

植物叶的波动性不对称对空气污染的响应及其指示功能

石 辉¹, 武云飞¹, 唐占铎¹, 王会霞^{1,2}, 王彦辉^{2*}

(1 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 2 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘 要: 植物发育的波动性不对称(fluctuating asymmetry, FA)与环境之间具有密切的关系。该研究以城市常用绿化树种大叶女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.)和小叶女贞(*Ligustrum quihoui* Carr.)为对象,在西安市区 9 个空气质量监测点采集了两树种成熟叶片样品,以叶脉为对称轴测定叶左右两边的半宽度、半周长和半面积,计算其相应 FA,考察植物叶片 FA 对空气环境条件变化的响应特征,探讨叶 FA 作为空气质量指标的可行性。结果表明:大叶女贞叶周长(FAP)、宽度(FAW)和面积(FAA)波动性不对称分别为 0.051、0.063 和 0.082,小叶女贞分别为 0.043、0.082 和 0.102,均以 FAA 最大, FAP 最小; FAP、FAW 和 FAA 在树种间、立地环境间均具有极显著的差异;两树种的 FAP 与空气中 SO₂ 浓度之间存在显著相关性。可见,大叶女贞和小叶女贞叶的波动性不对称特征对不同环境条件具有敏感的反应,具有作为生物监测指标的潜力,但在合适监测物种和叶特征指标的选择、样本数确定以及 FA 与空气特征污染物的关系等方面有待深入探讨。

关键词: 叶片;波动性不对称;发育稳定性;空气污染;环境质量

中图分类号: Q945. 11

文献标志码: A

Leaf Fluctuating Asymmetry in Response to Air Pollution and Indicator Function

SHI Hui¹, WU Yunfei¹, TANG Zhanduo¹, WANG Huixia^{1,2}, WANG Yanhui^{2*}

(1 School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Key Laboratory of Environmental Engineering in Shaanxi Province, Xi'an 710055; 2 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forest, Beijing 100091)

Abstract: The fluctuating asymmetry (FA) of biological development stability has a close relationship with environmental conditions. The *Ligustrum lucidum* and *L. quihoui* were selected as experimental materials, which are commonly urban greening tree species in Xi'an. The mature leaves of these plants were sampled from 9 air environmental monitoring sites. The leaf half-perimeter, half-width, and half-area were measured and the each FA was calculated, which the vein is symmetry axis. The response characteristics of 2 kinds leaf FA to environmental air condition were researched, and the potential of leaf FA as an air quality indicator was explored. The values of fluctuating asymmetry of perimeter, width, and area (abbreviated as FAP, FAW and FAA, respectively) were 0.051, 0.063 and 0.082 for *L. lucidum*, respectively. The FAP, FAW and FAA of *L. quihoui* were 0.043, 0.082 and 0.102, respectively. The each FA showed

收稿日期: 2016-03-01; 修改稿收到日期: 2016-06-30

基金项目: 陕西省自然科学基金重点项目(2014JZ011); 国家林业公益专项(201304301-05)

作者简介: 石 辉(1968—), 博士, 教授, 主要从事环境生态学方面的教学研究工作。E-mail: shihui06@126.com

* 通信作者: 王彦辉, 研究员, 博士生导师, 主要从事森林生态与森林水文方面的研究工作。E-mail: wangyh@caf.ac.cn

significant differences between different plant species sampling sites and enviromental sites. There were close relationship between the FAP and air SO₂ concentrations for each plant species. The leaf FA has high sensitivity to different environmental conditions, and it has the potential as a biological monitoring indicator. However, the choice of suitable species for monitoring, leaf characteristic indexes, the number of samples, FA and characteristics of pollutants relations should further research.

Key words: leaf blade; fluctuating asymmetry; development stability; air pollution; environmental quality

生物在发育过程中由于生物和非生物的因素干扰,经常会出现一些小的、随机性的偏离;波动性不对称(fluctuating asymmetry, FA)反映了双边对称结构偏离的强弱,被用于反映发育稳定性的一个指标^[1-4]。一些研究表明,植物叶的 FA 与环境污染之间有密切的关系,可以用作环境质量的指示物^[5]。如人工培养实验中的海草 *Halophila ovalis* 叶 FA 与 Cu 离子浓度之间具有显著的相关性,而与 Pb 离子浓度之间的关系不显著^[6];在天然水体中不同位置的海草 *Zostera capricorni* Aschers. 叶 FA 差异显著,但与水体中重金属(Cd、Pb、Cu、Zn、Se)的浓度高低没有一致性^[7];暴露的 Pb 可显著降低湿地入侵植物紫色金钱草(*Lythrum salicaria*)茎叶的长度、数量和生物量,但却增加了其叶的 FA^[8];冶炼厂周边的桦树(*Betula pendula*)及其 2 个亚种(*B. pubescens* ssp. *pubescens* 和 *B. pubescens* ssp. *tortuosa*)叶 FA 随着环境污染程度的增加而增大,FA 与叶中的 Ni 浓度正相关^[9];上海市行道树二球悬铃木(*Platanus acerifolia*)叶宽度的 FA 与环境胁迫等级之间的关系密切,而叶的偏向性 FA 与环境胁迫等级之间没有显著的联系^[10]。但是,关于叶的 FA 与环境胁迫之间还存在一些相反的观点,如 Wuytack 等^[11]研究表明白柳(*Salix alba*)叶面积的 FA 不受空气污染和一些气候环境因子的影响;Velickovic 等^[5]的结果更是表明车前草(*Plantago major*)的 FA 在非污染区域有较大的值,意味着其在非污染区域的不对称性高于污染区域。

