

民勤荒漠区植物物候对气候变暖的响应

常兆丰^{1,2,3,*}, 邱国玉⁴, 赵 明^{1,2,3}, 杨自辉^{1,2,3}, 韩富贵^{1,2,3}, 仲生年^{1,2,3},
李爱德^{1,2,3}, 刘淑娟^{1,2,3}

(1. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 民勤 733300; 2. 甘肃省荒漠化防治重点实验室, 兰州 730070;
3. 甘肃省治沙研究所, 兰州 730070; 4. 北京师范大学资源学院, 北京 100857)

摘要:近几十年来,全球气候普遍变暖。那么,荒漠地区的气候是不是响应了全球气候的这种变化?在全球气候变化过程中,荒漠区植物物候又是如何响应这种气候变化的呢?显然,研究荒漠地区植物物候对气候变化的响应对于深入研究荒漠植物物候与气候因子的关系以及荒漠地区的植物保护都具有重要意义。运用位于中国西北典型荒漠地区的民勤沙生植物园 1974 ~ 2007 年 42 种中生、旱生植物的物候观测资料进行分析。结果表明:研究区 1974 年以来气温抬升幅度大于其他文献的研究报道,春季物候期提前幅度明显大于其他国家文献报道;在气温变暖的过程中,不同月份的气温变化与年平均气温的变化趋势并不完全对应,物候期发生当月的平均气温对该物候期的影响 > 物候期发生上月平均气温 > 年平均气温;研究区位于中国典型荒漠化地区,属于干旱荒漠气候,春季气温升高较其他地区更加明显,这就是当地春季物候期提前幅度相对较大的原因所在,也是当地以及中国西北沙区近几十年来沙尘暴天气增多和沙尘暴发生日期提前的原因。植物物候变化既是植物对气候变化的综合反应过程,又是植物适应气候变化的过程,尤其是荒漠植物。因此,物候研究将会成为今后气候学和植物生态学研究的一个重要内容。

关键词:典型荒漠化地区;植物物候;气候变暖;响应;民勤

文章编号:1000-0933(2009)10-5195-12 中图分类号:Q142, Q948 文献标识码:A

Responses of plant phenology to climate warming in Minqin desert area

CHANG Zhao-Feng^{1,2,3,*}, QIN Guo-Yu⁴, ZHAO Ming^{1,2,3}, YANG Zi-Hui^{1,2,3}, HAN Fu-Gui^{1,2,3}, ZHONG Sheng-Nian^{1,2,3}, LI Ai-De^{1,2,3}, LIU Shu-Juan^{1,2,3}

1 Minqin National Station for Desert Steppe Ecosystem Studies, Minqin 737300, China

2 Gansu Key Laboratory of Desertification Combating, Lanzhou 730070, China

3 Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China,

4 College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5195 ~ 5206.

Abstract: Recently responses of plant phenology to climate warming have become a hot topic both in the plant phenology and the climate change studies. However, reports of desert plant to climate warming based on a long-term observation are quite few. In this study, a 34-years observation was carried out to reveal the responses of phenology of 42 desert plant species (including mesophyte and xerophyte) to climate changes in Minqin, a typical desert area in the Northwest China. Results showed that spring phenophases were significantly greater than reported by others. In the process of climate warming, change of monthly average temperature in different months and change of annual mean temperature was not corresponding entirely. The influence on phenophase by monthly average temperature in the phenophase month was more obviously than that in the last month, and annual mean temperature influenced phenophase the least. The study area locates in China typical desertification areas and has an arid desert climate; air temperature rising in spring is faster than other

基金项目:国家 863 资助项目(JY03-B-28-2)

收稿日期:2008-07-09; 修订日期:2009-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: czf123@sina.com

regions. This is the reason of advanced spring phenophase in local area; it is also the reason that it has more sandstorms and the in-advance date of sandstorms over the past several decades in this area as well as China's northwest sand area.

Key Words: typical desertification area; plant phenology; climate warming; response; Minqin

植物的物候不仅是植物自身的生理现象,而且也是对外部生境、气候、水文条件的综合反应。因此,物候学自诞生以来一直是生态学和气候学研究的重要内容和重要方法之一^[1,2]。

近些年来,随着全球气温的变暖,植物物候对气候变化的响应已成为物候学研究的一个热点问题。欧洲的研究报道称,自 20 世纪 80 年代以后,由于气候增暖,欧洲的许多物候现象发生了明显变化,春季物候期提前,秋季物候期推迟,植物的生长季节得到了延长,甚至英国的鸟类产蛋期也提前了^[3~5]。

在地中海地区的生态系统中,现在大多数落叶植物叶子的生长比 50a 前平均提早了 16d,而落叶时间推迟了 13d。据报道,从北欧斯堪的纳维亚到欧洲东南部的马其顿地区,白杨展叶期比 30a 前提前了 6d,而秋季叶变色期推迟了 5d^[6]。欧洲地区生物春季物候在 1969~1998 年间提早了 8d^[7],北美在 1959~1993 年间提早了 6d^[8]。欧洲地区早春气温每升高 1℃,植物生长季提早约 7d,年均温升高 1℃,生长季长度延长 5d^[9,10]。对欧洲国际植物园收集的 1959~1996 年间的资料分析表明,春季物候期提前了 6.3d,秋季物候期推迟了 4.5d^[11],这与北纬 45~70°地区 1982~1990 年间归一化植被指数(NDVI)所显示的结果也基本一致^[12]。最近的 NDVI 资料表明,过去 20a 内,欧亚地区植物生长季长度延长了 18d 左右、北美延长了 12d^[13]。Rötzer 等人依据 1951~1995 年间中欧 10 个地区的 4 个春季物候期的观测,得出植物生长季有每 10a 提前 1.3~4.0d 的趋势^[14]。Menzel 对 1959~1996 年间的同样资料分析表明,一些植物种呈现出春季物候期平均每 10a 提前 2.1d 和秋季物候期每 10a 平均推迟 1.6d,而整个生长季延长 3.6 d/10a 的线性趋势^[11]。关于气候与生长季变化间的关系的研究以欧洲居多,但所得结论基本一致。

然而,上述的研究对象均属于中生植物,以荒漠区为背景研究旱生以及沙生植物物候的并不多见。朴世龙、方精云等基于 NDVI 预测中国温带森林年均气温每升高 1℃,春季植物生长季将提前 7.5d,秋季叶变色期将推迟 3.8d^[15]。在全球气候变暖的情况下,生长在干旱荒漠中的植物是如何响应气温变化的呢?不同的生态型和不同的生活型对气温变化的响应如何?这就是本文试图回答的问题。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

