

北京春季的树木物候与气象 因子的统计学分析

张 福 春

(中国科学院地理研究所)

提 要

本文采用积分回归法对北京春季的树木开花期与它前期气象因子的关系作了统计学分析,指出前期气温是影响这些物候期的主要因素,其次是日照时数和降水。上年秋至开花前的气温高低对开花期的早迟都有影响,但不同时期其影响效果不一样,可分成三个时期:在日照时数和降水保持一定的情况下,上年秋或当年春的气温偏高时,可使开花期提前,冬季气温偏高则使开花期推迟,反之亦然。而三个时期中,春季气温又有决定作用。本文还指出,可以利用该模式进行物候预报。

物候现象是温度、降水、日照、土壤等多种环境因子影响以及植物本身生理生态特性的综合反映。其中每个环境因子的波动都可对物候期的早迟带来影响。如春季树木开花现象,一般说花芽在前一年夏末秋初就已经形成,经历了上年夏末的高温,冬季的严寒、休眠和春季的回暖,其影响较为复杂,目前国内对这一问题只作过些定性分析,而对其中一些现象的解释还有争论^[1]。本文打算从统计学角度对这问题作进一步的探讨,想通过分析回答以下问题:(1)影响北京春季树木开花的主要因子是什么?(2)同一气象要素在不同季节里对树木开花期的影响是否相同?(3)探讨用统计学方法作春季树木开花期预报的可能性。

物候期的早迟主要是由气候决定的,反之可由物候现象来反推气候。物候学在气候变迁研究、县级气候区划和山区气候调查等方面的应用,都是根据这一原理进行的。上述问题的回答,无疑的将为选择指示物候现象,估计气候异常对物候期的可能影响,以及解释物候现象的生态地理特征提供理论依据。

一、计 算 方 法

气象因子对物候期影响的分析,可采用多元分析法或积分回归法进行。Fritts 曾用多元分析法分析了前期气象要素对树木年轮宽度的影响,取得满意的结果^[2]; Fisher 采用积分回归法成功的分析了小麦产量与降水的关系^[3],我国也曾使用该法作过小麦的农业气象分析,都取得较好的结果^[4、5]。两种方法比较起来,后者的计算简单些,因此本文采用积分

回归法进行,并用电子计算机计算。

设北京春季树木开花日期为 Y , \hat{Y} 为 Y 的估计值, $X_i(t)$ 为编号为 i 的气象因子, $a_i(t)$ 为该气象因子 $X_i(t)$ 对树木开花期 Y 的影响系数, t 为时间, T 为树木花芽形成至开花日期的日数;于是有:

$$\hat{Y} = C + \sum_i \int_0^T a_i(t) X_i(t) dt \quad (1)$$

这里 C 为常数 $a_i(t) = \frac{\Delta Y}{\Delta X_i}$ 可理解为在 $t-t+\Delta t$ 时段, 该气象要素值变化一个单位, 对树木开花期的影响, $a_i(t)$ 可用正交多项式表示, 即:

$$a_i(t) = \sum_j b_{ij} \Phi_j \quad (i=1, 2, \dots; j=0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

式中 Φ_j 为正交多项式的第 j 次项, 有表可查, b_{ij} 为第 i 个气象要素的第 j 次项系数, 将(2)式代入(1)式有:

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= C + \sum_i \int_0^T \sum_j b_{ij} \cdot \Phi_j \cdot X_i(t) dt \\ &= C + \sum_i \sum_j b_{ij} \int_0^T \Phi_j \cdot X_i(t) dt \\ &= C + \sum_i \sum_j b_{ij} \cdot G_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $G_{ij} = \int_0^T \Phi_j \cdot X_i(t) dt$, 对于 G_{ij} 一般都用 $G_{ij} = \sum_i \Phi_j \cdot X_i$ 的形式计算, 下标 i 是气象要素的编号, j 为正交项式的项次编号。全部变量可分成两类: 若 $j=0$, 表示影响因子是花芽形成发育期内某气象要素 $X_i(t)$ 的累积值; $j \neq 0$, 表示其影响的时间分配方式。

考虑到要对几个气象要素, 如降水, 气温等进行联合处理, 而它们各自单位不同, 为此进行了标准化处理, 即取:

$$\begin{aligned} Y^* &= \frac{Y - \bar{Y}}{S_Y} \\ G_{ij}^* &= \frac{G_{ij} - \bar{G}_{ij}}{S_{G_{ij}}} \end{aligned} \quad (4)$$

