

DOI: 10.5846/stxb201511112281

苗百岭, 梁存柱, 韩芳, 梁茂伟, 张自国. 内蒙古主要草原类型植物物候对气候波动的响应. 生态学报, 2016, 36(23): 7689-7701.

Miao B L, Liang C Z, Han F, Liang M W, Zhang Z G. Responses of phenology to climate change over the major grassland types. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7689-7701.

内蒙古主要草原类型植物物候对气候波动的响应

苗百岭^{1,2}, 梁存柱^{1,*}, 韩芳³, 梁茂伟¹, 张自国²

1 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021

2 内蒙古气象科学研究所, 呼和浩特 010051

3 内蒙古生态与农业气象中心, 呼和浩特 010051

摘要:物候是气候变化的指示者, 由于不同地区植被类型不同, 导致其对气候波动的响应方式不同。利用 2004—2013 年内蒙古草原区生态监测站群落优势种物候观测资料和同时段的气象资料, 分析了不同草原类型区优势种物候期变化及其与气候因子间的相互关系, 结果表明: (1) 2004—2013 年内蒙古草原区各时段气候波动趋势均不显著, 返青前以气温降低、降水增加趋势为主; 黄枯前草甸草原、典型草原以气温降低、降水增加趋势为主, 荒漠草原变化趋势相反。(2) 2004—2013 年典型草原植物返青期平均提前 4.01 d, 黄枯推后 10.35 d, 生长季延长 14.36 d; 草甸草原返青期提前 2.04 d, 黄枯期推后 12.68 d, 生长季延长 14.72 d; 荒漠草原物候变化趋势最小, 返青期平均提前了 1.32 d, 黄枯期平均推后了 9.58 d, 生长季延长了 10.90 d。(3) 内蒙古草原区植物返青期主要受气温波动的影响, 草甸草原返青期与前 3 个月平均气温的负相关最为显著, 气温每升高 1℃, 返青期约提前 1.123 d; 典型草原、荒漠草原返青期与前 2 个月平均气温的负相关最为显著, 气温每升高 1℃, 返青期约提前 1.137 d 和 1.743 d。(4) 典型草原区植物黄枯期受前 1—2 月平均气温和累积降水的共同影响, 与夏季平均气温和当月降水量的相关最为显著, 夏季气温每升高 1℃, 黄枯期约提前 2.250 d, 当月降水每增加 1 mm, 黄枯期约推后 0.119 d。草甸草原、荒漠草原植物黄枯期与各时段降水、气温的相关均不显著, 影响黄枯机制比较复杂。

关键词:草原类型; 物候; 返青期; 黄枯期; 气候波动

Responses of phenology to climate change over the major grassland types

MIAO bailing^{1,2}, LIANG Cunzhu^{1,*}, HAN Fang³, LIANG Maowei¹, ZHANG Zigu²

1 College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China

2 Meteorological Research Institute of Inner Mongolia, Huhhot 010051, China

3 Inner Mongolia Ecology and Agrometeorology Centre, Hohhot 010051, China

Abstract: Plant phenology, studying periodic life cycle of plant and animal, always is used to indicate climate change. Various vegetation types show different phenological responses to change change. This study aims to analyze the relationships of changes between phenology phases of dominant species and climate variables over the three major grassland types in the Mongolia Plateau, including meadow grassland, typical grassland, and desert grassland. This analysis used phenological and meteorological data from 24 ecological monitoring station in the grassland of inner Mongolia between 2004 and 2013. The results showed that: (1) precipitation shows the increased trend and air temperature decreases before the start of the growing season (SOS) in the study area. Before the end of the growing season (EOS), air temperature decreased and precipitation increased in meadow and typical grassland, but air temperature increased and precipitation decreased in desert grassland. (2) through 10 years (2004—2013), the SOS of meadow grassland advanced by 2.04 days and EOS delayed by

基金项目: 科技部科技支撑资助项目(2013BAC09B03); 内蒙古自然科学基金(2016MS0320)

收稿日期: 2015-11-11; 修订日期: 2016-04-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bilcz@imu.edu.cn

12.68 days, and which lengthened the growth duration about 14.72 days. The SOS of typical grassland advanced by 4.01 days and EOS delayed by 10.35 days; the total growth duration was lengthened by 14.36 days in 10 years. In desert grassland, SOS and EOS advanced by 1.32 days and delayed by 9.58 days, and the growth duration lengthened by 10.90 days. (3) The dominant factor affecting SOS was temperature, rather than precipitation, in grassland vegetation. The SOS showed a significantly negative correlation with the mean air temperature in meadow grasslands in the previous three months, and it advanced 1.123 days with a 1°C increase in average air temperature in the three months prior. However, in typical and desert grasslands, the SOS significantly negatively correlated with the average air temperature of the two months prior, and it advanced by 1.137 days and 1.743 days, respectively, with a 1°C increase in average air temperature in the two months prior. (4) The EOS in typical steppe was jointly controlled by both of air temperature and precipitation of previous 1—2 months. In particular, there was a significant relationship between the average summer air temperature and precipitation in the current month. In addition, the EOS was delayed by 0.119 days with increased precipitation in the current month. However, a more complicated mechanism presumably controls the EOS of typical and desert grasslands, and no significant relationships between the EOS and climate factors were found.

Key Words: grassland type; phenology; the start of the growing season (SOS); the end of the growing season (EOS); climate change

植物物候是指植物受环境要素影响、特别是受气温等气象和气候条件变化影响而出现的周期性变化,包括各种植物的发芽、展叶、开花、叶变色、落叶等^[1-2]。物候是气候变化的指示者,是“大自然的语言”^[1],植物物候现象不仅是季节变化的反映,也是生态系统对全球气候变化的响应,是全球气候变化的“诊断指纹”^[3-4]。植被对气候变化的反馈机制很多是受物候调控的^[5],因此,植物物候研究也是植被-气候关系研究的重要环节。

总体而言,随着气候变暖,北半球大部分地区表现出植被生长始期提前,末期推迟,生长期延长^[6-8],但近十几年来表现出变幅减缓的趋势^[9-11]。如 Jeong 等发现北半球植被 1982—1999 年生长季始期(SOS)植物平均提前了 3.1 d,生长季末期(EOS)平均推迟了 2.5 d,生长季(LOS)延长了 5.6 d;2000—2008 年 SOS 提前的趋势减缓,只提前了 0.2 d^[7]。Wang 等研究北半球 1982—2011 年植被物候的变化趋势,发现总体上 SOS 有提前的趋势(1.4±0.6) d/10a,但 1982—2011 年 SOS 并没有显著的变化趋势^[11]。但也有不同结果,如 Zeng 等研究的结果也表明在 2000—2010 年北半球的 SOS 提前了 4.7 d,EOS 推后了 1.6 d,LOS 延长了 6.3 d。但是北美和亚欧大陆的物候变化有明显的区别,在 2000—2010 年,SOS 提前了 11.5 d,末期推迟了 2.2 d,LOS 延长了 13.7 d;欧亚大陆生长季 SOS 提前了 2.7 d,EOS 推迟了 3.5 d,LOS 延长了 6.2 d^[6]。Cong 等研究 1982—2010 年中国温带植被的 SOS 变化趋势,发现有提前趋势,平均(1.3±0.6) d/10a^[12]。Yang 等研究 1982—2010 年中国温带植被 EOS 的变化趋势,在过去 30 年生长季末期推迟了 1.3 d/10a,然而这种退后趋势并不是持续的,1980s 显著的退后,1990s 和 2000s 这种退后的趋势减缓^[13]。总之,不同研究关于 2000 年后的物候变化研究有较大的争议。

