中国科学: 地球科学 2020 年 第 50 卷 第 11 期: 1618 ~ 1632
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

基于多遥感产品和地面观测的北极苔原春季返青期特征研究

郑江珊[1,2], 徐希燕[1], 贾根锁[1*], 吴文瑾[3]

1. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094
* 通讯作者, E-mail: jiong@tea.ac.cn

收稿日期: 2019-09-28; 收修改稿日期: 2020-05-08; 接受日期: 2020-06-09; 网络版发表日期: 2020-07-30
国家自然科学基金面上项目(批准号: 41875107)和中国科学院战略性先导科技专项A类项目(编号: XDA19070203)资助

摘要 北极是气候变化的敏感区, 其增温幅度约为全球地表平均增温幅度的两倍. 北极苔原由于受到气候变化的影响其生长特征出现明显的年际和季节波动. 本研究基于北极苔原区29个地面台站的长期连续观测数据, 对2000~2018年遥感归一化植被指数(NDVI)、归一化水分指数(NDWI)和归一化雪指数(NDSI)采用多种拟合方法进行平滑降噪, 并提取返青期日期(SOS). 同时利用多源地面观测资料, 包括通量、物候影像和实地物候记录, 对遥感返青期进行验证, 探究返青期的时空变化规律及其在不同植物群落的变化特征. 结果表明, 在研究的站点中, 纬度越高, 返青期开始时间越晚; 纬度每向北增加一度, 返青期推迟约3.86天. 2000~2018年间, 不同的植物群落, 返青期的发生时间和年际变化幅度差异大; 尽管2000~2018年间研究站点的时间变化趋势并不显著, 但不同群落的返青期在2016年之后逐年推迟. 高北极植被包括: (1) 以莎草/禾草、苔藓为主的北极低矮湿地复合体(5~10cm), (2) 稍高的匍匐、半匍匐矮灌木苔原(<15cm); 高北极植被的大部分返青期呈延迟趋势. 低北极植被包括: (1) 以莎草、苔藓、矮灌木为主的湿地复合体(10~40cm), (2) 以莎草和矮灌木为主的直立灌木苔原(20~50cm), (3) 包含苔原与泰加林的过渡带; 大部分的低北极植被返青期无明显趋势.

关键词 北极, 物候, 返青期, 苔原, 遥感, 气候

1 引言

近百年来地球气候系统正在经历以变暖为主要特征的显著变化, 高纬度地区变暖程度比中低纬度更大. 近几十年, 由于海冰减少而导致的“北极放大”(Arctic amplification)效应加剧(Dai等, 2019), 北极近地表气温的上升幅度几乎是全球地表平均的两倍以上(Serreze和Francis, 2006; Screen和Simmonds, 2010). 而气候的显著变化对相对敏感的北极生态系统具有重要的影响(Chapin等, 2000; Hinzman等, 2005; Li等, 2020), 主要原因是北极苔原生态系统的营养结构简单, 恢复力和抵抗力的稳定性较弱. 全球气候变暖, 由矮小的苔

中文引用格式: 郑江珊, 徐希燕, 贾根锁, 吴文瑾. 2020. 基于多遥感产品和地面观测的北极苔原春季返青期特征研究. 中国科学: 地球科学, 50(11): 1618–1632, doi: 10.1360/SSTe-2019-0228
英文引用格式: Zheng J, Xu X, Jia G, Wu W. 2020. Understanding the spring phenology of Arctic tundra using multiple satellite data products and ground observations. Science China Earth Sciences, 63(10): 1599–1612, https://doi.org/10.1007/s11430-019-9644-8

© 2020 《中国科学》杂志社

藓、地衣和低矮被子植物构成的北极苔原生态系统正逐步让位于更高大的灌木丛和北方森林，同时原有植物高度增加，其他较低纬度的新物种也正在向高纬度地区入侵(Chapin等, 2005; Macias-Fauria等, 2012). 根据历史和近期航空照片对比以及本地观测，自1950年以来，阿拉斯加北部苔原地区的直立灌木面积增长速率达到1.2% decade^{-1}(Sturm等, 2001; Thorpe等, 2002).

物候代表了植被的季节动态，可作为区域气候变化的间接指标(Menzel等, 2006)，其不仅仅受气候影响，也通过调节叶片的萌芽和休眠、植物冠层的生理活动进而从多种尺度上对气候进行反馈(Richardson等, 2013a; Xu等, 2020). 因此, 及时了解气候变化背景下物候的响应，可以帮助我们更好地理解与重视全球变暖带来的影响，进而可以使用模型进行物候的预测. 近几十年来, 在不同的地区和生物群落中, 特别是在北半球高纬度地区, 卫星(Tucker等, 2001; Zeng等, 2011; Jeong等, 2011; Kobayashi等, 2016)和地面观测(Menzel, 2000; Cooper等, 2011; 仲舒颖等, 2012; 王焕炯等, 2012; Oberbauer等, 2013; Andresen等, 2018; 刘玉洁等, 2018)皆显示植被春季物候发生了显著改变.

由于人工观测物候的局限性，同时随着遥感和云计算技术等的发展，卫星传感器依靠其观测尺度大、可长时间连续观测的优点，越来越多的应用于物候分析. 遥感指数——归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为表征地表植被覆盖和生长状态、监测植被变化和解释气候、天气事件对生物圈影响的主要参数之一，已在生态、农业等领域得到广泛应用(Jia等, 2006; 苗晨等, 2014; Xu等, 2018). 但在高纬度寒冷地区，由于冬季冰雪覆盖的影响，不同的NDVI产品之间存在一定的差异(Xu等, 2019)，因此NDVI对于植被生长变化的监测有局限性, 这时可以使用归一化水指数(normalized difference water index, NDWI)和归一化雪指数(normalized difference snow index, NDSI)进行辅助. NDWI能有效地评估植被冠层的水分含量(Delbart等, 2005; Thompson等, 2015; 张海威等, 2018). NDSI被广泛用于监测有效的雪覆盖面积和变化(Hall等, 2002; Nagler等, 2008; 郝晓华等, 2008; Hui等, 2017), 可辅助识别雪覆盖对植被的影响.

本研究结合多源地面观测数据与多光谱遥感数据, 并使用多个遥感指数提取植被春季物候, 发挥各数据类型的优点进行研究分析. 本文以北极60°N~80°N苔原地区的29个站点为研究对象，采用多源地面观测资料与遥感指数数据结合的方法，对北极苔原区2000~2018年植被返青期的变化进行研究，探讨不同数据方法获取北极苔原区植被返青期的意义和可行性, 探究返青期的时空变化规律, 旨在揭示: (1) 北极苔原地区春季物候的空间和时间变化特征; (2) 不同植物群落春季物候变化的差异.

2　数据与方法

2.1　数据

2.1.1　地面观测资料

地面观测数据来源主要包括通量观测网络、物候影像数据和实验观测. 站点分布图见图1，站点详细信息见网络版附表S1(http://earthcn.scichina.com)，共计142站点年(site-years).

通量观测数据来源为全球通量网(FluxNet)和美洲通量网(AmeriFlux)的生态系统-大气二氧化碳(CO_2)净交换量(NEE)数据, 包括21个站点, 共100站点年. FluxNet和AmeriFlux作为全球与美洲的通量观测研究网络，为区域或全球尺度的碳水循环模拟提供了强有力的数据基础(Friend等, 2007).

物候影像来源为生态系统物候相机观测网络(PhenoCam)(Richardson等, 2018)的5个站点, 共18站点年, 以及Zackenberg valley实验(Westergaard-Nielsen等, 2017)的1个站点，共6站点年. 物候相机观测网络是一个全球性的合作网络，主要使用数码相机跟踪植被物候，可作为直接观测与卫星数据之间的桥梁，至今已有393个站点，1783站点年(来自2019年发布的PhenoCam Dataset v2.0)(Seyednasrollah等, 2019). Zackenberg valley实验站位于格陵兰岛东北部, 主要使用单台摄像机拍摄高北极4个不连续观测区域(region 1~4), 观测时间为2000~2013年. 目前仅有区域4的2008~2013年数据供公开使用，因此我们选择该区域进行物候与生态系统生产力的监测与评估.

实验观测数据来源为Toolik field station Environmental Data Center(以下简称Toolik)的植被物候计划(Environmental Data Center Team, 2019)的两个站点(站点a和b)，共18站点年. Toolik野外试验站位于美国阿拉斯加州北部, 观测始于2007年, 主要监测潮湿酸性

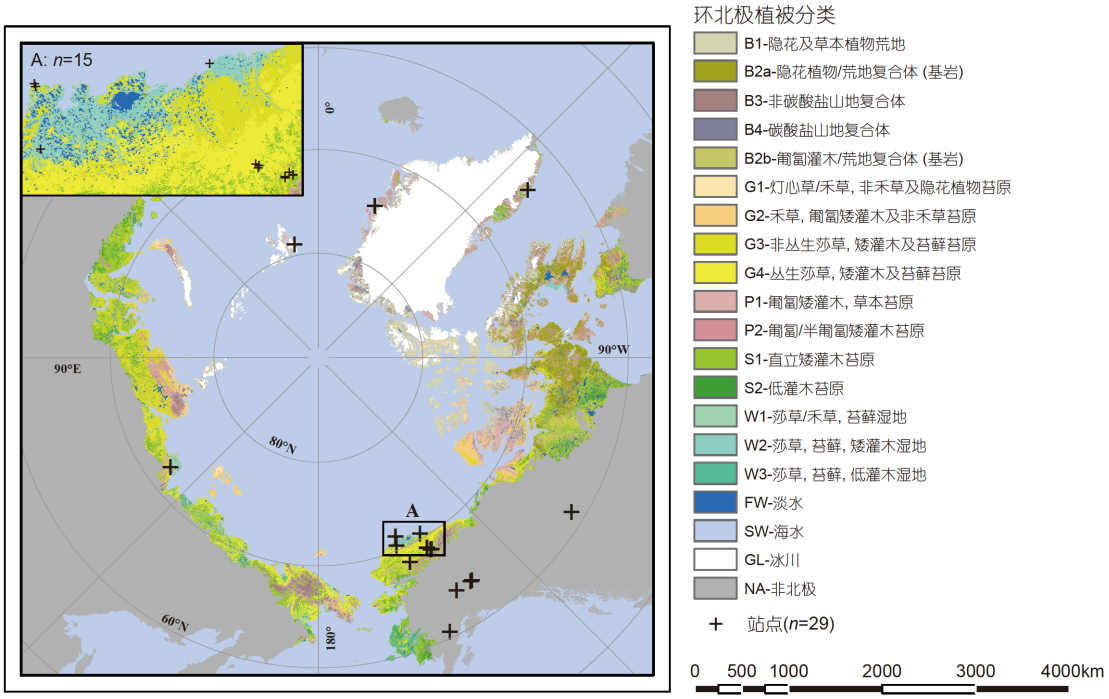

图 1　基于环北极植被分类(CAVM)的植被类型空间分布图和本研究中地面观测的站点分布

黑色十字表示研究站点, *n*表示站点数量. 由于阿拉斯加北部区域(A)站点比较密集, 我们将其放大作为左上角的附图

草丛和干燥荒地苔原的植被物候, 观测频率在5月下旬到6月中旬为每周2次, 6月中旬之后每周1次, 植被开始衰老后恢复为每周2次.

