

The Effects of Pre-Season Rainfall on the Phenology of Plants in the Rejuvenated Period

Lijun Guo*, Tong Zhang*, Qianbin Zhang, Huibo Jin, Enze Li, Yahui Li, Yuqing Wu, Zhongling Yang#

College of Life Science, Henan University, Kaifeng Henan
Email: #yang_zhl06@126.com

Received: Dec. 14th, 2019; accepted: Jan. 1st, 2020; published: Jan. 8th, 2020

Abstract

Plant phenology is highly sensitive to global change, and most of studies used plant phenology to predict future climate change. The starting date of the vegetation growing season is often affected by changing precipitation. However, majorities of previous studies have reported accumulated temperature of pre-season as the determinant factor affecting plant green-up period. In the present study, we synthesized the influence of pre-season precipitation on the starting date of vegetation growing season at local, region, hemisphere and global scales. Our study found that the effects of pre-season precipitation on the starting date of the vegetation growing season could not be ignored, especially in the semiarid and arid regions, where pre-season precipitation rather than pre-season temperature was one of the major determinant factors affecting plant green-up period. Most of the studies found that pre-season precipitation had negative effects on the starting date of the vegetation growing season, but positive and neutral effects were also reported. The pre-season rainfall mainly changes the phenology of rejuvenated period in different areas through water restriction and the changes of temperature, nutrition and light caused by rainfall changes. Altered green-up period may affect the exchange of ecosystem substance and energy, which would be detrimental to the development of husbandry and nomadic life. Our study not only points out the existed shortage of current phenological studies but also provides suggestions for the future phenological studies during the green-up period under global change scenarios. This will provide support for improving and even building a new global phenological dynamic process model.

Keywords

Pre-season Precipitation, Green-Up Period, Phenological Observations, Remote Sensing

*共同第一作者。

#通讯作者。

季前降雨对植物返青期物候的影响

郭丽君*, 张 统*, 张乾斌, 靳慧博, 李恩泽, 李雅慧, 吴雨晴, 杨中领#

河南大学生命科学学院, 河南 开封

Email: *yang_zhl06@126.com

收稿日期: 2019年12月14日; 录用日期: 2020年1月1日; 发布日期: 2020年1月8日

摘 要

由于植物物候对环境变化的高度敏感性, 人们通常通过研究植物物候预测未来气候变化。改变的降雨影响了植物返青期。然而, 过去的大部分研究认为, 生长季开始前累积温度是影响植物返青期物候的决定因素。本研究从局域、区域、半球和全球三个空间尺度, 总结了生长季前降雨对植物返青期物候的影响, 发现: 季前降雨对植物返青期物候变化起着不容忽视的作用, 特别是在干旱半干旱地区, 季前降雨可能取代季前温度成为影响返青期物候的决定因素。大部分研究证明季前降雨与返青期物候呈负相关关系, 但是也有研究发现正相关或无相关关系。季前降雨主要是通过水分限制以及降雨改变引起的温度、营养以及光照变化改变不同地区返青期物候。季前降雨引起的返青期物候的改变可能影响生态系统物质和能量交换, 同时也对畜牧业的发展和牧民生活带来不利后果。在全球变化背景下, 本研究不仅指出当前返青期物候研究的不足, 而且也对将来植物返青期物候的研究提出了部分建议, 这将为改进甚至构建新的全球物候动态过程模型提供依据。

关键词

季前降雨, 返青期, 物候观测, 遥感

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

物候学是研究自然界中植物和动物的节律性变化与周围环境周期性变化之间关系的一门科学[1]。因为它与环境的密切关系, 越来越多的生态学家们开始重视研究物候[2], 并通过物候的变化来反映和预测环境气候变化[3] [4] [5] [6]。植物物候是物候学的重要组成部分, 它分为营养物候和繁殖物候, 详细划分为返青期(又叫萌芽期, 植物生长季开始期)、展叶期、开花期、果实或种子散布期和黄枯期。大量的研究证明持续的全球变化(全球变暖、降雨格局改变、二氧化碳浓度升高、氮沉降等)影响着植物物候的每一个时期[7] [8] [9] [10]。植物返青期(starting date of the vegetation growing season, SOS), 是植物新一轮生长周期的开始。它的变化在探究气候变化对植物整个生活周期的影响中, 具有其他生物因子无法替代的作用。大部分的返青物候研究更是集中在生长季开始前(前一年生长季结束至当年返青之间), 环境因子改变对植物返青期的影响上。关于生长季开始前积温(以下简称季前温度)对返青期物候影响的研究最多, 无论是实验方法方面还是对季前温度对返青物候影响的认识方面都已相对成熟。然而, 人们对生长季开始前降雨