青藏高原高寒草原和蒙古高原温性草原作为欧亚草原的重要组成部分,也是全球气候变化最剧烈的地区之一^[14],近年来也开展了大量的物候研究。但得出的物候变化趋势差异较大。如 Jin 等、Yu 等和 Piao 等发现 1982 年到 1990s 中期青藏高原 SOS 总体呈提前的趋势,1999 年后 SOS 出现了延迟,时段的差异导致 1982—2006 年高原的返青期没有显著的变化趋势^[9,15-16],而 Shen 等发现 1982—2006 年在青藏高原的中部 SOS 出现推迟的趋势,在高原的西南部、东部和东北部均出现 SOS 提前的趋势,区域的差异导致整个高原的 SOS 并没有显著的变化趋势^[17],而 Zhang 等发现从 1982—2011 年青藏高原的 SOS 呈现持续的提前趋势^[18]。在蒙古高原同样存在争议,基于不同的研究方法,往往有不同的物候变化趋势。其中,基于植被指数(NDVI)进行推算的结果表明,1982—1999 年^[19-20]、1982—2006 年^[21]、2001—2010 年^[22]、2002—2014^[23]年内蒙古草

原区 SOS 均有提前的趋势, EOS 有推迟的趋势, LOS 有延长的趋势; 基于气候生长季法得出的物候变化趋势也有相同的结论^[24-25]。但基于站点观测数据的研究却表现出与前两种方法不同的趋势, 具有较复杂的物候变化特征, 甚至同一草原类型不同站点之间, 也有相反的物候变化趋势(表 1)。

表 1 不同资料来源的内蒙古草原区植物物候变化趋势(d/10a)

Table 1 Previously reported changes of vegetation phenology (days per decade) from different resources in Inner Mongolia grassland									
时期 Period	数据 Data	区域 Region	站点 Station	观测植物 Plant	草原类型 Type	返青 Greenup	枯黄 Dormancy	生长季 Duration	参考文献 Reference
1982—2006	NDVI	中国北方	—	—	温性草原	-3.60	2.40	6.00	[21]
1982—1999	NDVI	中国北方	—	—	温性草原	-6.76	3.99	10.75	[19]
1982—1999	NDVI	中国北方	—	—	典型草原	-6.11	3.89	7.22	[20]
1982—1999	NDVI	中国北方	—	—	草甸草原	-5.00	4.44	变化不大	[20]
1982—1999	NDVI	中国北方	—	—	荒漠草原	-7.78	6.67	13.33	[20]
2001—2010	NDVI	中国北方	—	—	温性草原	-3.10	1.30	—	[22]
2002—2014	NDVI	内蒙古	—	—	温性草原	-5.79	5.07	10.86	[23]
1960—2010	0℃ 积温	内蒙古	49 个	—	—	-0.65	0.71	2.37	[24]
1960—2010	10℃ 积温	内蒙古	49 个	—	—	-0.85	1.26	3.11	[24]
1961—2010	0℃ 积温	内蒙古	46 个	—	温性草原	-2.04	0.68	2.92	[25]
1983—2002	观测	内蒙古	额尔古纳	羊草	草甸草原	-5.21	3.88	延长	[26]
1983—2009	观测	内蒙古	额尔古纳	贝加尔针茅	草甸草原	-2.74	3.68	6.41	[27]
1983—2002	观测	内蒙古	鄂温克旗	羊草	典型草原	-0.04	-4.27	缩短	[26]
1983—2009	观测	内蒙古	鄂温克旗	大针茅	典型草原	0.31	-2.72	-3.03	[27]
1985—1993	观测	内蒙古	锡林浩特	羊草	典型草原	—	推后	—	[28]
1985—2002	观测	内蒙古	锡林浩特	大针茅	典型草原	推后	提前	—	[29]
1983—2002	观测	内蒙古	锡林浩特	羊草	典型草原	3.59	0.75	缩短	[26]
1983—2009	观测	内蒙古	锡林浩特	大针茅	典型草原	5.71	-0.36	-6.07	[30]
1985—2003	观测	内蒙古	锡林浩特	大针茅	典型草原	9.30	-6.20	-3.80	[31]
1983—2002	观测	内蒙古	镶黄旗	羊草	典型草原	-0.78	-7.55	缩短	[26]
1983—2009	观测	内蒙古	镶黄旗	克氏针茅	典型草原	-5.26	-7.88	1.16	[30]
1983—2002	观测	内蒙古	察右后旗	羊草	典型草原	-7.44	-5.60	缩短	[26]
1983—2009	观测	内蒙古	察右后旗	克氏针茅	典型草原	-4.83	-0.54	4.77	[30]
1983—2009	观测	内蒙古	察右后旗	克氏针茅	典型草原	-5.17	-2.97	3.40	[32]
2004—2012	观测	内蒙古	6 个	小针茅	荒漠草原	-0.98	-0.98	-3.2	[33]

羊草 *Leymus Chinensis*

关于植物物候对气候变化的响应机制也表现出较为复杂的特征, 有些研究认为 SOS 与气温显著相关, EOS 与气温和降水均有一定的关系, 气温被认为是影响植物物候变化的主导因子^[34-36]。但也有研究揭示植物物候的变化与水分状况有潜在的相关性, 尤其是在温带的干旱半干旱区^[12, 37-38]。如 Shen 等在青藏高原的研究发现, 植物返青期受降水的年际间变异影响较大, 春季降水是高原植物返青的主要影响因素^[39-40]。Piao 等研究了青藏高原植物返青期对气候波动的响应, 认为春季降水的增加推迟了高寒草甸植物的返青期^[19]。在蒙古高原, Shinod 等初步分析了内蒙古草原针茅物候与气象因子的关系, 表明在热量满足的情况下, 植物返青期与其前 5d 的降水量呈显著的正相关^[41]。更有研究认为: 在内蒙古温带草原区, 植物的返青期主要受降水控制^[31, 42]。同时, 降水也是制约黄枯期的关键因子^[31, 42]。造成植物物候对气候变化响应机制存在大量争议的原因之一, 可能与各植被所处的水热环境以及所处区域气候变化趋势不同有关。

内蒙古温带草原是欧亚草原的重要组成部分, 从东北到西南具有明显的水热梯度, 包括了草甸草原、典型草原和荒漠草原 3 个温带草原的主要植被类型^[43], 这为揭示不同植被类型物候对气候变化的响应格局提供了理想的平台。本文基于内蒙古草原 26 个物候观测站点 2004—2013 年的观测资料, 以多个站点的平均变化

反映各草原类型植物物候变化特征,以此揭示北方温带草原区植物返青期、黄枯期和生长季长度等物候变化趋势及其对气候波动的响应机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区中温型草原区,该区域是中国温带草原的典型分布区(图 1)。基于气候干湿程度的不同而形成的草甸草原亚带、典型草原亚带和荒漠草原亚带是贯通全区的 3 个亚带。在邻近森林带的半湿润区分布着草甸草原亚带,年降水量大致在 350—500mm,年均温为-2.3—5℃,建群种为早生的贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)。随着大陆度的增高和湿润度的降低,在草甸草原亚带以西的半干旱区形成了广大的典型草原亚带,年降水量大致在 300—400mm,年均温为 1—4℃,建群种为早生的大针茅(*Stipa grandis*)或克氏针茅(*Stipa krylovii*)。再往西进入干旱区,则出现了更为旱化的荒漠草原亚带,年降水量大致在 135—311mm 之间,年均温为 0.8—5.3℃,建群种为强旱生的小针茅(*Stipa klemenzii*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)等^[43]。

