

近 150 年北京春季物候对气候变化的响应*

张学霞¹, 葛全胜², 郑景云², 张福春²

(1. 北京林业大学水保学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所)

摘要:对北京春季 6 种物候的计算得出其代表性指标——山桃始花期, 并分析物候对气温变化的响应模式。根据气温变化态势, 将历史时期气温和物候资料划分为 4 个时间段, 并采用 u 检验论证时间段间具有显著性差异, 分析物候期对气温变化的响应模式和机制, 得出: 物候期的提前与推迟对温度的增高与降低的响应是非线性的, 在同等增、降温幅度下, 因降温而导致的物候期推迟幅度较因增温而导致物候期提前幅度小; 平均气温增高 1^{°C}, 北京春季物候期提前 2.8~3.6d。并估算了未来北京春季物候变化趋势。

关键词:植物物候; 响应模式; 北京; 山桃始花期; 气候变化

物候学是一门古老的科学, 曾一度因预报农时、服务农业生产而繁荣昌盛。近年来, 随着气象、气候观测技术的进步, 物候学的实用性逐渐减弱, 如物候学的主要传统应用——预报农时以指导农民适时播种、收割, 预报霜期以减轻霜害, 现在都可以采用科学仪器替代。国外物候学研究的鼎盛期持续到 20 世纪 50 年代^[1], 国内滞后于国外, 到 60 - 80 年代。近 10 年来, 随着人们对全球变暖等问题的关注, 生物物候现象作为全球变化最敏感、最精确的指示剂, 其研究又重新焕发生机。

温度是影响物候变化的主要因子, 温度升高, 春季物候期提前。部分学者采用统计学方法预测了气温和不同植物物候期的定量关系。Sparks^[6]认为, 全球升温 3.5^{°C}, 春季开花期约提前 2 周。Kramer^[7]预测欧洲大陆温度上升 1^{°C}, *Fagus sylvatica* 展叶期提前 3.6d。Fitter^[5]指出英国中部月均温升高 1^{°C}, 春季开花日期大约提前 4d。郑景云^[2]以全国 26 个站点资料为数据源, 得出春季物候期的提前与推迟对温度升降的响应是非线性的。若温度上升 1^{°C}, 物候期提前 3.5d, 反之, 则推后 8.8d。张福春等^[3-4]采用积分回归等方法证明影响北京春季木本物候的关键因子是温度。年均温上升 1^{°C}, 春季物候期提前 3.7d。植物物候期对气候变化的响应因植物种类、季节^[5]、地理位置(如高度)^[8]的不同而差别很大。因此, 对同一地点利用不同历史时期气温和物候资料, 分析物候期对气温变化的响应模式和机制具有十分重要的意义。

本文选择物候变化具有代表性、物候观测资料

丰富的北京地区^[9]作为研究区域, 以气温变化最敏感的春季物候^[5]作为研究对象, 采用多元回归方法分析不同历史阶段春季物候期对 1、2、3 月气温的响应(因为山桃始花一般出现在 3 月份), 预测 CO₂ 浓度加倍情况下春季物候推迟或提前的天数, 以期对植物物候, 乃至整个生态系统对气候变化的响应过程、方式及其程度的研究提供科学依据。

1 资料来源

北京地区是我国物候资料最丰富的地区。1950 年以来, 竺可桢教授在北海公园对北海冰融、山桃始花、杏树始花、紫丁香始花、洋槐始花、柳飞絮、燕始见和布谷鸟始鸣等 8 种物候现象进行了系统观测^[10]。1962 年以后, 中国科学院地理研究所又在在北京颐和园等地按统一的观测方法进行了系统的物候观测, 并持续至今。龚高法等^[11]以上述文献记载为基础, 参照现代物候观测标准整理并建立了北京地区 1850 - 1982 年山桃始花物候期的多年变化序列。

本研究采用的物候资料中, 1950 - 1962 年的物候数据来自竺可桢的观测日记; 1963 - 2000 年的来自中国科学院地理研究所《中国动植物物候观测年报》(1 - 11 号); 1850 - 1949 年的山桃始花物候数据来源于文献^[11]。气候数据为中国国家气象局记录的 1850 - 2000 年北京标准气象站的逐月气温资料。

