

DOI: 10.5846/stxb202001060039

徐玲玲. 内蒙古中西部优势植物春季返青对降水的非线性响应. 生态学报, 2020, 40(24): 9120-9128.

Xu L. L. Non-linear response of dominant plant species regreening to precipitation in mid-west Inner Mongolia in spring. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9120-9128.

内蒙古中西部优势植物春季返青对降水的非线性响应

徐玲玲*

国家气象中心, 北京 100081

摘要: 长期以来, 研究植被物候变化与气候因子的关系多基于线性模型, 事实上植被物候对气候变化的响应可能是非线性的。以 1984—2017 年内蒙古中西部温性典型草原和温性草原荒漠长时间序列植被物候观测资料为基础, 分析了近 40 年来气候变化背景下不同草地类型优势植物返青期变化特征及其对春季降水的非线性响应。结果表明: (1) 温性典型草原冷蒿返青期主要受水分控制, 与春季降水量表现为开口向下的二次函数关系。气候暖干化导致的水分亏缺是冷蒿返青期呈极显著延迟趋势(1.32 d/a)的主要原因; 春季降水量超过 60 mm 时, 冷蒿返青期表现出由延迟转变为提前的趋势。(2) 温性草原荒漠猫头刺返青期主要受热量控制。受春季显著升温影响, 猫头刺返青期呈极显著提前趋势(0.63 d/a)。春季降水增多利于猫头刺提早返青, 二者表现为开口向上的二次函数关系; 春季降水量超过 40 mm 时, 猫头刺返青期对降水的响应程度逐渐降低, 这可能与荒漠植物本身的生理特性有关。

关键词: 春季物候; 降水; 非线性响应

Non-linear response of dominant plant species regreening to precipitation in mid-west Inner Mongolia in spring

XU Lingling*

National Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract: The relationship between plant phenology and climate factors has been studied mostly based on linear models for a long time. In fact, the response of plant phenology to climate change may be non-linear. Based on long-time series of phenological observation data of temperate typical grassland and temperate steppe desert in Inner Mongolia from 1984 to 2017, the phenological change characteristics of dominant plant species in different grassland types and their non-linear responses to spring precipitation during the past 40 years were analyzed. The results showed that: (1) the controlling factor of *Artemisia frigida* regreening in temperate typical grassland was water in spring, which behaved as a quadratic function of downward opening. The water deficit caused by warm and dry climate in spring was the main reason for the significantly delayed trend (1.32 d/a) of *Artemisia frigida* regreening. Only if the precipitation in spring exceeded 60 mm, its regreening might show a transition trend from delay to advance. (2) The controlling factor of *Oxytropis aciphylla* regreening in temperate steppe desert was temperature. Affected by the significant warming in spring, the regreening of *Oxytropis aciphylla* showed a significantly advanced trend with the magnitude of 0.63 d/a. The precipitation increase in spring promoted regreening, and there was a quadratic function of upward opening between the plant regreening and spring precipitation. When the spring precipitation exceeded 40 mm, its response to precipitation gradually decreased, which was mainly related to the physiological characteristics of desert plants.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700421)

收稿日期: 2020-01-06; 修订日期: 2020-07-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xulingling2001@126.com

Key Words: spring phenology; precipitation; non-linear response

植被物候是不同植被生物现象年复一年重现的时序节点,是植物长期适应环境的季节性变化而形成的生长发育节律^[1-2]。工业革命以来,以变暖为主要特征的全球气候变化已经对植被物候产生了重要的影响^[3-9]。由于能够敏感而直接地反映生物圈对气候变化的响应,植被物候日益成为全球变化研究的焦点。

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,在全球气候变化中扮演着重要角色^[10-11]。中国天然草原面积约 $4.0 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 占国土总面积的 41.7%, 其中以分布在温带干旱/半干旱地区的温性草原类(草甸草原、典型草原、荒漠草原)和分布在青藏高原地区的高寒草原类为主,这些区域也是全球气候变化的敏感地带和生态环境脆弱区。目前,围绕气候变化对草地生态系统尤其是对草本植物物候期的影响,已经开展了大量的研究^[12-16]。大多数学者认为,春季升温促使北半球植被返青期提前^[17-18]。郭连云和李惊^[12]研究发现,气候变暖导致青海三江源高寒地区西北针茅返青期呈逐年提前的趋势。陈效述等^[19]基于内蒙古 7 个草原牧业气象试验站羊草物候观测数据,也认为羊草返青期变化趋势以显著提前为主。Chmielewski 和 Rötzer^[4]观测发现 2 至 4 月早春平均气温每升高 1°C , 欧洲树木萌芽生长的日期提前约 7d。但也有学者研究得出相反的结论,赵广帅等^[20]研究发现,青藏高原气候变暖导致西藏半干旱草甸草原植物返青期推迟,气候变暖带来的蒸发加剧和降水减少是其主要原因。张钦仁等^[21]也认为青海环湖地区牧草返青早晚主要受水分条件限制。事实上,不同区域不同物种的植物物候期变化趋势差异巨大,植物物候期对气候变化的响应机制也不尽相同^[22]。目前已有的研究成果多侧重于气候变化背景下单一区域或单一站点优势植物主要物候期变化特征的统计分析,包括植物返青期和黄枯期的提前或延迟、植物生长季长度的延长或缩短等;研究方法以植物物候期变化与温度、降水等气候因子的简单线性统计为主。事实上,植物物候变化与温度、降水等气候因子有一定的关系,但二者之间并不一定满足线性假设。郑景云等^[23]研究气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响,发现物候期的提前与推迟对温度的上升与下降的响应是非线性的。目前,基于非线性模型开展不同草地类型植物物候对气候变化内在响应机理的研究尚不多见。