(以下简称季前降雨)对返青物候的影响的认识却相对有限。本研究从局域、区域和半球全球尺度上对国内外为数不多的季前降雨变化对植物返青期物候影响的研究进展进行了归纳和总结,希望能对人们认识季前降雨对返青物候的重要性有所帮助。

2. 季前降雨对返青期物候的影响

吸水是种子萌发的主要条件,种子只有吸收了足够的水分后,各种与萌发有关的生理生化作用才能逐步开始[11]。同时,水分也是植物生长的一个主要条件,不仅调控着植物的形态和生理活动[12],也影响着植物物候。季前降雨,特别是春季的第一场有效降雨能促进植物的萌发和返青[13]。接下来,文章将从不同的空间尺度评述季前降雨对植物返青期物候的影响,进而为未来研究植物返青期物候提供理论依据。

2.1. 局域水平上

通过自然条件下定点观察和开展全球变化控制实验定株观测研究特定站点的个体和群落物候,大多数研究发现季前降雨与植物返青期物候是负相关关系,但是,也有研究表明季前降雨与植物返青期物候呈现正相关或无相关关系。研究结果展示如下: Pangtey 等研究发现在喜马拉雅山中部的高山草地,水分对一些物种新一轮生长周期的开始是必需的[14]; Peñuelas 等对 Cardedeu 实验站 1952~2000 年间完整的植物物候数据分析发现许多物种在增加季前降雨之后,提前了萌芽时间。其中,小叶榆(*Ulmus minor*)表现最为明显,每增加 100 mm 降雨,萌芽期可以提前 7 天[15]; 叶鑫等对高寒矮生蒿草(*Kobresia humilis*)草甸 2009~2011 三年的物候数据分析发现,冬季降雪提前了杂类草麻花芫(*Gentiana straminea*)和美丽凤毛菊(*Saussurea superba*)的返青期[16]。Han 等在大针茅(*Stipa grandis*)干旱草原进行的放牧和雨水添加实验发现增雨对群落返青期没有显著影响。不过,在年际之间,由于提高的土壤含水量和合适的温度,2013 年植物群落水平萌芽期相比 2012 年提前了 6.1 天[17]。而白美兰等基于 1983~2009 年内蒙古草甸草原、典型草原和荒漠草原植物生长期物候观测资料和气象数据分析发现,季前降雨变化对几种典型植物的萌芽返青期影响较为复杂,不仅存在负相关或没有相关关系,而且随着季前降雨的增多,植物萌发物候也会出现推迟,即使相关关系都不显著[18]。又如,在中国中部冬季干燥的半干旱物候园里,42 个物种中的 33 个的叶片萌芽时间在经历湿润冬天后比经历干燥冬天后推迟(23 个物种达到显著水平),而剩下的 9 个物种的萌芽期与季前降雨不存在负相关关系[19]。

在局域水平上,除了降雨量的影响,生长季开始前第一次有效降雨的开始时间和改变的降雨时机也可以影响植物返青期物候。Jolly 和 Running 在南非 Kalahari 的半干旱落叶林生态系统中的物候观测结果表明利用生长季开始前第一次有效降雨时间能更好的预测叶片萌芽时期[20]。Ghazanfar 对 Oman 北部沙漠 Wadi 中的物候观测数据分析表明季前降雨对地下芽植物比对高位芽植物萌发物候影响更大。季前降雨推迟或减少,萌发物候都会推迟[21]。

传统的物候观测方法是地面观测,它具有种特异性和站点特异性,表征出植物返青期物候对生长季前降雨的不一致响应。由于站点分布覆盖范围有限,又缺乏长时间序列的物候观测数据,因此很难向大尺度物候时空变化分析推演。而新的研究技术—基于遥感方法的物候研究,反映的是区域、大洲、半球乃至全球水平的整个植物动态以及超过 10 年以上的年际变化,成为研究全球气候变化与植被动态关系的重要手段[22]。