不难得到:

$$\begin{aligned} \hat{Y}^* &= \sum_i \sum_j b_{ij}^* \cdot G_{ij}^* \\ b_{ij}^* &= b_{ij} \cdot S_Y / S_{G_{ij}} \end{aligned} \quad (5)$$

则可得到正规方程组:

$$\begin{cases} r_{10,10}b_{10}^* + r_{10,11}b_{11}^* + \dots + r_{10,i_1}b_{i_1}^* + \dots + r_{10,i_j}b_{i_j}^* + \dots = r_{10,y} \\ r_{11,10}b_{10}^* + r_{11,11}b_{11}^* + \dots + r_{11,i_1}b_{i_1}^* + \dots + r_{11,i_j}b_{i_j}^* + \dots = r_{11,y} \\ \dots \\ r_{i_1,10}b_{10}^* + r_{i_1,11}b_{11}^* + \dots + r_{i_1,i_1}b_{i_1}^* + \dots + r_{i_1,i_j}b_{i_j}^* + \dots = r_{i_1,y} \\ \dots \\ r_{i_j,10}b_{10}^* + r_{i_j,11}b_{11}^* + \dots + r_{i_j,i_1}b_{i_1}^* + \dots + r_{i_j,i_j}b_{i_j}^* + \dots = r_{i_j,y} \\ \dots \end{cases} \quad (6)$$

各式中带*号的参数代表标准化参数, \bar{G} 、 \bar{Y} 分别为 G 、 Y 的平均值, S_y 、 $S_{G_{i_j}}$ 分别为 Y 和 G_{i_j} 的标准差。

物候观测资料的年代不长, 为了提高精度, 把不同种的、日期相近的物候期看作同一条条件下的统计样本, 对于多种物候的大样本, 应满足:

$$R^{(h)} \cdot B^{*(h)} = C^{(h)} \quad (7)$$

这里 (h) 为种类标号, (7) 为 (6) 的另一种写法, 如 $R^{(h)}$ 为矩阵, 各矩阵元素即为 (6) 中各项的系数。

因为同一地点, 出现期相近的物候现象, 其年际间的变化是同步的, 每两者间的相关系数都较高。此外, 虽然每年间的气候有变化, 不同树种开花期间的间隔日数可稍有变化, 但它们的开花顺序一般是不变的, 因此可以认为对春季的一些开花现象有:

$$B^{*(1)} = B^{*(2)} = B^{*(3)} = \dots = B^{*(h)} = B^* \quad (8)$$

而 R 、 C 均可由实际观测资料求得。

本文采用逐步回归方法求系数 $b_{i_j}^*$, 其好处是: 1. 因子选入的先后、 F 值的大小和同一因子的正交多项式展开式项数选入的多少, 将大致反映出这些因子的相对重要性; 2. 最后的回归方程中, 只包含少数几个显著的变量, 而且它们是全部因子中最重要的因子; 3. 由

$a_i(t) = \sum_j b_{i_j} \Phi_j$ 将给出某气象因子对树木开花影响的季节变化信息。

最后可由

$$C^{(h)} = \bar{Y}^{(h)} - \sum_i \sum_j b_{i_j}^* S_{y^{(h)}} \cdot \bar{G}_{i_j}^{(h)} / S_{G_{i_j}}^{(h)} \quad (9)$$

$$b_{i_j}^{(h)} = b_{i_j}^* \cdot S_{y^{(h)}} / S_{G_{i_j}}^{(h)} \quad (10)$$

得到 $b_{i_j}^{(h)}$ 和常数 $C^{(h)}$ 。

二、资 料

物候资料：采用竺可桢同志1950—1972年亲自在北京北海公园所作的观测记录^[6]，并将日期换算为年顺序累积天数。因为山桃始花、杏树始花、紫丁香始花的日期相近，多年变化趋势一致，为了增加样本数量，因此把它们看成同一条件下的统计样本。

气象资料：用北京的旬平均气温、旬降水量、旬日照时数。考虑到这些植物的花芽已于上年形成，因此时段的选取是从上年的10月1日起，每旬为一时段，至当年3月底，总共18旬。