人工记录是最为直观、准确的物候获取方法^[24],为研究植物群落的物候变化及其与环境因子的关系等生态过程提供了重要的直接数据^[25-26]。本研究以 1984—2017 年内蒙古中西部温性典型草原和温性草原化荒漠长时间序列植被物候观测资料为基础,从植物物候对气候因子非线性响应的角度深入探讨了不同草地类型优势植物物候期对气候变化的内在响应机理,以期揭示不同植被类型物候变化特征及其对气候变化的响应规律,为准确评估气候变化产生的生态效应,开展退化草地植被恢复以及草地生态系统对全球碳循环的研究提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

内蒙古草原是欧亚大陆草原的重要组成部分,总面积为 $0.87 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 占全国草原面积的 22.1%^[27]。本研究选择锡林浩特和李井滩牧业气象观测站作为内蒙古中西部地区不同草地类型的代表性站点。前者位于内蒙古自治区中部的锡林郭勒盟($116^\circ 07' \text{E}$, $43^\circ 57' \text{N}$), 海拔 1003.0 m, 属温带半干旱大陆性季风气候, 年平均气温 3.2°C , 年降水量 200—400 mm, 年日照时数 3025.2 h, $\geq 0^\circ\text{C}$ 生物学积温 2350—3400; 植被类型为温性典型草原类, 主要建群种有克氏针茅(*Stipa kryoiyü*)、羊草(*Leymus chinensis*)、冷蒿(*Artemisia frigidawilld*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等。后者位于内蒙古自治区西部的阿拉善盟($105^\circ 23' \text{E}$, $39^\circ 05' \text{N}$), 海拔 1235.0 m, 属温带干旱大陆性气候, 年平均气温 8.3°C , 年降水量 140—160 mm, 年平均风速 3.9 m/s, 年平均日照时数 3252.8 h; 植被类型为温性草原化荒漠类, 主要建群种有霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、红砂(*Reaumuria soongorica*)等。

1.2 资料来源

内蒙古地区植被物候观测开始于 20 世纪 80 年代初期,按照中国气象局《农业气象观测规范》^[28]进行测

定。选择代表当地草地类型的地段设置植被物候观测场,面积为 100 m×100 m,并围栏围封保护。观测场通常划分为 4 个观测区域(50 m×50 m)作为 4 个重复,每年轮换一个区域,每个观测区域随机抽取 4 个样方,每个样方面积 1 m×1 m。选择长势良好且连续 3 年具有完整生活史的 10 个植株,返青期至黄枯期每 2 天定株进行一次物候期观测。定义某物候期出现≥10%为初期,≥50%为普期。本研究中所用的物候期均为普期。

考虑到观测数据的代表性、完整性等因素,选择冷蒿(*Artemisia frigida*)作为温性典型草原的代表性植物,物候数据包括 1984 至 2017 年共 34 年,其中 1988、1989、1991、1993 年数据根据相同站点针茅的物候数据插补获得。选择猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)作为温性草原化荒漠的代表性植物,物候数据包括 1984 至 2017 年共 34 年,其中 1990、2014 年数据利用相邻年份插补获得。站点对应的气象数据来自观测场周边的气象站,数据起始年份为 1981—2017 年,主要包括逐日气温、降水、日照等数据。

1.3 研究方法

(1) 物候期数据处理

为了便于统计分析,植被返青期观测数据均采用 Julian days-JD 日序换算方法转化为同年 1 月 1 日开始计算的序日。

(2) 植被返青期和气象要素随时间变化趋势分析

采用一元线性趋势法定量分析植被返青期和主要气象要素(气温、降水)随时间的变化趋势,计算公式为:

$$X_i = a + bt_i \quad (1)$$

式中, t_i 表示年份, X_i 表示植被返青期和气候要素, a 为回归常数, b 为倾向值。若 $b > 0$ 表示植被返青期推迟或气候要素值增加;若 $b < 0$ 表示植被返青期提前或气候要素值降低。