2.2. 区域水平上

利用 NOAA/AVHRR 影像数据、MODIS 数据、SPOT 植物数据和地球资源卫星 TM 数据等数据源和动态阈值方法、滑动平均方法、求导方法以及拟合方法等监测方法[23],研究者在区域尺度上进行了一系

列物候时空变化分析,我国也在这方面取得了比较显著的成果。其中,在内蒙古地区,Chen 等利用 1983~2009 年间内蒙古草原六个站点的气温和降雨数据以及三种优势物种的物候数据集代入传统积温模型(thermal time models)和经过改进结合了气温和降雨的积温模型(thermal time models),发现改进的结合了降雨的积温模型(thermal time models)在降雨较少地区具有更高的模拟精度和准确性。该结果表明在降雨相对较少的地区,晚冬和早春的降雨对萌发物候的影响可能比温度更为强烈[24];Liu 等使用 1982~2006 年内蒙古草原植物动态数据与标准化的积温为基础的指数、新定义的以累积水分为基础模拟的土壤湿度指数和降雨指数做相关,发现对于内蒙古地区返青模式,以水分为基础的指数比以积温为基础的指数更有决定性,该结果表明了可利用水分对返青物候的决定作用[25];利用鄂尔多斯 1982~2010 年的 NDVI 数据和气候数据,Zhu 和 Meng 发现春季降雨与植物返青期有显著的格兰杰因果关系(granger causality,一种时间序列上的因果关系,即原因变量的发生在时间上领先于结果变量),表明季前降雨对植物返青期有很重要的影响。不过需要注意的是,这种格兰杰因果关系在草甸草地不显著,这主要是因为和典型草原相比,草甸是一种泛域的严重受当地土壤因素而不是气候因素影响的草地类型,此处的草甸一般围绕着盐湖或其他水源生长,而这些地方的降雨并不是唯一的水分供应者。因此,由于可以接收相对多的水分,草甸对春季降雨不敏感[13]。在东北地区,Tao 等利用 1982~2000 年中国东北样带 NDVI 数据和 14 个气象站点的气候数据分析表明在样带中的干旱半干旱区域,植物返青期与返青期前 2~4 个月的降雨量相关[26]。同样,在对全球气候变化高度敏感的青藏高原,围绕季前降雨和季前温度与植物返青期物候的关系,科研工作者开展大量的研究。Shen 等使用 NDVI 数据和气候数据表征青藏高原返青期物候空间变化与季前温度和降雨的相关关系,发现 50 个站点中有 32 个站点的返青期物候与生长季前一月的降雨呈显著的负相关关系,相关系数在-0.67~-0.10 之间浮动($P < 0.01$) [27]。这一结果与 Piao 等[28]在该地区的研究结果相反,主要可能是由于他们对季前降雨的定义不同引起的。Shen 等通过对青藏高原 2000~2011 年 NDVI 数据与气候数据进一步分析,得出高海拔地区的返青期延迟可能是由春季降雨的减少引起的,而不是由于春季温度增加引起的[29];最终,Shen 等采用 2000~2012 年间青藏高原的绿色植被动态数据研究生长季前降雨与返青物候的关系,得出整个区域返青物候模式与持续升高的春季温度模式不一致,而对季前降雨的年际变化非常敏感,特别是在相对干旱地区。沿青藏高原空间上形成的降雨梯度,长期年均生长季前降雨每减少 10 mm,返青物候的降雨敏感性增加 0.01 天/毫米[10]。在中国北部地区,Cong 等通过 1999~2009 年北纬 30 度中国北温带植物物候变化数据表明在季前温度或者是降雨增加的地方,植物返青期物候提前[30];Wu 等利用植被归一化指数(NDVI)对中国北方六个植物区系 1982~2006 年的植物动态数据进行研究,并结合同时期温度和降雨数据进行分析,发现上一年 11 月份—当年 1 月的降雨可以分别解释温带落叶林、温带草原和温带荒漠返青物候变化的 16.1%, 20.9% 和 14.2%,强调了冬季降雨在缺水生物区系中调控春季植物物候的重要性[31]。在整个 Iberian Peninsula 半岛获取的为期 16 天的 MODIS 返青物候图谱数据展现了从北到南,从东到西的植物返青期变化,在其中的东南沿海区域——降雨少,植物生长受水分限制——返青发生在秋季,它的返青由秋季降雨引发[15]。