任一气象要素对树木开花期的影响，如用正交多项式表示，取少数几项就能达到较高的精度。本文取至4次项。

三、计 算 结 果

1. 根据 Φ （可查表）和气象要素的旬值，由 $G_{ij} = \sum_j \Phi_j X_{ij}$ ，求得 G_{ij} 。

2. 求出 G_{ij} 的两两相关系数，可得到有16个变量的线性方程组（6）。用逐步回归求解时，取 $F = 3.0$ ，得到标准化回归系数如下：

$$\begin{aligned} b_{10}^* &= -0.4069 & b_{12}^* &= -0.3718 \\ b_{11}^* &= -0.3088 & b_{31}^* &= -0.1858 \end{aligned}$$

由（9）（10）式得到北京几种春季树木物候的回归系数和常数，其值见表1：

表 1 北京春季几种物候现象的偏回归系数 $b_{ij}^{(h)}$

Tab.1 Coefficient of partial regression $b_{ij}^{(h)}$ for phenophase of trees in spring of Beijing.

b	山 桃 始 花	杏 树 始 花	紫 丁 香 始 花
	(1)	(2)	(3)
$b_{10}^{(h)}$	-0.14843	-0.13754	-0.12582
$b_{11}^{(h)}$	-0.01568	-0.01451	-0.01330
$b_{12}^{(h)}$	-0.00549	-0.00509	-0.00466
$b_{31}^{(h)}$	-0.00120	-0.00111	-0.00102
$C^{(h)}$	103.35	108.88	118.41

根据表1和（2）式可得到每种树木开花期受气象因子影响的影响系数 $a_i(t)$ ，图1-2是 $a_i(t)$ 的函数图形。根据表1和(3)式还可得到不同树木开花期的各年估计值(见图3)。

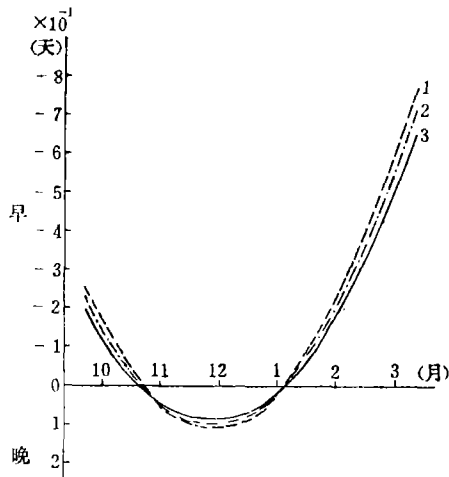


图 1 日照降水不变的情况下，旬平均气温偏高 1°C 对北京春季树木开花期的影响
1—山桃始花，2—杏树始花，3—紫丁香始花

Fig.1 The effect of 1°C change in average temperature of ten-day periods on the flowering date of trees when sunshine and precipitation are in normal condition.

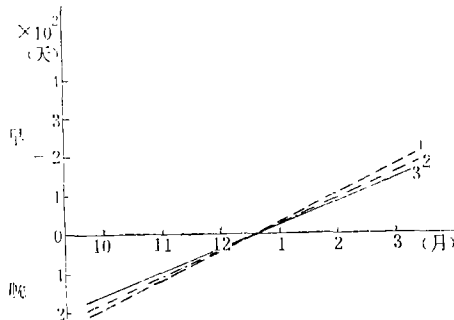


图 2 气温降水不变的情况下，旬日照时数偏多 1 小时对北京春季树木开花期的影响
1—山桃始花，2—杏树始花，3—紫丁香始花

Fig.2 The effect of 1 hr. change in average sunshine of ten-day periods on the flowering date of trees when temperature and precipitation are in normal condition.