(3) 植被返青期和气象要素相关性分析

采用一元一次或二次函数定量分析植被返青期与春季不同时段(3 月、4 月、5 月、3—5 月)气温和降水量的相关关系。计算公式为:

$$\begin{aligned} Y_i &= px_i + q \\ Y_i &= cx_i^2 + dx_i + e \end{aligned} \quad (2)$$

式中, x_i 为不同时段气象要素变量, Y_i 为植被返青期变量。应用最小二乘法原理可获得方程的拟合系数 p 、 q 、 c 、 d 、 e , 建立反映不同时段气候因子对植被返青期影响的函数表达式。植被返青期与气象要素之间的相关性用相关系数 r 或决定系数 R^2 表示,其中 r 的取值范围为 $[-1, 1]$;采用双侧 t 检验进行显著性水平检验 ($P < 0.001, 0.01$ 或 0.05)。

2 结果与分析

2.1 气温和降水变化特征

如图 1 所示,1981—2017 年温性典型草原区和温性草原化荒漠区春季气温均呈极显著上升趋势 ($P < 0.01$),但升温幅度略有差异。温性草原化荒漠区春季气温气候倾向率为 $0.67^\circ\text{C}/10\text{a}$,略高于温性典型草原区 ($0.47^\circ\text{C}/10\text{a}$)。近 40 年来,温性典型草原区春季平均气温为 4.8°C ;其中最高值出现在 1998 年,为 7.3°C ,最低值出现在 2010 年,为 2.3°C 。温性草原化荒漠区气温相对偏高,1991—2017 年春季平均气温为 10.8°C ;最高值出现在 2013 年,为 12.5°C ,最低值出现在 1996 年,为 8.4°C 。

1981—2017 年温性典型草原区和温性草原化荒漠区春季降水量波动明显,整体呈微弱增加趋势,气候倾向率分别为 $6.26 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 和 $4.59 \text{ mm}/10 \text{ a}$,均未达到显著性水平(图 1)。温性典型草原区 1981—2017 年春季平均降水量为 37.4 mm ,最高值出现在 2010 年,为 109.3 mm ;最低值出现在 1999 年,仅 10.4 mm 。温性草原化荒漠区 1991—2017 年春季平均降水量为 26.9 mm ,最高值出现在 1998 年 (67.6 mm),最低值出现在 1995 年,仅 1.4 mm 。

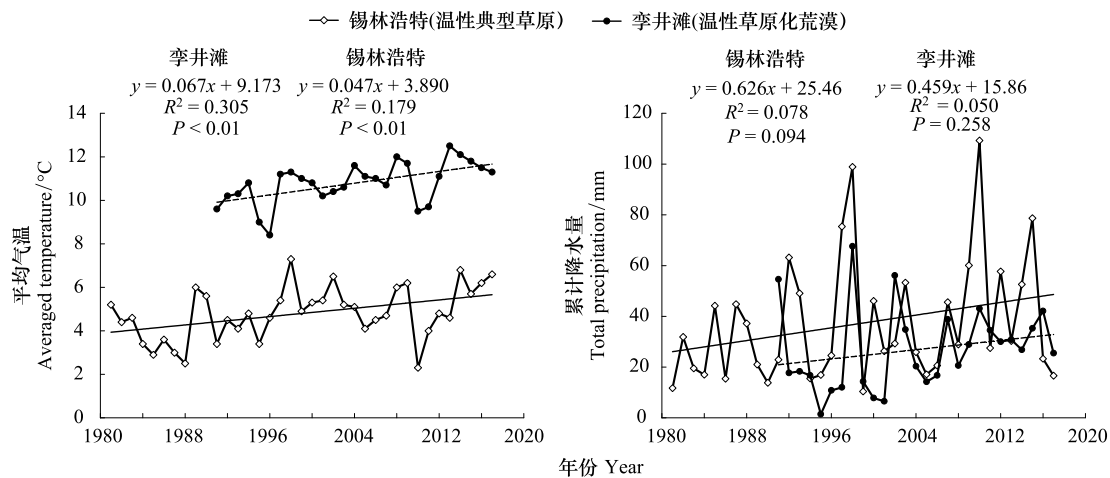


图 1 1981—2017 年研究区域代表站春季平均气温和累计降水量变化趋势

Fig.1 Variation trends of averaged temperature and total precipitation in spring of representative stations in the study area from 1981 to 2017

