

内蒙古草原羊草物候与气象因子的关系

陈效逯*, 李 惊

(北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 研究温带草原植物物候与气象因子变化的关系, 对于提高草原净初级生产量和碳收支估算的精度, 掌握放牧的时宜及其区域差异, 具有重要的科学意义和实践价值。该文利用内蒙古草原 7 个牧业气象试验站 1983 ~ 2002 年的羊草物候观测数据, 对返青和黄枯日期与气温和降水量的关系进行了统计分析。结果表明: (1) 所有站点的年平均气温均呈显著升高的趋势, 多数站点的年降水量呈不显著减少的趋势; 同时, 各站羊草返青期和黄枯期均以显著提前的趋势占优势, 多数站点的生长季节 (返青到黄枯的期间) 呈缩短的趋势。 (2) 在区域尺度上, 羊草返青日期与返青前一个月均温的负相关最为显著, 气温每升高 1℃, 返青期约提前 2.4d; 在站点尺度上, 森林草原区站点的羊草返青期早晚主要受返青前一个月均温 (负相关) 的影响, 典型草原区站点的羊草返青期早晚主要受前一年 10 月或 11 月到返青期累积降水量 (负相关) 的影响, 森林草原区最北部额尔古纳右旗的返青期早晚受返青前一个月均温和前一年 10 月到返青期累积降水量的共同影响。 (3) 在区域尺度上, 羊草黄枯日期与黄枯前一个月均温的负相关最为显著, 气温每升高 1℃, 黄枯期约提前 3.7d; 在站点尺度上, 羊草黄枯期早晚与前期气温以负相关为主, 与前期降水量以正相关为主。

关键词: 羊草; 返青期; 黄枯期; 气象因子; 内蒙古草原

文章编号: 1000-0933(2009)10-5280-11 中图分类号: Q142, Q948, S812 文献标识码: A

Relationships between *Leymus chinensis* phenology and meteorological factors in Inner Mongolia grasslands

CHEN Xiao-Qiu*, LI Jing

College of Urban and Environmental Sciences, MOE Laboratory for Earth Surface Processes, Peking University, Beijing 100871, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5280 ~ 5290.

Abstract: Studying grassland phenology and its relation to meteorological factors is crucial for enhancing the accuracy of net primary production and carbon sequestration estimate, and identifying appropriate grazing and harvesting times. Grasslands of *Leymus chinensis* are an endemic and dominant formation in the eastern part of Eurasia. Many studies have focused on physiological characteristics but few on phenological performances of *Leymus chinensis* in Inner Mongolia. Therefore, we used phenological observation data of *Leymus chinensis* and corresponding meteorological data from seven stations of Inner Mongolia during 1983 to 2002 to reveal statistical relationships between the greenup/brownoff date of *Leymus chinensis* and mean air temperature/precipitation, and find out principal factors influencing greenup and brownoff dates of *Leymus chinensis* at regional and local scales.

Annual mean air temperature showed a significant increase trend at all seven stations, whereas annual mean precipitation indicated an insignificant decrease trend at most of the stations. At the same time, both greenup and brownoff dates of *Leymus chinensis* represented a dominantly significant advancement, and the growing season (period from greenup to brownoff) was shortened at most of the stations. So, the response of *Leymus chinensis* growing season length to climate change was different from that of woody plants, namely, a temperature increase may not induce a growing season lengthening of *Leymus chinensis*. At regional scales, the most significantly negative correlation appeared between the *Leymus*

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40671028, 40371042)

收稿日期: 2009-04-16; 修订日期: 2009-06-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cxq@pku.edu.cn

chinensis greenup date and mean air temperature over the previous one month, namely, if the mean air temperature increased 1℃, the greenup date advanced about 2.4 days. At local scales, *Leymus chinensis* greenup at stations of the forest steppe area was influenced mainly by the mean air temperature over the previous one month (negative correlation), whereas *Leymus chinensis* greenup at stations of the typical steppe area was influenced primarily by the cumulative precipitation from the last October or November to the greenup date (negative correlation). A special case occurred at Eerguna station located in the most northern part of the forest steppe area, there *Leymus chinensis* greenup was affected by both mean air temperature over the previous one month and cumulative precipitation from the last October to the greenup date. In terms of relationships between the *Leymus chinensis* brownoff date and meteorological factors, at regional scales, the most significantly negative correlation occurred between the *Leymus chinensis* brownoff date and mean air temperature over the previous one month, namely, if the mean air temperature increased 1℃, the brownoff date advanced about 3.7 days. By contrast, the correlation between the *Leymus chinensis* brownoff date and precipitation was less significant. At local scales, a negative correlation dominated between the brownoff date and the previous air temperature, whereas a positive correlation dominated between the brownoff date and the previous precipitation.

Key Words: *Leymus chinensis*; greenup; brownoff; meteorological factors; Inner Mongolia grasslands