观测区民勤沙生植物园位于中国西北部腾格里沙漠西缘。观测区地理位置为 102°59'E,38°34'N,平均海拔 1378 m。当地年平均气温 7.76℃,年平均降水量 116.36mm,蒸发量 2383.7 mm,干燥度 5.85,年平均风速 2.4 m·s⁻¹,年平均≥17 m·s⁻¹的大风日数 27.4 d,属于典型干旱荒漠气候。当地在汉代以前曾有广阔的水域,汉代以来出现沙漠化,生态环境逐渐退化,现为连绵起伏的沙丘,地下水位深 16~20m,天然分布的植物以沙旱生的灌木、小灌木和草本植物为主,一般盖度在 15% 以下。

1.2 材料

民勤沙生植物园自 1974 被中国科学院地理研究所列为中国国家物候观测网点之一,多年累计观测植物 108 种,其中乔木 20 种,灌木 68 种,草本 40 种。乔、灌木和草本植物分别观测 15 个物候期。一方面,有些植物属于后来增加的,另一方面,有的物种后来消失了。本文选择观测时间较长的 42 个种(表 1)作为分析对象。其中,乔木和小乔木 18 个种,灌木和半灌木 18 种,草本植物 6 个种,运用 1974~2007 年的观测资料进行分析。其中,观测资料时间最短的也在 10a 以上,如长穗怪柳(*Tamarix elongata*)和短穗怪柳(*Tamarix laxa*)均为 14a,文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*)仅为 10a。

1.3 方法

(1) 本文对气温及物候期的变化趋势用一元线性趋势线方程表示,即:

$$y = kx + b$$

(1)

式中, y 为趋势线方程, k 为趋势线的斜率, x 为年($x = 1, 2, \cdots, 34$)。

表 1 灌木 Shrub 民勤沙生植物园物候观测主要植物种类

Table 1 Main plants observed on phenology in Minqin Botanical Garden

科名 Family	类型 Type	序号 No.	植物名* Plants	观测年份 Number of year for observation
杨柳科 Salicaceae	乔木 Arbor	1	新疆杨 <i>Populus alba</i> var. <i>pyramidalis</i>	1974 ~ 2007
		2	二白杨 <i>Populus gansuensis</i>	1974 ~ 2007
		3	胡杨 <i>Populus euphratica</i>	1974 ~ 2007
		4	旱柳 <i>Salix matsudana</i>	1975 ~ 2007
		5	馒头柳 <i>S. matsudana</i> var. <i>matsudana</i>	1990 ~ 2007
	灌木 Sshrub	6	西沙柳 <i>Salix psammophila</i>	1978 ~ 1984, 1990 ~ 2007
蔷薇科 Rosaceae	乔木 Arbor	7	杏 <i>Prunus armeniaca</i>	1975 ~ 1976, 1989 ~ 2007
榆科 Ulmaceae	乔木 Arbor	8	白榆 <i>Ulmus pumila</i>	1974 ~ 2007
豆科 Lleguminosae	乔木 Arbor	9	国槐 <i>Sophora japonica</i>	1983 ~ 2007
		10	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1975, 1983 ~ 1984, 1987 ~ 2007
		11	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	1978 ~ 2007
		12	沙冬青 <i>Ammopiptanthus mongolicus</i>	1983 ~ 2007
		13	荒漠锦鸡儿 <i>Caragana roborowskyi</i>	1990 ~ 2002, 2005 ~ 2007
	灌木 Shrub	14	柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i>	1974 ~ 2002, 2005 ~ 2006
		15	中间锦鸡儿 <i>Caragana intermedia</i>	1974 ~ 2007
		16	花棒 <i>Hedysarum scoparium</i>	1974 ~ 2007
		17	甜甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	1975 ~ 2007
		18	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	1983 ~ 2007
	草本 Herb	19	苦豆子 <i>Sophora lopecuroides</i>	1974 ~ 2007
		20	侧柏 <i>Platyclusus orientalis</i>	1990 ~ 2007
		21	桑树 <i>Morus alba</i>	1974 ~ 2007
		22	枣 <i>Ziziphus jujuba</i>	1979 ~ 2007
柏科 Upressaceae	乔木 Arbor	23	沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	1974 ~ 2007
桑科 Moraceae	乔木 Arbor	24	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	1978 ~ 2007
鼠李科 Rhamnaceae	乔木 Arbor	25	小叶白蜡 <i>Fraxinus bungeana</i>	1983 ~ 2007
胡颓子科 Elaeagnaceae	乔木 Arbor	26	连翘 <i>Forsythia suspense</i>	1978 ~ 2007
	小乔木 Small arbor	27	紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	1984 ~ 2007
	乔木 Arbor	28	白丁香 <i>Syringa oblata</i> var. <i>alba</i>	1984 ~ 2003
	灌木 Shrub	29	火炬树 <i>Rhus typhina</i>	1978 ~ 2007
漆树科 Anacardiaceae	灌或小乔 Shrub or small arbor	30	文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolia</i>	1978 ~ 1984, 2005 ~ 2007
无患子科 Sapindaceae	灌木 Shrub	31	多枝怪柳 <i>Tamarix ramosissima</i>	1974 ~ 2007
柽柳科 Tamaricaceae	灌木 Shrub	32	长穗怪柳 <i>Tamarix elongata</i>	1974 ~ 1984, 2005 ~ 2007
		33	短穗怪柳 <i>Tamarix laxa</i>	1974 ~ 1984, 2005 ~ 2007
		34	黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>	1975, 1983 ~ 2002
茄科 Solanaceae	灌木 Shrub	35	唐古特白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	1975, 1978 ~ 2007
蒺藜科 Zygophyllaceae	灌木 Shrub	36	沙蒿 <i>Artemisia arenaria</i>	1974 ~ 2007
菊科 Asteraceae	灌木 Shrub	37	油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	1990 ~ 2007
		38	梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	1974 ~ 2007
藜科 Chenopodiaceae	小乔木 Small arbor	39	牡丹 <i>Paeonia suffruticosa</i>	1983 ~ 2007
毛茛科 Ranunculaceae	灌木 Shrub	40	芍药 <i>Paeonia lactiflora</i>	1983 ~ 2007
	草本 Herb	41	芦苇 <i>Phragmites communis</i>	1975 ~ 2007
禾本科 Gramineae	草本 Herb	42	黄花矶松 <i>Limonium aureum</i>	1983 ~ 2007
白花丹科 lumbaginaceae	草本 Herb			