2.2 优势植物返青期变化特征

如图 2 所示,1984—2017 年温性典型草原冷蒿和温性草原化荒漠猫头刺返青期表现出相反的变化趋势。冷蒿 34a 返青期整体呈极显著延迟趋势,延迟幅度为 1.32 d/a ($P < 0.001$);多年平均返青日期为 DOY 102.6 (4 月 13 日),其中最早出现在 3 月 25 日(1989 年),最晚出现在 5 月 13 日(2014 年)。猫头刺 1984—2017 年返青期表现为极显著提前的趋势,平均每年提前约 0.63d ($P < 0.001$);多年平均返青日期为 DOY 89.6 (3 月 30 日),其中最早返青期为 3 月 15 日(2013 年),最晚为 4 月 20 日(1994 年)。

2.3 优势植物返青期对气候因子的响应

2.3.1 温性典型草原冷蒿

如表 1 所示,1984—2017 年冷蒿返青期与春季各时段气温和降水因子的相关系数均未通过显著性检验,表明冷蒿返青早晚对气候因子的响应敏感性较差。具体来看,冷蒿返青期与 3、4 月平均气温负相关,相关系数分别为 -0.219 和 -0.630,说明冷蒿返青期及返青前期的温度升高利于牧草萌动返青。近 40 年来研究区春季气温显著升高,冷蒿返青期实际却呈极显著延迟的趋势,表现出互相矛盾的结果。冷蒿返青期与 5 月平均气温转变为正相关关系,相关系数为 0.285,说明 5 月份升温对冷蒿返青有延迟作用。冷蒿返青期与春季气温整体正相关,3—5 月平均气温每升高 1℃,牧草返青期延迟 3.62 d (图 3)。由此可以推断,与温度相比,水分因子才是冷蒿返青早晚的决定性因素。春季剧烈升温带来的强烈蒸散加剧了水分亏缺,应该是导致冷蒿返青期延迟的主要原因。

冷蒿返青期与 3、4、5 月降水量的相关系数分别为 -0.548、-0.316 和 -0.837,表现为一致性负相关关系(表 1),说明春季降水增多利于牧草提前返青。整体来看,冷蒿返青期并未随春季降水量的增多线性提前,而是表现为开口向下的二次函数关系(图 3)。当春季累计降水量不足 60 mm 时,降水增多对牧草返青提前的促进作用有限,冷蒿返青期随降水量的增加仍然表现为延迟趋势;当春季累计降水量超过 60 mm 时,冷蒿返青期延迟的幅度渐缓,并逐渐转变为提前的趋势。近 40 年来尽管研究区春季平均降水量呈微弱增加的趋势

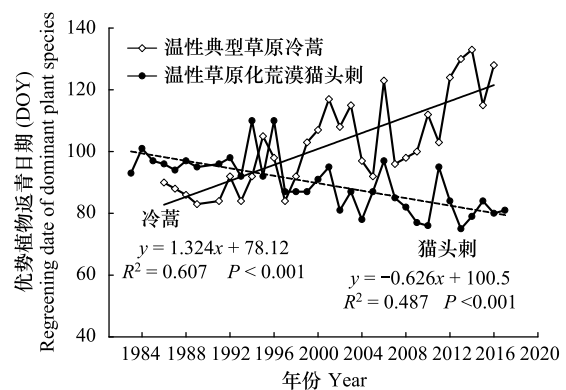


图 2 1984—2017 年研究区域优势植物春季返青期变化趋势

Fig.2 Variation trends of the regreening date of dominant plant species in the study area from 1984 to 2017

(6.26 mm/10a),但春季累计降水量平均仅为 37.4 mm,远低于 60 mm 的阈值。冷蒿返青期观测对应的 34 年中,有 85.3%的年份春季降水量低于 60 mm,仅 1992、1997、1998、2010、2015 年高于 60 mm,这 5 年冷蒿返青日期分别为 DOY 92, DOY 84,DOY 92,DOY 100,DOY 115,较相邻年份提前 5—13 d。由此可见,温性典型草原春季降水的微弱增加不足以逆转剧烈升温带来的水分亏缺,冷蒿返青期表现为极显著延迟趋势;只有当春季降水明显增多,冷蒿返青期才可能随降水量的增多由延迟转变为提前的趋势。