物候学是研究自然界以年为周期重复出现的各种生物现象的发生时间及其与环境条件(气候、水文和土壤)周期性变化相互关系的科学^[1,2]。物候现象如树木的开花、展叶、叶变色、落叶,鸟类的迁飞,昆虫的活动等不仅反映当地、当时的环境条件,而且反映过去一段时间内环境条件的积累^[1],因此,生物物候现象是环境条件季节和年际变化最直观、最敏感的综合指示器,其发生时间可以反映陆地生态系统短期的动态特征^[3,4]。最近 10a 以来,随着全球气候变化研究的不断深入,植物物候学的研究获得了新生并取得了长足的进步,分析树木物候现象和生长季节时空变化及其对气候变化的响应,已成为全球气候变化研究的前沿领域。许多研究结果表明,1950~1990 年,欧洲一些树木的春季开花和展叶期平均每 10a 提前 2~2.7d,秋季叶变色和落叶期平均每 10a 推迟 0.9~1.6d^[5,6],据此,植物物候生长季节每 10a 延长 3~4d。在北美,根据过去 35~63a 的观测统计,树木春季开花和展叶期平均每 10a 提前 1.2~3.8d^[4]。在我国东部温带地区,1963~1996 年,单种树木春季物候期平均每 10a 提前 1.1~5.4d^[7];1982~1993 年,植物群落生长季节开始日期平均每 10a 提前 4d,结束日期推迟 10d,生长季节长度延长 14d^[8]。对树木物候变化与气象因子驱动之间关系的统计分析显示,春季物候现象发生日期都与气温高度相关^[6,9,10],秋季物候现象发生日期与气温和水分状况等有一定的关系^[10,11],而生长季节长度则与年平均气温和年有效积温总量相关显著^[12],据此,气温被认为是影响植物物候期和生长季节的关键气象因子。由于数据的缺乏,到目前为止,国内外对草原植物物候的研究一直很薄弱。在仅有的研究成果中,Cleland 等^[13]通过模拟加利福尼亚中部沿海的区域气候变化,发现变暖是草原植物开花与冠层变绿时间提前的关键因子,提高 CO₂浓度和 N 沉降推迟草原植物开花和变绿时间,而增加降水量对草原植物的物候变化未产生一致性的影响;Franks 等^[14]研究了 1 年生草本植物芸苔花期对气候波动的响应,认为干旱引起的生长季节缩短可导致花期的提前。在国内,李荣平等^[15]初步分析了锡林浩特单站 9a 的羊草物候与气象因子的关系,并未显示出水分条件的作用。在前人研究的基础上,本文选择我国内蒙古草原作为研究的区域,试图对 1983~2002 年期间牧草物候期与气象因子之间的关系进行多站点的系统分析,旨在揭示半干旱地区植物物候对气候变化响应的统计特征,这对于进行温带草原物候对气候变化响应的模拟和预测,提高草原净初级生产量和碳收支估算的精度,以及掌握季节性放牧活动的时宜及其区域差异,具有重要的科学意义和实践价值。

1 研究区域、数据和方法

1.1 研究区域和站点选择

内蒙古地区位于东南沿海湿润、半湿润季风气候向西北内陆干旱、半干旱气候的过渡带。全区年平均气

温在 $-5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间,自东北向西南递增;年平均降水量在 $35 \sim 530\text{mm}$ 之间,自东向西或自东南向西北递减。受温度和水分条件的综合影响,植被带主要表现为近经向的空间分异特征,从东到西依次为森林、森林草原、典型草原、荒漠草原、草原化荒漠和典型荒漠^[16]。羊草草原是欧亚大陆草原区东部特有的一个群系,在我国,广泛分布于内蒙古高原的东部,成为欧亚草原区东端的一种优势草原类型。在羊草草原区,有 50 多个优势种,其中羊草(*Leymus chinensis*)占绝对优势,是稳定的建群成分^[17]。羊草草原也是我国温带最重要的牧场,具有草质好、生产力高、适于刈割和适口性强等特点。因此,研究羊草物候与气象因子的关系,对于揭示整个内蒙古羊草草原物候的时空格局及其对气候变化的响应,具有典型性和很强的实践性。

选择内蒙古地区全部 7 个牧业气象试验站,即额尔古纳右旗、鄂温克旗、巴雅尔吐胡硕、锡林浩特、镶黄旗、察哈尔右翼后旗和乌审召,作为研究的样本站点,其中,额尔古纳右旗、鄂温克旗、巴雅尔吐胡硕 3 个站位于森林草原区,其年干燥度指数大于 30;锡林浩特、镶黄旗、乌审召、察哈尔右翼后旗 4 个站位于典型草原区,其年干燥度指数小于 30(表 1)。

表 1 物候站点的地理坐标和气候条件

Table 1 Geographical coordinates and climatic conditions of phenological stations

站点 Site	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔高度 Altitude (m)	年均温 Mean annual temperature($^{\circ}\text{C}$)	年降水量 Mean annual precipitation(mm)	年干燥度指数 k Mean annual aridity index k
额尔古纳右旗 Ergunayouqi	50°15'N	121°11'E	582.3	-1.97	375.9	46.81
鄂温克旗 Ewenkeqi	49°09'N	119°45'E	621.4	-0.98	344.9	38.24
巴雅尔吐胡硕 Bayaertuhushuo	45°04'N	120°20'E	629.1	3.77	438.9	31.87
锡林浩特 Xilinhaote	43°57'N	116°04'E	990.8	2.97	269.9	20.81
镶黄旗 Xianghuangqi	42°14'N	113°50'E	1322.8	3.85	272.0	19.64
察哈尔右翼后旗 Chahaeryouyihouqi	41°27'N	113°11'E	1424.5	4.17	325.7	22.99
乌审召 Wushenzhao	39°06'N	109°02'E	1312.9	6.83	315.4	18.74

$k = P / (T + 10)$, 式中: k 为 de Martonne 干燥度指数, P 为年平均降水量, T 为年均温 $k = P / (T + 10)$, where k is the de Martonne aridity index, P is the mean annual precipitation, T is the mean annual temperature

1.2 数据来源及预处理

所用的羊草物候数据包括各站点 1983 ~ 2002 年逐年的羊草返青日期和黄枯日期。各牧业气象试验站观测地段的面积一般不小于 10000 m^2 ,当地的地形、地势、土壤、牧草种类和生产量等对该地区的草场类型具有代表性,且距离道路、水体、居民点、防护林等较远,受小气候的影响较小,还具有气象和牧草物候的平行观测。牧草物候观测从返青期开始至黄枯期结束,通常选择每种有代表性的 10 株(丛),在逢双或者隔日的下午进行定株观测。返青期开始是指 $\geq 10\%$ 的春季越冬植株露出心叶,老叶恢复弹性,由黄转青。黄枯期开始是指 $\geq 10\%$ 的植株地上器官约有三分之二枯萎变色^[18]。相应的气象数据为上述 7 个站点 1983 ~ 2002 年的逐日平均气温和逐日降水量。