在区域尺度上,不难发现,季前降雨相对季前温度在植物返青物候变化上起着不容忽视的作用,特别是在干旱半干旱地区,季前降雨取代季前温度成为影响返青物候的最主要因素。当然,和局域尺度返青物候变化反应一样,随着季前降雨的减少,返青物候变化也可能提前、推迟或对植物返青期物候无显著影响。这种不一致性可能是由于研究区域的地理环境、植物区系、遥感数据的来源和分析方法的不同引起的[32]。

2.3. 半球全球尺度上

相比区域和局域尺度,全球气候变化在半球以及全球尺度上更加复杂多样。因此,在半球/全球尺度

研究气候与物候的关系难度更大。不过, 研究者们已经通过分析现有数据, 取得一些进展, 现做以下展示: Botta 等的研究显示在低纬度地区, 叶片返青物候主要依赖于季前降雨变化[33]。Forkel 等使用改进的动态全球植被物候模型, 结合三种植物绿度遥感数据、十种物候检测方法量化了气候因子对物候变化的影响——研究发现: 温带和北方森林的返青时间的年际变化和趋势主要由入射光和可利用水分控制, 绿度峰值的年际变化和趋势主要由可利用水分与土地覆被和土地利用方式控制; 冻土融化导致的可利用水分增加使得西伯利亚北方森林比北美北方森林的绿度趋势更明显。结论强调了可利用水分和入射光在全球尺度上对返青期物候的共同主导地位[34]。

3. 季前降雨对植物返青期物候温度敏感性的影响

Yu 等利用蒙古草原 1982~1991 年的 NDVI 数据和气象数据分析表明干旱胁迫会导致荒漠草地返青推迟, 而在土壤含水量较高的地区植物返青期提前, 季前降雨缺少还会影响蒙古草原植物物候对气候变暖的响应[35]。为了理解降雨是如何影响春季物候的温度敏感性, Cong 等分析了春季降雨与春季物候的温度敏感性之间的相关关系, 发现: 随着春季累计降雨量的增加, 春季物候对温度的响应变得更加强烈, 相关系数约为-0.3, 并且针对不同生态系统类型不同方法的分析也都得出一致结论, 不过只有森林和草甸生态系统相关系数是显著或边际显著的[10]。Shen 等运用遥感技术研究青藏高原返青期与气候条件关系, 发现: 在相对湿润地区, 返青期对生长季前温度的反应更敏感。沿着青藏高原自然降雨梯度, 季前降雨每增加 10 mm, 返青期物候的温度敏感性就增加 0.25 天/°C。同时, 季前降雨与有效积温日的负相关关系也表明青藏高原的干旱地区具有较高累积积温, 因此植物萌发受水分限制, 表现为高的降雨敏感性; 而在湿润地区, 积温难以达到萌发阈值, 植物萌发受积温限制, 表现为高的温度敏感性。据此, 作者提出了最大化气候获益理论即充分利用好的气候因素与此同时最小化气候不利因素的风险。在湿润地区, 干旱的风险小, 植物便形成了高的温度敏感性机制去满足积温需求; 在干旱地区, 为了充分吸收水分, 植物形成了高的降雨敏感性机制[30]。

4. 季前降雨影响返青物候的机制

萌发的必要条件是适当的水分, 充足的空气, 适宜的温度和光。没有水就没有生命, 水分是植物萌发和生长的必要条件。只有达到植物萌发和生长所需水分阈值, 植物才能成功发芽、生长, 完成新一轮生活周期。在干旱半干旱地区, 增加的生长季前温度会通过增加蒸发散, 加剧干旱, 最终导致生态系统更晚达到合适水分条件的阈值而影响春季物候[26]; 在青藏高原, 过去几十年, 土壤温度的持续增加使土壤冻层下降, 增加了土壤水的淋滤和地表径流, 减少了表层土的可利用水分含量, 影响着植被动态的季节转变[36] [37] [38]。