表 1 温性典型草原冷蒿返青日期与春季气温和降水的关系

Table 1 Relationship between the regreening date and temperature as well as precipitation in spring for *Artemisia frigidawilld* of temperate typical grassland

| 气象因子 Meteorological factors | 月份 Month | 拟合方程 Fitting equation | <i>r</i> |
|--------------------------------|-------------|---------------------------------|----------|
| 气温 Temperature | 3 | $y = -1.508x + 108.9$ | -0.219 |
| | 4 | $y = -5.630x + 102.5$ | -0.630 |
| | 5 | $y = 3.187x + 58.43$ | 0.285 |
| | 3—5 | $y = 3.617x + 82.88$ | 0.268 |
| 降水量 Precipitation | 3 | $y = -0.162x + 102.1$ | -0.548 |
| | 4 | $y = -0.054x + 101.7$ | -0.316 |
| | 5 | $y = -0.054x + 99.81$ | -0.837 |
| | 3—5 | $y = -0.01x^2 + 0.969x + 84.44$ | 0.257 |

拟合样本量为 34

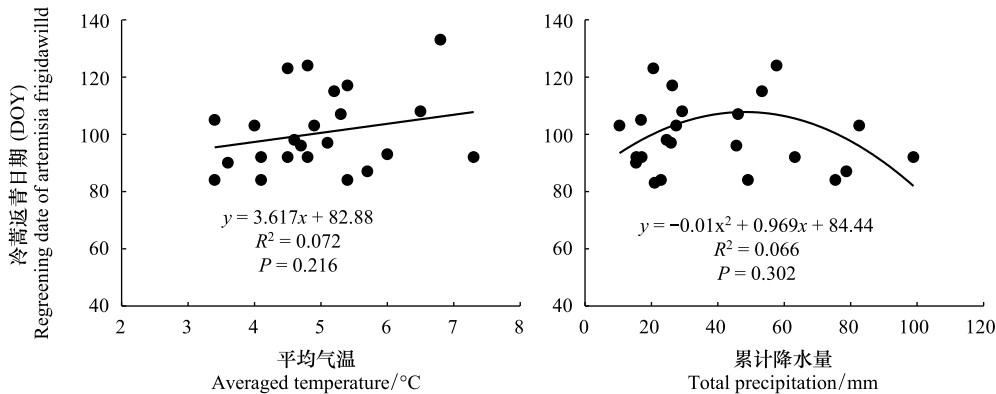


图 3 温性典型草原冷蒿返青日期与春季气温和降水的关系

Fig.3 Relationship between the regreening date and temperature as well as precipitation in spring for *Artemisia frigidawilld* of temperate typical grassland

2.3.2 温性草原化荒漠猫头刺

如表 2 所示,猫头刺返青期与 3、4、5 月平均气温表现为一致性负相关关系,相关系数依次为-0.730、-0.252和-0.096,其中与 3 月平均气温达到极显著相关水平,说明春季升温利于猫头刺提前返青,尤其是 3 月份气温升高对猫头刺返青期提前的影响最为明显。总体来看,猫头刺返青期与春季气温线性负相关,相关系数为-0.671;3—5 月平均气温每升高 1℃,牧草返青期提前 5.56 d ($P < 0.01$) (图 4)。近 40 年来温性荒漠草原区春季升温趋势明显,平均每 10 a 升高 0.67℃。受春季显著升温影响,1984—2017 年猫头刺返青期呈极显著提前趋势。

猫头刺返青期与 3、4、5 月降水量也表现为负相关关系,相关系数依次为-0.170、-0.356、-0.334,但相关性较温度类因子偏弱,未通过显著性检验。比较而言,4—5 月猫头刺进入返青后期的降水情况对其返青早晚的影响较大。春季降水增多利于猫头刺提前返青,但二者并未线性相关,而是表现为开口向上的二次函数关

系,相关系数为 0.458,且通过 0.05 的显著性水平检验(图 4)。当春季累计降水量小于 40 mm 时,猫头刺返青期随降水量的增多呈提前趋势;当春季累计降水量超过 40 mm 时,猫头刺返青期对降水的响应程度逐渐降低,随降水量的变化也逐渐平缓。尽管近 40 年来温性荒漠草原区春季降水量呈微弱增加趋势(4.59 mm/10a),但春季降水量平均仅为 26.9 mm,未达到 40 mm 的阈值。猫头刺物候期观测对应的 34 年中,有 81.5% 的年份春季降水量不足 40 mm,猫头刺返青期与春季降水量表现为负相关关系,这与已有的观测结果一致。1991、1998、2002、2010、2016 年春季降水量达到或超过 40 mm,对应的返青日期分别为 DOY 96, DOY 87, DOY 81, DOY 77, DOY 80, 但这 5 年猫头刺返青期并未显著提前。由此可以推断,春季降水增多利于猫头刺返青,但当降水量达到一定量值后,猫头刺返青对降水的响应程度趋于减弱。