在研究中,首先将返青日期和黄枯日期转化为从 1 月 1 日开始计算的序日,然后对数据进行审查和必要的校正。统计分析表明,对于同一个站点来说,羊草和针茅返青期与黄枯期时间序列之间存在着明显的顺序相关性,相关系数均达到显著的水平,因此,若某个站点同一年中两种牧草的返青或黄枯日期之间的期距相差过大或过小,则可以认为其中一种牧草或者两种牧草的数据不准确。进而,根据该站点所记录的气候评价中对当年物候现象发生日期正常或异常的评价,来判断哪个数据是可信的,从而剔除错误的数据,以确保用于统计分析的羊草物候数据的可靠性。

1.3 分析方法

首先,计算各站点年均温、年降水量、羊草返青日期、黄枯日期和生长季节长度的线性趋势;其次,将羊草

平均返青日期和黄枯日期之前不同时段의 逐年均温和降水量分别与逐年羊草返青日期和黄枯日期进行相关、回归分析。所有统计分析运用 Fortran95 编程和 SPSS13.0 完成。在区域尺度上的计算时,将每个站点 20 年的物候时间序列联结起来组成物候时空序列(7×20 个数据),再与对应的气象时空序列(7×20 个数据)进行相关分析,旨在探究研究区域内和研究时段中影响羊草返青和黄枯的主导气象因子,这种时空序列耦合的处理方法可以增大样本量,便于概括区域尺度上物候期与气象条件相关关系的整体特征,并且已被证实是行之有效的^[11,19,20]。由于本研究的基本假设是牧草物候期的变化主要受到气象因子的影响与控制,故暂不探讨其他环境因子对牧草物候期的影响。此外,为了揭示地方尺度上影响牧草物候的主要气象因子,还分析了单站气象因子与羊草物候期之间的相关关系。

2 气象因子和羊草物候期的趋势变化

2.1 气温和降水量的线性趋势

在 1983 ~ 2002 年期间,各站点的年均温呈显著升高的趋势,升温幅度为 $0.07 \sim 0.11^{\circ}\text{C}/\text{a}$,其中,锡林浩特、镶黄旗和察哈尔右翼后旗的升温幅度明显高于其他站点。相比之下,除察哈尔右翼后旗以外,各站年降水量均呈减少的趋势,减少的幅度差异很大,其中,只有巴雅尔吐胡硕的线性趋势达到显著的水平,且减少的幅度最大,达到 $11.1\text{mm}/\text{a}$ (表 2)。上述年均温和年降水量线性趋势变化的事实,构成了牧草生长季节多年变化的水热条件背景。

表 2 各站年均温和年降水量的线性趋势及其显著性水平(1983 ~ 2002 年)

Table 2 Linear trends and their significance levels of mean annual air temperature and precipitation at each station(1983 – 2002)

站点 Site	年均温 Mean annual temperature			年降水量 Mean annual precipitation		
	斜率 Slope	R^2	p	斜率 Slope	R^2	p
额尔古纳右旗 Eergunayouqi	0.072	0.266	0.02 *	-5.156	0.111	0.1517
鄂温克旗 Ewenkeqi	0.08	0.315	0.01 **	-1.290	0.009	0.6904
巴雅尔吐胡硕 Bayaertuhushuo	0.078	0.457	0.001 ***	-11.059	0.254	0.0234 *
锡林浩特 Xilinhaote	0.106	0.494	0.0005 ***	-1.300	0.010	0.6794
镶黄旗 Xianghuangqi	0.101	0.456	0.001 ***	-0.108	0.000	0.958
察哈尔右翼后旗 Chahaeryouyihouqi	0.098	0.474	0.0008 ***	1.290	0.017	0.587
乌审召 Wushenzhao	0.071	0.347	0.006 **	-0.689	0.003	0.8231

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

2.2 羊草返青期和黄枯期的线性趋势

从多年平均值来看,羊草返青日期大致呈从南向北逐渐推迟的空间变化趋势,只有海拔高度最高的察哈尔右翼后旗比较特别,其羊草返青日期明显偏晚,这显然与春季气温高低的空间差异密切相关。对羊草返青日期时间序列与年份之间的线性回归分析显示,除锡林浩特和乌审召以外,其他站点羊草返青期均呈提前的趋势,其中,额尔古纳右旗和察哈尔右翼后旗的提前趋势达到显著的水平($p < 0.05$),平均每年分别提前 0.5d 和 0.7d(表 3)。

表 3 各站羊草返青期的线性趋势及其显著性水平(1983 ~ 2002 年)

Table 3 Linear trends and their significance levels of *Leymus chinensis* greenup at each station(1983 – 2002)

站点 Site	平均返青期 Mean greenup date	样本量 N	斜率 Slope	R^2	p
额尔古纳右旗 Eergunayouqi	124.11	19	-0.5213	0.2194	0.043 *
鄂温克旗 Ewenkeqi	120.44	18	-0.0040	0.0000	0.982
巴雅尔吐胡硕 Bayaertuhushuo	113.3	20	-0.2722	0.0475	0.356
锡林浩特 Xilinhaote	108.05	20	0.3586	0.0750	0.243
镶黄旗 Xianghuangqi	108.22	18	-0.0781	0.0033	0.820
察哈尔右翼后旗 Chahaeryouyihouqi	122.16	19	-0.7440	0.2711	0.022 *
乌审召 Wushenzhao	99	19	0.2050	0.0893	0.214

表注见表 2 Notes see Table 2

羊草黄枯平均日期的纬向变化趋势不明显,位于西南部纬度最低的乌审召最早进入黄枯期,而中部的锡林浩特最晚进入黄枯期,表明影响羊草黄枯日期空间差异的环境因素比较复杂。对羊草黄枯日期时间序列与年份之间的线性回归分析显示,额尔古纳右旗、巴雅尔吐胡硕、锡林浩特和乌审召呈推迟的趋势,但均未达到显著的水平;而鄂温克旗、镶黄旗和察哈尔右翼后旗呈提前的趋势,其中,鄂温克旗($p < 0.05$)和镶黄旗($p < 0.01$)的提前趋势达到了显著的水平,平均每年提前 0.4d 和 1.8d(表 4)。