2 北京地区春季物候变化特点

2.1 春季物候代表性指标选取

北京春季物候现象具有顺序性、相关性、同步性的特点, 因此可以用某一种春季物候指标的变化分

* 收稿日期: 2004 - 12 - 08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371019); 国家重大基础研究计划课题(973 项目)(2002CB111502); 中国科学院研究生资助专项和中国科学院创新项目(KZCX3 - SW - 321 和 KZCX1 - SW - 01 - 09)

作者简介: 张学霞(1975 -), 女, 山东人, 博士, 主要从事遥感应用与全球环境变化方面的研究。

析整个春季物候现象变化规律^[4,10]。本文采用 1950 - 2000 年北京地区的北海冰融、山桃始花、杏树始花、紫丁香始花、洋槐始花、柳絮飞 6 种物候指标进行相关分析,以寻求对春季物候现象最具有代表性的物候指标,结果见表 1。可以看出,物候现象两两之间相关系数均在 0.61 ~ 0.85 之间,相关性较强,与陈效速等^[4]的研究结果相同;山桃始花与其它物候现象之间的关系最为密切。

已有研究表明^[5,7,12-13],春季最早开花的植物在始花日期上比晚开花植物对气温的响应敏感。本研究中山桃始花最早,可以作为北京春季物候的指示性指标,其变化趋势可代表北京市春季物候现象的变化趋势。本文以山桃始花物候期为指标,分析近 150 年北京春季植物对气温变化的响应。

表 1 近 50 年北京春季物候现象出现日期期间的
相关系数(1950 - 2000 年)

| | 北海冰融 | 杏始花 | 紫丁香始花 | 柳絮飞 | 洋槐盛花 | 山桃始花 |
|-------|------|------|-------|------|------|------|
| 北海冰融 | 1.00 | | | | | |
| 杏始花 | 0.72 | 1.00 | | | | |
| 紫丁香始花 | 0.65 | 0.79 | 1.00 | | | |
| 柳絮飞 | 0.67 | 0.63 | 0.73 | 1.00 | | |
| 洋槐盛花 | 0.54 | 0.70 | 0.79 | 0.77 | 1.00 | |
| 山桃始花 | 0.85 | 0.80 | 0.78 | 0.75 | 0.61 | 1.00 |

注:表中各相关系数均通过 $\alpha = 0.01$ 水平的显著性检验。

2.2 物候变化特点

北京春季物候波动性较大,为便于计算和比较,首先将日期转换为日序(如 1999 年 3 月 21 日为第 80 天)。为了消除一些短周期的振动,采用 10 年滑动平均法对物候期数据序列进行处理,如图 1 所示。

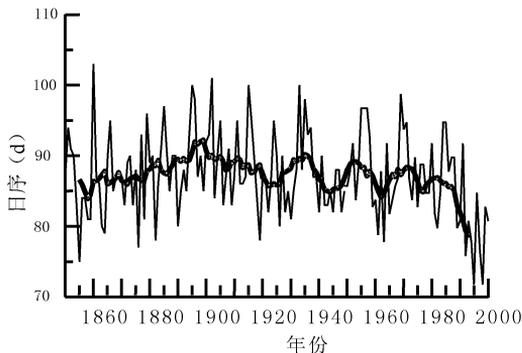


图 1 北京近 150 年山桃始花日期及 10 年滑动平均(1850 - 2000 年)

注:细线为实际曲线,粗线为 10 年滑动平均曲线。

10 年滑动平均曲线表明,20 世纪 80 年代以来,北京山桃始花期一直呈提前趋势,1990 - 2000 年比过去 140 年提前了 8.8d,这与近 10 多年持续的暖冬有关。

北京山桃始花物候期的变幅较大,1902 年、1941、1957、1988 年出现了 4 个最晚物候期的峰值,1863、1928、1948、1965 年出现 4 个最早物候期的谷值,最大变幅为 32d。张福春等^[3]的中国山桃始花期的地理分布模式表明,纬度每向北推移 1°,山桃始花期推迟 3.3d。据此,北京地区山桃始花期的最大变幅相当于 10 个纬度的摆幅。