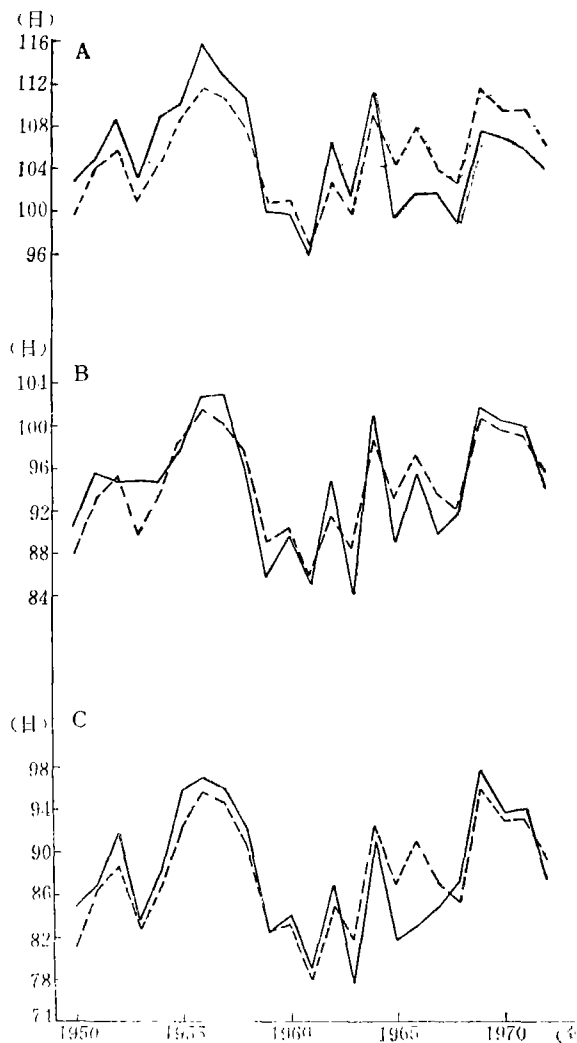


图 3 北京春季一些树木开花期的观测值与计算值的比较
A—山桃始花，B—杏树始花，C—紫丁香始花
虚线，计算值，实线，观测值

Fig.3 The comparsion of the actual flowering date with the calculated flowering date of some trees in spring of Beijing.

回归的方差分析结果列于表 2。

表 2 树木开花期的方差分析

Tab.2 Analysis of variance for flowering date.

变 差 来 源	平 方 和	自 由 度	均 方	F
回 归	1490.7	4	372.8	39.8**
剩 余	520.6	62	9.36	
总 计	2071.3	66		

“**” 表示在0.01水平上显著

复相关系数 $R = 0.844$ 、

四、统计结果的分析与结论

1. 北京春季的树木开花期与气象因子有高度的相关。从表 2 可以看到, 仅用少数几项就得到0.844的复相关系数, 开花期的估计值与观测值相当接近, 如作单种分析, 复相关系数都高达0.9以上。

2. 气温是影响北京春季树木开花期的主要因子。逐步回归的出发点, 就是根据因子在总回归平方和中的大小来挑选因子的, 因此凡是偏回归平方和大的, 也就是显著的那些因子, 一般是对Y有重要影响的因子, 可用F值来衡量它的显著性。

在本文的逐步回归计算中, 较早选入的几项都是有关气温的项, F也较大, 日照其次, 降水项在一定的显著性标准下没有被选入。因此, 气象因子对北京春季树木开花期影响的次序为气温、日照、降水。

气温的主导作用还可以从G和Y的相关系数上看出(见表3): 与温度有关项的相关系数普遍较高。在逐步回归计算中, 最初选入的与气温有关的几项, 复相关系数就达0.7左右。在标准回归系数中, 与气温有关项的系数也比较大。

3. 花芽发育过程中, 各气象要素累积值的影响: 对于气温 $j=0$ 项被选入, 说明随着该时期平均温度的提高, 能使平均开花期提前, 这是不难理解的; 对于日照时数, $j=0$ 项未被选入, 反映这几种树木的开花期与该时期平均日照时数多少的关系不大。

4. 气温对北京春季树木开花期的影响系数有明显的季节变化, 而春季气温对开花期早迟有决定性作用。由图 1 可以看出, 在降水、日照时数不变的情况下, 气温对开花期的影响可分为三部分: 冬前、冬季、春季。春季气温的影响最大, 这时期的气温愈高, 开花期愈提前; 冬前的气温影响与春季的类似, 但量值要小的多。如表 4 所示: 杏树始花, 在其他条件不变时, 如果10月上旬和 3 月下旬的平均气温都比多年平均值偏高 1°C , 可分别使开花期提

表 3 变量G与一些树木开花期的相关系数

Tab.3 The correlation coefficient between the variable G and the flowering date for some trees.