表 4 各站羊草黄枯期的线性趋势及其显著性检验(1983~2002 年)

Table 4 Linear trends and their significance levels of *Leymus chinensis* brownoff at each station(1983–2002)

站点 Site	平均黄枯期 Mean brownoff date	样本量 N	斜率 Slope	R^2	p
额尔古纳右旗 Eergunayouqi	260.95	19	0.3882	0.1862	0.065
鄂温克旗 Ewenkeqi	269.91	18	-0.4274	0.2750	0.026 *
巴雅尔吐胡硕 Bayaertuhushuo	256.95	20	0.2353	0.0315	0.454
锡林浩特 Xilinhaote	277.58	19	0.0971	0.0020	0.855
镶黄旗 Xianghuangqi	254.28	19	-1.7553	0.5196	0.0007 **
察哈尔右翼后旗 Chahaeryouyihouqi	265.79	14	-0.5601	0.2409	0.075
乌审召 Wushenzhao	230.42	19	0.4920	0.1448	0.108

表注见表 2 Notes see Table 2

总的来看,只有额尔古纳右旗、巴雅尔吐胡硕和乌审召 3 个站点的生长季节(返青到黄枯的期间)呈延长的趋势,其中,仅额尔古纳右旗达到显著延长的程度($p < 0.01$);其余 4 个站点的生长季节长度呈缩短的趋势,其中,镶黄旗达到显著缩短的程度($p < 0.001$)。这与同期欧洲^[5,6]、北美^[4]和我国^[7,8]已经观察到的树木生长季节的显著延长形成鲜明的对比,表明影响牧草生长季节长度趋势变化的主导气象因子不仅是气温,还与降水等水分条件有着密切的关系。下面从年际变化尺度上进一步分析水热因子与羊草返青期和黄枯期早晚的统计关系。

3 羊草返青期与气象因子年际波动的关系

3.1 区域尺度分析

对 7 个站点逐年的羊草返青日期时空序列数据与气温和降水量时空序列数据进行的相关分析显示(表 5),羊草返青日期与气温指标的相关系数均很高,通过了 $p < 0.001$ 的显著性检验,而与降水量指标的相关系

表 5 羊草返青日期与气温和降水量时空序列之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between spatiotemporal series of *Leymus chinensis* greenup dates and air temperatures/precipitations

气温指标 Temperature indexes	相关系数 Correlation coefficient	降水指标 Precipitation indexes	相关系数 Correlation coefficient
T_{g1}	-0.553 ***	P_{g1}	-0.209
T_{g2}	-0.547 ***	P_{g2}	0.020
T_{g3}	-0.523 ***	P_{g3}	0.085
T_{g4}	-0.593 ***	P_{g4}	-0.202
T_{g5}	-0.635 ***	P_{g5}	-0.254 **
T_{g6}	-0.695 ***	P_{g6}	-0.161
T_{g7}	-0.610 ***	P_{g7}	0.169
T_{g8}	-0.590 ***	P_{g8}	0.188
T_{g9}	-0.534 ***	P_{g9}	0.166

T_{g1} 、 T_{g2} 为前一年 10 月、11 月到返青期的均温; T_{g3} 为前一年黄枯到返青期均温; T_{g4} 为 1 月到返青期的均温; $T_{g5} - T_{g9}$ 为平均返青期前 2 个月、前 1 个月、前 20d、前 15d、前 10d 的均温; $P_{g1} - P_{g9}$ 为与 $T_{g1} - T_{g9}$ 同阶段的累积降水量; ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ T_{g1} and T_{g2} denote the mean air temperature from the last October and November to the mean greenup date, respectively; T_{g3} denotes the mean air temperature from the mean brownoff date of the last year to the mean greenup date of the current year; T_{g4} denotes the mean air temperature from January to the mean greenup date; $T_{g5} - T_{g9}$ denote the mean air temperatures over two months, one month, 20 days, 15 days and 10 days before the mean greenup date, respectively; $P_{g1} - P_{g9}$ denote cumulative precipitations during the same period of time with $T_{g1} - T_{g9}$; * * : $p < 0.01$; * * * : $p < 0.001$

数均较低,仅与返青前两个月累积降水量的相关系数通过了 $p < 0.01$ 的显著性检验。上述结果表明,在区域尺度上,气温的高低是决定羊草返青期早晚的重要因素。前期气温越高,羊草返青越早;前期气温越低,羊草返青越晚。这与前期气温对树木春季物候期发生早晚的影响是一致的^[6~10]。返青前一个月均温与返青日期的相关系数最大,说明这段时间的温度是影响羊草返青期早晚的关键因子,线性回归方程的拟合结果显示(图 1),在研究的期间内,返青前一个月均温每升高 1°C ,羊草返青日期平均提前 2.4d。

3.2 站点尺度分析

分别对每个站点羊草返青日期时间序列数据和当地气温、降水量时间序列数据进行的相关分析表明(表 6,表 7),不同站点影响羊草返青期的主导气象指标并不一致,根据羊草返青日期与气象指标相关关系的特点,可以将这 7 个站点分为 3 类。

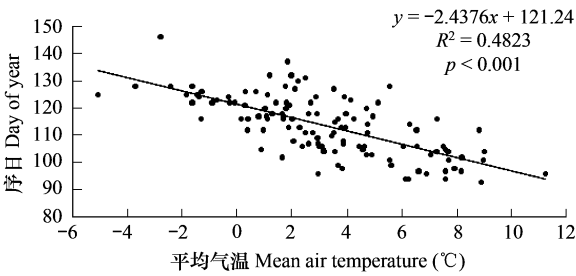


图 1 羊草返青日期与返青前一个月平均气温时空序列的相关和回归分析

Fig. 1 Correlation and regression analyses between spatiotemporal series of the *Leymus chinensis* greenup date and mean air temperature over the previous one month