2.1.2　多参数遥感数据产品

遥感数据来源主要为中等分辨率成像光谱仪MODIS陆地产品第6版地表反射率(MOD09GA)数据(Vermote和Wolfe, 2015). 其空间分辨率为500m、时间分辨率为1天. MOD09GA产品提供了1~7波段每日栅格化二级数据产品(L2G), 投影为正弦曲线投影, 包括500m的地表反射率值和1km的观测和地理位置统计值. 本研究覆盖时间为2000年2月至2018年12月. MOD09GA主要用来计算日尺度的NDVI、NDWI和NDSI, 所有NDVI、NDWI和NDSI产品均由谷歌地球引擎平台(https://earthengine.google.com/)免费获取, 该平台数据产品已消除了大部分云、大气等造成的影响.

2.2　方法

(1) 通量数据提取物候参数. 通量观测数据使用NEE来提取植被春季物候. 首先使用三次平滑样条函数将NEE原始时间序列进行平滑, 定义NEE从正变为负, 即CO_2从源到汇的转变日期为春季返青日期. NEE由正变为负的日期与记录的SOS有很好的一致性, 且跟土壤温度和气温表征的返青日期基本一致(Baldocchi等, 2005; Melaas等, 2013).

(2) 物候相机观测网络(PhenoCam)提取物候参数. 物候相机观测网络和Zackenberg valley实验通过对感兴趣区域(ROI, region of interest)计算相对绿度指数(GCC, green chromatic coordinate)来提取春季返青日期. GCC反映了植被绿光(545~565nm)反射率在不同物候时期的差异, 因此可以作为表征植被绿度和季节轨迹的可靠参数(Ahrends等, 2008; Richardson等, 2013b). GCC的计算公式如下(Richardson等, 2007):

$$\mathrm{GCC} = \frac{DN_{\mathrm{green}}}{DN_{\mathrm{red}} + DN_{\mathrm{green}} + DN_{\mathrm{blue}}}, \tag{1}$$

式(1)中, DN_{red}、DN_{green}、DN_{blue}分别对应像素中红、绿、蓝波段亮度值.

本研究使用物候相机观测网络提供的GCC产品(滑动窗口为3天)的第90个百分位数值达到10%振幅的日期作为春季返青日期(Klosterman等, 2014), 其已经

过严格的质量控制和检查, 剔除了过亮、过暗和太阳高度低于地平线10°时获得的图像, 具有噪声少、受异常值影响小的优点(Richardson等, 2018). Zackenberg valley实验中的区域4(2008~2013年)GCC数据, 通过双sigmoid模型拟合, 定义曲率变化率第一次达到最大值的日期为春季返青期(Zhang等, 2003; Klosterman等, 2014).

(3) 实验观测数据提取物候参数. Toolik的植被物候计划对潮湿酸性草丛(站点a)和干燥荒地苔原(站点b)分别进行观测, 每个站点包括5个相距小于100m的观测样地, 主要记录9个物候阶段, 分别为无雪日期、展叶期、花芽萌动期、初花日期、落花初期、落花末期、种子脱落期、叶变色初期和叶变色末期. 本研究将每个站点5个样地的展叶期进行平均, 分别得到站点a和b的SOS.

(4) 遥感数据提取物候参数. 本研究使用MOD09-GA产品的波段1、2、4和6进行归一化植被指数(NDVI)(Huete等, 1985; Jackson和Huete, 1991)、归一化水指数(NDWI)(Gao, 1996)、归一化雪指数(NDSI)(Crane和Anderson, 1984; Dozier, 1989)的计算. 遥感指数计算公式如下:

$$\mathrm{NDVI}=\frac{\rho_{b2}-\rho_{b1}}{\rho_{b2}+\rho_{b1}}, \tag{2}$$

$$\mathrm{NDWI}=\frac{\rho_{b2}-\rho_{b6}}{\rho_{b2}+\rho_{b6}}, \tag{3}$$

$$\mathrm{NDSI}=\frac{\rho_{b6}-\rho_{b4}}{\rho_{b6}+\rho_{b4}}, \tag{4}$$

式(2)~(4)中, ρ_{b1}、ρ_{b2}、ρ_{b4}、ρ_{b6}分别为MODIS的波段1(0.620~0.670μm)、波段2(0.841~0.876μm)、波段4(0.545~0.565μm)和波段6(1.628~1.652μm)的反射率.

利用动态阈值法, 参考Delbart等(2005)的试验结果, 定义返青开始的日期(SOS). 春季温度升高时, NDVI逐渐增加, 而NDWI和NDSI逐渐减少. 对于NDVI, SOS为数值从最小值开始, 增长到与最大值之间20%的日期(Yu等, 2010; Zhu等, 2013; Shen等, 2014a); 对于NDWI和NDSI, SOS为数值从最大值开始下降, 达到最小值的日期. 遥感指数容易受到不利气象条件和其他因素的干扰, 需要进行去噪声处理(Shen等, 2013; Wang等, 2013). 首先我们根据MOD09GA产品质量控制文件对反射率数据进行筛选, 去除被云、气溶胶和积雪污染严重、水体比例较大的像素; 然后对不符合要求的NDVI值进行剔除. 例如, 剔除3月1日到10月1日之间小于0的NDVI值, 以减少初春积雪的影响; 对缺失值采用线性插值, 并使用8天最大值合成法(Holben, 1986)来消除残余的太阳高度角、云和大气等噪声的影响. 为进一步消除时间序列中的噪声和积雪影响, 我们采用Jönsson和Eklundh(2002)共同开发的TIMESAT软件包中提供的Savitzky-Golay滤波、非对称高斯函数和双Logistic函数拟合方法, 对遥感指数时间序列进行平滑处理. 不同的拟合方法会影响SOS的数值, 但一般不会影响SOS总的变化趋势(Cong等, 2013; Shen等, 2014b). 同时考虑到各拟合法的优缺点, 我们在剔除明显拟合异常值的情况下, 对三种拟合法获取的SOS值进行平均, 从而折中不同方法的优劣.

3 结果

3.1 不同遥感指数提取的植被返青开始日期(SOS)与地面台站观测数据进行对比

不同数据源由于观测的时间和空间尺度、提取物候期的方式不同, 估算得到的植被返青期存在差异. 为验证不同地面数据源与遥感提取物候的差异, 我们选取3个不同纬度、不同植被类型的站点, 分别对比了NDVI、NDWI、NDSI与NEE、PhenoCam和实地观测记录的时间序列和估算的返青期(图2). 相对于NDVI, NEE提取的返青期偏晚(图2a), 但结果仍然很接近. GCC提取的返青期也晚于NDVI提取的返青期(图2b). 由NDSI和NDWI提取的返青期则明显晚于由NDVI和其他地面观测获取的返青期.

我们将遥感指数NDVI(图3a)、NDWI(图3b)、NDSI(图3c)提取的SOS与对应站点和年份的地面观测SOS数据进行拟合. 表1为各遥感指数与各地面观测类型的拟合参数, 三条拟合曲线都为极显著相关(p<0.0001). NDVI提取的SOS与对应年份地面观测的SOS更为接近(R^2=0.85), 而NDWI和NDSI推算的SOS值偏大. 可能原因是NDWI与NDSI作为表征水分的遥感指数, 在高纬度地区受初春地表积雪覆盖的影响, 对于感应植被季节的动态变化存在一定程度的延迟. 三个遥感指数提取的SOS都可在一定程度上代表该站点的植被物候, 其中NDVI提取的SOS效果优于其他两个指数. 从各项拟合参数看, 通量数据和数码照片观测与遥感数据相关性更高(p<0.0001), Toolik实地观测与

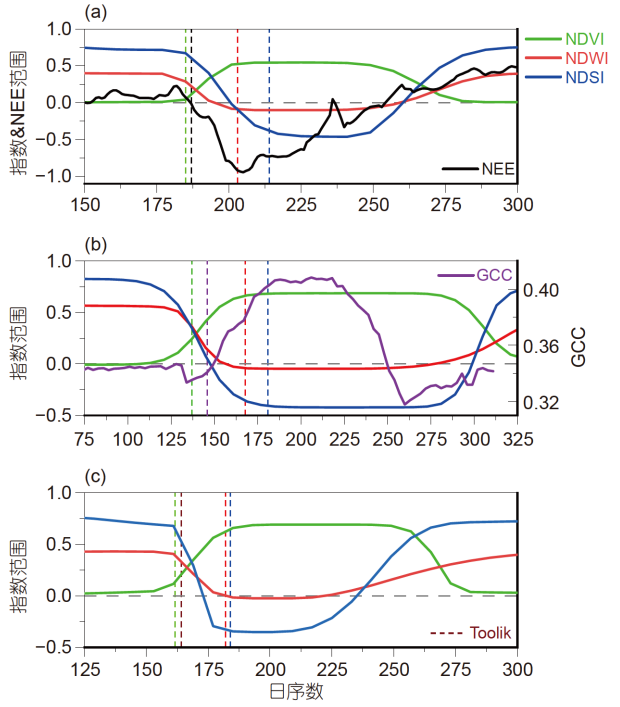

图 2　不同类型地面观测与遥感指数NDVI、NDWI、NDSI时间序列和估算的SOS

(a)为DK-ZaH站点(74.4732°N, 20.5503°W, P2类型)2006年的NEE与遥感指数年变化曲线, (b)为NEON.D19.HEAL.DP1.00042站点(63.8757°N, 149.2133°W, NAA类型)2018年的GCC与遥感指数年变化曲线, (c)为Toolik-MAT站点(68.6214°N, 149.6092°W, G4类型)2013年的遥感指数年变化曲线. 绿色、红色和蓝色竖直虚线分别为NDVI、NDWI和NDSI估算的返青期时间, 黑色(a)、紫色(b)和褐色(c)竖直虚线分别为NEE、GCC和Toolik提取的返青期时间

遥感数据相关性较差(p>0.01).