3 北京春季物候对春季温度变化的响应模式

3.1 研究时段划分

表 2 北京市 1850 - 2000 年 T₁、T₂、T₃、Y 变异特征分析

| 时段 | 变量 | 极差 | 均值 M | 标准差 S | 变异系数 CV |
|----------------------|----------------|-----|--------|-------|---------|
| 1850 - 2000 | T ₁ | 7.4 | - 4.48 | 1.57 | - 0.35 |
| | T ₂ | 8.6 | - 1.73 | 1.90 | - 1.10 |
| | T ₃ | 8.3 | 4.92 | 1.82 | 0.37 |
| 阶段 1: 1850 - 1879 | T ₁ | 5.0 | - 5.14 | 1.20 | - 0.23 |
| | T ₂ | 8.4 | - 1.94 | 1.97 | - 1.02 |
| | T ₃ | 6.8 | 4.91 | 1.64 | 0.33 |
| 阶段 2: 1880 - 1909 | T ₁ | 6.3 | - 4.87 | 1.87 | - 0.38 |
| | T ₂ | 4.7 | - 2.75 | 1.51 | - 0.55 |
| | T ₃ | 5.8 | 3.88 | 1.81 | 0.47 |
| 阶段 3: 1910 - 1939 | T ₁ | 6.0 | - 4.45 | 1.78 | - 0.40 |
| | T ₂ | 6.4 | - 1.55 | 1.55 | - 1.00 |
| | T ₃ | 5.9 | 4.81 | 1.59 | 0.33 |
| 阶段 4: 1940 - 1969 | T ₁ | 4.2 | - 4.64 | 1.25 | - 0.27 |
| | T ₂ | 7.9 | - 2.10 | 2.05 | - 0.98 |
| | T ₃ | 6.0 | 4.86 | 1.81 | 0.37 |
| 阶段 5: 1970 - 2000 | T ₁ | 6.9 | - 3.72 | 1.49 | - 0.40 |
| | T ₂ | 6.3 | - 0.72 | 1.77 | - 2.46 |
| | T ₃ | 7.0 | 5.69 | 1.86 | 0.33 |

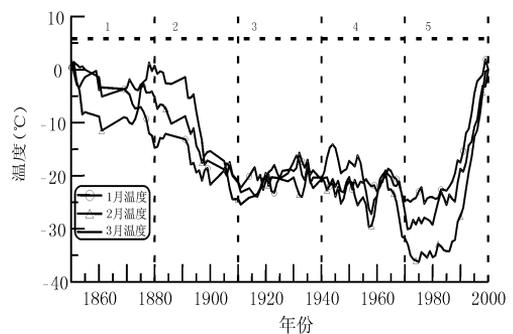


图 2 北京近 150 年 1、2、3 月的温度累积距平曲线(1850 - 2000 年)

注:图中 1、2 5 为时段,含义见表 2。

图 2 表明,尽管北京市 1850 - 2000 年 1、2、3 月的温度(以下简称 T₁、T₂、T₃)的累积距平均为负值,但曲线的变化形态却直观、清晰地展示出近 150 年北京 T₁、T₂、T₃ 的变动特点:变幅较大、变化趋势不单一。为科学地评价物候对气温变化的响应,有必要根据

气温变动态势,划分不同的研究时段。世界气象组织(WMO)的规定一般取 30 年作为气候标准时段。因此,本文以 30 年为最小时间单位,将研究时段划分为 5 个阶段(图 2、表 2)。

分别对近 150 年两两 30 年段间的 T_1 、 T_2 和 T_3 的平均值的变化进行显著性 u 检验^[14-15],如果两个时间段气温均值没有显著性差异,则将其合并为新的分析时段;反之,则保持原有时段的划分。当显著性水平为 $\alpha=0.01$ 时, $u=2.58$; $\alpha=0.05$ 时, $u=1.96$; $\alpha=0.10$ 时, $u=1.65$ 。 u 统计量值如表 3。