1.2 资料来源

1.2.1 物候数据

物候数据来源于内蒙古气象局 2004—2013 年草原区的 24 个生态监测站的观测资料,本文主要分析返青期、黄枯期 2 个发育阶段的变化特征及其生长季长度的变化特征。各台站详细情况见表 2。

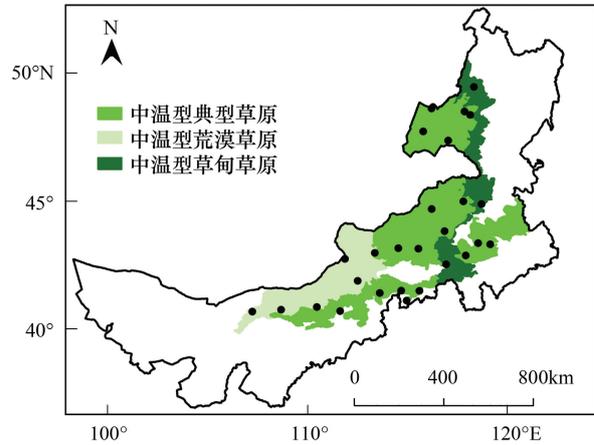


图 1 内蒙古草原类型分布图

Fig.1 Distribution of Grassland types in Inner Mongolia

表 2 内蒙古草原区物候观测台站基本情况

Table 2 Informations of Phenology Field Observation Station in Inner Mongolia Grassland

站点 Station	经度 E/(°) Longitude	纬度 N/(°) Latitude	草原类型 Grassland Type	观测优势植物 Observation Plant	返青期 Green-up	黄枯期 Dormancy	生长季长度 Duration
额尔古纳	120.18	50.25	草甸草原	贝加尔针茅	137±6	263±8	128±9
霍林郭勒	119.82	45.53	草甸草原	贝加尔针茅	124±4	251±1	128±2
克什克腾旗	117.53	43.25	草甸草原	贝加尔针茅	126±6	260±6	134±8
满洲里	117.43	49.57	典型草原	大针茅	133±4	244±12	110±14
陈巴尔虎旗	119.43	49.32	典型草原	大针茅	130±4	256±5	122±6
鄂温克旗	119.75	49.15	典型草原	大针茅	127±6	260±9	136±6
新巴尔虎右旗	116.82	48.67	典型草原	克氏针茅	128±4	251±10	125±11
新巴尔虎左旗	118.27	48.22	典型草原	克氏针茅	132±5	255±5	124±9
乌拉盖	118.80	45.72	典型草原	大针茅	127±10	248±3	121±11
东乌旗	116.97	45.52	典型草原	克氏-大针茅	123±5	257±6	134±8
阿巴嘎旗	114.95	44.02	典型草原	克氏针茅	121±6	254±6	134±6
镶黄旗	113.83	42.23	典型草原	克氏针茅	115±5	245±9	133±11
四子王旗	111.68	41.53	典型草原	克氏针茅	117±10	265±7	151±10
西乌旗	117.60	44.58	典型草原	大针茅	126±3	259±6	130±6
锡林浩特	116.07	43.95	典型草原	大针茅	118±10	272±3	155±7
巴林右旗	118.65	43.53	典型草原	大针茅	119±6	260±5	143±7
正镶白旗	115.00	42.30	典型草原	克氏针茅	121±3	264±4	145±6

续表

站点 Station	经度 E/(°) Longitude	纬度 N/(°) Latitude	草原类型 Grassland Type	观测优势植物 Observation Plant	返青期 Green-up	黄枯期 Dormancy	生长季长度 Duration
正蓝旗	115.98	42.25	典型草原	克氏针茅	117±6	255±7	142±12
太仆寺旗	115.27	41.88	典型草原	克氏针茅	112±5	289±6	180±6
二连浩特	111.97	43.65	荒漠草原	沙生针茅	121±10	270±1	145±11
苏尼特左旗	113.63	43.87	荒漠草原	小针茅	120±8	270±8	151±7
苏尼特右旗	112.65	42.75	荒漠草原	小针茅	118±9	273±12	152±9
乌拉特中旗	108.52	41.57	荒漠草原	小针茅	113±12	259±12	143±25
达茂旗	110.43	41.70	荒漠草原	短花针茅	118±6	295±5	170±11

1.2.2 气候资料

所用气象数据来源于内蒙古草原区的 24 个生态监测站的月平均气温、月降水量、土壤水分数据。

1.3 物候观测方法

物候观测主要按照《中国物候观测方法》和《农业气象观测规范》的规范进行观测^[44-45]。

1.3.1 观测地点

各生态监测站观测地段的面积一般不小于 10000 m², 监测站内的植物种类、生物量和土壤等能代表当地的草原类型, 不受人为干扰, 且受小气候的影响较小, 还应具有植物物候的平行观测。

1.3.2 观测时间

自返青期开始至黄枯期结束, 可根据牧草发育期出现的规律, 一般逢双或隔日观测, 但每旬末必须进行巡视或观测, 观测时间一般定在下午。

1.3.3 观测植株的选择

观测的牧草选取能代表当地草原类型的针茅属植物。当牧草返青后, 在每个发育期观测小区内, 选取有代表性的植株 10 株, 采取定点定株的方式观测。

1.3.4 牧草进入发育期的百分率统计和标准

判断牧草是否进入发育期, 一般以主茎为准, 当主茎受损时应另选植株。牧草进入发育期标准以观测总植株中进入发育期株数所占百分率而定。发育期的观测一般只记始期、普遍期, 当进入发育期的株(丛) ≥10% 时为始期, ≥50% 时为普遍期, 本文所用的物候期都是指普遍期。

返青普遍期: 地上牧草长出绿芽达 50%。

黄枯普遍期: 监测小区内 50% 的牧草地上部分约有 2/3 枯萎变色。

1.4 研究方法

1.4.1 物候资料处理

为方便计算, 将物候日期转化成日序, 即距离同年 1 月 1 日的日数, 得出年累积天数, 然后进行统计分析。

1.4.2 线性倾向估计方法

将各台站优势植物的物候观测日期换算成累积天数, 物候的变化趋势用一元线性方程来描述。计算公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times J_{\text{day}} - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n J_{\text{day}}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

式中, θ_{slope} 为趋势斜率, n 为监测时间段的年数, J_{day} 为第 i 年的物候累积天数。利用 J_{day} 序列和时间序列(年份)的相关关系来判断 J_{day} 年际间变化的显著性, 斜率为负表示物候期提前, 反之则表示物候期延后。

1.4.3 相关分析方法

对各物候期与气象因子进行相关分析, 采用 t 检验进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中, n 为研究时段年数; x, y 为相关分析的两个变量, x_i, y_i 分别为他们的样本值。

2 结果与分析

2.1 气温和降水的波动趋势

在 2004—2013 年期间, 各草原区的年均温略呈降低的趋势, 降温幅度为 0.103—0.153℃/a, 其中, 典型草原降温幅度高于草甸草原和荒漠草原(表 3), 但均不显著($P > 0.061$)。各草原区的年降水均呈升高的趋势,

表 3 内蒙古主要草原类型区气候变化的线性趋势及其显著性水平(2004—2013 年)

Table 3 Linear trends and their significance levels of climate change in Inner Mongolian grassland