* 下同 the same below

(2) 聚类过程运用 SPSS 软件,用欧氏距离计算两个样本之间的距离,欧氏距离公式为:

$$d_{pq} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{pj} - x_{qj})^2} \quad (2)$$

式中, d_{pq} 为样本 p 和样本 q 之间的欧氏距离, x_{pj} 和 x_{qj} 为样本 p 和样本 q 第 j 物候的观测值, m 为物候数($m=1,2,\dots,9$)。

(3) 相关系数计算及其 T 检验公式:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^m x'_{ij} x'_{il}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x'^2_{ij} \sum_{i=1}^m x'^2_{il}}} \quad (3)$$

$$t_{jl} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\frac{1-r_{ij}^2}{m-2}}} \quad (4)$$

式中, r_{ij} 为样本 j 和样本 l 的样关系数, x'_{ij} 和 x'_{il} 为原始数据的离差标准标准化值, t 为 T 检验值, m 为样本数。

(4) 物候频数计算公式:

$$P_i = \sum_{j=1}^{42} p_j \quad (5)$$

式中, P_i 为第 i 候序的物候频数, $i=13,14,\dots,64$; j 为植物序号, $j=1,2,\dots,42$ 。

2 结果

2.1 气温变化趋势

1974~2007 年平均气温变化表现为明显的抬升趋势(图 1),年平均气温 1974~1980 年平均为 7.54℃,1981~1990 年平均为 7.44℃,1991~2000 年平均为 7.93℃,2001~2007 年平均为 8.20℃,2001~2007 年平均与 1974~1980 年平均增高了 0.66℃。按自然年代的月平均气温作图(图 2)。由图 2 可以看出,从 1974~1980 年到 2001~2007 年,除 8、9 月份和 12 月份略有降低外,其他各月的气温均有不同程度的增高,2、3、1、5、6、4、11 月份和 7 月份平均气温分别抬高了 2.26、1.71、0.94、0.87、0.80、0.77、0.69℃和 0.46℃。

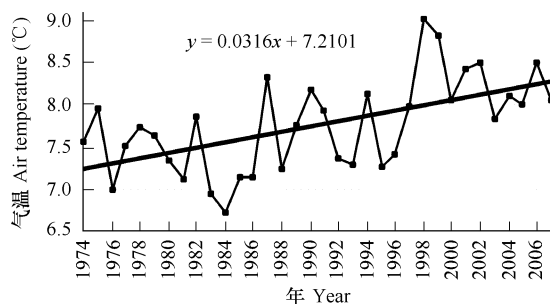


图 1 民勤 1974~2007 年年平均气温变化

Fig. 1 The change of annual mean temperature

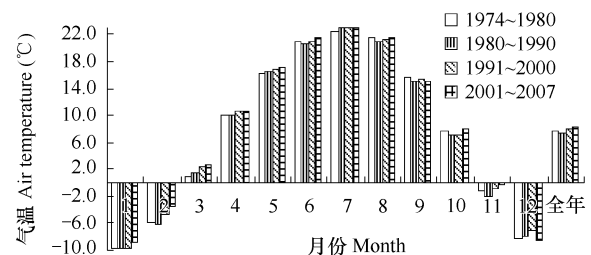


图 2 1974~2007 年月平均气温变化

Fig. 2 The change of monthly average temperature from 1974 to 2007

以自然年代分段进行方差检验,结果表明,从 1974~2007 年,3 月份、2 月份以及年平均气温的变化差异显著,6 月份平均气温的变化差异较显著(表 2)。由此可见,气温的抬升主要是由于春季,尤其是早春 2~3 月份气温抬升引起的。

2.2 物候变化趋势及敏感物候期

用(1)式分别求得了 42 种植物的 15 个物候期的多年变化的线性趋势线斜率(表 3)。表中负值即为物候期逐渐提前,正值即为物候期逐渐延迟。结果表明:从芽膨大到果实成熟的物候变化线性斜率一般为负值,而从叶初变色到落叶末期多为正斜率,即春季物候期普遍提前,而季节物候期相对推迟。

表 2 1974 ~ 2007 年气温变化趋势

Table 2 Air temperature changing trend from 1974 to 2007													
	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 March	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.	12 月 Dec.	全年 All year
趋势线斜率 The slope of trend line (℃·a ⁻¹)	0.0208	0.0838	0.0650	0.0370	0.0359	0.0271	0.0161	0.0009	-0.0028	0.0125	0.0426	0.0395	0.0316
2001 ~ 2007 年与 1974 ~ 1980 年相比 增加 Increasing (℃)	0.94	2.26	1.71	0.77	0.87	0.80	0.46	-0.06	-0.34	0.16	0.69	-0.24	0.67
Compared 2001 ~ 2007 with 1974 ~ 1980 均方比 Mean square ratio	0.578	3.306**	3.712**	1.016	1.067	2.625*	0.651	0.804	0.271	1.130	1.669	1.307	4.404**

** 显著 Remarkable, * 较显著 Quite remarkable

表 3 物候变化的线性趋势线斜率(d/a)