3.2　植被返青期(SOS)的纬度梯度和时间变化趋势

我们将每个站点2000~2018年间的返青日期进行平均, 得到不同遥感指数提取的SOS与地面观测值的纬度梯度, 并进行线性拟合(图4). 3个遥感指数与地面观测的结果趋势基本一致, 都与纬度呈正相关, 即随纬度增加, SOS越晚. 3个指数与地面观测的平均增长幅度为3.86天/纬度. NDWI(k=3.70, R^2=0.74, p<0.0001)与NDSI(k=3.58, R^2=0.72, p<0.0001)的增长斜率更接近地面观测(k=3.67, R^2=0.60, p<0.0001)的增长斜率, 而NDVI(k=4.48, R^2=0.78, p<0.0001)偏大. NDVI提取的SOS值更为接近地面观测值, 而NDWI与NDSI提取的SOS的日期偏大.

由于地面观测资料时间相对较短, 且各站点观测时间范围不一致, 我们仅对各站点2000~2018年的遥感SOS时间变化进行分析. 对SOS序列采用最小二乘法, 按照不同遥感指数将时间变化斜率进行分类, 得到SOS变化趋势箱线图(图5). 3个遥感指数均显示北极苔原区植被返青在2000~2018年有轻微延迟的趋势(斜率为正), 平均延迟约为1.2days decade^{-1}. NDVI提取的SOS延迟程度较强, 约为1.53(−0.55~3.31)days decade^{-1}, NDWI提取的SOS延迟程度为0.98(−1.05~3.40) days decade^{-1}, NDSI提取的SOS延迟程度为0.73 (−1.91~2.66)days decade^{-1}.

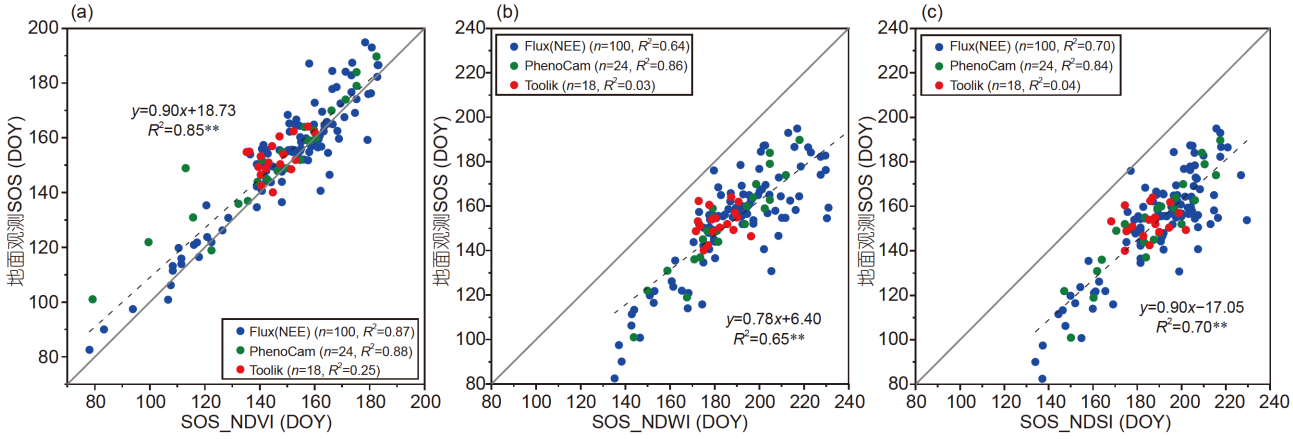

图 3　地面观测与遥感指数NDVI(a)、NDWI(b)、NDSI(c)提取的SOS的对比

Flux(NEE)表示通量站观测的生态系统-大气CO_2净交换量(NEE)提取的SOS, PhenoCam表示由物候相机观测网络和Zackenberg valley实验提取的SOS, Toolik表示由Toolik field station Environmental Data Center(TFS EDC)观测提供的SOS. n表示站点年数量, R^2表示各地面观测数据与遥感指数提取的SOS的决定系数. **表示遥感指数估计的SOS和地面观测的SOS拟合显著(p<0.0001). DOY(Day of year)即日序数

表 1　不同遥感指数与各地面观测类型的回归模型

遥感指数	地面观测类型	站点年数量n	决定系数R^2	斜率k	p值	自由度DF
NDVI	总体	142	0.85	0.90	<0.0001	140
	Flux(NEE)	100	0.87	0.95	<0.0001	98
	PhenoCam	24	0.88	0.78	<0.0001	22
	Toolik	18	0.25	0.48	0.0339	16
NDWI	总体	142	0.65	0.78	<0.0001	140
	Flux(NEE)	100	0.64	0.77	<0.0001	98
	PhenoCam	24	0.86	1.01	<0.0001	22
	Toolik	18	0.03	0.15	0.4952	16
NDSI	总体	142	0.70	0.90	<0.0001	140
	Flux(NEE)	100	0.70	0.92	<0.0001	98
	PhenoCam	24	0.84	0.96	<0.0001	22
	Toolik	18	0.04	0.14	0.4565	16

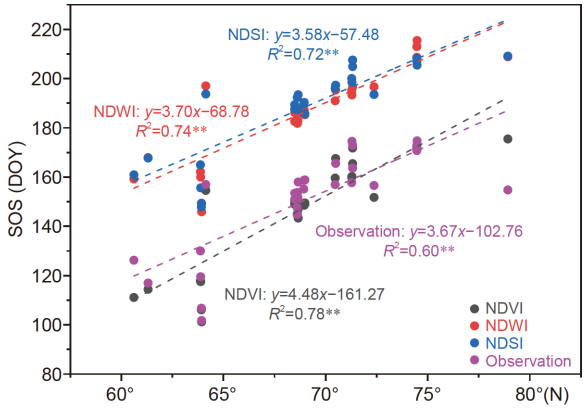

图 4　遥感指数NDVI、NDWI、NDSI提取的SOS和地面观测数据(observation)提取的SOS的纬向梯度

**表示纬向变化趋势显著(p<0.0001)

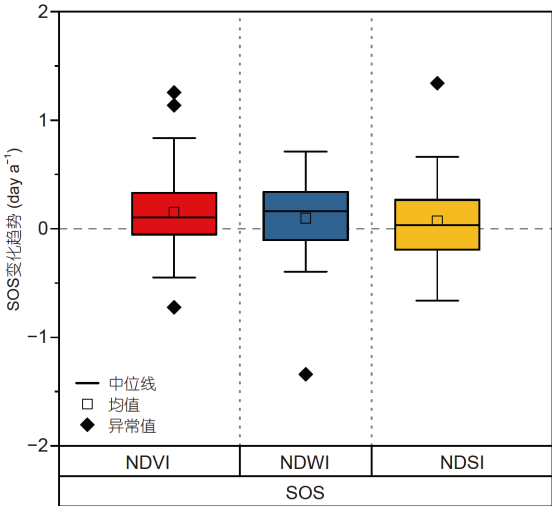

图 5　由NDVI、NDWI和NDSI提取的SOS的时间(2000~2018年)变化趋势

3.3　不同植被种类的返青期时间变化趋势

根据北极圈植被分类(CAVM)(Walker等, 2005), 本研究中主要涉及的苔原植被类型可分为5类(图1, 网络版附表S1). W1为北极寒冷地区的湿地复合体, 植物主要以高度在5~10cm的莎草/禾草和苔藓为主; P2为高度在10~20cm的匍匐/半匍匐矮灌木苔原; W2为北极较温暖地区的湿地复合体, 植物主要以高度为10~40cm的莎草、苔藓、矮灌木为主; G4植被类型更为丰富, 主要为高度20~50cm的莎草、矮灌木和苔藓苔原; NAA是指分布在环北极植被地图中定义的非北极地区, 主要包括分布在苔原与泰加林的过渡带高度更高的植被类型.