根据 u 检验结果(表 3),阶段 3 和阶段 4 气温变化无显著性差异,可归并为新时间段。其它时段间差异显著,分段结果保持不变。

使用线性方程 $y = a + bx$ 考察 T_1 、 T_2 、 T_3 序列在新时间段的变化趋势(图 3) 其中 a 、 b 用最小二乘法进行估计。

表 3 北京市 1850 - 2000 年每 2 个 30 年段 T_1 、 T_2 、 T_3 平均值的 u 统计量值

| 时段 | 气温变量 | u |
|------------|-------|----------|
| 阶段 1 与阶段 2 | T_1 | 0.53 |
| | T_2 | 1.46 |
| | T_3 | 1.85 * |
| 阶段 2 与阶段 3 | T_1 | 0.74 |
| | T_2 | 2.57 ** |
| | T_3 | 1.76 * |
| 阶段 3 与阶段 4 | T_1 | 0.44 |
| | T_2 | 1.12 |
| | T_3 | 0.11 |
| 阶段 4 与阶段 5 | T_1 | 2.62 *** |
| | T_2 | 2.82 *** |
| | T_3 | 1.76 * |

注: *为 $\alpha=0.1$ 、**为 $\alpha=0.05$ 、***为 $\alpha=0.01$ 水平上显著。

结果表明, T_2 、 T_3 具有相同的变动趋势, T_1 的变动趋势在 1910 年之前同 T_2 、 T_3 反相, 之后与 T_2 、 T_3 变化同相(图 3)。

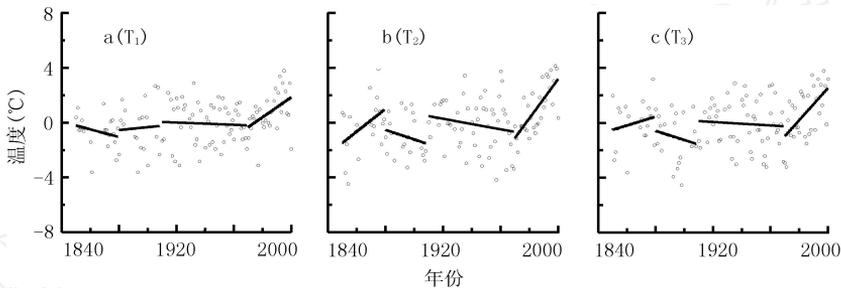


图 3 北京近 150 年 T_1 、 T_2 、 T_3 序列线性趋势(1850 - 2000 年)

3.2 北京春季物候对春季温度的响应模式

以 1850 - 2000 年的 T_1 、 T_2 、 T_3 作为自变量, 将山桃始花期(以下简称 Y) 作为因变量, 分别进行各时

段的逐步回归, 建立回归模型。其中, 变量取舍的准则为: 当一个变量的 SIG T 值为 0.05 时, 该变量被引入回归方程, 当 SIG T 值为 0.1 时, 该变量被剔除。

表 4 北京市 1850 - 2000 年各年代段 T_1 、 T_2 、 T_3 与 Y 多元回归结果

| 时间段 | 气温变化态势 | 回归方程 | 复相关系数 R | DW 检验值 |
|-------------|--------|--|---------|--------|
| 1850 - 1879 | 气温弱升高 | $Y = 101.596 - 2.89T_3$ (0.001) (0.0001) | 0.73 | 2.22 |
| 1880 - 1909 | 气温下降 | $Y = 95.165 - 1.63T_3$ (0.0001) (0.015) | 0.56 | 1.45 |
| 1910 - 1969 | 气温弱下降 | $Y = 87.335 - 2.18T_3$ (0.0001) (0.0001) | 0.66 | 1.76 |
| 1970 - 2000 | 气温升高 | $Y = 100.164 - 2.83T_3$ (0.0001) (0.0001) | 0.82 | 1.71 |
| | | $Y = 95.205 - 1.47T_2 - 2.15T_3$ (0.0001) (0.0001) (0.0001) | 0.89 | 1.85 |

注: 括号内为回归方程中各变量的显著性水平。

经运算各时段回归模型中, T_1 均被剔除, T_2 只有 1970 - 2000 年被引入, 而 T_3 均为显著变量被引入。回归结果表明: T_3 是影响 Y 的最重要因素, T_3 和 Y 为负相关关系。山桃始花对春季温度变化的响应是非线性的。比较不同时段回归模型和温度变化态势(表 4、图 3c), 在温度升高模式, T_3 回归系数比温度下降模式的值高。随着温度的升高, T_2 对 Y 的影响增大。尤其是 1970 - 2000 年, T_2 的回归系数高至 -1.47, 物候期提前 13d(图 1)。