阶段 Stage	要素 Factor	草甸草原 Meadow Steppe			典型草原 Typical Steppe			荒漠草原 Desert Steppe		
		斜率 slope	概率 P	决定系数 R^2	斜率 slope	概率 P	决定系数 R^2	斜率 slope	概率 P	决定系数 R^2
返青 Green-Up	T_{g3}	-0.282	0.133	0.259	-0.346	0.061	0.372	-0.263	0.178	0.214
	T_{g2}	-0.212	0.379	0.098	-0.253	0.282	0.143	-0.124	0.597	0.036
	T_{g1}	-0.188	0.467	0.068	-0.221	0.348	0.110	-0.047	0.815	0.007
	T_{g0}	-0.216	0.444	0.075	-0.249	0.367	0.102	-0.305	0.262	0.154
	T_{spring}	-0.050	0.735	0.015	-0.075	0.593	0.037	-0.061	0.664	0.025
	T_{winter}	-0.334	0.082	0.331	-0.404	0.036 *	0.441	-0.361	0.051	0.398
	R_{g3}	-0.553	0.303	0.131	0.154	0.757	0.013	-0.021	0.957	0.000
	R_{g2}	-0.855	0.101	0.300	-0.120	0.792	0.009	0.002	0.995	0.000
	R_{g1}	-0.450	0.335	0.116	0.146	0.791	0.009	0.081	0.836	0.006
	R_{g0}	0.016	0.985	0.000	0.100	0.846	0.005	0.298	0.718	0.017
	R_{spring}	0.593	0.838	0.006	0.450	0.811	0.008	1.627	0.335	0.116
	R_{winter}	0.102	0.834	0.006	0.377	0.348	0.110	-0.022	0.913	0.002
	SOS_0	0.321	0.680	0.022	0.734	0.417	0.084	0.976	0.376	0.099
	SOS_{10}	0.070	0.928	0.001	-0.223	0.793	0.009	-0.371	0.687	0.021
黄枯 Dormany	T_{g2}	0.003	0.960	0.000	-0.012	0.865	0.004	0.060	0.490	0.062
	T_{g1}	-0.002	0.977	0.000	-0.010	0.918	0.001	0.121	0.380	0.098
	T_{g0}	-0.148	0.201	0.196	-0.176	0.143	0.247	-0.155	0.180	0.212
	T_{summer}	-0.047	0.606	0.035	-0.056	0.556	0.045	0.009	0.927	0.001
	R_{g2}	5.574	0.248	0.162	4.683	0.177	0.215	-3.339	0.346	0.111
	R_{g1}	-0.360	0.723	0.017	-0.916	0.668	0.024	-2.099	0.485	0.063
	R_{g0}	2.570	0.057	0.381	0.938	0.574	0.041	1.797	0.228	0.176
	R_{summer}	10.091	0.132	0.260	8.652	0.135	0.257	-0.242	0.961	0.000
	EOS_0	-0.307	0.577	0.041	-0.571	0.243	0.166	-0.983	0.086	0.325
	EOS_{10}	0.552	0.461	0.070	0.000	1.000	0.000	-0.873	0.170	0.221
年 Year	T_{year}	-0.103	0.198	0.197	-0.153	0.061	0.371	-0.125	0.120	0.274
	R_{year}	15.075	0.051	0.397	12.581	0.039 *	0.431	3.801	0.533	0.050 *

T_{g3} 为返青前 3 个月的平均温度; T_{g2} : 为返青或黄枯前 2 个月的平均温度; T_{g1} : 为返青或黄枯前 1 个月的平均温度; T_{g0} : 为返青或黄枯当月的平均温度; T_{spring} : 为春季的平均温度; T_{winter} : 为前一年冬天的平均温度; T_{summer} : 为夏季的平均温度; T_{year} : 为年平均温度; R_{g3} — R_{g0} 、 R_{spring} 、 R_{winter} 、 R_{summer} 、 R_{year} 为与 T_{g3} — T_{g0} 、 T_{spring} 、 T_{winter} 、 T_{summer} 、 T_{year} 同阶段的累积降水量; SOS_0 、 EOS_0 : 为日平均温度稳定通过 0℃ 的初日和终日; SOS_{10} 、 EOS_{10} : 为日平均温度稳定通过 10℃ 的初日和终日

升高幅度为 3.801—15.075 mm/a; 各草原区变异很大, 增幅最大为草甸草原, 未达到显著的水平 ($P =$

0.051);最小的为荒漠草原,典型草原与荒漠草原均达到显著水平($P \leq 0.050$) (表 3)。3 个草原区返青前 3 个月均温(T_{g3})、前 2 个月均温(T_{g2})、前 1 个月均温(T_{g1})、返青当月均温(T_{g0})以及返青前 1 年冬季均温(T_{winter} :前 1 年的 12 月与当年的 1—2 月)、春季均温(T_{spring} :返青当年 3—5 月)均呈降低趋势,降温幅度的顺序均是 $T_{winter} > T_{g3} > T_{g0} > T_{g2} > T_{g1} > T_{spring}$,除典型草原冬季均温以外($P=0.036$),均未达到显著水平($P > 0.051$) (表 3)。相对于气温的变化趋势,降水的波动显得比较复杂,3 个草原区除返青当月降水(R_{g0})和春季降水(R_{spring})均呈增加趋势以外($P > 0.335$),其他时段降水的变化趋势差异很大;草甸草原降水以下降趋势为主,而典型草原和荒漠草原降水以增加趋势为主,但均未达到显著水平($P > 0.101$)。

除个别时段以外,草甸草原、典型草原植物黄枯期前各时段气候波动特征以气温降低、降水增加趋势为主;而荒漠草原以气温升高、降水减少趋势为主,变化趋势同样均不显著($P > 0.057$) (表 3)。上述气温和降水的变化特征,构成了内蒙古草原区 2004—2013 年植物物候动态的水热背景。

2.2 返青期变化特征

2004—2013 年草甸草原、典型草原和荒漠草原植物返青期分别为(129±8)、(123±8) d 和(118±9) d。近 10 年 3 类草原植物返青期均呈提前趋势,草甸草原、典型草原和荒漠草原植物返青期分别提前了 2.04、4.01 d/10a 和 1.32 d/10a($P > 0.239$) (图 2)。典型草原返青期提前趋势最大,而荒漠草原返青期提前趋势最小。

2.3 黄枯期变化特征

2004—2013 年草甸草原、典型草原和荒漠草原植物黄枯期分别为(259±8)、(258±12) d 和(268±11) d。3 类草原植物近 10 a 的黄枯期均呈推后趋势,草甸草原、典型草原和荒漠草原植物黄枯期平均推迟了 12.68、10.35 d 和 9.58 d (图 3)。草甸草原和典型草原黄枯期推后趋势显著($P < 0.022$),而荒漠草原黄枯期推后趋势最小,且不显著($P=0.223$)。

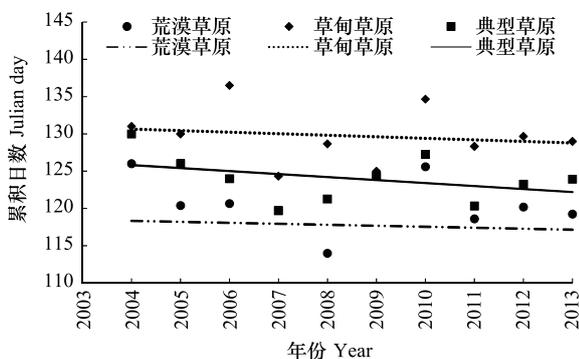


图 2 内蒙古草原区植物返青期变化趋势(2004—2013)

Fig.2 Interannual variations in the onset dates of green-up from 2004 to 2013 in the Inner Mongolia Grassland

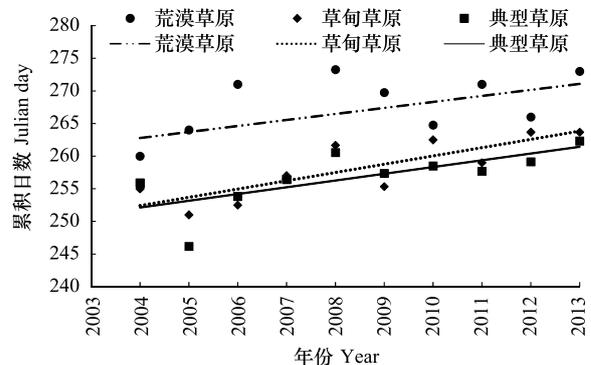


图 3 内蒙古草原区植物黄枯期变化趋势(2004—2013)