Table 3 Slope of linear trend line of phenological change (d/a)															
序号 No.	植物 Plants	芽初膨大 Beginning of expanding buds	芽开放期 Buds opening period,	展叶始期 The beginning extending leaves period	展叶盛期 The beginning flourishing leaves period	开花始期 Flowering period	开花盛期 Flourishing stage	开花末期 Late flowering	果实成熟 Fruit maturity	落果始期 The beginning fruit dropping period	落果末期 The end of fruit dropping	叶初变色 The beginning period of discoloration	叶全变色 The period of the whole leaf discoloration	落叶始期 The beginning period of falling	落叶末期 The end period of falling
1	新疆杨	-0.375	-0.381	-0.248	-0.163	-0.397	-0.283	-0.202	-0.195	0.225	-0.009	0.189	0.035	0.058	-0.023
2	二白杨	-0.377	-0.296	-0.117	-0.083	-0.293	-0.261	-0.223	0.282	0.193	0.097	0.025	-0.003	-0.017	-0.006
3	胡杨	-0.217	-0.223	-0.070	-0.086	-0.150	-0.025	-0.027	-0.337	-0.275	-0.144	-0.446	0.048	-0.514	-0.084
4	旱柳	-0.374	-0.346	-0.237	-0.203	-0.348	-0.094	-0.074	-0.173	-0.177	-0.069	0.312	0.373	0.282	0.222
5	馒头柳	-0.341	-0.304	-0.175	-0.366	-0.224	-0.318	-0.116	-0.121	—	—	0.308	-0.275	0.278	0.184
6	西北沙柳	-0.307	-0.363	-0.261	-0.209	-0.357	-0.188	-0.306	-0.176	-0.095	-0.039	0.365	0.256	0.217	-0.255
7	杏	-0.205	-0.355	-0.284	-0.279	-0.239	-0.329	-0.245	-0.207	-0.113	-0.107	-0.396	0.231	-0.134	0.032
8	白榆	-0.353	-0.318	-0.375	-0.240	-0.353	-0.238	-0.185	-0.020	0.012	0.014	-0.430	-0.377	-0.270	-0.291
9	国槐	-0.275	-0.009	-0.136	-0.171	-0.484	-0.090	-0.340	-0.330	—	—	0.512	0.530	0.431	0.180
10	刺槐	-0.337	-0.376	-0.322	-0.038	-0.214	-0.177	-0.153	-0.095	0.067	-0.219	0.397	-0.359	0.507	-0.233
11	紫穗槐	-0.298	-0.156	-0.188	-0.115	-0.158	-0.167	-0.061	-0.220	0.121	—	0.519	0.052	0.330	-0.124
12	沙冬青	-0.180	-0.173	-0.159	-0.101	-0.062	-0.225	-0.039	-0.006	0.260	0.259	-0.583	—	—	—
13	荒漠锦鸡儿	-0.258	-0.206	-0.191	-0.169	-0.161	-0.143	-0.116	-0.028	-0.427	-0.485	0.452	0.286	-0.156	0.353
14	宁条锦鸡儿	-0.261	-0.217	-0.146	-0.136	-0.150	-0.171	-0.169	-0.036	-0.131	-0.312	0.467	0.371	0.300	0.038
15	中间锦鸡儿	-0.257	-0.221	-0.222	-0.181	-0.203	-0.168	-0.097	0.013	0.126	0.208	0.193	-0.001	0.203	0.354
16	花棒	-0.178	-0.140	-0.101	0.085	-0.176	-0.683	0.085	-0.097	0.011	-0.104	0.359	0.286	0.298	0.351

续表

序号 No.	植物 Plants	芽初膨大 Beginning of expanding buds	芽开放期 Buds opening period,	展叶始期 The beginning extending leaves period	展叶盛期 The beginning flourishing leaves period	花蕾序现 Buds and inflorescence appearing	开花始期 Flowering period	开花盛期 Flowering stage	开花末期 Late flowering	果实成熟 Fruit maturity	落果始期 The beginning fruit dropping period	落果末期 The end of fruit dropping	叶初变色 The beginning period of discoloration	叶全变色 The period of the whole leaf discoloration	落叶始期 The beginning period of falling	落叶末期 The end period of falling
17	甜甘草	-0.128	-0.095	-0.132	-0.116	-0.124	-0.122	-0.078	-0.243	0.030	0.248	0.248	—	—	—	0.512
18	紫苜蓿	-0.347	-0.265	-0.214	-0.236	-0.258	-0.231	-0.197	0.015	-0.283	-0.083	0.115	-0.198	0.547	0.025	-0.076
19	苦豆子	-0.233	-0.212	-0.203	-0.095	-0.078	-0.226	-0.242	-0.013	-0.023	0.298	—	—	0.113	0.242	0.379
20	侧柏	-0.225	-0.251	-0.175	-0.131	-0.377	-0.042	-0.011	-0.153	-0.133	0.032	-0.571	—	—	—	—
21	桑树	-0.213	-0.197	-0.165	-0.044	-0.149	-0.111	-0.031	-0.077	-0.214	0.023	0.339	0.244	0.507	0.184	0.084
22	枣	-0.147	-0.113	-0.179	-0.134	-0.299	-0.248	-0.146	-0.117	-0.190	0.294	0.062	0.377	0.414	0.384	0.288
23	沙枣	-0.228	-0.162	-0.143	-0.084	-0.134	-0.158	0.153	0.119	-0.026	-0.015	-0.033	0.715	0.310	0.418	-0.151
24	沙棘	-0.241	-0.155	-0.116	0.076	-0.058	-0.129	-0.110	-0.306	-0.137	—	—	0.387	0.123	0.316	-0.405
25	小叶白蜡	-0.221	0.163	-0.307	-0.239	-0.157	-0.304	-0.007	0.006	-0.260	-0.101	—	-0.372	-0.054	-0.413	0.232
26	连翘	-0.376	-0.319	-0.103	-0.076	-0.195	-0.112	-0.026	-0.154	-0.064	—	—	0.410	0.203	-0.056	0.228
27	紫丁香	-0.377	-0.313	-0.184	-0.147	-0.291	-0.071	0.053	-0.021	-0.287	-0.286	—	0.433	-0.098	0.394	0.416
28	白丁香	-0.369	-0.345	-0.155	-0.206	-0.262	-0.157	-0.051	-0.097	-0.053	—	—	0.379	0.081	0.223	-0.082
29	火炬树	-0.062	-0.004	0.072	0.053	-0.247	0.091	-0.077	-0.012	0.103	—	—	0.221	0.180	-0.083	0.351
30	文冠果	-0.235	-0.149	-0.262	-0.207	-0.156	-0.230	0.030	0.012	-0.243	0.162	0.092	0.412	0.140	0.343	0.388
31	多枝怪柳	-0.146	-0.135	-0.092	0.014	-0.153	-0.246	-0.273	-0.171	-0.146	-0.190	-0.391	0.246	0.467	0.154	0.053
32	长穗怪柳	-0.140	-0.125	-0.108	-0.049	-0.171	-0.173	-0.142	0.013	-0.131	-0.292	-0.208	0.033	0.014	0.263	0.209
33	短穗怪柳	-0.145	-0.137	-0.074	-0.017	-0.133	-0.244	-0.203	-0.142	-0.147	-0.231	-0.271	0.378	0.533	0.309	0.442
34	黑果枸杞	-0.150	-0.112	-0.148	-0.135	-0.134	-0.025	-0.001	-0.017	-0.143	-0.039	0.005	0.034	-0.253	-0.203	0.165
35	唐古特白刺	-0.148	-0.135	-0.148	-0.134	-0.143	-0.190	0.027	-0.043	-0.029	0.052	-0.047	0.368	0.447	0.507	0.203
36	沙蒿	-0.168	-0.167	-0.119	-0.064	-0.114	-0.478	-0.245	-0.010	-0.301	0.109	—	-0.175	-0.098	-0.533	-0.267
37	油蒿	-0.160	-0.165	-0.071	-0.104	-0.106	-0.514	-0.166	-0.254	-0.334	—	—	0.271	0.267	0.239	-0.217
38	梭梭	-0.147	-0.116	-0.135	-0.139	-0.170	-0.086	-0.149	-0.054	-0.033	0.049	—	0.570	0.439	0.496	0.552
39	牡丹	-0.263	-0.158	-0.209	-0.068	-0.218	-0.317	0.141	-0.069	-0.111	-0.191	-0.309	0.321	-0.072	0.080	-0.140
40	芍药	-0.154	-0.135	-0.136	-0.119	-0.143	-0.178	-0.291	-0.135	-0.169	-0.243	-0.149	-0.154	0.004	-0.014	-0.035
41	芦苇	-0.068	-0.047	0.003	-0.110	-0.018	-0.026	0.039	0.095	0.194	0.226	—	0.394	0.209	0.200	0.133
42	黄花矶松	-0.227	-0.263	-0.293	-0.340	-0.179	-0.107	0.031	-0.385	-0.012	-0.064	-0.061	-0.141	0.214	0.193	0.054
	平均	-0.236	-0.195	-0.167	-0.126	-0.189	-0.198	-0.132	-0.107	-0.116	-0.013	-0.075	0.190	0.177	0.157	0.100