水分还可以通过影响种子的积温需求和外界光照限制种子萌发。在湿润地区, 过多的降雨会引起光反射增加, 光照强度的不足, 直接或间接的引起温度下降, 进而影响春季物候[29]。此外, 水分限制和养分限制是幼苗定居成功开始生长的两个主要限制因素[39]。而养分的吸收更多的是借助于根通过土壤溶液吸收。降低的土壤含水量会抑制微生物对养分的转化和养分的溶解速率以及运输[40], 最终给萌发和返青物候造成影响。

5. 可能带来的后果

对反射率的影响: 反射率是入射光被地表反射回的部分, 影响着地表能量交换[41]。通常, 新一轮植物开始生长, 反射率降低, 当植物开始凋亡, 反射率增加。干旱区物候的推迟可能引起生长季长度缩短, 引起反射率增加[42], 而生长季缩短导致的反射率增加可能会降低地表温度。因此季前降雨引起的物候变化按照可利用水分和区域特征不同可能减弱或放大全球变暖的效应。

对水分和碳循环的影响: Hu 等发现积雪融化导致春季物候提前, 植物在没有充足水分储存的情况下就进入了生长季, 增加了夏季干旱的可能性[43]。由于生长季前降雨变化导致的春季物候期提前或推迟都可能改变生长季长度。生长季长度和总初级生产力(GPP)以及净初级生产力(NPP)都是高度相关的[4]。而 GPP 和 NPP 是控制陆地碳摄取的主要因素, 所以生长季长度的改变会对大气碳含量有重要影响。即使不改变年净碳交换, 改变的返青和结束时间也会改变大气二氧化碳浓度的变化幅度。春季因为返青提前增加春季 NPP 将拉低大气二氧化碳浓度的最低值, 而在生长季其他时间引起的土壤呼吸增加也将导致大气二氧化碳浓度最大值变得更大[4] [44] [45] [46]。

对畜牧业的影响: 生长季前期干旱会推迟返青时间, 植物返青的推迟就会导致当季牧草的缺乏, 进而影响畜牧业产量, 最终严重影响人民的生活和畜牧业的发展[47]。另一方面, 干旱引起的生长季的推迟会加剧风蚀, 进而引起荒漠化, 危害草地维护、管理和草原经济的可持续发展[48]。

6. 不足与展望

IPCC 预测地表温度在本世纪会持续上升; 极端降雨事件将会更高强度和更多频度的发生在很多区域[49]。结合前面的研究结果发现, 降雨可能引起返青物候的显著变化, 以及随之而来的个体、种群、群落乃至生态系统结构和功能的改变。然而, 关于季前降雨对植被返青物候影响的研究仍存在以下几个方面的问题, 本研究通过总结现阶段存在的具体问题, 提出了相应的建议, 现归纳如下:

1) 研究因子过于单一: 降雨对物候的影响虽然越来越受到重视, 但只是集中在降雨量改变的影响方面, 而对降雨时机、强度以及降雨频度改变对物候的影响的研究则很少。另外, 全球变化不仅包括降雨格局改变, 还有全球变暖, 二氧化碳浓度升高, 氮沉降等。应对 IPCC 预测气候变化, 我们应该开展降雨变化和其他驱动因子交互影响返青物候的实验, 才能更好地预测未来气候变化下返青物候改变模式及其相应的作用机制。

2) 种特异性、站点特异性和研究方法特异性: 关于降雨格局改变如何影响返青物候的研究, 其研究方法不同, 得出的结果可能就不一致, 甚至可能相反。如何标准化各个研究方法, 综合这些不同尺度的研究, 从而准确预测未来气候变化对返青物候的影响, 将是一个巨大挑战。

3) 地面观测实验少、观测物种单一、周期短: 可利用水对物候学和绿地动态的重要性要求有良好的地面观测数据来量化。而关于降雨对萌发物候影响的自然观测和控制实验研究很少, 并且研究对象往往集中在少数优势种上, 忽略了不同的物种其物候特征面对同一种气候变化或同一物种物候特征面对不同的气候变化其响应都可能是不一样的。而且, 有些物种只有长期观测才能准确判断其物候变化。因此, 在大量开展地面观测的基础上, 也应该重视在群落水平上进行长时间的观测, 为检验现有模型的同时, 也为改进和新构建全球物候动态过程模型提供依据。

4) 模型参数还存在一定问题: 降雨对返青物候的影响现在还没包含在 IPCC 使用的以积温日或蓄冷日为基础的 state-of-the-art 陆地生物圈模型中, 这可能是对于旱地区物候预测的不确定的根源之一。

基金项目

国家自然科学基金(31570429, 31300363); 博士后科学基金(2013M541970, 2014T70675)。

参考文献

- [1] 葛全胜, 戴君虎, 郑景云. 物候学研究进展及中国现代物候学面临的挑战[J]. 中国科学院院刊, 2010, 25(3): 310-316.
- [2] 杨华, 舒斌, 黄映国, 鲜骏仁. 近十年的国际植物物候研究文献发展态势分析[J]. 广西植物, 2013, 33(5): 717-722.