表 6 各站羊草返青日期与气温时间序列之间的相关系数(1983~2002 年)

站点 Site	返青日期与气温的相关系数 Correlation coefficient between greenup date and air temperature								
	T_{g1}	T_{g2}	T_{g3}	T_{g4}	T_{g5}	T_{g6}	T_{g7}	T_{g8}	T_{g9}
额尔古纳右旗 Eergunayouqi	0.104	0.204	0.137	-0.403	-0.507 *	-0.528 *	-0.409	-0.447	-0.287
鄂温克旗 Ewenkeqi	0.079	0.033	0.012	-0.340	-0.623 **	-0.633 **	-0.607 *	-0.566 *	-0.325
巴雅尔吐胡硕 Bayaertuhushuo	0.040	0.142	0.105	-0.324	-0.321	-0.446 *	-0.337	-0.254	-0.112
锡林浩特 Xilinhaote	0.240	0.204	0.368	0.196	-0.006	-0.243	-0.231	-0.309	-0.188
镶黄旗 Xianghuangqi	0.292	0.156	-0.101	-0.195	-0.308	-0.356	-0.245	-0.088	-0.101
察哈尔右翼后旗 Chahaeryouyihouqi	0.215	0.339	-0.430	-0.382	-0.469	-0.337	-0.224	-0.207	-0.233
乌审召 Wushenzhao	-0.105	0.188	0.019	-0.262	-0.286	-0.272	-0.156	-0.038	-0.062

表注见表 5 Notes see Table 5, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

表 7 各站羊草返青日期与降水量时间序列之间的相关系数(1983~2002 年)

站点 Site	返青日期与降水量的相关系数 Correlation coefficient between greenup date and precipitation								
	P_{g1}	P_{g2}	P_{g3}	P_{g4}	P_{g5}	P_{g6}	P_{g7}	P_{g8}	P_{g9}
额尔古纳右旗 Eergunayouqi	-0.548 *	-0.244	-0.374	0.071	-0.192	-0.133	-0.085	-0.058	0.394
鄂温克旗 Ewenkeqi	0.268	-0.013	0.483	0.039	0.018	-0.254	0.100	0.081	-0.129
巴雅尔吐胡硕 Bayaertuhushuo	-0.293	-0.262	-0.100	0.412	0.155	-0.007	0.294	0.329	-0.150
锡林浩特 Xilinhaote	0.038	-0.169	-0.067	-0.232	-0.122	0.117	-0.007	0.130	-0.264
镶黄旗 Xianghuangqi	-0.409	-0.654 **	-0.397	-0.449	-0.398	-0.366	-0.248	-0.244	-0.083
察哈尔右翼后旗 Chahaeryouyihouqi	-0.572 *	-0.432	-0.323	-0.035	-0.369	0.087	0.036	0.007	-0.104
乌审召 Wushenzhao	-0.509 *	-0.719 **	0.011	-0.335	-0.088	-0.236	-0.129	0.071	0.209

表注见表 5 Notes see Table 5, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

(1) 羊草返青日期主要受气温影响的站点是纬度较高、年均温较低的鄂温克旗和巴雅尔图胡硕。在这两个站点,羊草返青期的早晚只与气温有着较好的负相关关系,而与降水量的相关程度均较低,表明气温是羊草返青的限制性因素,而降水量不构成限制。平均返青期之前一个月的均温是决定返青期早晚的关键气象因子,平均气温越高,返青期越早;平均气温越低,返青期越晚。这与区域尺度上得出的结果相似。

(2)羊草返青日期主要受降水量影响的站点是纬度较低、年均温较高的察哈尔右翼后旗、镶黄旗和乌审召。在这些地方,羊草返青期的早晚与气温的相关程度均较低,而与前一年 10 月或 11 月份到返青期的累积降水量存在着显著的负相关关系,表明降水量是羊草返青的限制性因素,而气温则不构成限制。在前一年 10~11 月份期间,当地面温度低于零度以后,降水主要以雪的形式积累起来,直到来年气温高于零度后积雪融化渗入土壤,因而这段期间的累积降水量能够间接地反映羊草返青时所能获得的土壤水分,该期间降水量越多,羊草返青时所获得的土壤水分就越充足,返青就越早;反之,返青则越晚。

(3)羊草返青日期受到降水量和气温共同影响的站点是最北部的额尔古纳右旗。在该站,羊草返青期的早晚与其前 1 个月和 2 个月的均温以及前一年 10 月份到返青期的累积降水量都存在着显著的负相关关系,即平均气温越高,累积降水量越多,返青期越早;反之,返青期越晚。

此外,在锡林浩特,羊草返青日期与气温和降水量的相关程度均很低。

3.3 羊草返青期与气象因子关系的空间差异及其可能原因

将上述单站羊草返青日期与气象指标相关关系的 3 种类型和相应站点所属的植被类型结合起来分析发现,在森林草原区的站点如鄂温克旗和巴雅尔吐胡硕,对羊草返青期产生最显著影响的气象因子是返青前一个月的平均气温,其中,在额尔古纳右旗,返青前 1 个月的均温和前一年 10 月份到返青期的累积降水量对羊草返青期的影响几乎同等重要;而在典型草原区的站点如察哈尔右翼后旗、镶黄旗和乌审召,对羊草返青期产生最显著影响的气象因子是前一年 10 月或 11 月份到返青期的累积降水量,只有锡林浩特例外(相关不显著)。

上述影响羊草返青期关键气象因子东西分异特征的形成,可以从内蒙古地区气候变化的东西分异中得到一定的解释^[21]。在内蒙古草原的东北部和东部地区,降水量较多,气温较低,气候比较湿润,羊草返青所需的水分条件能够得到基本满足,因而春季气温的高低便通过控制融雪和土壤解冻过程,对羊草返青期的早晚起到关键的作用。而在内蒙古草原的中、西部地区,降水量较少,气温较高,羊草返青所需的热量条件能够得到基本满足,但由于蒸发与蒸腾作用旺盛,使得可利用的土壤水分较少,因此,秋、冬季的降水量便成为限制来年羊草返青期的主导因子,并且在越干旱的地方(如乌审召),这种限制性越显著。