—: 缺测 Lacks the data

从 42 种植物的物候期统计结果看出,15 个物候期提前的敏感顺序依次是:芽初膨大期、开花始期、芽开放期、花蕾序出现、展叶始期、开花盛期、展叶盛期、果实成熟期和开花末期,而落果末和落果始期只有微小的提前;从叶变色开始物候期推后,物候期推后的敏感顺序是:叶初变色期、叶全变色期、落叶始期和落叶末期。

统计结果表明,这 42 种植物的物候期最早的从第 14 候(3 月 11 日)开始,最晚的到第 63 候(11 月 8 日)结束,共经历 51 候。由各物候期的平均发生日期看,从芽初膨大期到果实成熟一般发生在 3 月下旬到 7 月上旬,3 月中、下旬至 4 月份是物候最最敏感的季节;从叶全变色期开始到落叶末期一般发生在 9 月下旬至 10 月下旬,8 月上旬前后是物候期变化最不明显的季节。

3 分析

3.1 植物物候变化的类型特征

其一,因为果实成熟以后的部分物候期缺测。其二,因果实成熟期之后的一般为非关键物候期,从前面的分析可知,其变化的敏感程度较差。因此,本文以从芽初膨大期到果实成熟期(前 9 个)物候期按(2)式进行了聚类,第一大跳跃将 42 种植物聚为 2 类,第二大跳跃段将 42 种植物聚为 3 类,第三大跳跃段将 42 种植物聚为 11 类(表 4)。

表 4 聚类类群 9 个物候期变化情况
Table 4 Changes in 9 phenophases of every clustering groups

植物类群 Plant group	植物序号 No.	物候期平均变化斜率 The mean changing slope of phenophase($d \cdot a^{-1}$)								
		芽初膨大 Beginning of expanding buds	芽开放期 Buds opening period,	展叶始期 The beginning extending leaves period	展叶盛期 The beginning flourishing leaves period	花蕾序现 Buds and inflorescence appearing	开花始期 Flowering period	开花盛期 Flowering flourishing stage	开花末期 Late flowering	果实成熟 Fruit maturity
1	12, 13, 14, 15, 17, 19, 22, 24, 31, 32, 33,34,35,38,40,	-0.182	-0.152	-0.146	-0.096	-0.145	-0.169	-0.154	-0.110	-0.078
2	36,37	-0.164	-0.166	-0.095	-0.084	-0.110	-0.496	-0.206	-0.132	-0.318
3	4,10,20,26,27,28	-0.343	-0.325	-0.196	-0.134	-0.281	-0.114	-0.051	-0.109	-0.134
4	3,11,21,23,30,39	-0.293	-0.250	-0.184	-0.117	-0.221	-0.151	-0.017	-0.063	-0.163
5	9	-0.275	-0.009	-0.136	-0.171	-0.484	-0.281	-0.090	-0.340	-0.330
6	25	-0.221	0.163	-0.307	-0.239	-0.157	-0.304	-0.007	0.006	-0.260
7	1,5,6,7,8,18	-0.321	-0.331	-0.260	-0.249	-0.305	-0.303	-0.259	-0.173	-0.167
8	42	-0.227	-0.263	-0.293	-0.340	-0.179	-0.107	0.031	-0.385	-0.012
9	2	-0.377	-0.296	-0.117	-0.083	-0.293	-0.391	-0.261	-0.223	0.282
10	29,41	-0.065	-0.026	0.038	-0.029	-0.133	0.033	-0.019	0.042	0.149
11	16	-0.178	-0.140	-0.101	0.085	-0.176	-0.138	-0.683	0.085	-0.097

本文分析对象只涉及中生植物和旱生植物 2 种生态型。这 11 个类群较为符合植物的类型特征,聚类结果为:类群 1、2、6 以旱生灌木为主,在类群 1 的 15 个植物中,包括有 11 个为旱生灌木,2 个中生草本植物(19、40 号)、1 个中生小乔林(38 号)和 1 个中生乔木(22 号);其他类群为中生植物。

3.1.1 植物生态型的物候差异

由表 4 可以看出,中生植物物候提前较早生植物明显,尤其是芽初膨大期、花蕾花序期、芽开放期和展叶始期。进一步按生态型统计物候变化情况(表 5),结果表明:①中生植物较早生植物物候期变化明显,即中生植物的物候提前幅度大于旱生植物,而延迟幅度小于旱生植物;②中生植物变化最为敏感的物候期依次是:芽膨大期、花蕾花序期、芽开放期、开花始期和展叶始期;③旱生植物变化最为敏感的物候期依次是:开花始期、芽膨大期、芽开放期、开花盛期以及展叶始期和展叶盛期,旱生植物的叶变化期延迟最为明显。