- [3] Fu, Y.H., Piao, S.L., Zhao, H., Jeong, S.J., Wang, X., Vitasse, Y., Ciais, P. and Janssens, I.A. (2014) Unexpected Role of Winter Precipitation in Determining Heat Requirement for Spring Vegetation Green-Up at Northern Middle and High Latitudes. *Global Change Biology*, **20**, 3743-3755. <https://doi.org/10.1111/gcb.12610>
- [4] Piao, S.L., Friedlingstein, P., Ciais, P., Viovy, N. and Demarty, J. (2007) Growing Season Extension and Its Impact on Terrestrial Carbon Cycle in the Northern Hemisphere over the Past 2 Decades. *Global Biogeochemical Cycles*, **21**, GB3018. <https://doi.org/10.1029/2006GB002888>
- [5] Peñuelas, J., Rutishauser, T. and Filella, I. (2009) Phenology Feedbacks on Climate Change. *Science*, **324**, 887-888. <https://doi.org/10.1126/science.1173004>
- [6] Wolkovich, E.M., Cook, B.I., Allen, J.M., Crimmins, T.M., Betancourt, J.L., Travers, S.E., Pau, S., Regetz, J., Davies, T.J., Kraft, N.J.B., Ault, T.R., Bolmgren, K., Mazer, S.J., McCabe, G.J., McGill, B.J., Parmesan, C., Salamin, N., Schwartz, M.D. and Cleland, E.E. (2012) Warming Experiments Underpredict Plant Phenological Responses to Climate Change. *Nature*, **485**, 494-497. <https://doi.org/10.1038/nature11014>
- [7] Cleland, E.E., Chiariello, N.R., Loarie, S.R., Mooney, H.A. and Field, C.B. (2006) Diverse Responses of Phenology to Global Changes in a Grassland Ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**, 13740-13744. <https://doi.org/10.1073/pnas.0600815103>
- [8] Korner, C. and Basler, D. (2010) Phenology under Global Warming. *Science*, **327**, 1461-1462. <https://doi.org/10.1126/science.1186473>
- [9] Norby, R.J., Hartz-Rubin, J.S. and Verbrugge, M.J. (2003) Phenological Responses in Maple to Experimental Atmospheric Warming and CO₂ Enrichment. *Global Change Biology*, **9**, 1792-1801. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2003.00714.x>
- [10] Shen, M.G., Piao, S.L., Cong, N., Zhang, G. and Janssens, I.A. (2015) Precipitation Impacts on Vegetation Spring Phenology on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, **21**, 3647-3656. <https://doi.org/10.1111/gcb.12961>
- [11] 鱼小军, 师尚礼, 龙瑞军, 王芳, 陈本建. 生态条件对种子萌发影响研究进展[J]. 草业科学, 2008, 23(10): 44-49.
- [12] Lambers, H., Chapin III, F.S. and Pons, T.L. (2008) Plant Water Relations. In: *Plant Physiological Ecology*, Springer, New York, 163-223. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3_5
- [13] Zhu, L. and Meng, J. (2015) Determining the Relative Importance of Climatic Drivers on Spring Phenology in Grassland Ecosystems of Semi-Arid Areas. *International Journal of Biometeorology*, **59**, 237-248. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0839-z>
- [14] Pangtey, Y.P.S., Rawal, R.S., Bankoti, N.S. and Samant, S.S. (1990) Phenology of High-Altitude Plants of Kumaun in Central Himalaya, India. *International Journal of Biometeorology*, **34**, 122-127. <https://doi.org/10.1007/BF01093457>
- [15] Peñuelas, J., Filella, I., Zhang, X., Llorens, L., Ogaya, R., Lloret, F., Comas, P., Estiarte, M. and Terradas, J. (2004) Complex Spatiotemporal Phenological Shifts as a Response to Rainfall Changes. *New Phytologist*, **161**, 837-846. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01003.x>
- [16] 叶鑫, 周华坤, 刘国华, 姚步青, 赵新全. 高寒矮生嵩草草甸主要植物物候特征对养分和水分添加的响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 147-158.
- [17] Han, J., Chen, J., Xia, J. and Li, L. (2015) Grazing and Watering Alter Plant Phenological Processes in a Desert Steppe Community. *Plant Ecology*, **216**, 599-613. <https://doi.org/10.1007/s11258-015-0462-z>
- [18] 白美兰, 郝润全, 李喜仓, 等. 草原区草本植物物候期对气候变化的响应[C]//中国气象学会. 第 28 届中国气象学会年会——S4 应对气候变化, 发展低碳经济. 2011: 9.
- [19] Dai, J., Wang, H. and Ge, Q. (2013) Multiple Phenological Responses to Climate Change among 42 Plant Species in Xi'an, China. *International Journal of Biometeorology*, **57**, 749-758. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0602-2>
- [20] Jolly, W.M. and Running, S.W. (2004) Effects of Precipitation and Soil Water Potential on Drought Deciduous Phenology in the Kalahari. *Global Change Biology*, **10**, 303-308. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00701.x>
- [21] Ghazanfar, S.A. (1997) The Phenology of Desert Plants: A 3-Year Study in a Gravel Desert Wadi in Northern Oman. *Journal of Arid Environments*, **35**, 407-417. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0190>
- [22] 武永峰, 李茂松, 宋吉青. 植物物候遥感监测研究进展[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(3): 51-58.
- [23] 李娜. 基于遥感的植物物候学方法研究[J]. 安徽农业科学, 2015(5): 318-319, 360.
- [24] Chen, X., Li, J., Xu, L., Liu, L. and Ding, D. (2014) Modeling Green-Up Date of Dominant Grass Species in the Inner Mongolian Grassland Using Air Temperature and Precipitation Data. *International Journal of Biometeorology*, **58**, 463-471. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0732-1>
- [25] Liu, H., Tian, F., Hu, H.C., Hu, H.P. and Sivapalan, M. (2013) Soil Moisture Controls on Patterns of Grass Green-Up in Inner Mongolia: An Index Based Approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**, 805-815. <https://doi.org/10.5194/hess-17-805-2013>