相较于NDWI与NDSI, NDVI提取的SOS与地面观测数据更加接近(图3), 因此这里只考虑使用NDVI提取不同苔原植被类型的SOS. 不同植被类型的返青期发生时间具有较大差异, NAA类型的返青期发生最早, P2类型的返青期发生最迟(图6). 按照同一种植被类型对SOS时间序列进行平均处理, 并对SOS平均值的时间序列使用最小二乘法估计变化趋势. 各植被类型的SOS年际变化幅度大, 其中P2类型的变化幅度最大, 为47.69天; G4类型的变化幅度最小, 为19.2天; W1、W2和NAA类型的变化幅度分别为23.43、28.98和

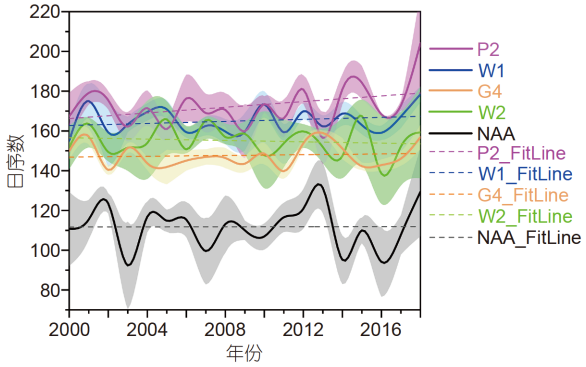

图 6　由NDVI提取的5种不同苔原植被类型SOS均值的时间序列

将同一植被类型的所有站点的时间序列进行平均, 阴影区域为标准差范围. W1为莎草、禾草、苔藓湿地, 属于北极寒冷地区的湿地复合体; P2为匍匐/半匍匐矮灌木苔原; W2为莎草、苔藓、矮灌木湿地, 属于北极较温暖地区的湿地复合体; G4为莎草、矮灌木和苔藓苔原; NAA是指在环北极植被地图中定义的非北极地区

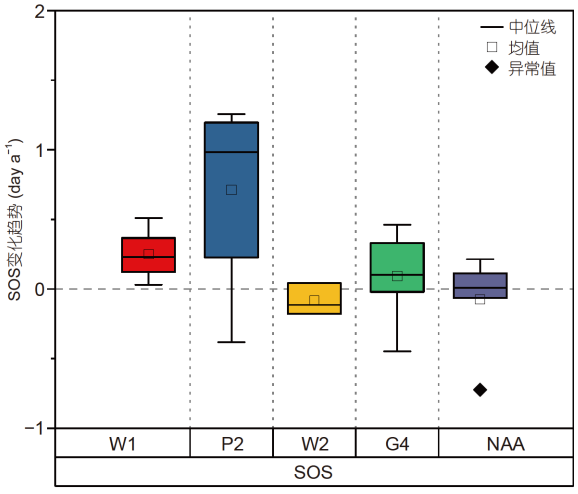

图 7　由NDVI提取的5种不同苔原植被类型SOS的时间变化趋势

38.99天. 各植被类型的平均SOS年际变化趋势中, P2 (k=0.71days a^{-1}, R^2=0.14)、W1(k=0.25days a^{-1}, R^2=0.05)和G4(k=0.10days a^{-1}, R^2=0.01)呈微弱滞后趋势, W2(k=−0.17days a^{-1}, R^2=0.02)呈微弱提前趋势, NAA(k=0.01days a^{-1}, R^2<0.01)无明显趋势(图7), 所有趋势皆不显著(p>0.05). 尽管如此, 我们发现几乎所有类型植被返青期在2016年之后都出现了显著的推迟(图6). 具有近年连续观测的PhenoCam也记录到这一显著推迟现象.

4　讨论

4.1　不同数据源估算的返青期对比

本研究使用了多种地面观测数据集和遥感资料进行北极苔原地区春季返青期的时空变化特征研究. 其中地面观测数据包括生态系统-大气二氧化碳净交换量(NEE)数据、物候影像和实地观测记录. 遥感资料来自MODIS卫星的地表反射率(MOD09GA)数据. 地面观测数据基于站点观测, 时间分辨率高, 可以针对不同物种或群落进行观测记录. 但由于在高纬度地区受环境与设备条件的限制, 地面观测台站相对于中低纬度地区较少(Myers-Smith等, 2019), 且缺乏长时间、连续的观测资料, 大部分站点观测时间少于10年. 目前, 仅有少数几个环北极台站有包含环境变量、物候等多参数的较长期监测系统, 包括瑞典北部的Abisko(68.35°N, 18.83°E)(van Wijk等, 2004; Callaghan等, 2010; Hobbie等, 2017)、阿拉斯加北部的Toolik Lake (68.63°N, 149.60°W)(van Wijk等, 2004; Hobbie等, 2017)、格林兰岛东部的Zackenberg(74.50°N, 27.77°W)(Høye等, 2007; Iler等, 2013)以及加拿大北部Ellesmere岛上的Alexandra Fiord(78.88°N, 75.80°W)(Svoboda等, 1994; Hudson和Henry, 2010; Hudson等, 2011; Bjorkman等, 2015). 因此, 在分析北极植被物候的时间变化时使用具有长时间序列的遥感卫星资料可以弥补地面台站的不足.

不同数据源由于观测的时间和空间尺度、提取物候期的方式不同, 估算得到的植被返青期存在差异. 通量观测的生态系统-大气二氧化碳净交换量(NEE)可以得到碳通量物候(carbon flux phenology, CFP), 定义NEE在春季从正到负(CO_2从源到汇)的时间为净生态系统碳吸收期开始(start of uptake period, SUP), 在秋季从负到正(CO_2从汇到源)的时间为碳吸收期结束(end of uptake period, EUP), 以及碳吸收长度(carbon uptake period, CUP)等指标(Richardson等, 2010; Wu等, 2012). 由于通量塔的监测范围在250~3000m, 与空间尺度相近的MODIS遥感数据有较好的可比性(严燕儿等, 2008). 虽然从物理意义上, NEE在春季从正到负的时间并不能准确对应植被返青的开始, 但在北极地区, 由于冬季漫长且环境恶劣, 土壤呼吸微弱, 一旦温度和水分达到生长条件, 植被会迅速生长繁殖, 积累有机碳,

从而NEE响应迅速(Emmerton等, 2016). 物候相机通过拍摄植被照片，提取感兴趣区(ROI)的相对绿度指数(GCC)来估算植被物候期(Richardson等, 2007)，表征的是地面一定范围内植被绿度达到某个程度的时间(Richardson等, 2013b). 在本研究中，我们使用动态阈值法来估算返青期，即GCC产品(滑动窗口为3天)的第90个百分位数值达到10%振幅的日期(Klosterman等, 2014). 经过质量控制(例如, 剔除过亮、过暗和太阳高度低于地平线10°时获得的图像)，90th GCC产品具有噪声小的优点, 但相对于GCC平均值, 50th和75th GCC产品，它受离群值的影响更大. 另一方面，仪器的安装角度决定了观测的视角，视角的不同会对最终提取结果产生影响，造成不同站点之间存在差异. Toolik地面观测记录的物候是对观测样地在物种尺度上能明显看到叶片(First leaf evident)的时间, 但由于同一个站点内5块样地相距很近，且各物种占比数据未公开，因此基于观测记录里的物种类型以及环北极植被分类方法，定义Toolik-HTH和Toolik-MAT站点为G4(莎草、矮灌木、苔藓苔原)类型，仅考虑群落水平上的物候. 由于该观测站是由人工记录的明显看到叶片的日期，与基于地表反射率的遥感指数定义的生长季开始日期并不完全相同；同时，该站点是在物种水平上进行物候观测，我们将相邻的5个样地的展叶期进行平均，得到群落水平的返青期. 由于空间尺度上的不匹配和物候期定义的不同，从而导致实地观测与遥感指数提取的返青期相关性并不好.

尽管地面观测与遥感数据在空间尺度和时间分辨率上存在差异，但利用景观放大法(landscape up-scaling approach)和高时空密度数据(Liang等, 2011) , 证实基于卫星的地表物候能捕捉到与地面观测一致的年际变化和空间差异. 本研究也证实, 遥感指数提取的返青期与地面观测有一致的纬度梯度和年际变化. 遥感指数监测到几乎所有植被类型返青期在2016年后出现显著推迟, 具有近年连续观测的PhenoCam也记录到这一推迟现象. 与NDVI相比, GCC提取的返青期偏晚, 证实了Klosterman等(2014)的研究结果. 同时有文章指出，在春季后期以及秋季末期，NDVI监测到的物候比GCC提取的要晚，因此基于卫星数据估算的植被生长季偏长(Kobayashi等, 2016). Baldocchi等(2005)也发现相对于NDVI, NEE提取的返青期偏晚，但结果仍然很接近, 说明基于NEE数据提取的碳吸收期开始(SUP)虽然与基于NDVI的植被返青期存在轻微系统偏差, 但它们所反映的趋势是一致的.

本研究验证Delbart等(2005)使用不同遥感指数: NDVI、NDWI和NDSI推算返青期的尝试. NDWI估算的返青期相较于NDVI偏晚(图2)，这一现象与Kobayashi等(2016)的结果一致. 由于在高纬度地区受初春地表积雪的影响, NDWI不仅对植被水分含量敏感, 同时也对地表湿度敏感，因此NDWI在湿度和植被生长的共同作用下逐渐下降，被认为是返青期向后延迟了. NDSI作为表征积雪的遥感指数，虽然与地面观测的返青期具有一致性较好的纬度梯度，但其提取的返青期偏晚(图2)，这与NDWI情况类似. NDSI在一定程度上可以表征北极苔原的春季返青期，但由于受地表积雪和可能存在的不稳定降雪的影响, NDSI提取的返青期偏大. 目前我们的研究局限于站点尺度, 当扩展到更大的区域尺度上时, 对数据质量控制带来难度, 尤其在中高纬受到积雪影响的区域. 近年来有许多不受融雪影响的植被指数，例如NDPI(normalized difference phenology index)(Wang等, 2017)、NDGI(normalized difference greenness index)(Yang等, 2019)等, 这些指数在监测中高纬草地和苔原的物候方面具有很高的潜力, 可用于测试不同遥感指数在苔原地区的适用性.