从图 4 可见: T_3 与其回归系数正相关: 温度升高回归系数亦增大。即在同等升降温幅度情况下, 因降温而导致的物候期推迟幅度较因升温而导致物候期提前幅度小。

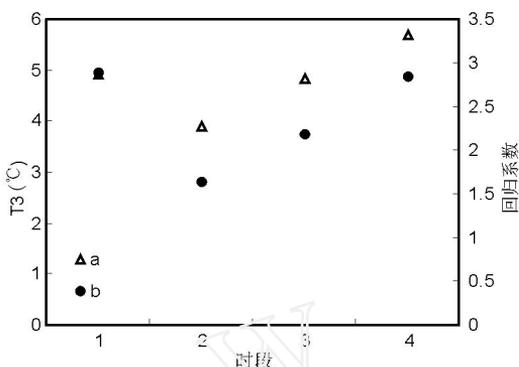


图 4 各时段 T_3 及其回归系数变化

注: a 为各时段 T_3 值; b 为各时段 T_3 回归系数值, 而且为便于比较回归系数取绝对值。

3.3 未来北京春季物候变化趋势的估计

近百年全球气温平均上升约 0.5 / 100 年^[16-17]; 1976 - 1999 年, 全球变暖速度为 2 / 100 年。未来 50 年全球变暖态势显著, 到 2030 年比 1960 - 1990 年平均上升 0.6 以上^[18]。根据 IPCC 报告, 大气 CO_2 浓度加倍时, 全球平均气温将增高 1.5 ~ 4.5^[16]。假设未来北京以同样幅度增温, 根据表 3 的计算结果, 未来气候变暖对春季植物物候期影响的定量分析如表 5。

表 5 气温升高 1~4.5 山桃始花物候期提前天数(单位: d)

| 模式 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 |
|-------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| 气温弱升高 | 2.9 | 4.3 | 5.8 | 7.2 | 8.7 | 10.1 | 11.6 | 13.0 |
| 气温升高 | 2.8 | 4.2 | 5.7 | 7.1 | 8.5 | 9.9 | 11.3 | 12.7 |
| | 3.6 | 5.4 | 7.2 | 9.1 | 10.9 | 12.7 | 14.5 | 16.3 |

由表 5 可见, 根据山桃始花物候期对温度的回归预测模型可得出, 平均气温增高 1, 北京春季物

候期提前 2.8 ~ 3.6d。

4 结论

(1) 根据物候现象的有序性、相关性、同步性分析可知: 北京地区山桃始花物候期的变化趋势可代表本地春季物候现象。

(2) 春季物候的早晚和春季气温负相关: 温度升高, 物候期提前; 气温降低, 物候期推后。

(3) 影响山桃始花物候期的主导气候因子是 3 月份气温。

(4) 物候期的提前与推迟对温度的增高与降低的响应是非线性的。在同等增、降温幅度情况下, 因降温而导致的物候期推迟幅度较因增温而导致物候期提前幅度小。

(5) 根据山桃始花物候期的回归预测模型得出, 平均气温增高 1, 北京春季物候期提前 2.8 ~ 3.6d。

参考文献:

[1] 松本太, 福冈义隆. 植物季节に及ぼす都市の温暖化の影響熊谷市におけるソメイヨシノ開花日を例として. 地理学评论[J], 2003, 76(1): 1 - 18.

[2] 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响[J]. 科学通报. 2002, 47(20): 1582 - 1587.

[3] 张福春. 北京春季的树木物候与气象因子的统计学分析[J]. 地理研究, 1983, 2(2).

[4] 陈效速, 张福春. 近 50 年北京春季物候的变化及其对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 2001, 22(1).

[5] Fitter AH, Fitter RSR, Harris IIB, et al. Relations between first flowering date and temperature in the flora of a locality in central England[J]. Funct Ecol, 1995(9): 55 - 60.

[6] Sparks TH, Carey PD. The responses of species to climate over two centuries: an analysis of the Marsham phenological record, 1736 - 1947. J Ecol, 1995(83): 321 - 329.

[7] Beaubien EG, Freeland HI. Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. Int J Biometeorol. 2000(44): 53 - 59.

[8] Murray MB, Cannell MGR, Smith RI. Data of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming. J Appl Ecol. 1989, (26): 69 - 700.

