27: 337 - 343. 汪持平, 王艳芬, 陈佐忠. 气候变化和放牧活动对糙隐子草种群的影响 [J] 植物生态学报, 2003, 27: 337 - 343. ]
- [55] Wang Mou, Li Yong, Huang Runqiu, et al. The effects of climate warming on the alpine vegetation of the Qinghai-Tibetan Plateau hinterland [J] Acta Ecologica Sinica 汪谋, 李勇, 黄润秋, 等. 气候变暖对青藏高原腹地高寒植被的影响 [J] 生态学报, 2005, 1275 - 1281. ]
- [56] Chen Xiaoquan, Gou Xinjing. Research on the eco-environmental protection in the source regions of Yangtze, Yellow and Lancang Rivers [M] Xining: Qinghai People's Press, 2002. 陈孝全, 苟新景. 三江源自然保护区生态环境 [M] 西宁: 青海人民出版社, 2002. ]
- [57] Wang Yan, Zhao Zhihong, Qiao Yansong, et al. Characteristics of the climatic variation in Zoige in the past 45 years and its effects on the eco-environment in the area [J] Journal of Geomechanics, 2005, 11: 328 - 340. 汪燕, 赵志中, 乔彦松, 等. 若尔盖 45 年来的气候变化特征及其对当地生态环境的影响 [J] 地质力学学报, 2005, 11: 328 - 340. ]
- [58] Li Yingnian, Wang Qiji, Zhou Xingnin, et al. The environmental characteristics analysis of plant community at alpine meadow [J] Arid Zone Research, 1998, 15: 54 - 58. 李英年, 王启基, 周兴民, 等. 高寒草甸植物群落的环境特征分析 [J] 干旱区研究, 1998, 15: 54 - 58. ]
- [59] Zhang Guosheng, Li Lin, Wang Qingchun, et al. Effects of climatic change on the alpine meadow of south Qinghai Plateau [J] Acta Prataculturae Sinica, 1999, 8: 1 - 10. 张国胜, 李林, 汪青春, 等. 青藏高原气候变化及其对高寒草甸牧草生长影响的研究 [J] 草业学报, 1999, 8: 1 - 10. ]
- [60] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 - 1991 [J] Nature, 1997, 386: 698 - 702.
- [61] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J] Science, 2003, 300, 1560 - 1563.
- [62] Fang Jingyun, Piao Shilong, He Jinsheng, et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982 - 1999 [J] Science in China (Series C), 2003, 47: 229 - 240. 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近 20 年来中国植被活动在加强 [J] 中国科学 C 辑, 2003, 47: 229 - 240. ]
- [63] Piao Shilong, Fang Jingyun. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999 [J] Acta Geographica Sinica, 2003, 58: 119 - 125. 朴世龙, 方精云. 1982 - 1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异 [J] 地理学报, 2003, 58: 119 - 125. ]
- [64] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China [J] Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19: 20 - 27.
- [65] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Interannual variations of monthly and seasonal NDVI in China from 1982 to 1999 [J] Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (D14): 4401.
- [66] White M A, Running S W, Thomson P E. The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest [J] International Journal of Biometeorology, 1999, 42, 3: 139 - 145.
- [67] Chen X, Luo G P, Xia J, et al. Ecological response to the climate change on the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang [J] Sciences in China (Series D), 2005, 48: 765 - 777.
- [68] Li Xiaobing, Chen Yunhao, Zhang Yunxia, et al. Impact of climate change on desert steppe in northern China [J] Advance in Earth Sciences, 2002, 17, 254 - 261. 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 等. 气候变化对我国北方荒漠草原植被的影响 [J] 地球科学进展, 2002, 17, 254 - 261. ]
- [69] Piao S L, Mohammad A, Fang J Y, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate change in China [J] Global Environmental Change, 2006, 16: 340 - 348.
- [70] Fang J Y, Piao S L, Zhou L M, et al. Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation [J] Geophysical Research Letters, 2005, 32: L21411.
- [71] Gu Zhihui, Chen Jin, Shi Peijun, et al. Correlation analysis of NDVI difference series and climate variables in Xilingole steppe from 1983 to 1999 [J] Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29: 753 - 765. 顾智慧, 陈晋, 史培军, 等. 锡林郭勒草原 1983 - 1999 年 NDVI 逐旬变化量与气象因子的相关分析 [J] 植物生态学报, 2005, 29: 753 - 765. ]
- [72] Ma Yuling, Yu Weihong, Fang Xiuqi. Change of grass growth in the Hulun Buir steppe in response to global warming [J] Arid Land Geography, 2004, 27: 29 - 34. 马玉玲, 余卫红, 方修琦. 呼伦贝尔草原对全球变暖的响应 [J] 干旱区地理, 2004, 27: 29 - 34. ]
- [73] Ke Jinhui, Piao Shilong, Fang Jingyun. NPP and spatio-temporal patterns in the Yangze River watershed [J] Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27: 764 - 770. 柯金虎, 朴世龙, 方精云. 长江流域植被净第一性生产力及其时空格局研究 [J] 植物生态学报, 2003, 27: 764 - 770. ]
- [74] Piao S L, Fang J Y, He J S. Variations in vegetation net primary production in the Qinghai-Xizang Plateau, China, from 1982 to