4.2　物候变化趋势及影响因素

本研究在站点尺度上得到的结论为北极苔原地区典型植物群落的春季物候出现轻微延迟或不变，而近年来多数研究观点主要为生长季开始时间提前、生长季结束时间推迟，进而导致生长季节时间延长(Jia等, 2004, 2006, 2009; Goetz等, 2005; Jeong和Medvigy, 2014; Xu等, 2018). 但生长季开始时间提前的程度在不同时间段有差别，例如，由甚高分辨率扫描辐射计(advanced very high resolution radiometer, AVHRR)监测得到1982~1991年间45°N~75°N地区SOS提前6.2days decade^{-1}，1992~1999年则提前2.4days decade^{-1}(Tucker等, 2001)；由AVHRR监测得到1982~1999年间北半球SOS提前3.1days decade^{-1}，而2000~2008年间仅提前0.2days decade^{-1}(Jeong等, 2011)；由中欧西部的3984个站点的地面观测记录和GIMMS(NASA global inventory modeling and mapping studies)第三代NDVI数据集得到的SOS在1982~2011年间平均提前4.5days decade^{-1}，但在2000~2011年间提前速率明显降低，卫星数

据甚至显示SOS具有延迟趋势(Fu等, 2014). 这些结果表明, SOS的提前程度正在减缓, 且已有部分研究证实, SOS已表现出延迟的趋势. Cooper等(2011)在斯瓦尔巴岛Adventdalen(78°10′N, 16°06′E)的一项实验结果证实, 当地维管植物由于受融雪延迟的影响, 导致春季物候延迟且生长季长度减少. Oberbauer等(2013)根据国际苔原实验(international tundra experiment, ITEX)发现在1992~2009年北美和北欧地区返青期开始的时间显著推迟, 而开花期和衰老期提前; 与低北极和高山植物相比, 高北极植物的物候转变更易发生在较低的热量和(heat sum)阈值下. Wang等(2015)使用遥感数据集发现北美西部的SOS提前趋势从2000年来有所减弱, 在加拿大和西伯利亚的部分地区SOS出现延迟的趋势. Park等(2018)使用GIMMS第三代NDVI数据集对北方森林的SOS进行研究, 发现在北美西北部SOS已从1982~1997年间的提前4.2days decade^{-1}, 转变为1982~2017年间的延迟0.7days decade^{-1}. Xu等(2019)使用MODIS和AVHRR两种遥感数据集发现2001~2013年间北美地区的返青期延迟, 延迟程度分别为1.8和8.8days decade^{-1}.

本研究认为北极苔原地区春季物候大部分延迟的原因可能是: (1) 研究站点分布不连续, 包含多种苔原植物群落, 不同群落的生态特征存在差异, 因此具有较高的空间异质性. (2) 温度被认为是影响北极苔原地区植被群落分布和生物量的重要因素(Epstein等, 2008; Walker等, 2009), 但有研究认为从1998年至今, 全球平均地表温度变化相对较小, 即地球进入升温间歇期(IPCC, 2013). 也从此时开始, 返青期提前的程度正在减缓(Tucker等, 2001; Jeong等, 2011; Fu等, 2014), 甚至出现延迟(Wang等, 2015; Park等, 2018). (3) 在高纬度地区, 冰雪长期覆盖, 除了温度之外, 积雪融化的时间和融化后土壤湿度的改变可能是导致物候改变的重要因素(Wang等, 2018). 持续性的冬季变暖可能导致植物的春化作用难以达到要求, 这有可能推迟SOS(Yu等, 2010). 部分站点NDVI开始增长的时间与NDSI开始下降的时间较接近(图2), 可以看出植被返青期与积雪开始融化的时间接近. 考虑到北极地区气候恶劣, 为适应极端的生活环境, 植物生长季被压缩到2~4个月. 一旦温度和湿度达到适宜的生长条件, 植物会迅速生长, 因此积雪融化的时间与苔原春季物候联系密切, 尤其是苔原中常见的常绿灌木. 尽管由于花芽的寒冷耐受性、光抑制性、光周期、在雪下生长的能力、种子休眠和发育速度等性状各有差异(Hamerlynck和Smith, 1994; Meloche和Diggle, 2001; Germino和Smith, 2000; Keller和Körner, 2003), 不同植被物种对于融雪的响应时间不同, 但当融雪提前时, 大部分广泛生长的物种开花期会持续更长的时间(Winkler等, 2018). 北极地区极端且短暂的冬季升温事件导致积雪迅速融化, 使生态系统暴露在温暖空气中, 但在恢复到正常的冬季气候之后, 由于缺少隔离的积雪, 生态系统暴露在更冷的温度下, 受到严重冻害并导致春季叶芽萌动期延迟, 同时降低了夏季产量(GPP)(Bokhorst等, 2011; 朴世龙等, 2019).

产量降低这一现象与近年来北极苔原的绿度下降, 即褐变(browning)表现一致, 都是表征植被生长受到自然和人为扰动后绿度降低的现象. 卫星记录显示, 尽管在1982~2017年北极苔原的总体绿度呈增加趋势, 但近年来, 在阿拉斯加西部的育空-库斯科维姆三角洲、加拿大群岛的极北地区以及西伯利亚苔原的西北部和北岸等地区, 都出现植被褐化; 与2016年相比, 2017年苔原绿度有所下降, 其中在欧亚大陆的生长季表现尤为明显(Epstein等, 2019). 本研究的MODIS与地面观测结果都表明, 在2016~2018年间植被返青期滞后尤为显著. 北极苔原区人为扰动较少, 植被褐变主要跟区域的气候变率有关, 主要原因包括: (1) 温度升高虽然被认为是导致苔原绿度增加的主要原因(Ackerman等, 2018; Bjorkman等, 2018), 但一些研究结果显示温度升高对苔原植被无明显影响, 甚至产生有害影响(例如褐变)(Lara等, 2018; Maliniemi等, 2018; Xu等, 2018). (2) 极端事件也可能导致苔原褐变, 包括冬季升温、霜冻干旱、结冰、野火(Pastick等, 2018)等非生物因素, 以及植食性动物的侵食(Olofsson等, 2009)、虫灾爆发(Phoenix和Bjerke, 2016; Treharne等, 2016)等生物因素. (3) 冬季降水, 积雪的动态对苔原植被结构和功能产生影响, 例如长期积雪会促进苔原常绿灌木的生长和夏季NEE的增加, 但会减少土壤碳的存储(Christiansen等, 2018).

4.3 植被群落对沿生物气候梯度的环境变化响应

根据7月平均温度从低到高, 北极圈生物气候分区(Circumpolar Arctic bioclimate)分成ABCDE五个亚区(Walker等, 2002). A分区最冷, 7月平均气温仅0~3℃,

而E分区最暖, 7月平均气温为9~12℃. A分区基本为裸岩, 植被高度较矮, 地衣与苔藓覆盖率为40%, 总生物量小于3t ha^{-1}(本研究不涉及A分区); B分区的植被具有两层垂直结构, 草本层高度可达10cm, 隐花植物覆盖率为60%, 总生物量为5~20t ha^{-1}; C分区的匍匐和半匍匐矮灌木高度可达15cm, 维管植物覆盖度为5~50%, 形成开放的斑块植被带; D分区的草本和矮灌木层高达40cm, 该分区50~80%被维管植物覆盖, 形成间断的封闭冠层带; E分区的植被具有2~3层垂直结构, 有时灌木层可高达80cm, 总生物量达到50~100t ha^{-1}, 植物物种更为丰富. 本研究涉及的5种植被类型中, W1主要分布在C分区的矿质土壤中; P2主要分布在B和C分区的酸性基岩地区, 可覆盖40%以上的地表; W2主要分布在D分区中偏微酸性的沼泽地带(fens); G4含有更丰富的植被类型, 且高度更高, 主要生长在D和E分区偏酸性的潮湿土壤中, 植被覆盖度可达80%以上; NAA则分布在苔原与泰加林的过渡带.

本研究涉及的5种植被类型中, W1、P2和G4的春季返青期呈延迟趋势, W2和NAA的返青期变化趋势不明显, 甚至呈提前趋势. 虽然W1与W2同属于湿地类型, 但两者生长的土壤和气候条件不同, W2生长在富含泥炭的偏酸性土壤中, 处于更为温暖的D分区, 植被覆盖度较W1更大, 植被高度也更高, 从而对于环境的响应不同. 在冬季, 低矮植被易被雪覆盖, 从而地表反照率较高(0.85), 而高大植被的冠层暴露在雪外, 地表反照率较低, 约为0.60(Sturm等, 2005). 当春天开始融雪时, 较高的植被能够更早地开始吸收太阳辐射能量. 由于地表反照率较低, 较高的植物也能够吸收更多的太阳辐射, 从而导致冰雪融化和植被生长提前(Zeng和Jia, 2013). 因此, 雪覆盖的差异使得W2的春季返青期相比于W1更容易提前.

在3个返青期呈延迟趋势的植被类型中, G4的延迟程度最小. 根据Bliss(1997)的北极分类方法, A~C分区可归为高北极区域, D~E分区为低北极区域. 高低北极的边界(即C与D分区的边界)将富含矿物质土壤的北部干燥苔原带与富含泥炭土的南部湿润苔原带分开(Alexandrova, 1980). 本研究中W1和P2主要分布在富含矿物质土壤的干燥高北极, W2、G4与NAA则主要分布在富含泥炭土的湿润低北极. 与高北极植被返青期的延迟趋势相比, 低北极植被的返青期无明显趋势, 甚至微弱的提前. 高北极土壤干燥、贫瘠, 在气候变暖的背景下, 高北极植被易受土壤水分的限制. 低北极土壤更为潮湿, 土壤表层苔藓覆盖率更大, 植被对碳、氮等营养元素的利用率更高(Norby等, 2019). 低北极植被由于高度较高, 能吸收更多的太阳辐射能量, 因此植被生长相对容易提前, 但同样需要考虑除温度之外的其他环境参数的变化, 例如积雪和日照时间.

虽然本研究使用多源地面观测资料与多光谱遥感数据揭示了北极苔原地区春季物候的时空变化, 但是由于观测资料的缺乏, 可用站点大多分布于北美地区, 研究区域还存在一定的限制, 未来仍然需要结合更多观测资料与更大范围的卫星数据进行物候变化及其驱动因子研究.