[9] 龚高法, 张丕远, 张瑾璐. 北京地区自然物候期的变迁[A]. 环境变迁研究(第一辑)[C]. 北京: 海洋出版社, 1984: 64 - 75.

[10] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学[M]. 北京: 科学出版社, 1973, 1 - 131.

[11] Gong Gifa, Zhang Piyan, Zhang Jinrong. The Variation of Phenodate in Beijing District[J]. Kexue Tongbao, 1984, 29(12): 1517 - 1519.

- [12] Donatella Spano, Carla Cesaraccio, Pierpaolo Duce, et al. Snyder. Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *Int J Biometeorol.* 1999(42): 124 - 133.
- [13] Abu - Asab M S, Peterson P M, Shetler S G, et al. Earlier plant flowering in spring as a response to global warming in the Washington, DC, area. *Biodiversity and Conservation*, 2001, 10: 597 - 612.
- [14] Wei Fengying, Gao Hongxing, Wang Liping. Climatic warming process during 1980s - 1990s in China[J]. *Journal of applied Meteorological Science.* 2003, 14(1): 79 - 86.
- [15] 魏风英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999. 43 - 47.
- [16] Hughton J T, Jenkins G J, Ephraens J J. Climate change. The IPCC scientific assessment. Cambridge University Press, 1990.
- [17] 王绍武, 叶瑾琳. 近百年全球气候变暖的分析[J]. *大气科学*, 1995, 19(5): 545 - 553.
- [18] 王绍武, 赵宗慈. 未来 50 年中国气候变化趋势的初步研究[J]. *应用气象学报*, 1995, 6(3): 333 - 342.
- [19] 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响[J]. *地理学报*, 1995, 50(5): 402 - 410.

Responses of Spring Phenology to Climate Changes in Beijing in Last 150 Years

ZHANG Xue-xia¹, GE Quan-sheng², ZHENG Jing-yun², ZHANG Fu-chun²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: Based on the calculation of six plant phenology in spring in Beijing, a representative index of spring phenology, was used to analyze response model of plant phenology to temperature changes. According to changing trends of temperature, temperature and phenology data in historical periods were categorized to four series with the same length of time slice. Prominence differences of two series were verified by *t* test. Response model and mechanisms of phenophase on temperature changes were analyzed in different series with different models of temperature changes. It had been concluded that the response of phenophase advance or delay to temperature change was nonlinear. At the same amplitude of temperature change, phenophase advance amplitude caused by temperature decrease was less than phenophase advance amplitude caused by temperature increase; If the temperature increased 1 °C, spring phenophase in Beijing would advance 2.83.6 days.

Key words: Plant phenology; Response model; Beijing; *Prunus davidina* Franch flowering phenophase; Climate changes

《中国农业气象》为中国科学引文数据库(CSCD)核心库来源期刊

中国科学引文数据库收入我国数学、物理、化学、天文学、地学、生物学、农林科学、医药卫生、工程技术、环境科学和管理科学等领域出版的中英文科技核心期刊和优秀期刊近千种,其中核心库来源期刊 670 种,扩展库期刊为 378 种。核心库的来源期刊经过严格的评选,是各学科领域中具有权威性和代表性的核心期刊,扩展库的来源期刊也经过大范围的遴选,是中国各学科领域较优秀的期刊,CSCD 是目前国内唯一能与 SCI 接轨的数据库,被誉为“中国的 SCI”。

《中国农业气象》2001 - 2003 年《中国学术期刊综合引证年度报告》指标

| | 总被引频次 | 影响因子 | 引文即年指标 | 他引总引比 | 被引半衰期 | 载文量 |
|------|-------|--------|--------|--------|-------|-----|
| 2001 | 195 | 0.1909 | 0.0204 | | 10 | 49 |
| 2002 | 201 | 0.2524 | 0.0364 | 0.9005 | 8.1 | 55 |
| 2003 | 264 | 0.3301 | 0.0435 | 0.8333 | 8.0 | 69 |
| 2004 | 307 | 0.4590 | 0.041 | 0.93 | 6.95 | 73 |

注:表中 2004 年数据来源于中国科学技术信息研究所等出版的《中国期刊引证研究报告》。