Fig.3 Interannual variations in the onset dates of vegetation dormancy from 2004 to 2013 in the Inner Mongolia Grassland

2.4 生长季变化特征

2004—2013 年草甸草原、典型草原和荒漠草原生长季长度分别为(130±8)、(135±17) d 和(154±17) d。3 类草原区生长季长度均呈延长趋势,草甸草原、典型草原和荒漠草原分别延长了 14.72、14.36 d/10a 和 10.90 d/10a (图 4)。草甸草原和典型草原生长季延长趋势显著($P < 0.018$),而荒漠草原生长季延长趋势最小,且不显著($P=0.240$)。

2.5 气候波动对内蒙古草原区植物物候期的影响

2.5.1 气候波动对植物返青期的影响

植物返青期与其前气温的相关性分析表明(表 4):草甸草原、典型草原和荒漠草原植物返青期均受其前 1—3 个月和当月的气温影响,且呈显著的负相关。其中,草甸草原植物返青期受其前 3 个月的平均气温影响最显著,温度每升高 1℃,植物返青期提前 1.123 d($R^2=0.576, P=0.000$)。典型草原和荒漠草原植物返青期均

受其前 2 个月的平均气温影响最显著。温度每升高 1°C , 典型草原植物返青期提前 1.137 d ($R^2 = 0.397, P = 0.000$), 荒漠草原植物返青期提前 1.743 d ($R^2 = 0.274, P = 0.001$)。

3 类草原植物返青期对冬、春季气温波动的响应相同, 均与冬、春季气温呈显著的负相关关系。冬季气温每升高 1°C , 导致草甸草原植物返青期提前 1.065 d ($R^2 = 0.595, P = 0.000$), 典型草原植物返青期提前 1.099 d ($R^2 = 0.385, P = 0.000$), 荒漠草原植物返青期提前 1.453 d ($R^2 = 0.212, P = 0.004$)。春季气温每升高 1°C , 导致草甸草原植物返青期提前 2.362 d ($R^2 = 0.528, P = 0.000$), 典型草原植物返青期提前 2.075 d ($R^2 = 0.351, P = 0.000$), 荒漠草原植物返青期提前 2.902 d ($R^2 = 0.210, P = 0.004$)。

3 类草原植物返青期与返青前降水的相关性分析表明(表 4): 植物返青期与降水条件的相关性均较差, 处于半湿润区的草甸草原和处于半干旱区的典型草原区植物返青期只与冬季降水呈显著的正相关关系, 而处于干旱区的荒漠草原返青期与各个阶段的降水相关均不显著 ($P > 0.137$)。不同草原区植物返青期对冬、春季降水波动的响应虽然有的显著, 有的不显著, 但响应方式相同, 与冬、春季降水均呈正相关关系。而对返青前 1—3 个月累积降水的响应却有所差别, 处于半干旱、干旱区的典型草原和荒漠草原与降水以负相关为主, 处于半湿润区的草甸草原多呈正相关, 这一差别可能与各草原区所处的水热环境有关。回归分析表明, 冬季降水每增加 1 mm, 导致草甸草原植物返青期推迟 0.694d ($R^2 = 0.365, P = 0.002$), 典型草原植物返青期推迟 0.245 d ($R^2 = 0.039, P = 0.047$)。

表 4 各草原区草本植物返青期与气候要素的相关系数(2004—2013)

Table 4 Relationships between the start of the growing season (SOS) and Climate Factors (2004—2013)

影响因子 Factor	时段 Time	草甸草原 Meadow Steppe			典型草原 Typical Steppe			荒漠草原 Desert Steppe		
		相关系数 r	斜率 slope	决定系数 R^2	相关系数 r	斜率 slope	决定系数 R^2	相关系数 r	斜率 slope	决定系数 R^2
平均温度 Temperature	T_{g3}	-0.759 **	-0.123	0.576	-0.619 **	-0.138	0.384	-0.480 **	-0.609	0.231
	T_{g2}	-0.741 **	-0.119	0.549	-0.630 **	-0.137	0.397	-0.523 **	-0.743	0.274
	T_{g1}	-0.638 **	-0.061	0.407	-0.607 **	-0.190	0.368	-0.368 **	-0.638	0.135
	T_{g0}	-0.590 **	-0.520	0.348	-0.452 **	-0.261	0.204	-0.407 *	-0.588	0.166
	$T_{s\ spring}$	-0.726 **	-2.362	0.528	-0.592 **	-2.075	0.351	-0.458 **	-2.902	0.210
	T_{winter}	-0.771 **	-0.065	0.595	-0.620 **	-0.099	0.385	-0.461 **	-0.453	0.212
降水 Precipitation	R_{g3}	0.359	—	—	-0.104	—	—	-0.184	—	—
	R_{g2}	0.069	—	—	-0.177	—	—	-0.249	—	—
	R_{g1}	-0.066	—	—	-0.159	—	—	-0.263	—	—
	R_{g0}	0.139	—	—	-0.003	—	—	-0.001	—	—
	$R_{s\ spring}$	0.244	—	—	0.158	—	—	0.176	—	—
	R_{winter}	0.604 **	0.694	0.365	0.198 *	0.245	0.039	0.188	—	—

* : $P < 0.05$ ** : $P < 0.01$; 表格中各气象因子符号与表 3 相同

2.5.2 气候波动对植物黄枯期的影响

各草原区植物黄枯期与前期气候条件的相关分析表明(表 5): 典型草原区植物黄枯期与前 1—2 个月和夏季气温均存在显著负相关关系。黄枯前 2 个月、前 1 个月和夏季气温每升高 1°C , 导致典型草原植物黄枯

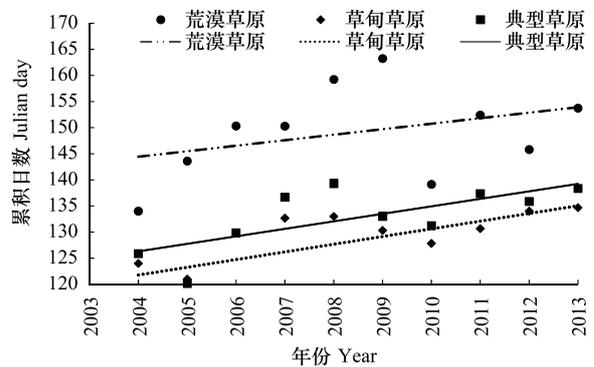


图 4 内蒙古草原区植物生长季长度变化趋势(2004—2013)

Fig. 4 Interannual variations of growing season duration from 2004 to 2013 in the Inner Mongolia Grassland

期分别提前 2.276 d ($R^2=0.057, P=0.010$)、1.913 d ($R^2=0.056, P=0.009$) 和 2.250 d ($R^2=0.066, P=0.007$)。但草甸草原和荒漠草原植物黄枯期对各阶段气温的响应情况却明显不同。半干旱区的荒漠草原植物黄枯期除了与当月和夏季气温存在负相关以外,与其他各阶段气温均呈正相关关系,而半湿润区的草甸草原植物黄枯期除了与夏季气温存在正相关以外,与其他各阶段气温均呈负相关关系,但相关均不显著 ($P>0.240$)。