表 2 温性草原化荒漠猫头刺返青期与春季气温和降水的关系

Table 2 Relationship between the regreening date and temperature as well as precipitation in spring for *Oxytropis aciphylla* of temperate steppe desert

| 气象因子 Meteorological factors | 月份 Month | 拟合方程 Fitting equation | <i>r</i> |
|--------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------|
| 气温 Temperature | 3 | $y = -3.294x + 98.96$ | -0.730 *** |
| | 4 | $y = -1.210x + 101.4$ | -0.252 |
| | 5 | $y = -0.483x + 96.18$ | -0.096 |
| | 3—5 | $y = -5.563x + 148.01$ | -0.671 *** |
| 降水量 Precipitation | 3 | $y = -0.494x + 88.99$ | -0.170 |
| | 4 | $y = -0.634x + 91.27$ | -0.356 |
| | 5 | $y = -0.251x + 91.83$ | -0.334 |
| | 3—5 | $y = 0.0097x^2 - 0.807x + 101.89$ | 0.458 * |

拟合样本量为 34; *** 表示显著水平为 $P < 0.001$, ** 表示显著水平为 $P < 0.01$, * 表示显著水平为 $P < 0.05$

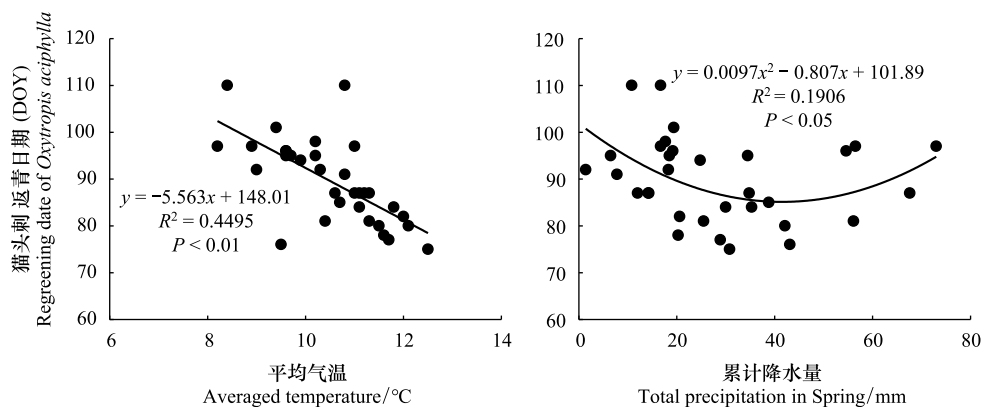


图 4 温性草原化荒漠区猫头刺返青日期与春季气温及降水的关系

Fig.4 Relationship between the regreening date and temperature as well as precipitation in spring for *Oxytropis aciphylla* of temperate steppe desert

3 讨论

本研究中 1984—2017 年温性典型草原冷蒿返青期呈极显著延迟的趋势(1.32d/a),温性草原化荒漠猫头刺却表现为极显著提前趋势(0.63 d/a),这与已发表的研究结论基本一致。高亚敏^[29]认为气候变化导致内蒙古通辽地区山地灌丛草甸草原羊草、冰草、委陵菜、车前等植物返青期呈一致性延迟趋势,平均每 10 a 延迟 1.16—7.60 d。师桂花等^[15]也发现气候变暖导致内蒙古锡林浩特温性典型草原糙隐子草返青期以 3.22d/10a 的速度显著延迟。李夏子等^[30]研究了内蒙古荒漠化草原优势植物春季物候期,发现霸王、狭叶锦鸡儿等植物

返青期随气候变暖均呈提早趋势,变化幅度为每年 0.1—0.6d。但也有部分学者研究得出相反的结论,陈效速和李惊^[19]基于内蒙古草原 7 个牧业气象试验站羊草物候观测数据,认为羊草返青期变化趋势以显著提前为主。全球气候变暖背景下,不同地区优势植物返青期的变化趋势差异巨大,随植物物种、地理分布区域等存在明显的区域差异,甚至表现出截然相反的变化趋势,这表明不同地区植物物候期对气候变化的内在响应机制是不同的。