到目前为止,大部分的植物物候研究结果均肯定了春季气温对春季物候期早晚的显著影响,而未发现前一年秋、冬季到来年春季的累积降水量对春季物候期有显著影响^[6,11,22],其中一个重要原因是研究对象多为乔灌木,它们大多生长在水分条件较好的地区,在生长发育过程中一般不存在水分的胁迫,而在半干旱的草原地区,前一年秋、冬到来年春季的水分条件对于春季物候期早晚的影响才表现出来,甚至成为影响当地牧草返青期的主导气象因子。

从牧草生长发育对区域气候条件的适应方面来看,生长在内蒙古草原东部和西部地区的羊草,由于长期受到不同环境条件的综合影响,在不同的种群之间产生相应的生态变异,即趋异适应。这种变异很有可能通过遗传被继承下来,从而使得生长在内蒙古草原东部和西部地区的羊草种群表现出显著的生理生态分化。钱吉等^[23]的研究表明,在分子水平上,水分在影响羊草种群分化的众多生态因子中起着主导的作用,随着水分因子在内蒙古草原地区连续的梯度变化,羊草各种群间也呈现出连续的倾群变异。这种变异很可能通过物候现象上的差异表现出来,即西部的羊草返青对水分的变化更为敏感,而东部的羊草返青对气温的变化更为敏感。在介于东部森林草原区和中、西部典型草原区之间的锡林浩特,没有发现影响羊草返青期的主导气象因子,可能是由于在环境条件过渡带中生长的羊草,其生理生态性状的稳定性较差所致^[24]。

4 羊草黄枯期与气象因子年际波动的关系

4.1 区域尺度分析

对 7 个站点逐年的羊草黄枯日期时空序列数据与气温和降水量时空序列数据进行的相关分析显示(表 8),羊草黄枯日期与气温指标存在着很好的负相关关系($p < 0.001$),其中,黄枯期早晚与黄枯前 1 个月和 2 个月平均气温的相关系数明显高于与其他气温指标的相关系数。该时段平均气温越高,黄枯期越早;平均气

温越低,黄枯期越晚。温度对羊草黄枯日期影响的机制可能表现在两个方面,一是由于温度升高,使羊草冠层蒸腾和土面蒸发加剧,导致羊草因水分亏缺而黄枯期提前,这可以从对羊草叶片光合速率季节变化的观测中得到印证^[25];二是植物叶片从开始生长到衰老需要一定的积温^[26],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。此外,尽管羊草黄枯日期与个别降水量指标之间的相关关系也通过了显著性检验,但相关系数明显小于其与气温的相关系数。线性回归分析显示,羊草黄枯日期到来前一个月均温每升高 1℃,黄枯日期平均提前 3.7d(图 2)。可见,气温对秋季羊草黄枯日期的影响效率明显大于对春季羊草返青日期的影响效率。

表 8 羊草黄枯日期与气温和降水量时空序列之间的相关系数

Table 8 Correlation coefficients between spatiotemporal series of *Leymus chinensis* brownoff dates and air temperatures/precipitations

气温指标 Temperature indexes	相关系数 Correlation coefficient	降水指标 Precipitation indexes	相关系数 Correlation coefficient
T_{b1}	-0.343 ***	P_{b1}	0.086
T_{b2}	-0.343 ***	P_{b2}	0.118
T_{b3}	-0.403 ***	P_{b3}	0.058
T_{b4}	-0.403 ***	P_{b4}	0.107
T_{b5}	-0.569 ***	P_{b5}	0.261 **
T_{b6}	-0.903 ***	P_{b6}	-0.221 **
T_{b7}	-0.929 ***	P_{b7}	-0.272 ***

$T_{b1} - T_{b7}$ 分别为 6~7 月均温、7~8 月均温、8~9 月均温、7~9 月均温、返青期至黄枯期均温、黄枯前 2 个月均温和黄枯前 1 个月均温; $P_{b1} - P_{b7}$ 为与 $T_{b1} - T_{b7}$ 相对应的同期累积降水量 $T_{b1} - T_{b7}$ denote the mean air temperature during June to July, July to August, August to September, July to September, the mean greenup date to the mean brownoff date, over two months before the mean brownoff date, over one month before the mean brownoff date, respectively; $P_{b1} - P_{b7}$ denote cumulative precipitations during the same period of time with $T_{b1} - T_{b7}$; * *: $p < 0.01$; * * *: $p < 0.001$

4.2 站点尺度分析

分别对每个站点羊草黄枯日期时间序列数据和当地气温、降水量时间序列数据进行的相关分析表明,羊草黄枯期早晚与气温之间以负相关为主(5 个站),这与区域尺度的分析结果相同,显著负相关出现在鄂温克旗、锡林浩特、镶黄旗和察哈尔右翼后旗,分别与返青期至黄枯期均温、8~9 月分均温和 7~9 月份均温的相关系数最大($p < 0.01$);羊草黄枯日期与气温的显著正相关出现在东北部的额尔古纳右旗和西南部的乌审召,分别与黄枯日期前两个月均温($p < 0.01$)和返青期至黄枯期均温($p < 0.05$)的相关系数最大(表 9)。

羊草黄枯期早晚与降水量之间以正相关为主(5 个站),显著正相关出现在鄂温克旗、锡林浩特和镶黄旗,分别与 7~9 月份累积降水量($p < 0.05$)、黄枯期前 2 个月($p < 0.05$)和 1 个月累积降水量($p < 0.01$)的相关系数最大;羊草黄枯期早晚与降水量的显著负相关仅出现在最北部的额尔古纳右旗,且与返青期至黄枯期累积降水量和黄枯前 1 个月累积降水量的相关系数最大($p < 0.05$)(表 10)。