- [26] Tao, F., Yokozawa, M., Zhang, Z., Hayashi, Y. and Ishigooka, Y. (2008) Land Surface Phenology Dynamics and Climate Variations in the North East China Transect (NECT), 1982-2000. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, 5461-5478. <https://doi.org/10.1080/01431160801908103>
- [27] Shen, M., Tang, Y., Chen, J., Zhu, X. and Zheng, Y. (2011) Influences of Temperature and Precipitation before the Growing Season on Spring Phenology in Grasslands of the Central and Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, **151**, 1711-1722. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.07.003>
- [28] Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Ciais, P. and Zhu, B. (2006) Variations in Satellite-Derived Phenology in China's Temperate Vegetation. *Global Change Biology*, **12**, 672-685. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01123.x>
- [29] Shen, M., Zhang, G., Cong, N., Wang, S., Kong, W. and Piao, S. (2014) Increasing Altitudinal Gradient of Spring Vegetation Phenology during the Last Decade on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, **189-190**, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.003>
- [30] Cong, N., Wang, T., Nan, H., Ma, Y., Wang, X., Myneni, R.B. and Piao, S. (2013) Changes in Satellite-Derived Spring Vegetation Green-Up Date and Its Linkage to Climate in China from 1982 to 2010: A Multi-Method Analysis. *Global Change Biology*, **19**, 881-891. <https://doi.org/10.1111/gcb.12077>
- [31] Wu, X. and Liu, H. (2013) Consistent Shifts in Spring Vegetation Green-Up Date across Temperate Biomes in China, 1982-2006. *Global Change Biology*, **19**, 870-880. <https://doi.org/10.1111/gcb.12086>
- [32] Badeck, F.W., Bondeau, A., Böttcher, K., Doktor, D., Lucht, W., Schaber, J. and Sitch, S. (2004) Responses of Spring Phenology to Climate Change. *New Phytologist*, **162**, 295-309. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01059.x>
- [33] Botta, A., Viovy, N., Ciais, P., Friedlingstein, P. and Monfray, P. (2000) A Global Prognostic Scheme of Leaf Onset Using Satellite Data. *Global Change Biology*, **6**, 709-725. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00362.x>
- [34] Forkel, M., Migliavacca, M., Thonicke, K., Reichstein, M., Schaphoff, S., Weber, U. and Carvalhais, N. (2015) Codominant Water Control on Global Interannual Variability and Trends in Land Surface Phenology and Greenness. *Global Change Biology*, **21**, 3414-3435. <https://doi.org/10.1111/gcb.12950>
- [35] Yu, F., Price, K.P., Ellis, J. and Shi, P. (2003) Response of Seasonal Vegetation Development to Climatic Variations in Eastern Central Asia. *Remote Sensing of Environment*, **87**, 42-54. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00144-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00144-5)
- [36] Chen, H., Zhu, Q., Wu, N., Wang, Y. and Peng, C.H. (2011) Delayed Spring Phenology on the Tibetan Plateau May Also Be Attributable to Other Factors than Winter and Spring Warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **108**, E93. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100091108>