各草原区植物黄枯期对降水的响应差异也较明显(表 5)。典型草原植物黄枯期与其前 1 个月的降水、当月的降水和夏季的降水均呈显著的正相关关系,受当月的降水影响最显著,每增加 1 mm 降水,典型草原区植物黄枯期约推后 0.119 d ($R^2=0.058, P=0.005$)。草甸草原、荒漠草原植物黄枯期与各时段降水相关均不显著 ($P>0.346$),但草甸草原植物黄枯期与各时段降水均呈正相关关系,而荒漠草原黄枯期与各时段降水均呈负相关关系。

表 5 各草原区植物黄枯期与气象因子的相关(2004—2013)

Table 5 Relationships between the end of the growing season (EOS) and Climate Factors (2004—2013)

影响因子 Factor	时段 Time	草甸草原 Meadow Steppe			典型草原 Typical Steppe			荒漠草原 Desert Steppe		
		相关系数 r	斜率 slope	决定系数 R^2	相关系数 r	斜率 slope	决定系数 R^2	相关系数 r	斜率 slope	决定系数 R^2
平均温度 Temperature	T_{g2}	-0.012	—	—	-0.238 **	-2.276	0.057	0.176	—	—
	T_{g1}	-0.254	—	—	-0.236 **	-0.913	0.056	0.239	—	—
	T_{g0}	-0.253	—	—	-0.014	—	—	-0.044	—	—
	T_{summer}	0.156	—	—	-0.257 **	-2.250	0.066	-0.011	—	—
降水 Precipitation	R_{g2}	0.105	—	—	0.119	—	—	-0.160	—	—
	R_{g1}	0.126	—	—	0.220 *	0.079	0.048	-0.087	—	—
	R_{g0}	0.096	—	—	0.240 **	0.119	0.058	-0.159	—	—
	R_{summer}	0.113	—	—	0.206 *	0.031	0.042	-0.193	—	—

* $P<0.05$; ** $P<0.01$;表格中各气象因子符号与表 3 相同

3 讨论

大量的研究表明,气候变化改变了北半球中高纬植物的物候期,呈现出春季提前,秋后推迟或略有推迟的现象,从而导致多数植物生长季的延长^[6-8]。本文的研究结果也表明,2004—2013 年内蒙古主要草原类型区植物物候总体表现为:返青期提前、黄枯期推迟,生长季延长的特征,与大尺度植物物候的变化趋势一致。

3.1 不同草原类型返青期变化趋势及其影响因子

2004—2013 年内蒙古 3 个主要草原类型植物返青期均表现为提前趋势,与 Ge 等利用 meta 分析研究发现 1980s—2000s 中国 17 种草本植物返青期平均提前了 (5.71 ± 7.90) d/10a 的结论基本一致^[35],也与基于 NDVI 数据推算的中国北方温性草原植物的物候变化趋势一致^[19-21],特别是与 Hou 等^[22]和 Gong 等^[23]基于 NDVI 数据对 2001—2010 年和 2002—2014 年中国北方温性草原区物候变化趋势的研究一致,Hou 等发现中国整个北方草原返青期提前了 3.10 d/10a^[22],Gong 等发现内蒙古草原返青期提前了 5.79 d/10a,与本文 3 个草原区返青期提前了 1.32—4.01 d/10a 的研究结果基本接近^[23]。

本研究发现,不同草原区植物返青期与前期各阶段的气温均呈显著的负相关关系,温度越高,返青期越早,与其他学者研究结论一致^[35]。与前期各时段降水均呈正相关关系,但相关均不显著 ($P>0.137$) (表 4)。这一结果与 Piao 等在中国温带草原的研究结论不一致^[19]。在湿润区,水分不是植被生长限制因子,植物返青对气温更敏感,降水增加会影响日照强度和日照时间,导致温度降低,影响植物的返青^[9,39];在干旱区,气温较高,蒸发和蒸腾作用强烈,在一定的温度条件下,降水增加,能增加植物可利用水分,有利于植物的返青^[37,40,42]。本项研究 3 个草原区返青各阶段降水虽然略有增加的趋势 ($P>0.101$),且降水与返青呈正相关,但均不显著 ($P>0.137$),降水的影响几乎可忽略不计。这表明温度仍然是影响草原植物返青的主要气候

因子。

通常认为温度是影响北方温带植物返青的决定因素^[34-36],本研究发现,2004—2013 年内蒙古 3 个草原类型返青期均提前,但返青期前各时段的气温均呈降低的趋势($P>0.051$),表现出相互矛盾的结果。Gong 等利用 2002—2014 年 NDVI 数据分析内蒙古草原区植被物候与气候动态也得出相同的结果,并解释其原因可能是由于降水增加所致^[23]。

为进一步解释这一现象产生的机理,本文进一步分析 3 个草原区日均温稳定通过 0℃ 和 10℃ 初日的波动发现:2004—2013 年 3 个草原类型返青期前日均温稳定通过 10℃ 的日数除草甸草原基本不变外,其他两个草原区均有提前的趋势,典型草原提前 2.23 d/10a ($P=0.793$),荒漠草原提前 3.71 d/10a ($P=0.687$) (表 3)。日均温稳定通过 10℃ 可表示喜温植物开始生长,10℃ 以上持续的日数为喜温植物生长期^[24-25]。草原区植物物候的提前可能与 10℃ 初日提前有关。但草原区植物通常在 10℃ 初日前基本上已经返青,返青与植物完全开始正常生长略有差别。一般 0℃ 时土壤开始解冻,多年生草本植物在稳定通过 0℃ 时即开始萌发,稳定通过 10℃ 时正常生长^[24-25],植物返青期通常在稳定通过 0℃ 初日与稳定通过 10℃ 初日之间。2004—2013 年草甸草原、典型草原、荒漠草原稳定通过日均温 0℃ 和 10℃ 的间隔日数均表现为缩短趋势($P>0.369$),分别缩短了 2.52、9.57、13.47 d/10a (图 5);0℃ 和 10℃ 间的均温呈上升趋势($P>0.345$),依次升高了 1.48、1.45℃/10a 和 0.08℃/10a,这可能是导致内蒙古草原区植物返青期提前的主要因素之一。

不同的草原类型驱动植物返青要求的水热条件是不同的。在草甸草原,植物返青期与前 3 个月的平均气温相关最显著;而在典型草原和荒漠草原,植物返青期与前 2 个月的平均气温相关最显著,这与各草原类型区所处的气候环境有关。3 个草原区植物返青期对降水波动的响应虽然略有不同的,但不论是降水变化趋势,还是降水与返青相关性均不显著($P>0.137$),表明温度仍然是制约内蒙古各草原区植物返青的主导因子。

3.2 内蒙古不同草原类型区黄枯期变化趋势特征及其影响因素

2004—2013 年内蒙古 3 个主要草原类型区的植物黄枯期均表现为推后趋势,平均推后了 9.58—12.68 d/10a。与 Liu 等基于 NDVI 数据对 1982—2011 年内蒙古草原区 EOS 变化趋势的研究不一致^[46],Liu 等研究发现:1982—2011 年内蒙古草原 EOS 提前了 (0.02 ± 0.01) d/a,但变化趋势不显著^[46];本文的研究结果与 Ge 等利用 meta 分析研究发现 1980s—2000s 中国 17 种草本植物黄枯期推迟了 (2.50 ± 13.41) d/10a 的结论基本一致^[35]。也与 Hou 等、Gong 等基于 NDVI 数据分析的中国北方温性草原区黄枯期推后的趋势一致,但变率大于这两个研究的 $(1.30—6.67)$ d/10a^[19-23] (表 1)。