5　结论

本研究利用北极苔原地区29个野外台站的观测资料和MODIS多参数卫星数据产品提取物候参数并进行验证, 并利用多种遥感指数计算春季物候的时空变化规律, 比较不同植被类型的物候变化特征, 得到以下结论:

(1) 归一化植被指数、归一化水指数和归一化雪指数提取的植被春季返青期都可代表该站点的植被物候, 其中归一化植被指数提取的春季返青期效果优于其他两个指数, 与近地面通量观测和物候探头观测高度一致.

(2) 归一化植被指数、归一化水指数和归一化雪指数获取的春季返青期均能表现北半球60°N~80°N间春季物候与纬度的关系, 纬度越高, 生长季开始时间越晚. 地面观测与遥感指数推算的春季返青期的纬向梯度基本一致. 地面观测的返青期的纬向梯度为3.67天/纬度, 三个遥感指数推算的返青期的纬向梯度为3.92天/纬度.

(3) 2000~2018年间, 不同的植物群落, 返青期的发生时间和年际变化幅度差异大. 尽管2000~2018年间研究站点的时间变化趋势并不显著, 但返青期在2016年之后都呈滞后趋势. 高北极植被(包括以莎草/禾草、苔藓为主的湿地复合体W1和匍匐、半匍匐矮灌木苔原P2)的大部分返青期随时间增加而延迟, 低北极植被(包括以莎草、苔藓、矮灌木为主的湿地复合体W2, 以莎草和矮灌木为主的直立灌木苔原G4和包含苔原与泰加林的过渡带NAA)的大部分返青期无明显变化.

本研究探讨了不同数据方法获取北极苔原区植被返青期的意义和可行性，揭示了近20年北极苔原地区春季返青期的空间和时间变化特征，以及不同植物群落春季返青期变化的差异，对理解北极苔原生态系统在气候变化背景下的适应与改变具有重要的意义. 但是针对我们所研究的站点尺度春季物候的年际变化对气候环境条件的响应，对常年冻土区碳交换的影响还需要在后续工作中进一步研究.

致谢 我们感谢全球通量网(FLUXNET)(https://fluxnet.fluxdata.org/)和美洲通量网(AmeriFlux)(https://ameriflux.lbl.gov/)免费分享的通量数据，感谢生态系统物候相机观测网络(PhenoCam)(https://phenocam.sr.unh.edu/)免费分享的数码相片数据，感谢NASA免费分享的MODIS陆地产品MOD09GA数据集.

参考文献

郝晓华, 王建, 李弘毅. 2008. MODIS雪盖制图中NDSI阈值的检验——以祁连山中部山区为例. 冰川冻土, 30: 132–138

刘玉洁, 陈巧敏, 葛全胜, 戴君虎. 2018. 气候变化背景下1981~2010中国小麦物候变化时空分异. 中国科学: 地球科学, 48: 888–898

苗晨, 申双和, 贾根锁. 2014. 华北平原不同生长发育期作物长势对气候因子的响应研究. 气候与环境研究, 19: 703–712

朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 2019. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. 中国科学: 地球科学, 49: 1321–1334

王焕炯, 戴君虎, 葛全胜. 2012. 1952~2007年中国白蜡树春季物候时空变化分析. 中国科学: 地球科学, 42: 701–710

严燕儿, 赵斌, 郭海强, 吴千红. 2008. 生态系统碳通量估算中耦合涡度协方差与遥感技术研究进展. 地球科学进展, 23: 884–894

张海威, 张飞, 张贤龙, 李哲, Ghulam A, 宋佳. 2018. 光谱指数的植被叶片含水量反演. 光谱学与光谱分析, 38: 1540–1546

仲舒颖, 葛全胜, 郑景云, 戴君虎, 王焕炯. 2012. 近30年北京自然历的主要物候期、物候季节变化及归因. 植物生态学报, 36: 1217–1225

Ackerman D E, Griffin D, Hobbie S E, Popham K, Jones E, Finlay J C. 2018. Uniform shrub growth response to june temperature across the north slope of alaska. Environ Res Lett, 13: 044013

Ahrends H E, Brügger R, Stöckli R, Schenk J, Michna P, Jeanneret F, Wanner H, Eugster W. 2008. Quantitative phenological observations of a mixed beech forest in northern switzerland with digital photography. J Geophys Res, 113: 1

Alexandrova V D. 1980. The Arctic and Antarctic: Their Division into Geobotanical Areas. Cambridge: Cambridge University Press. 247

Andresen C G, Tweedie C E, Lougheed V L. 2018. Climate and nutrient effects on arctic wetland plant phenology observed from phenocams. Remote Sens Environ, 205: 46–55

Baldocchi D D, Black T A, Curtis P S, Falge E, Fuentes J D, Granier A, Gu L, Knohl A, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Wilson K, Wofsy S, Xu L, Yamamoto S. 2005. Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: A synthesis of fluxnet data. Int J Biometeorol, 49: 377–387

Bjorkman A D, Elmendorf S C, Beamish A L, Vellend M, Henry G H R. 2015. Contrasting effects of warming and increased snowfall on arctic tundra plant phenology over the past two decades. Glob Change Biol, 21: 4651–4661

Bjorkman A D, Myers-Smith I H, Elmendorf S C, Normand S, Rüger N, Beck P S A, Blach-Overgaard A, Blok D, Cornelissen J H C, Forbes B C, Georges D, Goetz S J, Guay K C, Henry G H R, HilleRisLambers J, Hollister R D, Karger D N, Kattge J, Manning P, Prevéy J S, Rixen C, Schaepman-Strub G, Thomas H J D, Vellend M, Wilmking M, Wipf S, Carbognani M, Hermanutz L, Lévesque E, Molau U, Petraglia A, Soudzilovskaia N A, Spasojevic M J, Tomaselli M, Vowles T, Alatalo J M, Alexander H D, Anadon-Rosell A, Angers-Blondin S, Beest M, Berner L, Björk R G, Buchwal A, Buras A, Christie K, Cooper E J, Dullinger S, Elberling B, Eskelinen A, Frei E R, Grau O, Grogan P, Hallinger M, Harper K A, Heijmans M M P D, Hudson J, Hülber K, Iturrate-Garcia M, Iversen C M, Jaroszynska F, Johnstone J F, Jørgensen R H, Kaarlejärvi E, Klady R, Kuleza S, Kulonen A, Lamarque L J, Lantz T, Little C J, Speed J D M, Michelsen A, Milbau A, Nabe-Nielsen J, Nielsen S S, Ninot J M, Oberbauer S F, Olofsson J, Onipchenko V G, Rumpf S B, Semenchuk P, Shetti R, Collier L S, Street L E, Suding K N, Tape K D, Trant A, Treier U A, Tremblay J P, Tremblay M, Venn S, Weijers S, Zamin T, Boulanger-Lapointe N, Gould W A, Hik D S, Hofgaard A, Jónsdóttir I S, Jorgenson J, Klein J, Magnusson B, Tweedie C, Wookey P A, Bahn M, Blonder B, van Bodegom P M, Bond-Lamberty B, Campetella G, Cerabolini B E L, Chapin Iii F S, Cornwell W K, Craine J, Dainese M, de Vries F T, Díaz S, Enquist B J, Green W, Milla R, Niinemets Ü, Onoda Y, Ordoñez J C, Ozinga W A, Penuelas J, Poorter H, Poschlod P, Reich P B, Sandel B, Schamp B, Sheremetev S, Weiher E. 2018. Plant functional trait change across a warming tundra biome. Nature, 562: 57–62

Bliss L C. 1997. Arctic ecosystems of North America. In: Wielgolaski F E, ed. Polar and Alpine Tundra. Amsterdam: Elsevier. 551–684

Bokhorst S, Bjerke J W, Street L E, Callaghan T V, Phoenix G K. 2011. Impacts of multiple extreme winter warming events on sub-arctic heathland: Phenology, reproduction, growth, and CO_2 flux re-