要素	G	山 桃 始 花	杏 树 始 花	紫 丁 香 始 花
气 温	G ₁₀	-0.6071	-0.7088	-0.3914
	G ₁₁	-0.7276	-0.7764	-0.6610
	G ₁₂	-0.4622	-0.3602	-0.5236
	G ₁₃	0.2326	0.2146	0.2276
	G ₁₄	0.0911	0.0542	0.1514
降 水	G ₂₀	0.3969	0.2617	0.2465
	G ₂₁	-0.4390	-0.3292	-0.2718
	G ₂₂	0.3291	0.1692	0.1287
	G ₂₃	-0.3905	-0.3853	-0.2525
	G ₂₄	0.2915	0.2127	0.2492
日照时数	G ₃₀	-0.4273	-0.4137	-0.2910
	G ₃₁	-0.5094	-0.4959	-0.4655
	G ₃₂	-0.2145	-0.0495	-0.2715
	G ₃₃	0.2511	0.2703	0.1120
	G ₃₄	-0.1171	0.0177	-0.1417

表 4 北京春季树木开花期的标准差Sy（天）以及不同时期的气温影响系数

Tab.4 Standard deviation(Sy)for flowering date in spring of Beijing, and temperature influence coefficient in different periods.

种	类	山 桃 始 花	杏 树 始 花	紫 丁 香 始 花
开花期的标准差 Sy		5.94	5.51	5.04
气温影响系数	10月上旬	- 0.255	- 0.237	- 0.216
	12月中旬	0.102	0.094	0.086
	3 月下旬	- 0.789	- 0.731	- 0.669

前0.24天和0.73天。冬季，有效温度以下的低温对开花期也有影响，在其他条件不变时，这时的气温偏低会使开花期提前，反之，使开花期推迟。如山桃始花，当12月中旬的气温比多年平均值偏高1℃时，反使开花期推迟0.1天。说明冬季低温也是影响树木花芽发育的因子之一，不过影响系数相对小些而已。

5、日照时数和降水量是影响春季树木开花的次要因子。日照时数：如表 3 所示，它们与开花期的相关系数在0.25--0.5之间，回归分析中只有 1 次项因子被选入，其影响系数前

期为正（日照时数偏多使开花期推迟），后期为负（日照时数偏多使开花期提前）。降水：从计算结果看，冬春降水多少对北京春季树木开花早迟的影响不大。这可从水分供应和消耗上加以解释：树木与草本植物不同，树大根深，不管秋冬雨雪多少，它总可以从深层得到稳定的地下水供给，秋冬和早春树木没有叶子，其蒸腾耗水很少，尽管北京春旱严重，常影响作物发育，但还没有达到因干旱而影响树木花芽发育的程度。

五、讨 论

（一）上述方程式的物理意义

基本方程（1）可以写成：

$$\hat{Y} = C + \sum_i a_i(t) X_i \quad (11)$$

$$\because \quad \hat{Y} = \bar{Y} + \Delta Y \quad X = \bar{X} + \Delta X \quad (12)$$

\bar{Y} 、 \bar{X} 分别为Y、X的平均值。将（12）式代入（11）式：

$$\bar{Y} + \Delta Y = C + \sum_i a_i \bar{X} + \sum_i a_i \Delta X$$

$$\because \quad \bar{Y} = C + \sum_i a_i \bar{X}$$

$$\therefore \quad \Delta Y = \sum_i a_i \Delta X$$

也就是说，物候期的年际间波动是由于它的前期气象条件与多年平均值有一定的偏差而引起的。

（二）冬季低温对树木休眠期的影响

树木的休眠是为了适应不适宜的环境条件。温带地区树木的冬季休眠是为了适应冬季的严寒，各种树木有不同的休眠期，树木经过一定的休眠期后，遇到适宜条件才可萌芽。关于解除树木休眠的条件目前有两种看法：一种认为是需要低温阶段，另一种认为解除某些树木休眠的条件是长日照^[1]。

从本文的计算结果可看出：不管是分组计算还是作单项分析，都说明冬季低温对春季的物候期有一定的影响。在其它条件都相同时，冷冬可使春季树木开花期提前，暖冬则相反。我们认为上述结果反映了冬季气温高低对休眠期长短有影响，冬季偏冷有利于打破休眠期，使发育期提前；相反，冬暖则不利于打破休眠期，使发育期相应推迟。对于这个问题，国外也从实验中得到一些认识，认为“许多起源于凉爽气候条件下的植物，每年必须经过一个休眠期，通常这样的休眠，只有在温度低于5—8°C时才被打破，短时间的低于5—8°C的低温效果可以积累起来，如桃需要400小时以上的低于7°C的温度。”我们从统计学角度得出的结论与他们的试验结果是一致的^[7]。