大多数观点认为,温度是植物物候变化的主要影响因子^[31-33],返青前气温越高,草本植物返青越早。Chmielewski 和 Rötzer^[4]观测发现 2 至 4 月早春平均气温每升高 1℃,欧洲树木萌芽生长的日期提前约 7 d。本研究中,冷蒿返青期与 3、4 月平均气温有一定的负相关关系,但与春季气温整体正相关;3—5 月平均气温每升高 1℃,牧草返青期推迟 3.62 d,这与“春季升温利于植被返青”的观点是不一致的。原因可能是,温度对植物物候的影响是非线性的^[23],当水分成为胁迫因子时,水分条件对植物物候的影响将显得十分重要。张峰等^[16]认为,1985—2002 年内蒙古克氏针茅草原气候暖干化趋势明显,主要植物物候变化特征是返青期推迟、其他物候期提前。有研究表明,青藏高原气候变暖加剧蒸发,同时降水减少,导致西藏半干旱草甸草原植物返青期推迟^[20]。1985—2003 年内蒙古典型草原区物候期观测资料显示,返青前期土壤水分亏缺是羊草和克氏针茅返青期显著延迟的主要原因^[34]。近 40 年来温性典型草原春季气温呈明显上升趋势,气候暖干化特征明显,春季降水微弱增加不足以逆转剧烈升温带来的水分亏缺,水分成为制约冷蒿返青期早晚的决定性因素。蒋菊芳等^[35]研究发现,腾格里沙漠边缘荒漠草本植物刺蓬(*Cornulaca alaschanica*)春季物候与气温显著正相关,温度越高、物候期越迟,水分条件适宜时刺蓬的春季物候才会出现。因此,温性典型草原春季水分亏缺是冷蒿返青期极显著延迟的主要原因。春季累计降水量不足 60 mm 时,冷蒿返青期随降水量的增加依然呈延迟趋势;只有当春季累计降水量超过 60 mm 时,冷蒿返青期才有可能随降水量的增多转变为提前的趋势。这也反映出冷蒿返青期的变化对降水的响应存在一定的滞后性。

本研究中,温性草原化荒漠猫头刺返青期与春季气温显著负相关,尤其是 3 月平均气温对猫头刺返青早晚的影响达到极显著水平。受春季升温影响,猫头刺返青期明显提前。有研究发现,春季气温每升高 1℃,内蒙古荒漠化草原优势植物霸王、狭叶锦鸡儿等植物返青期提前幅度约 2.10—4.40 d。温度对腾格里沙漠边缘荒漠植物梭梭林(*Haloxylon ammodendron*)的影响显著,春季回暖越早、气温越高,梭梭林萌芽、展叶越早^[35]。春季降水增多利于猫头刺提前返青,但二者并未线性相关;当春季降水量超过 40 mm 时,猫头刺返青期对降水的响应程度逐渐降低,这可能与荒漠植物本身的生理特性有关。有研究表明,尽管不同降水条件下荒漠植物油蒿和白刺的水分利用策略存在差异,但随着年降水量的增加,两种植物的水分利用效率都逐渐降低^[36]。闫建成等^[37]分析了 5、20、70、150mm 4 个降水梯度下荒漠植物物候及其形态等对降水变化的响应,发现 70 mm 降水量时资源分配达到最佳化。也就是说,尽管荒漠植物具备适应极端干旱生境的特殊生态功能与生理机制,当外界降水量能满足植物生长需求后,植物对降水的响应程度趋于减弱。

长期以来,气候与植物物候关系的研究多基于线性模型,但植物物候与气候因素之间并不一定满足线性假设,植被物候对气候变化的响应可能是非线性的。郑景云等^[23]研究了气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响,发现物候期的提前与推迟对温度的上升与下降的响应是非线性的。线性模型对气候变量所在时间段的取值范围十分敏感,如果数据具有非线性特征,不同时间段取值范围得到的分析结果就不一样^[38]。因此,将线性模型用于植物物候与气候因素关系研究时存在一定的局限性。本研究尝试用一元二次函数分析了温性典型草原冷蒿和温性草原化荒漠猫头刺返青期与春季降水量的关系,并围绕不同草地类型优势植物物候对气候变化的内在响应机理给出了解释,有助于更好地理解不同草地类型优势植物物候特征对气候变化的过程响应机理。

4 结论

(1) 气候变暖背景下,温性典型草原冷蒿返青期呈极显著延迟趋势(1.32 d/a)。冷蒿返青期主要受水分

控制,与春季降水量表现为开口向下的二次函数关系,气候暖干化导致的水分亏缺是冷蒿返青期延迟的主要原因。当春季累计降水量大于 60mm 时,冷蒿返青期有可能随降水量的增多转变为提前的趋势。

(2)温性荒漠草原猫头刺春季返青早晚主要受热量控制。受春季显著升温影响,猫头刺返青期呈极显著提前趋势(0.63 d/a)。春季降水增多利于猫头刺提早返青,二者表现为开口向上的二次函数关系;春季降水量超过 40mm 时,猫头刺返青期对降水的响应程度逐渐降低,这可能与荒漠植物本身的生理特性有关。

参考文献 (References):