sponses. Glob Change Biol, 17: 2817–2830
Callaghan T V, Bergholm F, Christensen T R, Jonasson C, Kokfelt U, Johansson M. 2010. A new climate era in the sub-Arctic: Accelerating climate changes and multiple impacts. Geophys Res Lett, 37: L14705
Chapin F S, Eugster W, McFadden J P, Lynch A H, Walker D A. 2000. Summer differences among arctic ecosystems in regional climate forcing. J Clim, 13: 2002–2010
Chapin F S, Sturm M, Serreze M C, McFadden J P, Key J R, Lloyd A H, McGuire A D, Rupp T S, Lynch A H, Schimel J P, Beringer J, Chapman W L, Epstein H E, Euskirchen E S, Hinzman L D, Jia G, Ping C L, Tape K D, Thompson C D C, Walker D A, Welker J M. 2005. Role of land-surface changes in arctic summer warming. Science, 310: 657–660
Christiansen C T, Lafreniére M J, Henry G H R, Grogan P. 2018. Long-term deepened snow promotes tundra evergreen shrub growth and summertime ecosystem net CO_2 gain but reduces soil carbon and nutrient pools. Glob Change Biol, 24: 3508–3525
Cong N, Wang T, Nan H, Ma Y, Wang X, Myneni R B, Piao S. 2013. Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in china from 1982 to 2010: A multimethod analysis. Glob Change Biol, 19: 881–891
Cooper E J, Dullinger S, Semenchuk P. 2011. Late snowmelt delays plant development and results in lower reproductive success in the High Arctic. Plant Sci, 180: 157–167
Crane R G, Anderson M R. 1984. Satellite discrimination of snow/cloud surfaces. Int J Remote Sens, 5: 213–223
Dai A, Luo D, Song M, Liu J. 2019. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO_2. Nat Commun, 10: 121
Delbart N, Kergoat L, Le Toan T, Lhermitte J, Picard G. 2005. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. Remote Sens Environ, 97: 26–38
Dozier J. 1989. Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. Remote Sens Environ, 28: 9–22
Emmerton C A, St. Louis V L, Humphreys E R, Gamon J A, Barker J D, Pastorello G Z. 2016. Net ecosystem exchange of CO_2 with rapidly changing high Arctic landscapes. Glob Change Biol, 22: 1185–1200
Environmental Data Center Team. 2019. Plant phenological monitoring program at Toolik, Alaska. Toolik Field Station, Institute of Arctic Biology, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks. http://toolik.alaska.edu/edc/biotic_monitoring/plant_phenology.php
Epstein H E, Walker D A, Raynolds M K, Jia G J, Kelley A M. 2008. Phytomass patterns across a temperature gradient of the north american arctic tundra. J Geophys Res, 113: 22–24
Epstein H E, Bhatt U S, Raynolds M K, Walker D A, Forbes B C, Phoenix G, Bjerke J, Tømmervik H, Karlsen S-R, Myneni R, Park T, Goetz S, Jia G. 2019. Tundra Greenness (in “State of the Climate in 2018”). Bull Amer Meteor Soc, 100: S163–S165
Friend A D, Arneth A, Kiang N Y, Lomas M, Ogée J, Rödenbeck C, Running S W, Santaren J D, Sitch S, Viovy N, Ian Woodward F, Zaehle S. 2007. FLUXNET and modelling the global carbon cycle. Glob Change Biol, 13: 610–633
Fu Y H, Piao S, Op de Beeck M, Cong N, Zhao H, Zhang Y, Menzel A, Janssens I A. 2014. Recent spring phenology shifts in western central Europe based on multiscale observations. Glob Ecol Biogeogr, 23: 1255–1263
Gao B. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sens Environ, 58: 257–266
Germino M J, Smith W K. 2000. Differences in microsite, plant form, and low-temperature photoinhibition in alpine plants. Arct Antarct Al Res, 32: 388–396
Goetz S J, Bunn A G, Fiske G J, Houghton R A. 2005. Satellite-observed photosynthetic trends across boreal north america associated with climate and fire disturbance. Proc Natl Acad Sci USA, 102: 13521–13525
Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, DiGirolamo N E, Bayr K J. 2002. MODIS snow-cover products. Remote Sens Environ, 83: 181–194
Hamerlynck E P, Smith W K. 1994. Subnivean and emergent microclimate, photosynthesis, and growth in *Erythronium grandiflorum* pursh, a snowbank geophyte. Arct Alp Res, 26: 21–28
Hinzman L D, Bettez N D, Bolton W R, Chapin F S, Dyurgerov M B, Fastie C L, Griffith B, Hollister R D, Hope A, Huntington H P, Jensen A M, Jia G J, Jorgenson T, Kane D L, Klein D R, Kofinas G, Lynch A H, Lloyd A H, McGuire A D, Nelson F E, Oechel W C, Osterkamp T E, Racine C H, Romanovsky V E, Stone R S, Stow D A, Sturm M, Tweedie C E, Vourlitis G L, Walker M D, Walker D A, Webber P J, Welker J M, Winker K S, Yoshikawa K. 2005. Evidence and implications of recent climate change in northern alaska and other arctic regions. Clim Change, 72: 251–298
Hobbie J E, Shaver G R, Rastetter E B, Cherry J E, Goetz S J, Guay K C, Gould W A, Kling G W. 2017. Ecosystem responses to climate change at a low arctic and a high arctic long-term research site. Ambio, 46: 160–173
Holben B N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. Int J Remote Sens, 7: 1417–1434
Høye T T, Post E, Meltofte H, Schmidt N M, Forchhammer M C. 2007. Rapid advancement of spring in the high arctic. Curr Biol, 17: R449–R451
Hudson J M G, Henry G H R. 2010. High Arctic plant community

resists 15 years of experimental warming. J Ecol, 98: 1035–1041

Hudson J M G, Henry G H R, Cornwell W K. 2011. Taller and larger: Shifts in arctic tundra leaf traits after 16 years of experimental warming. Glob Change Biol, 17: 1013–1021

Huete A R, Jackson R D, Post D F. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. Remote Sens Environ, 17: 37–53

Hui F M, Kang J, Liu Y, Cheng X, Gong P, Wang F, Li Z, Ye Y F, Guo Z Q. 2017. AntarcticaLC2000: The new Antarctic land cover database for the year 2000. Sci China Earth Sci, 60: 686–696

Iler A M, Høye T T, Inouye D W, Schmidt N M. 2013. Nonlinear flowering responses to climate: Are species approaching their limits of phenological change? Phil Trans R Soc B, 368: 20120489

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press

Jackson R D, Huete A R. 1991. Interpreting vegetation indices. Preventive Vet Med, 11: 185–200

Jeong S J, Ho C H, Gim H J, Brown M E. 2011. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008. Glob Change Biol, 17: 2385–2399

Jeong S J, Medvigy D. 2014. Macroscale prediction of autumn leaf coloration throughout the continental United States. Glob Ecol Biogeogr, 23: 1245–1254

Jia G J, Burke I C, Kaufmann M R, Goetz A F H, Kindel B C, Pu Y. 2006. Estimates of forest canopy fuel attributes using hyperspectral data. For Ecol Manage, 229: 27–38

Jia G J, Epstein H E, Walker D A. 2004. Controls over intra-seasonal dynamics of AVHRR NDVI for the Arctic tundra in northern Alaska. Int J Remote Sens, 25: 1547–1564

Jia G J, Epstein H E, Walker D A. 2009. Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming. J Environ Monit, 11: 2231–2238

Jönsson P, Eklundh L. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 40: 1824–1832

Keller F, Körner C. 2003. The role of photoperiodism in alpine plant development. Arct Antarct Al Res, 35: 361–368

Klosterman S T, Hufkens K, Gray J M, Melaas E, Sonnentag O, Lavine I, Mitchell L, Norman R, Friedl M A, Richardson A D. 2014. Evaluating remote sensing of deciduous forest phenology at multiple spatial scales using PhenoCam imagery. Biogeosciences, 11: 4305–4320

Kobayashi H, Yunus A P, Nagai S, Sugiura K, Kim Y, Van Dam B, Nagano H, Zona D, Harazono Y, Bret-Harte M S, Ichii K, Ikawa H, Iwata H, Oechel W C, Ueyama M, Suzuki R. 2016. Latitudinal gradient of spruce forest understory and tundra phenology in Alaska as observed from satellite and ground-based data. Remote Sens Environ, 177: 160–170

Lara M J, Nitze I, Grosse G, Martin P, McGuire A D. 2018. Reduced arctic tundra productivity linked with landform and climate change interactions. Sci Rep, 8: 2345

Li X, Che T, Li X, Wang L, Duan A, Shangguan D, Pan X, Fang M, Bao Q. 2020. CASEarth Poles: Big data for the three poles. Bull Am Meteorol Soc, doi: 10.1175/BAMS-D-19-0280.1

Liang L, Schwartz M D, Fei S. 2011. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. Remote Sens Environ, 115: 143–157

Macias-Fauria M, Forbes B C, Zetterberg P, Kumpula T. 2012. Eurasian Arctic greening reveals teleconnections and the potential for structurally novel ecosystems. Nat Clim Change, 2: 613–618

Maliniemi T, Kapfer J, Saccone P, Skog A, Virtanen R. 2018. Long-term vegetation changes of treeless heath communities in northern Fennoscandia: Links to climate change trends and reindeer grazing. J Veg Sci, 29: 469–479

Melaas E K, Richardson A D, Friedl M A, Dragoni D, Gough C M, Herbst M, Montagnani L, Moors E. 2013. Using FLUXNET data to improve models of springtime vegetation activity onset in forest ecosystems. Agric For Meteorol, 171-172: 46–56

Meloche C G, Diggle P K. 2001. Preformation, architectural complexity, and developmental flexibility in *Acomastylis rossii* (Rosaceae). Am J Bot, 88: 980–991

Menzel A. 2000. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. Int J Biometeorol, 44: 76–81

Menzel A, Sparks T H, Estrella N, Koch E, Aasa A, Ahas R, Alm-kübler K, Bissolli P, Braslavská O G, Briede A, Chmielewski F M, Crepinsek Z, Curnel Y, Dahl Å, Defila C, Donnelly A, Filella Y, Jatczak K, Måge F, Mestre A, Nordli Ø, Peñuelas J, Pirinen P, Remišová V, Scheifinger H, Striz M, Susnik A, Van Vliet A J H, Wielgolaski F E, Zach S, Zust A. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Glob Change Biol, 12: 1969–1976

Myers-Smith I H, Grabowski M M, Thomas H J D, Angers-Blondin S, Daskalova G N, Bjorkman A D, Cunliffe A M, Assmann J J, Boyle J S, McLeod E, McLeod S, Joe R, Lennie P, Arey D, Gordon R R, Eckert C D. 2019. Eighteen years of ecological monitoring reveals multiple lines of evidence for tundra vegetation change. Ecol Monogr, 89: e01351

Nagler T, Rott H, Malcher P, Muller F. 2008. Assimilation of meteorological and remote sensing data for snowmelt runoff forecasting. Remote Sens Environ, 112: 1408–1420

Norby R J, Sloan V L, Iversen C M, Childs J. 2019. Controls on fine-scale spatial and temporal variability of plant-available inorganic nitrogen in a polygonal tundra landscape. Ecosystems, 22: 528–543

Oberbauer S F, Elmendorf S C, Troxler T G, Hollister R D, Rocha A V, Bret-Harte M S, Dawes M A, Fosaa A M, Henry G H R, Høye T T, Jarrad F C, Jónsdóttir I S, Klanderud K, Klein J A, Molau U, Rixen C, Schmidt N M, Shaver G R, Slider R T, Totland Ø, Wahren C H, Welker J M. 2013. Phenological response of tundra plants to background climate variation tested using the International Tundra Experiment. Phil Trans R Soc B, 368: 20120481