(三) 从物候期与气象因子的一些统计关系看物候指标在一些方面的应用

1. 对于气候变迁研究 气候变迁研究中常根据历史物候记载来恢复历史气候。由于春季树木开花期与春季气温关系最密切, 因此根据这类历史物候记载可以推算历史上春季的冷暖波动。此外, 由于秋冬的气温和前期日照等对春季树木开花期也有些影响, 因此这种推算值只是一种近似值。

2. 物候指标与气候调查 由于春季的树木开花现象与春季气温的相关系数较高, 因此这类物候现象可作为春季热量资源的指示物候现象。据分析, 北京春季树木的开花现象可作为: (1) 一些界限温度出现日期的指标; (2) $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温多少的指标; (3) 春季月份平均气温高低的指标; (4) 该年春季气温相对于多年平均值的变化等^[8]。

(四) 可以利用以上统计模式作春季树木开花期的预报

养蜂业上常根据蜜源植物开花情况确定放蜂日期和地区, 农业上要知道一些物候期以确定季节的早晚, 公园或旅游场所要预知某些花卉的开放日期以确定游客高峰等, 因此物候预报有一定的实用价值。对于春季树木物候预报, 常用的积温法有一定缺陷:

$$\text{积温预报公式为: } D = D_1 + \frac{A}{t - B}$$

这里 D_1 为生长期开始日期, 即春季日平均气温稳定通过 B 时的日期, 可根据观测资料确定, D 为要预报的物候期, t 为 D_1 至 D 时期的平均气温 (天气预报结果), B 为有效温度下限, 一般取 $B = 5$, A 为 D_1 至 D 期间所需要的有效积温。由于春季气温不高, $(t - B)$ 的值较小, 如果 t 的预报有小的误差, $(t - B)$ 就会有成倍的变化, $A / (t - B)$ 的值也会有大的波动, 所以用积温法预报早春的物候期误差较大。

利用方程 (3) 做出的物候预报, 由于考虑因素多、时段长, 可克服上述缺点。其中, 趋势项可用上年实测物候期或用平均值代替。气象资料: 前期的可采用实测记录, 后期的可用长期天气预报的结果。在不同时期还可根据新出现的天气实况不断加以订正。

本文是以北京春季几种树木开花期为例并采用线性模式所得到的结果, 可能会有某些局限性, 此外这些结果应理解为一定地区的特殊条件下某些植物的生态气候特征。

参 考 文 献

- (1) 任宪威、李 珍: 北京树木物候谱、北京林学院学报, 1 期, 1981 年。
- (2) Fritts, H. C., Multivariate techniques for specifying tree-growth and climate relationship and for reconstructing anomalies in paleoclimate. Journal of applied meteorology. 1971, Vol. 10, No. 5, P 845-864.
- (3) Fisher, R. A., The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothomsted, Roy. Soc, (London), Phil. Trans. Ser. B: 213, 1924.
- (4) 卢其尧: 华北平原降水量对冬小麦产量的影响, 气象学报, 33 卷 3 期, 1963 年。
- (5) 王世耆等: 北京地区冬小麦产量和气象要素的统计学分析, 中国农业科学, 1 期, 1979 年。
- (6) 竺可桢、宛敏渭: 物候学, 科学出版社, 1973 年。
- (7) R. F. 道本迈尔: 植物与环境 (曲仲湘等译), 科学出版社, 1965 年。

〔8〕 张福春：试论物候学方法在小区气候调查中的应用，地理科学，1 期，1982 年。

STATISTIC ANALYSIS ON THE PHENOPHASE OF TREES IN SPRING OF BEIJING

Zhang Fuchun

(Institute of Geography, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the integral regression method was used to analyse the relation between meteorological factors and phenophase of trees in spring of Beijing. The conclusions are as follows:

1. The relations between meteorological factors and phenophase are very close.

2. The factors which influence the phenophase of trees in spring are temperature, sunshine and precipitation in order of the intensity of their effects.

3. If precipitation and sunshine are similar to those in normal years, they may be analysed in three time intervals: pre-winter, winter and spring.

The effect of spring temperature on phenophase is the most important. At that time, the higher the temperature is, the earlier the phenophase occurs and vice versa. The temperature effect in pre-winter is similar to that in spring, but the intensity is smaller. The low temperature in winter also effects phenophase in spring, but the higher the temperature is, the later the phenophase, and vice versa. This shows that winter low temperature is also an essential condition for phenophase.

4. Integral regression equation may be used to forecast the phenophase of the trees in spring.