与返青期相比,黄枯期则是一个更为复杂的生理过程,以往的研究认为:夏、秋季温度升高能够增强植物光合作用酶的活性^[47],降低叶绿素的分解速度^[48],延缓植物的黄枯。另一方面,夏、秋季温度升高能够推迟初霜日的出现^[2],延长无霜期的日数^[49],从而减少对植物的低温冷害,造成黄枯期的推后。但是也有研究持相反的观点,他们认为夏、秋季温度升高能够加速植物的黄枯,主要有两个方面原因:一是因为温度升高,使地表蒸腾加剧,导致植物因水分亏缺而黄枯期提前;二是因为植物叶片从开始生长到衰老需要一定的积温,前期气温的升高使得植物叶片所需的积温用较短的时间即可满足,从而导致黄枯期的提前^[26]。本研究发现:2004—2013 年期间,除荒漠草原以外,其他两个草原类型植物黄枯期均与各时段气温呈负相关,且典型草原植物黄枯期与前 2 月的均温、前 1 月的均温、夏季均温的相关均达到显著性水平。与 Liu 等基于 NDVI 数据分析发现 1982—2011 年内蒙古草原 EOS 与前期气温呈正相关的研究结论不一致,与陈效速^[26],顾润源^[32]等基

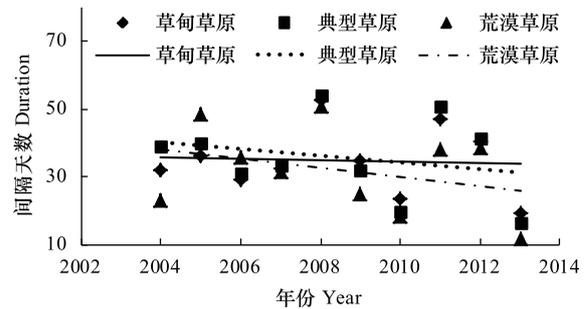


图 5 日平均气温稳定通过 0℃ 和 10℃ 初日间隔长度年际变化
Fig. 5 Interannual variations of beginning day of Growing Season stably above 0℃ and 10℃ during 2004 and 2013

于站点观测数据的研究结论一致,夏、秋季温度升高,导致了黄枯期的提前。

在满足植物生长所需热量的前提下,降水增加,植物可利用水分增多,会延长植物的生长。尤其是在气候干旱地区,降水亏缺通常会抑制植物的生长和光合活性,增加叶绿素分解和植物死亡的风险,提前植物的衰老^[46,50]。本文研究发现:2004—2013 年期间,除荒漠草原以外,其他两个草原类型植物黄枯期均与各时段降水呈正相关关系。其中,典型草原植物黄枯期与前 1 月的累积降水、当月降水和夏季降水的相关均达到显著性水平。与 Liu 等基于 NDVI 数据研究发现内蒙古草原 EOS 与黄枯前降水呈正相关的研究结论一致^[46],增加降水,能够缓解水分胁迫,延长植物的生长季。

2004—2013 年草甸草原、典型草原的气候波动发现,植物黄枯前各时段气候波动特征多以降水增加、气温降低趋势为主(表 3),但 3 个草原区植物黄枯期均在日均温稳定通过 10℃ 终日以后,虽然黄枯前气温有所降低,但均未低于 10℃(草甸草原:11.9—19.7℃;典型草原:12.8—20.4℃),不足以产生低温冷害,造成植物黄枯期的提前。由此可以解释,黄枯前各时段温度虽然降低,但不影响植物生长,在降水不变或降水增加的情况下,土壤蒸发减少,有利于植物黄枯期的延后。至于荒漠草原,本文研究发现黄枯前各时段气候波动特征多以降水减少、温度升高趋势为主(表 3),而荒漠草原植物黄枯期与前 1—2 月平均气温呈正相关关系,与降水呈负相关关系,但均不显著($P>0.240$),表明了影响荒漠草原黄枯期的机制比较复杂,有待深入研究。

3.3 内蒙古不同草原类型区生长季长度变化趋势

2004—2013 年内蒙古草原区生长季表现出延长的趋势,各草原区生长季平均延长了 10.90—14.72d,表明近十几年来内蒙古草原植被生长季的变化并未延缓,与 Zeng 等关于北半球 2000—2010 年生长季延长了 6.3 d,欧亚大陆生长季延长了 6.2 d,北美生长季延长了 13.7 d 的结果基本一致^[6]。但不同的是,上述学者认为生长期延长主要是由于返青期的提前,而本文研究发现内蒙古草原生长季延长主要是由于黄枯期的推后造成。本文的研究结果特别是与基于 NDVI 数据研究发现内蒙古草原 2002—2014 年黄枯期推后 5.07 d,生长季延长 10.86 d 的结论高度一致^[23]。

物候变化趋势对气候变化的响应是一个较长期过程,物候的变化可能延续气候变化的长期趋势,短时间内气候波动可能对物候变化总体趋势影响不显著。但短时间的的气候波动,也会导致物候变化剧烈震荡,内蒙古草原区近 10 年来尽管增温并不显著(略有降低),但气候波动性加剧,导致各草原区物候波动也很大,这可能会导致植物物候变化趋势分析的不确定性,因此物候研究需基于更长时期的连续观测。

4 结论

(1) 2004—2013 年内蒙古草原区的年平均气温呈不显著降低趋势,降低幅度为 0.103—0.153℃/a;年降水量呈增加趋势,增加幅度为 3.801—15.075 mm/a,典型草原与荒漠草原增加趋势显著,而草甸草原变化趋势不显著。近 10 年来,返青期和黄枯期前各时段的气候波动特征比较复杂,返青期前以气温降低、降水增加的趋势占优势,黄枯期前草甸草原、典型草原以气温降低、降水增加趋势为主,荒漠草原正好相反,变化趋势均不显著。

(2) 2004—2013 年典型草原植物返青期平均提前 4.01 d,黄枯推后 10.35 d,生长季延长 14.36 d;草甸草原返青期提前 2.04 d,黄枯期推后 12.68 d,生长季延长 14.72 d;荒漠草原物候变化趋势最小,返青期平均提前了 1.32 d,黄枯期平均推后了 9.58 d,生长季延长了 10.90 d,不同草原类型物候变化趋势基本一致。同时,各草原区植物返青期的变化趋势与近十几年来日平均气温稳定通过 10℃ 初日、稳定通过 0℃ 和 10℃ 的间隔日数及 0℃ 和 10℃ 间平均气温的变化趋势基本一致。

(3) 内蒙古草原区植物返青期主要受前期气温波动的影响,草甸草原返青期与前 3 个月平均气温的负相关最为显著,气温每升高 1℃,返青期约提前 1.123 d;典型草原、荒漠草原返青期与前 2 个月平均气温的负相关最为显著,气温每升高 1℃,返青期约提前 1.137 d 和 1.743 d。