Olofsson J, Oksanen L, Callaghan T, Hulme P E, Oksanen T, Suominen O. 2009. Herbivores inhibit climate-driven shrub expansion on the tundra. Glob Change Biol, 15: 2681–2693

Park H, Jeong S J, Ho C H, Park C E, Kim J. 2018. Slowdown of spring green-up advancements in boreal forests. Remote Sens Environ, 217: 191–202

Pastick N J, Jorgenson M T, Goetz S J, Jones B M, Wylie B K, Minsley B J, Genet H, Knight J F, Swanson D K, Jorgenson J C. 2018. Spatiotemporal remote sensing of ecosystem change and causation across Alaska. Glob Change Biol, 25: 1171–1189

Phoenix G K, Bjerke J W. 2016. Arctic browning: Extreme events and trends reversing arctic greening. Glob Change Biol, 22: 2960–2962

Richardson A D, Jenkins J P, Braswell B H, Hollinger D Y, Ollinger S V, Smith M L. 2007. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. Oecologia, 152: 323–334

Richardson A D, Andy Black T, Ciais P, Delbart N, Friedl M A, Gobron N, Hollinger D Y, Kutsch W L, Longdoz B, Luyssaert S, Migliavacca M, Montagnani L, William Munger J, Moors E, Piao S, Rebmann C, Reichstein M, Saigusa N, Tomelleri E, Vargas R, Varlagin A. 2010. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. Phil Trans R Soc B, 365: 3227–3246

Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M. 2013a. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. Agric For Meteorol, 169: 156–173

Richardson A D, Klosterman S, Toomey M. 2013b. In: Schwartz M D ed. Phenology: An Integrative Environmental Science. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers

Richardson A D, Hufkens K, Milliman T, Aubrecht D M, Chen M, Gray J M, Johnston M R, Keenan T F, Klosterman S T, Kosmala M, Melaas E K, Friedl M A, Frolking S. 2018. Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery. Sci Data, 5: 180028

Screen J A, Simmonds I. 2010. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. Nature, 464: 1334–1337

Serreze M C, Francis J A. 2006. The Arctic amplification debate. Clim Change, 76: 241–264

Seyednasrollah B, Young A M, Hufkens K, Milliman T, Friedl M A, Frolking S, Richardson A D, Abraha M, Allen D W, Apple M. 2019. PhenoCam Dataset v2.0: Vegetation Phenology from Digital Camera Imagery, 2000–2018. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, doi: 10.3334/ORNLDAAC/1674

Shen M, Sun Z, Wang S, Zhang G, Kong W, Chen A, Piao S. 2013. No evidence of continuously advanced green-up dates in the Tibetan Plateau over the last decade. Proc Natl Acad Sci USA, 110: E2329

Shen M, Tang Y, Chen J, Yang X, Wang C, Cui X, Yang Y, Han L, Li L, Du J, Zhang G, Cong N. 2014a. Earlier-season vegetation has greater temperature sensitivity of spring phenology in northern hemisphere. PLoS ONE, 9: e88178

Shen M, Zhang G, Cong N, Wang S, Kong W, Piao S. 2014b. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau. Agric For Meteorol, 189-190: 71–80

Sturm M, Racine C, Tape K. 2001. Increasing shrub abundance in the Arctic. Nature, 411: 546–547

Sturm M, Douglas T, Racine C, Liston G E. 2005. Changing snow and shrub conditions affect albedo with global implications. J Geophys Res, 110: 1–3

Svoboda J, Freedman B, Calvert J, Murray J L. 1994. Ecology of a Polar Oasis: Alexandra Fiord, Ellesmere Island, Canada. Toronto: Captus University Publications

Thompson J A, Paull D J, Lees B G. 2015. Using phase-spaces to characterize land surface phenology in a seasonally snow-covered landscape. Remote Sens Environ, 166: 178–190

Thorpe N, Eyegetok N, Hakongak N, Elders K. 2002. Nowadays it is not the same: Inuit Quajimajatuqangit, climate and caribou in the Kitikmeot Region of Nunavut, Canada. In: Krupnik I, Jolly D, eds. The Earth is Faster Now: Indigenous Observations of Arctic Environmental Change. Fairbanks, USA: Arctic Research Consortium of the United States. 198–239

Treharne R, Bjerke J, Emberson L, Tømmervik H, Phoenix G. 2016. Arctic Browning: Vegetation damage and implications for carbon balance. Geophys Res Abstracts, 18: EGU2016-8838

Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, Los S O, Myneni R B, Taylor M G. 2001. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. Int J Biometeorol, 45: 184–190

van Wijk M T, Clemmensen K E, Shaver G R, Williams M, Callaghan

T V, Chapin F S, Cornelissen J H C, Gough L, Hobbie S E, Jonasson S, Lee J A, Michelsen A, Press M C, Richardson S J, Rueth H. 2004. Long-term ecosystem level experiments at Toolik Lake, Alaska, and at Abisko, Northern Sweden: Generalizations and differences in ecosystem and plant type responses to global change. Glob Change Biol, 10: 105–123

Vermote E, Wolfe R. 2015. MOD09GA MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1kmand 500 m SIN Grid V006 (Data set). NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2019-08-14 from https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09GA.006

Walker D A, Gould W A, Maier H A, Raynolds M K. 2002. The circumpolar arctic vegetation map: AVHRR-derived base maps, environmental controls, and integrated mapping procedures. Int J Remote Sens, 23: 4551–4570

Walker D A, Raynolds M K, Daniëls F J A, Einarsson E, Elvebakk A, Gould W A, Katenin A E, Kholod S S, Markon C J, Melnikov E S, Moskalenko N G, Talbot S S, Yurtsev B A, The other members of the CAVM Team. 2005. The circumpolar Arctic vegetation map. J Vegetation Sci, 16: 267–282

Walker D A, Leibman M O, Epstein H E, Forbes B C, Bhatt U S, Raynolds M K, Comiso J C, Gubarkov A A, Khomutov A V, Jia G J, Kaarlejärvi E, Kaplan J O, Kumpula T, Kuss P, Matyshak G, Moskalenko N G, Orekhov P, Romanovsky V E, Ukraientseva N G, Yu Q. 2009. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: Interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index. Environ Res Lett, 4: 045004

Wang C, Chen J, Wu J, Tang Y, Shi P, Black T A, Zhu K. 2017. A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems. Remote Sens Environ, 196: 1–12

Wang T, Peng S, Lin X, Chang J. 2013. Declining snow cover may affect spring phenological trend on the Tibetan Plateau. Proc Natl Acad Sci USA, 110: E2854–E2855

Wang X, Piao S, Xu X, Ciais P, MacBean N, Myneni R B, Li L. 2015. Has the advancing onset of spring vegetation green-up slowed down or changed abruptly over the last three decades? Glob Ecol Biogeogr, 24: 621–631

Wang X, Wang T, Guo H, Liu D, Zhao Y, Zhang T, Liu Q, Piao S. 2018. Disentangling the mechanisms behind winter snow impact on vegetation activity in northern ecosystems. Glob Change Biol, 24: 1651–1662

Westergaard-Nielsen A, Lund M, Hansen B U, Tamstorf M P. 2013. Camera derived vegetation greenness index as proxy for gross primary production in a low Arctic wetland area. ISPRS J Photogrammetry Remote Sens, 86: 89–99

Westergaard-Nielsen A, Lund M, Pedersen S H, Schmidt N M, Klosterman S, Abermann J, Hansen B U. 2017. Transitions in high-Arctic vegetation growth patterns and ecosystem productivity tracked with automated cameras from 2000 to 2013. Ambio, 46: 39–52

Winkler D E, Butz R J, Germino M J, Reinhardt K, Kueppers L M. 2018. Snowmelt timing regulates community composition, phenology, and physiological performance of alpine plants. Front Plant Sci, 9: 1140

Wu C, Gonsamo A, Chen J M, Kurz W A, Price D T, Lafleur P M, Jassal R S, Dragoni D, Bohrer G, Gough C M, Verma S B, Suyker A E, Munger J W. 2012. Interannual and spatial impacts of phenological transitions, growing season length, and spring and autumn temperatures on carbon sequestration: A North America flux data synthesis. Glob Planet Change, 92-93: 179–190

Xu X, Riley W J, Koven C D, Jia G. 2018. Observed and simulated sensitivities of spring greenup to preseason climate in northern temperate and boreal regions. J Geophys Res-Biogeosci, 123: 60–78

Xu X, Riley W J, Koven C D, Jia G. 2019. Heterogeneous spring phenology shifts affected by climate: Supportive evidence from two remotely sensed vegetation indices. Environ Res Commun, 1: 091004

Xu X, Riley W J, Koven C D, Jia G, Zhang X. 2020. Earlier leaf-out warms air in the north. Nat Clim Chang, 10: 370–375

Yang W, Kobayashi H, Wang C, Shen M, Chen J, Matsushita B, Tang Y, Kim Y, Bret-Harte M S, Zona D, Oechel W, Kondoh A. 2019. A semi-analytical snow-free vegetation index for improving estimation of plant phenology in tundra and grassland ecosystems. Remote Sens Environ, 228: 31–44

Yu H, Luedeling E, Xu J. 2010. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. Proc Natl Acad Sci USA, 107: 22151–22156

Zeng H, Jia G, Epstein H. 2011. Recent changes in phenology over the northern high latitudes detected from multi-satellite data. Environ Res Lett, 6: 045508

Zeng H, Jia G. 2013. Impacts of snow cover on vegetation phenology in the arctic from satellite data. Adv Atmos Sci, 30: 1421–1432

Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Hodges J C F, Gao F, Reed B C, Huete A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sens Environ, 84: 471–475

Zhu J, Miller A E, Lindsay C, Broderson D, Heinrichs T, Martyn P. 2013. MODIS NDVI Products and Metrics User Manual. Alaska: Geographic Information Network of Alaska, UAF

(责任编委: 李新)