综上所述,在 7 个牧业气象试验站中,额尔古纳右旗和乌审召两地羊草黄枯期早晚与水热因子的相关性比较特殊。两地的羊草黄枯日期与前期气温均呈显著正相关,而额尔古纳右旗羊草黄枯日期还与前期降水量呈显著负相关,其原因有待进一步研究。总之,与返青期相比,各站羊草黄枯期早晚与水热因子之间的统计关系存在着更大的空间差异性和不确定性,表明其受气象因子影响的机制要复杂得多。

5 结论

本文利用内蒙古草原 7 个牧业气象试验站 1983~2002 年的羊草物候数据和气象数据,在分析年平均气

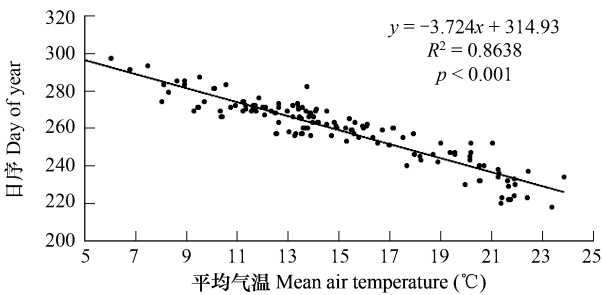


图 2 羊草黄枯日期与黄枯前一个月平均气温时空序列的相关和回归分析

Fig. 2 Correlation and regression analyses between spatiotemporal series of the *Leymus chinensis* brownoff date and mean air temperature over the previous one month

表 9 各站羊草黄枯日期与气温时间序列之间的相关系数(1983~2002 年)

Table 9 Correlation coefficients between time series of the *Leymus chinensis* brownoff date and air temperature at each station(1983~2002)

站点 Site	黄枯日期与气温的相关系数 Correlation coefficient between brownoff date and air temperature						
	T_{b1}	T_{b2}	T_{b3}	T_{b4}	T_{b5}	T_{b6}	T_{b7}
额尔古纳右旗 Eergunayouqi	0.282	0.567 *	0.586 **	0.607 **	0.108	0.634 **	0.554
鄂温克旗 Ewenkeqi	-0.453	-0.331	-0.282	-0.426	-0.651 **	-0.129	-0.160
巴雅尔吐胡硕 Bayaertuhushuo	0.171	-0.057	-0.034	0.009	-0.142	-0.284	-0.283
锡林浩特 Xilinhaote	0.033	-0.284	-0.419	-0.277	-0.575 **	-0.318	0.058
镶黄旗 Xianghuangqi	-0.341	-0.485 *	-0.821 **	-0.715 **	-0.352	-0.592 **	-0.759 **
察哈尔右翼后旗 Chahaeryouyihouqi	-0.518	-0.582 *	-0.588 *	-0.669 **	-0.646 *	-0.627 *	-0.423
乌审召 Wushenzhao	0.346	0.144	0.158	0.241	0.551 *	0.164	0.078

表注见表 8 Notes see Table 8, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

表 10 各站羊草黄枯日期与降水量时间序列之间的相关系数(1983~2002 年)

Table 10 Correlation coefficients between time series of the *Leymus chinensis* brownoff date and precipitation at each station(1983~2002)

站点 Site	黄枯日期与降水量的相关系数 Correlation coefficient between brownoff date and precipitation						
	P_{b1}	P_{b2}	P_{b3}	P_{b4}	P_{b5}	P_{b6}	P_{b7}
额尔古纳右旗 Eergunayouqi	0.104	0.204	0.137	-0.403	-0.528 *	-0.287	-0.507 *
鄂温克旗 Ewenkeqi	0.177	0.415	0.317	0.489 *	0.380	0.322	0.269
巴雅尔吐胡硕 Bayaertuhushuo	0.329	0.255	0.070	0.257	0.354	0.315	-0.164
锡林浩特 Xilinhaote	0.188	0.275	0.489 *	0.306	0.339	0.499 *	-0.176
镶黄旗 Xianghuangqi	-0.224	0.286	0.718 **	0.208	0.389	0.515 *	0.832 **
察哈尔右翼后旗 Chahaeryouyihouqi	-0.080	-0.114	-0.179	-0.103	-0.088	-0.091	-0.113
乌审召 Wushenzhao	-0.098	0.018	0.284	0.106	0.328	-0.100	-0.130

表注见表 8 Notes see Table 8, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

温、年降水量和羊草物候期线性趋势变化的基础上,重点研究了气温、降水量的年际变化对羊草返青期和黄枯期早晚的影响,得到以下结论:

(1)在研究的期间内,所有站点的年平均气温均呈显著升高的趋势,6 个站点的年降水量呈减少的趋势,但显著性程度一般不高。相应地,有 4 个站点的羊草生长季节呈缩短的趋势,只有 3 个站点的羊草生长季节呈延长的趋势。由此可见,羊草生长季节长度的趋势变化对气候变化的响应与木本植物不同,气温的升高并不一定导致其生长季节的延长,这很可能与不同地点的水分条件限制有关^[27]。

(2)在区域尺度上,羊草返青日期的时空变化主要受到前期气温时空变化的影响,与返青前一个月均温的负相关关系最为显著,气温每升高 1℃,返青期约提前 2.4d。在站点尺度上,影响羊草返青日期年际波动的主导气象因子存在着明显的空间差异:在气候比较湿润的森林草原区站点如鄂温克旗和巴雅尔吐胡硕,羊草返青期早晚主要受返青前一个月均温(负相关)的影响;在气候相对干旱的典型草原区站点如察哈尔右翼后旗、镶黄旗和乌审召,羊草返青期早晚主要受前一年 10 月或 11 月份到返青期累积降水量(负相关)的影响;在森林草原区最北部的额尔古纳右旗,返青期早晚受返青前一个月均温和前一年 10 月份到返青期累积降水量的共同影响。上述空间差异的形成与当地水热条件的配合状况和羊草种群的生态变异有关。