3.1.2 植物生活型的物候变化差异

依据植物的外貌特征一般把高等植物划分为乔木、灌木、藤本、草本等生活型,本文研究对象只包括乔木、

灌木和草本 3 种生活型。从乔、灌、草 3 种生活型(表 6)可以看出:①乔木植物的物候提前幅度大于灌木植物。其中,从芽膨大期到果实成熟,中生乔木的物候期提前幅度均大于旱生乔木,而从叶变色期开始及其以后旱生乔木物候推迟幅度均大于中生乔木。②除开花始期和开花盛期外,草本植物的物候提前幅度大于灌木植物。其中,旱生草本植物的芽膨大期、展叶期和花蕾花序期提前幅度大于中生草本植物。

3.2 物候提前的原因

3.2.1 物候期变化对气温变化的响应

由(3)式分别计算每种植物各物候期变化与月平均气温变化的相关系数,并用(4)式对其相关系数进行 T 检验(图 3)。由图 3 可见:①芽初膨大期、展叶始期、芽开放期、花蕾花序期、展叶盛期等物候与气温变化具有较多的显著正相关关系,亦即绝大多数植物的这些物候期随气温变暖而表现为提前趋势。②落果末期、叶

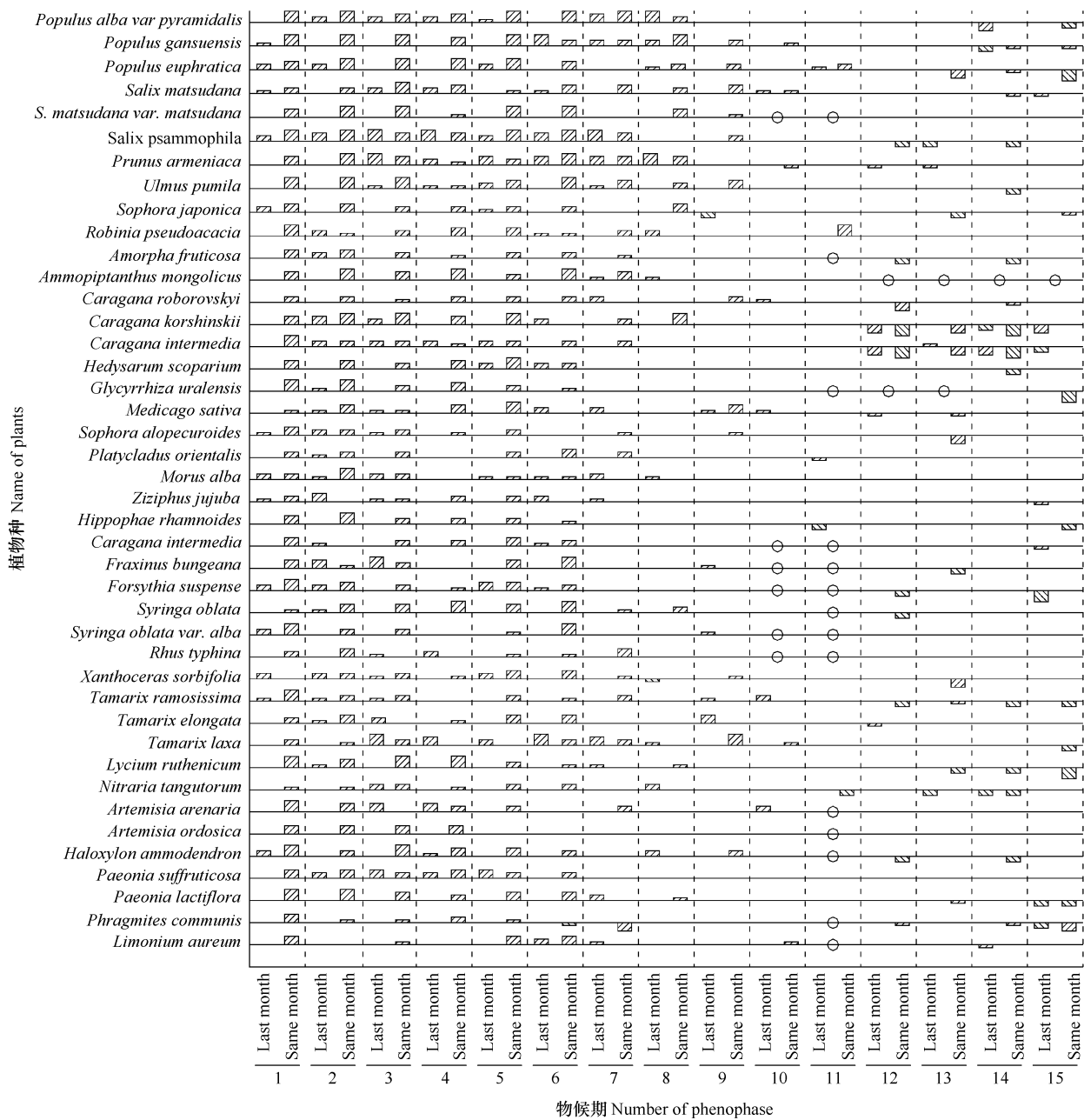


图 3 物候期与气温变化的相关系数的 T 检验

Fig. 3 T-test of correlation coefficients between Phenophase and temperature change

表 5 过去 34a 不同生态型植物的物候变动日数

Table 5 Days of phenology changes of plants in different ecotype in the past 34 years (d)														
芽初膨大 Beginning of expanding buds	芽开放期 Buds opening period	展叶始期 The beginning extending leaves period	展叶盛期 The beginning flourishing leaves period	花蕾序现 Buds and Inflorescence appearing	开花始期 Flowering period	开花盛期 Flowering stage	开花末期 Late flowering	果实成熟 Fruit maturity	落果始期 The beginning fruit dropping period	落果末期 The end of fruit dropping	叶初变色 The beginning period of discoloration	叶全变色 The period of the whole leaf discoloration	落叶始期 The beginning period of fallening	落叶末期 The end period of fallening
中生植物 Mesophytes	-9.0	-7.3	-6.2	-5.0	-8.1	-6.7	-4.0	-3.8	0.5	-1.4	5.6	3.8	3.8	3.1
旱生植物 Xerophytes	-6.5	-5.6	-4.8	-3.1	-4.8	-6.7	-5.2	-3.4	-1.9	-4.1	7.6	7.7	6.4	3.9

表中负值为提前日数,正值为延迟日数 negative value for ahead of time date number and just when for detention date number in table