(4) 典型草原区植物黄枯期受前 1—2 月平均气温和累积降水的共同影响。与前 1 月、前 2 月和夏季均温

呈显著负相关,与夏季平均气温的负相关最为显著,气温每升高 1℃,黄枯期约提前 2.250 d;与前 1 月、当月和夏季累积降水量均呈显著正相关,与当月降水量的正相关最为显著,每增加 1 mm 降水,黄枯期约推后 0.119 d。与典型草原不同,草甸草原、荒漠草原植物黄枯期与降水、气温的相关均不显著,说明影响这两个草原区黄枯期的机制比较复杂,有待于进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1973: 1-31.
- [2] Schwartz M D. Phenology: An Integrative Environmental Science. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003: 1-564.
- [3] 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. 中国科学院院刊, 2010, 25(3): 310-316.
- [4] Root T L, Price J T, Hall K R, Schneider S H, Rosenzweig C, Pounds J A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421(6918): 57-60.
- [5] Linderholm H W. Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(1/2): 1-14.
- [6] Zeng H Q, Jia G S, Epstein H. Recent changes in phenology over the northern high latitudes detected from multi-satellite data. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 045508.
- [7] Jeong S J, Ho C H, Gim H J, Brown M E. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982—2008. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2385-2399.
- [8] Cleland E E, Chuine I, Menzel A, Mooney H A, Schwartz M D. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(7): 357-365.
- [9] Piao S L, Cui M D, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Liu J, Tang Y H. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1599-1608.
- [10] Zhao J J, Zhang H Y, Zhang Z X, Guo X Y, Li X D, Chen C. Spatial and temporal changes in vegetation phenology at middle and high latitudes of the Northern Hemisphere over the past three decades. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 10973-10995.
- [11] Wang X H, Piao S L, Xu X T, Ciais P, MacBean N, Myneni R B, Li L. Has the advancing onset of spring vegetation green-up slowed down or changed abruptly over the last three decades?. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(6): 621-631.
- [12] Cong N, Wang T, Nan H J, Ma Y C, Wang X H, Myneni R B, Piao S L. Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: a multimethod analysis. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 881-891.
- [13] Yang Y T, Guan H D, Shen M G, Liang W, Jiang L. Changes in autumn vegetation dormancy onset date and the climate controls across temperate ecosystems in China from 1982 to 2010. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 652-665.
- [14] Piao S L, Mohammad A, Fang J Y, Cai Q, Feng J M. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. *Global Environmental Change*, 2006, 16(4): 340-348.
- [15] Jin Z N, Zhuang Q L, He J S, Luo T X, Shi Y. Phenology shift from 1989 to 2008 on the Tibetan Plateau: an analysis with a process-based soil physical model and remote sensing data. *Climatic Change*, 2013, 119(2): 435-449.
- [16] Yu H Y, Eike L, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(51): 22151-22156.
- [17] Shen M G, Tang Y H, Chen J, Zhu X L, Zheng Y H. 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*, 2011, 151(12): 1711-1722.
- [18] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, Xiao X M. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(11): 4309-4314.
- [19] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Ciais P, Zhu B. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 672-685.
- [20] 王宏, 李晓兵, 余弘婧. 基于 NOAA/AVHRR NDVI 监测中国北方典型草原的生长季及变化. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 365-374.
- [21] 赵文龙. 中国北方草原物候、生产力和土壤碳储量对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [22] Hou X H, Gao S, Niu Z, Xu Z G. Extracting grassland vegetation phenology in North China based on cumulative SPOT-VEGETATION NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(9): 3316-3330.
- [23] Gong Z, Kawamura K, Ishikawa N, Goto M, Wulan T, Alateng D, Yin T, Ito Y. MODIS normalized difference vegetation index (NDVI) and vegetation phenology dynamics in the Inner Mongolia grassland. *Solid Earth*, 2015, 6(4): 1185-1194.
- [24] 张戈丽, 陶健, 董金玮, 徐兴良. 1960 年—2010 年内蒙古东部地区生长季变化分析. *资源科学*, 2011, 33(12): 2323-2332.
- [25] 郭灵辉, 吴绍洪, 赵东升, 冷国勇, 张清雨. 近 50a 内蒙古不同植被类型区生长季变化. *干旱区地理*, 2014, 37(3): 532-538.

- [26] 陈效述, 李惊. 内蒙古草原羊草物候与气象因子的关系. *生态学报*, 2009, 29(10): 5280-5290.
- [27] 李夏子, 韩国栋. 内蒙古东部草原优势牧草生长季对气象因子变化的响应. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 987-992.
- [28] 李荣平, 周广胜, 王玉辉, 韩喜. 羊草物候特征对气候因子的响应. *生态学杂志*, 2006, 25(3): 277-280.
- [29] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 内蒙古克氏针茅草原植物物候及其与气候因子关系. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1312-1322.
- [30] 李夏子, 韩国栋, 郭春燕. 气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响. *生态学报*, 2013, 33(13): 4146-4155.
- [31] Yuan W P, Zhou G S, Wang Y H, Han X, Wang Y S. Simulating phenological characteristics of two dominant grass species in a semi-arid steppe ecosystem. *Ecological Research*, 2007, 22(5): 784-791.
- [32] 顾润源, 周伟灿, 白美兰, 李喜仓, 邸瑞琦, 杨晶. 气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响. *生态学报*, 2012, 32(3): 767-776.
- [33] Han F, Zhang Q, Buyantuev A, Niu J M, Liu P T, Li X H, Kang S, Zhang J, Chang C M, Li Y P. Effects of climate change on phenology and primary productivity in the desert steppe of Inner Mongolia. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(2): 251-263.
- [34] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid-and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 2004, 10(7): 1133-1145.
- [35] Ge Q S, Wang H J, Rutishauser T, Dai J H. Phenological response to climate change in China: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 265-274.
- [36] Wang C, Cao R Y, Chen J, Rao Y H, Tang Y H. Temperature sensitivity of spring vegetation phenology correlates to within-spring warming speed over the Northern Hemisphere. *Ecological Indicators*, 2015, 50: 62-68.
- [37] Chen X Q, Li J, Xu L, Liu L, Ding D. Modeling greenup date of dominant grass species in the Inner Mongolian Grassland using air temperature and precipitation data. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(4): 463-471.
- [38] Fu Y H, Piao S L, Zhao H F, Jeong S J, Wang X H, Vitasse Y, Ciais P, Janssens I A. Unexpected role of winter precipitation in determining heat requirement for spring vegetation green-up at northern middle and high latitudes. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3743-3755.
- [39] Shen M G, Piao S L, Cong N, Zhang G X, Janssens I A. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3647-3656.
- [40] Shen M G, Zhang G X, Cong N, Wang S P, Kong W D, Piao S L. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189-190: 71-80.
- [41] Shinoda M, Ito S, Nachinshonhor G U, Erdenetsetseg D. Phenology of mongolian grasslands and moisture conditions. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, 85(3): 359-367.
- [42] Liu H, Tian F Q, Hu H C, Hu H P, Sivapalan M. Soil moisture controls on patterns of grass green-up in Inner Mongolia: an index based approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 9(10): 11641-11675.
- [43] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社, 1985: 4-9, 428-428.
- [44] 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法. 北京: 科学出版社, 1979: 47-56.
- [45] 国家气象局. 农业气象观测规范. 北京: 气象出版社, 1993: 172-174.
- [46] Liu Q, Fu Y H, Zeng Z Z, Huang M T, Li X R, Piao S L. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 644-655.
- [47] Shi C G, Sun G, Zhang H X, Xiao B X, Ze B, Zhang N N, Wu N. Effects of warming on chlorophyll degradation and carbohydrate accumulation of Alpine herbaceous species during plant senescence on the Tibetan Plateau. *PLoS One*, 2014, 9(9): e107874.
- [48] Fracheboud Y, Luquez V, Björkén L, Sjödin A, Tuominen H, Jansson S. The control of autumn senescence in European aspen. *Plant Physiology*, 2009, 149(4): 1982-1991.
- [49] Hartmann D L, Klein T A M G, Rusicucci M, Alexander L V, Broenniman B, Charabi Y, Dentener F J, Dlugokencky E J, Easterling D R, Kaplan A, Soden B J, Thorne P W, Wild M, Zhai P M, Kent E. Observations: atmosphere and surface//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. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 159-254.
- [50] Dreesen F E, De Boeck H J, Janssens I A, Nijs I. Do successive climate extremes weaken the resistance of plant communities? An experimental study using plant assemblages. *Biogeosciences*, 2014, 11(1): 109-121.