(3)在区域尺度上,羊草黄枯日期的时空变化也主要受到前期气温时空变化的影响,与黄枯前一个月均温的负相关关系最为显著,气温每升高 1℃,黄枯期约提前 3.7d。在站点尺度上,羊草黄枯日期与前期气温的年际波动以负相关为主,显著负相关出现在鄂温克旗、锡林浩特、镶黄旗和察哈尔右翼后旗;羊草黄枯日期与前期降水量的年际波动以正相关为主,显著正相关出现在鄂温克旗、锡林浩特和镶黄旗。在额尔古纳右旗和乌审召,羊草黄枯期早晚与气温、降水量呈显著相关的性质,与其它站点不同,表明影响该地区羊草黄枯的机制比较复杂,有待进一步研究。

References:

- [1] Zhu K Z, Wan M W. Phenology. Beijing: Science Press, 1980. 1.
- [2] Lieth H ed. Phenology and Seasonality Modeling. New York: Springer-Verlag, 1974. 4—5.
- [3] Schwartz M D. Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. International Journal of Biometeorology, 1999, 42: 113—118.
- [4] Walther G R, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee T J C, Fromentin J M, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F. Ecological responses to recent climate change. Nature, 2002, 416: 389—395.
- [5] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. Nature, 1999, 397: 659.
- [6] Chmielewski F M, Roetzer T. Response of tree phenology to climate change across Europe. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108: 101—112.
- [7] Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X, Wang W C. Spring phenophases in recent decades over eastern China and its possible link to climate changes. Climate Change, 2006, 77: 449—462.
- [8] Chen X Q, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China. Global Change Biology, 2005, 11: 1118—1130.
- [9] Menzel A. Plant Phenological Anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. Climate Change, 2003, 57: 243—263.
- [10] Chen X Q, Han J W. Seasonal aspect stages of plant communities and their spatial-temporal variation in temperate eastern China. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(2): 336—346.
- [11] Chen X Q. Untersuchung zur zeitlich-raeumlichen Aehnlichkeit von phaenologischen und klimatologischen Parametern in Westdeutschland und zum Einfluss geoekologischer Faktoren auf die phaenologische Entwicklung im Gebiet des Taunus. Offenbach: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1994. 61.
- [12] Chen X Q, Pan W F. Relationships among phenological growing season, time-integrated normalized difference vegetation index and climate forcing in the temperate region of eastern China. International Journal of Climatology, 2002, 22: 1781—1792.
- [13] Cleland E E, Chiariello N R, Loarie S R, Mooney H A, Field C B. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103: 13740—13744.
- [14] Franks S J, Sim S, Weis A E. Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104: 1278—1282.
- [15] Li R P, Zhou G S, Wang Y H, Han X. Phenological responses of *Leymus chinensis* to climate factors. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(3): 277—280.
- [16] The Integrated Investigation Team in Inner Mongolia and Ningxia, CAS. Vegetation of Inner Mongolia. Beijing: Science Press, 1985. 420—447.
- [17] Editorial Board of Vegetation of China. Vegetation of China. Beijing: Science Press, 1980. 519—527.
- [18] China Meteorological Administration. Observation Criterion of Agricultural Meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 1993. 167—174.
- [19] Chen X Q. A study of phenological seasonal rhythm in spring and summer of north China region. Scientia Geographica Sinica, 1990, 10(1): 69—76.
- [20] Thompson R, Clark R M. Spatio-temporal modelling and assessment of within-species phenological variability using thermal time methods. International Journal of Biometeorology, 2006, 50: 312—322.
- [21] Chen X Q, Peng J D, Li H M. Seasonal and regional differences of air temperature changes in Inner Mongolia. Geographical Research, 2009, 28(1): 27—35.
- [22] Menzel A. Phenology: its importance to the global change community—an editorial comment. Climate Change, 2002, 54: 397—385.
- [23] Qian J, Ma Y H, Ren W W, Zheng S Z. Comparative study on ecotype differentiation of *Leymus chinensis* in different geographic populations at molecular level. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(3), 143—146.
- [24] Ren W W, Qian J, Zheng S Z. Comparison of characteristics of different provenance *Leymus chinensis* grown under different water-stress conditions. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(2), 157—160.
- [25] Chen X Q, Zhou M, Zheng T, Zhang R J. Examining seasonal variations of *Leymus chinensis* photosynthetic rates in the Hulunbeier Grassland: a case study of a grassland meteorological experiment station in Ewenke. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2003—2012.
- [26] Worrall J. Phenology and the changing seasons. Nature, 1999, 399: 101.

- [27] Yu F F, Price K P, Ellis J, Shi P J. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87:42—54.

参考文献:

- [1] 竺可桢,宛敏渭. 物候学. 北京:科学出版社,1980. 1
- [10] 陈效述, 韩建伟. 我国东部温带植物群落的季相及其时空变化特征. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 336~346.
- [15] 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.
- [16] 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. 420~447.
- [17] 中国植被编委会. 中国植被. 北京:科学出版社, 1980. 519~527.
- [18] 国家气象局. 农业气象观测规范. 北京:气象出版社, 1993. 167~174.
- [19] 陈效述. 华北地区春夏季的物候季节节奏研究. *地理科学*, 1990, 10(1): 69~76.
- [21] 陈效述, 彭嘉栋, 李慧敏. 内蒙古地区气温变化的季节和区域差异. *地理研究*, 2009, 28(1): 27~35.
- [23] 钱吉, 马玉虹, 任文伟, 郑师章. 不同地理种群羊草分子水平上生态型分化的研究. *生态学报*, 2000, 20(3): 143~146.
- [24] 任文伟, 钱吉, 郑师章. 不同种源羊草在不同水分条件下的性状比较. *应用生态学报*, 1997, 8(2): 157~160.
- [25] 陈效述, 周萌, 郑婷, 张荣菊. 呼伦贝尔草原羊草光合速率的季节变化——以鄂温克旗牧业气象试验站为例. *生态学报*, 2008, 28(5): 2003~2012.