表 6 过去 34a 不同生活型植物的物候变动日数

Table 6 Days of phenology changing of plants in different life form in the past 34 years (d)														
芽初膨大 Beginning of expanding buds	芽开放期 Buds opening period,	展叶始期 The beginning extending leaves period	展叶盛期 The beginning flourishing leaves period	花蕾序现 Buds and inflorescence appearing	开花始期 Flowering period	开花盛期 Flowering stage	开花末期 Late flowering	果实成熟 Fruit maturity	落果始期 The beginning fruit dropping period	落果末期 The end of fruit dropping	叶初变色 The beginning period of discoloration	叶全变色 The period of the whole leaf discoloration	落叶始期 The beginning period of fallening	落叶末期 The end period of fallening
乔木 Arbor	-8.8	-7.1	-6.6	-5.2	-8.8	-7.1	-4.3	-4.0	0.9	-1.5	6.7	4.6	4.7	2.5
灌木 Shrub	-7.5	-6.3	-4.7	-2.9	-5.4	-6.9	-5.1	-3.3	-3.6	-5.1	7.2	5.1	4.6	3.3
草本 Herb	-7.4	-6.3	-5.5	-5.0	-5.6	-5.6	-3.4	-3.2	1.2	-0.5	6.3	7.5	6.2	5.2

表中负值为提前日数,正值为延迟日数 negative value for ahead of time date number and just when for detention date number in table

全变色期、叶初变色期以及落果始期等物候与气温变化具有较多的显著负相关关系,亦即多数植物的这些物候期随气温变暖而延迟。③物候期发生当月的气温均较上月的气温对物候期影响明显。由此可见,当地物候期的变化主要是由于气温变暖所致,而且春季提前幅度较大的物候期一般就发生在气温变化幅度较大的当月或下月。

3.2.2 物候期变化对气温变化响应的阶段性

前述已知,1961~2007年气温总体上表现为上升趋势,但这个上升过程是有阶段性的,20世纪60~70年代气温表现为下降趋势,从80年代以来气温上升,1984年为明显的转折点,本世纪以来又出现下降趋势。月平均气温变化趋势与年平均气温的变化趋势并不完全对应(图4)。那么,是年平均气温对物候期的变化影响明显呢,还是物候期发生当月的平均气温或上月的平均气温对物候期变化影响更为明显呢?

由前面分析可见,芽初膨大期对气温变化最为敏感。在42种植物中,芽膨大期发生在3月份的有22种,发生在3月下旬至4月上旬的有19种,发生在4月下旬至5月上旬的只有1种。于是,以下按4个年代(1974~1980年、1981~1990年、1991~2000年和2001~2007年)进一步分析不同年代芽膨大期变化与物候期发生当月平均气温、上月平均气温和年平均气温的相关分析,相关分析的显著性检验结果(表7)表明。

(1)各年代植物物候期变化与气温均有不同程度的正相关关系,中生植物芽膨大期变化与气温的正关关系较早生植物的更为明显:在26种中生植物中,与1981~1990年气温较显著的10种,与1991~2000年气温较显著的14种,与2001~2007年气温较显著的12种;而在16种旱生植物中,与1981~1990年气温较显著的6种,与1991~2000年气温较显著的10种,与2001~2007年气温较显著的6种。

(2)芽膨大期当月气温较上月平均气温影响明显,年平均气温对芽膨大期的影响相对最不明显:如在中生植物中,与1974~1980年、1981~1990年、1991~2000年芽膨大期当月平均气温具有较显著正相关的分别为2、10、14种和12种,而与芽膨大期上月平均气温具有较显著正相关的分别为6、2、0种和4种,与同期年平均气温具有较显著正相关的只有1、5、3种和1种。

(3)如果按与物候期发生上月平均气温、当月平均气温和年平均气温具有较显著正相关及其以上关系的植物种统计并按年平均(4个年代分别为7、10、10a和7a),气温对中生植物芽膨大期的影响程度2001~2007年>1981~1990年和1991~2000年>1974~1980年,而气温对旱生植物芽膨大期的影响程度是1991~2000年>2001~2007年>1974~1980年>1981~1990年。

3.2.3 影响物候期变化的主要季节

用(5)式统计这42种植物15个物候从第14~64候各候发生的物候频数(图5)。结果表明:物候频数的分布存在2个明显的高峰期,第1高峰期在候序22~26之间,对应的日期为4月16日~5月10日,而这个日期段为多数植物的芽开放期、展叶始期、展叶盛期和花蕾花序出现期,由表2可知,2001~2007年与1974~

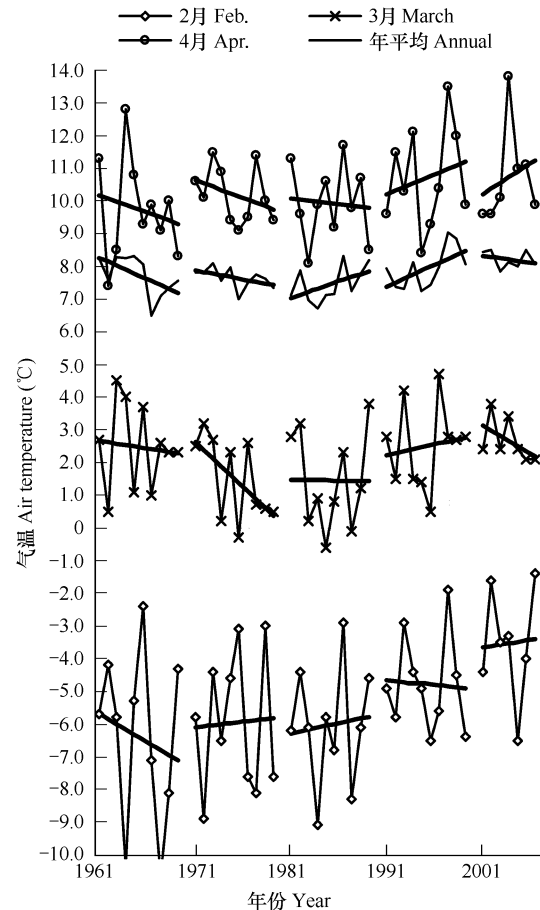


图4 1961~2007年各年代气温变化趋势

Fig. 4 Trend of temperature change from 1961 to 2007

1980 年 3、4、5 月份相比,平均气温分别增高了 1.71、0.77℃ 和 0.87℃,尤其是 2 月份增加了 2.26℃。由图 3 可见,绝大多数植物这些物候期的提前与当月或上月气温变暖具有显著或较显著正相关关系。在候序 22~26 两边物候逐渐减少。第 2 高峰出现在候序 56~61 之间,对应的日期为 10 月上旬~11 月上旬,这个日期段为植物的叶初变色、叶全变色和落叶始期,2001~2007 年与 1974~1980 年相比,10 月份气温增高了 0.16℃,11 月份气温增高了 0.69℃。由此可见春季气温变暖较秋季气温变暖对物候期影响更为明显。