- [37] Hu, H., Wang, G., Liu, G., Li, T., Ren, D., Wang, Y., Cheng, H. and Wang, J. (2009) Influences of Alpine Ecosystem Degradation on Soil Temperature in the Freezing-Thawing Process on Qinghai-Tibet Plateau. *Environmental Geology*, **57**, 1391-1397. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1417-7>
- [38] Yang, M., Yao, T., Gou, X., Koike, T. and He, Y. (2003) The Soil Moisture Distribution, Thawing-Freezing Processes and Their Effects on the Seasonal Transition on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, **21**, 457-465. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(02\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00069-X)
- [39] Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A. and Siddique, K.H.M. (2012) Drought Stress in Plants: An Overview. In: *Plant Responses to Drought Stress*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1-33. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1
- [40] Singh, B. and Singh, G. (2004) Influence of Soil Water Regime on Nutrient Mobility and Uptake by *Dalbergia sissoo* Seedlings. *Tropical Ecology*, **45**, 337-340.
- [41] Bonan, G.B. (2008) Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, **320**, 1444-1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- [42] Richardson, A.D., Keenan, T.F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O. and Toomey, M. (2013) Climate Change, Phenology, and Phenological Control of Vegetation Feedbacks to the Climate System. *Agricultural and Forest Meteorology*, **169**, 156-173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>
- [43] Hu, J.I.A., Moore, D.J.P., Burns, S.P. and Monson, R.K. (2010) Longer Growing Seasons Lead to Less Carbon Sequestration by a Subalpine Forest. *Global Change Biology*, **16**, 771-783. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01967.x>
- [44] Lucht, W., Prentice, I.C., Myneni, R.B., Sitch, S., Friedlingstein, P., Cramer, W., Bousquet, P., Buermann, W. and Smith, B. (2002) Climatic Control of the High-Latitude Vegetation Greening Trend and Pinatubo Effect. *Science*, **296**, 1687-1689. <https://doi.org/10.1126/science.1071828>
- [45] Nemani, R., White, M., Thornton, P., Nishida, K., Reddy, S., Jenkins, J. and Running, S. (2002) Recent Trends in Hydrologic Balance Have Enhanced the Terrestrial Carbon Sink in the United States. *Geophysical Research Letters*, **29**, 106-109. <https://doi.org/10.1029/2002GL014867>
- [46] Schaffer, K., Denning, A.S. and Leonard, O. (2005) The Winter Arctic Oscillation, the Timing Offspring, and Carbon Fluxes in the Northern Hemisphere. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**, GB3017.

<https://doi.org/10.1029/2004GB002336>

- [47] Klein, J.A., Hopping, K.A., Yeh, E.T., Nyima, Y., Boone, R.B. and Galvin, K.A. (2014) Unexpected Climate Impacts on the Tibetan Plateau: Local and Scientific Knowledge in Findings of Delayed Summer. *Global Environmental Change*, **28**, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.03.007>
- [48] Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G. and Guo, R. (2015) Accelerated Dryland Expansion under Climate Change. *Nature Climate Change*, **6**, 166-171. <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
- [49] (2014) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.