- 1999 [J] Climatic Change, 2006, 74: 253 - 267.
- [75] Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng NDVI reflection of alpine vegetation changes in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J] Acta Geographica Sinica, 2005, 60: 467 - 478.  
 杨建平, 丁永建, 陈仁升. 长江黄河源区高寒植被变化的 NDVI 记录 [J] 地理学报, 2005, 60: 467 - 478.]
- [76] Chmielewski FM, Muller A, Bruns E. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961 - 2000 [J] Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121: 69 - 78.
- [77] Lobell D B, Asner G P. Climate and management contributions to recent trends in U S agricultural yields [J] Science, 2003, 299: 1032.
- [78] Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981 - 2000 [J] Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 138: 82 - 92.
- [79] Wang Yuan, Fang Xiuqi, Xu Tan, et al. Impact of climate warming and adaptation activities of rice plantation in Northeast China [J] Resources Science, 2005, 27: 121 - 127. 王媛, 方修琦, 徐锁, 等. 气候变暖与东北地区水稻种植适应行为 [J] 资源科学, 2005, 27: 121 - 127.]
- [80] Zhang Han, Lou Weiping. An analysis of the impact of climate change on setting rate of early-rice in recent 20 years [J] Zhejiang Meteorology, 2005, 26: 26 - 28, 40. 张寒, 娄伟平. 近20年气候变化对早稻结实率的影响分析 [J] 浙江气象, 2005, 26: 26 - 28, 40.]

## Plant signals and ecological evidences of climate change in China

YUAN Jing-wei<sup>1,2,3</sup>, NI Jian<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Laboratory of Climate Studies,

China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Climate changes, including the changes of average air temperatures, precipitation patterns and the frequency and quantity of extreme climate events, have led to some changes in terrestrial ecosystems. The changes in species, communities and ecosystems responding to changed climates could be the indirect biological and ecological evidences (indicators) of climate change. Such evidences are worth to being used to assess the impacts of future climate change, especially for the mitigation and adaptation of global climate change as a key issue of Earth System Sciences and for the sustainable ecosystem management and development. Under the background of global assessment of climate change impacts on ecosystems, China's plant signals and ecological evidences of climate change are synthesized. Results showed that there have been some changes in plant species, communities and vegetation ecosystems responding to "existed" climate changes. During the past decades the phenological phases such as leaf unfolding and first flowering of some plants to the north of 33°N latitude have advanced due to climate warming. The growing season of vegetation has been lengthened. The community structure and composition have been changed especially in some vegetation ecotones and treeline areas such as in the Changbai Mountains and in the alpine meadow on the Tibetan Plateau. Treeline in some mountains shifted up to higher elevation. In total, climate changes have resulted in the increases in vegetation cover, vegetation activity and net primary productivity in the whole country. The agricultural vegetation also have some kinds of changes in cultivated regime, structure, area, and production in the northern and western China. The yields increased only in northeast of China. However, there is a negative relationship between agricultural yield and temperature at most regions of China. This might be a potential risk to food safety.

**Key Words:** climate change; advances of plant phenophase; increase in growing season; species replacement; shifts of geographical distribution; shift-up of treeline; increase in net primary productivity