- [1] Visser M E, Caro S P, van Oers K, Schaper S V, Helm B. Phenology, seasonal timing and circannual rhythms: towards a unified framework. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1555): 3113-3127.
- [2] White M A, De Beurs K M, Didan K, Inouye D W, Richardson A D, Jensen O P, O'keefe J, Zhang G, Nemani R R, Van Leeuwen W J D, Brown J F, de Wit A, Schaepman M, Lin X M, DETTINGER M, Bailey A S, Kimball J, Schwartz M D, Baldocchi D D, Lee J T, Lauenroth W K. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2335-2359.
- [3] 方修琦,余卫红. 物候对全球变暖响应的研究综述. *地球科学进展*, 2002, 17(5): 714-719.
- [4] Chmielewski F M, Rötzer T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101-112.
- [5] 黄文洁,曾桐瑶,黄晓东. 青藏高原高寒草地植被物候时空变化特征. *草业科学*, 2019, 36(4): 1032-1043.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, Viovy N, Demarty J. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3): GB3018.
- [9] Badeck F W, Bondeau A, Bottcher K, Doktor D, Lucht W, Schaber J, Sitch S. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, 2004, 162(2): 295-309.
- [10] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 229-233.
- [11] Ni J. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China. *Climatic Change*, 2004, 67(2/3): 237-246.
- [12] 郭连云,赵年武,田辉春. 气候变暖对三江源区高寒草地牧草生育期的影响. *草业科学*, 2011, 28(4): 618-625.
- [13] 雷占兰,周华坤,刘泽华,徐维新,魁武,李发录. 气候变化对高寒草甸垂穗披碱草生育期和产量的影响. *中国草地学报*, 2012, 34(5): 10-18.
- [14] 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.
- [15] 师桂花,季晓丽,陈素华. 气候变化对典型草原糙隐子草物候期和产量的影响. *中国草地学报*, 2017, 39(1): 42-49.
- [16] 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.
- [17] Clark J S, Melillo J, Mohan J, Salk C. The seasonal timing of warming that controls onset of the growing season. *Global Change Biology*, 2014, 20(4): 1136-1145.
- [18] Lucht W, Prentice I C, Myneni R B, Sitch S, Friedlingstein P, Cramer W, Bousquet P, Buermann W, Smith B. Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 2002, 296(5573): 1687-1689.
- [19] 陈效速,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.
- [20] 赵广帅,石培礼,宗宁,何永涛,张宪州,何洪林,张晶. 降水减少加剧气候变暖对西藏半干旱草甸草原物候变化的效应. *资源与生态学*报: 英文版, 2017, 8(1): 50-56.
- [21] 张钜仁,颜晓东,张峰,李朝生,董章杭,柴秀梅,李自珍. 气候变化对青海天然牧草影响研究. *高原气象*, 2007, 24(4): 724-731.
- [22] 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.
- [23] 郑景云,葛全胜,赵会霞. 近 40 年中国植物物候对气候变化的响应研究. *中国农业气象*, 2003, 24(1): 28-32.
- [24] 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(7): 1118-1130.
- [25] 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.
- [26] 陈效速,庞程,徐琳,李静,张晴华,尉杨平. 中国温带旱柳物候期对气候变化的时空响应. *生态学报*, 2015, 35(11): 3625-3635.

- [27] 段淳清. 内蒙古草地资源现状及其可持续利用对策. 内蒙古草业, 2006, 18(3): 21-25.
- [28] 国家气象局. 农业气象观测规范. 北京: 气象出版社, 1993: 133-180.
- [29] 高亚敏. 气候变化对通辽草甸草原草本植物物候期的影响. 草业科学, 2018, 35(2): 423-433.
- [30] 李夏子, 郭春燕, 韩国栋. 气候变化对内蒙古荒漠化草原优势植物物候的影响. 生态环境学报, 2013, 22(1): 50-57.
- [31] 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 余卫东. 植物物候与气候研究进展. 生态学报, 2010, 30(2): 447-454.
- [32] 翟佳, 袁凤辉, 吴家兵. 植物物候变化研究进展. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3237-3243.
- [33] 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.
- [34] 袁文平. 典型草原物候特征及其对生态系统功能的影响研究[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2007.
- [35] 蒋菊芳, 梁从虎, 杨华, 张宇林, 丁文魁, 杨永龙. 近十年气温和降水对荒漠植物梭梭、刺蓬物候期的影响. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 141-146.
- [36] 周雅聃, 陈世革, 宋维民, 卢琦, 林光辉. 不同降水条件下两种荒漠植物的水分利用策略. 植物生态学报, 2011, 35(8): 789-800.
- [37] 闫建成, 梁存柱, 付晓玥, 王炜, 王立新, 贾成朕. 草原与荒漠一年生植物性状对降水变化的响应. 草业学报, 2013, 22(1): 68-76.
- [38] 周彤, 曹入尹, 王少鹏, 陈晋, 唐艳鸿. 中国草地和欧洲木本植物返青期对气温和降水变化的响应: 基于生存分析的研究. 植物生态学报, 2018, 42(5): 526-538.