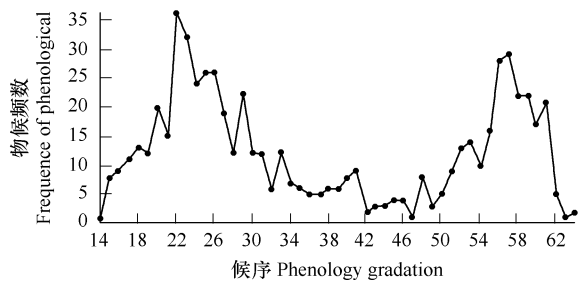


图 5 物候频数分布图
Table 5 Phenophase frequency distribution

表 7 芽初膨大期与不同年代气温变化较显著及其以上正相关植物种数

Table 7 Buds expanding period and more notable air temperatures changes of different year and more than positive correlation species								
不同年代的月平均气温和年平均气温(℃)								
Monthly average temperature and annual mean temperature in different period								
生活型 Life type	生态型 Ecotype							
		1974~1980 年			1981~1990 年			
		上月 Last month	当月 That month	年平均 Annual mean	上月 Last month	当月 That month	年平均 Annual mean	
芽膨大日期	中生	全部 total	6	2	1	2	10	5
The date of	Mesophytes	乔木 Arbor	5	2	0	1	4	3
bud expanding	(26 种)	灌木 Hrub	0	0	0	1	4	2
(d)		草本 Herb	1	0	1	0	2	0
	旱生	全部 Total	1	4	0	0	6	1
	xerophytes	乔木 arbor	0	0	0	0	1	1
	(16 种)	灌木 Shrub	1	4	0	0	5	0
		草本 Herb	0	0	0	0	0	0

不同年代的月平均气温和年平均气温(℃)								
Monthly average temperature and annual mean temperature in different period								
生活型 Life type	生态型 Ecotype							
		1991~2000 年			2001~2007 年			
		上月 Last month	当月 That month	年平均 Annual mean	上月 Last month	当月 That month	年平均 Annual mean	
芽膨大日期	中生	全部 Total	0	14	3	4	12	1
The date of	Mesophytes	乔木 Arbor	0	9	1	2	8	0
bud expanding	(26 种)	灌木 Hrub	0	4	0	0	2	1
(d)		草本 Herb	0	1	2	2	2	0
	旱生	全部 Total	0	10	2	1	6	0
	Xerophytes	乔木 Arbor	0	1	0	0	1	0
	(16 种)	灌木 Shrub	0	8	2	1	5	0
		草本 Herb	0	1	0	0	0	0

4 讨论

(1) 1974 年以来,当地气温呈显著抬升趋势,且抬升幅度大于其他文献报道的数值;同期降水量也表现出增加趋势。自 1974 年以来,当地中生植物(芽初膨大、牙开放期、始展叶期、展叶盛期、蕾或序现、开花始期和开花末期)平均提前了 9.0d,落叶末期平均推迟了 3d;旱生植物春季物候期平均提前了 6.5d,落叶末期平均推迟了 3.9d。与他人的研究比较,春季物候期提前幅度较大。而且,春节物候提前幅度乔木和灌木>草本植物,落叶末期平均推迟草本植物>灌木>乔木,这是其他的研究没有涉及到的问题。

(2) 分别 4 个年代的统计分析结果表明,各年代植物芽膨大期变化与气温变化均有不同程度的正相关关系,中生植物芽膨大期变化与气温的正关较旱生植物更为明显;对芽膨大期变化最明显的是芽膨大期发生当月的平均气温,其次是芽膨大期发生上月的平均气温,年平均气温与当月平均气温和上月平均气温比较,对芽

膨大期的影响相对最不明显。按年代分析当月平均气温和上月平均气温以及年平均气温对物候期变化的影响程度大小,这也是其他研究所未涉及到的。

(3) 春季物候期提前幅度较大的原因是:当地属于典型荒漠气候,春季气温升高较其他地区更加明显,这就是当地春季物候期提前幅度相对较大的原因所在,也是近几十年来中国西北地区沙尘暴天气增多和沙尘暴发生日期提前的原因。

(4) 当地气候变化的第二个明显标志是降水增加,但因降水量很小,尤其是有效降水更少($\geq 10\text{mm}$ 的降水量只有 43.20mm),所以,物候提前与降水量增加的关系并不明显。

References:

- [1] Zhu K Z, Wan M W. phenology. Science press, Beijing, 1980.
- [2] Wan M W, Liu X Z. The observation methods of phenology in China. Science press, Beijing, 1987.
- [3] Christiaan Both and Marcel E. Visser. Adjustment to climate change is constrained by arrival date in a long-distance migrant bird. *Nature*, 2001 (411): 296—298.
- [4] Crick H Q P, Dudley C, Glue D E and Thomson D L. UK birds are laying eggs earlier. *Nature*, 1997, 388: 526.
- [5] Annette Menzel and Peter Fabian. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397: 659.
- [6] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397(6721): 659.
- [7] Chmielewski F M, Rötzer T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101—112.
- [8] Schwartz M D, Reiter B E. Changes in North American spring. *Int. J. Climatol.*, 2000, 20: 929—932.
- [9] Frank M, Chmielewski, Thomas R. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101—112.
- [10] White M Z, Running S W, Thornton P E. The impact of growing season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. *Int. J. Biometeorol.*, 1999, 42(3): 139—145.
- [11] Menzel A. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *Int. J. Biometeorol.*, 2000, 44(2): 76—81.
- [12] Myneni R B. Increase plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386: 698.
- [13] Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R K. Variation in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(D17): 20069—20083.
- [14] Rötzer T, Wittenzeller M, Haechel H, *et al.* Phenology in central Europe—differences and trends for spring phenophases in urban and rural areas. *Int. J. Biometeorol.*, 2000, 44(2): 60—66.
- [15] Piao Shilong, Fang Jingyun, Zhou Liming, Philippe ciais. Variations in Satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global change Biology*, 2006, (12): 672—685.

参考文献:

- [1] 竺可桢,宛敏渭主编. 物候学. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 宛敏渭,刘秀珍主编. 中国物候观测方法. 北京: 科学出版社, 1987.