生物监测是利用生物对环境中污染物质的反应来判断环境污染状况的一种手段;植物常年静止在栖息地,其对环境变化的响应更能反映长期污染对生物的影响^[12]。因此,进一步认识植物叶 FA 与环境胁迫之间的关系,对于探索叶 FA 对环境的指示作用、特别是复合环境污染物的协同效应具有重要的意义。大叶女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.)和小叶女贞(*L. quihoui* Carr.)是常用的城市空气污染监测植物^[13],也是西安市常见的绿化植物。本试验以西安大叶女贞和小叶女贞为对象,研究其叶的宽度、周长和面积的波动性不对称对空气污染的响应

特征,探讨叶 FA 作为评价空气质量指标的可行性。

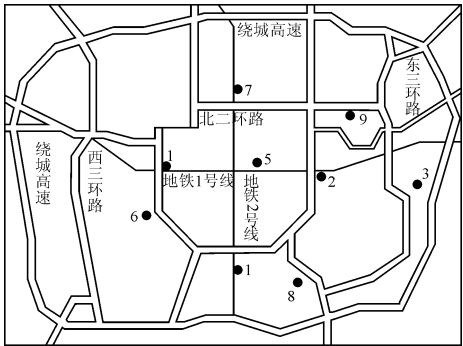
1 材料和方法

1.1 样品采集

样品采集于 2014 年 5 月中旬进行,主要采样点位于西安市高新西区、高压开关厂、广运潭、经开区、曲江、市体育场、小寨、兴庆小区、纺织城,具体位置见图 1。这 9 个点为西安市环境监测点,具有相应的空气环境监测数据。在每个采样点周边选取胸径、树高相近的大叶女贞和小叶女贞各 6 棵;每棵树在冠层的 2/3 处、沿东南西北 4 个方向,每个方向采集 2 片成熟叶,即每棵树采集 8 片叶,每个样点为 48 片叶。总计大叶女贞和小叶女贞各 432 片树叶带回实验室清洗后备用。

1.2 数据获取

将清洗干净的树叶编号并进行扫描存贮,叶半宽度、半面积及半周长指标的测定采用 ImageJ1.48 软件进行。为减少误差,每片树叶 3 个特征值均测量 3 次,取其平均值分别作为指标的单叶测定结果。叶半宽度测定时在 ImageJ 中连接叶尖和叶根描绘



中 1~9 号采样点依次为高压开关厂、兴庆小区、纺织城、小寨、市体育场、高新西区、经开区、曲江和广运潭

图 1 试验采样点分布示意图

he digits in map are sampling site numbers, and 1-9 stand for High Voltage Switchgear Factory, Xingqing Residential Area, angzhi City or Textile City, Xiaozhai, Xi'an Stadium, Western High-Tech Zone, Xi'an Economic Development Zone, Qujiang Park, and Guangyuntan, respectively

Fig. 1 Map showing the sampling sites, Xi'an, Shaanxi, China

出主脉,然后作 2 条主脉的平行线使其恰好与叶片的左右边缘相切,最后作出 3 条平行线的垂线,分别测定左右半宽的程度。叶半周长测定时,在 ImageJ 中使用折线沿着叶片边缘勾勒出左右两侧叶尖至叶根的轮廓,点击‘分析—测量’,即可得到半周长值。在 ImageJ 中使用折线沿着叶片边缘勾勒出叶尖至叶根的轮廓,再顺着主脉回到起点构成一个封闭图形,点击‘分析-测量’,即可得到左右半面积的数值。

1.3 波动性不对称 FA 值的计算

利用式(1)计算叶的 FA,式中 L 为叶左侧的特征值(包括左半周长、左半宽、左半面积等), R 为叶右侧特征值(包括右半周长、右半宽、右半面积等), FA 为无量纲。其中分别用 FAW、FAP 和 FAA 表示叶宽、叶周长和叶面积的波动性不对称参数。

$$FA=\frac{|R-L|}{(R+L)/2}$$

(1)

2 结果与分析

2.1 叶半宽度、半周长和半面积的正态性分析

由于 FA 是从生物两侧完全对称的形态特征中

发生的随机偏差,其统计特点是左右两侧特征值(例如半周长、半宽、半面积)之差是均值为零的正态分布^[14]。利用 Kolmogorov-Smimov 检验对左半周长-右半周长、左半宽-右半宽、左半面积-右半面积的结果进行正态性检验;再根据箱式图剔除少量异常值后,对每个采样点剩余数据进行 Kolmogorov-Smimov 检验,结果显示半周长、半宽、半面积这 3 项指标的左右特征值之差均符合正态分布且均值为零($P>0.05$)(表 1),所以大叶女贞和小叶女贞叶片周长、宽、面积具有波动性不对称的特征。

2.2 不同采样点空气污染物浓度

大叶女贞和小叶女贞的叶寿命在 2 年左右,一般在 3 月初(初春)发新叶;因此采集的成熟叶片大致有 1 年的叶龄,可近似地认为是 2013 年 3 月初发的新叶发育而来。从 2013 年 3 月到 2014 年 5 月不同采样点的主要空气污染物浓度月均值见表 2。这期间的 SO_2 浓度最大值为样点 2 兴庆小区的 $43.91\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最小值为样点 3 纺织城的 $22.97\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,满足国家二级空气质量标准(GB3096-2012)的要求。 NO_2 浓度最大值为样点 2 兴庆小区的 $83.64\text{ }\mu\text{g}\cdot$

表 1 大叶女贞与小叶女贞半周长、半宽度、半面积的正态性检验

Table 1 The normality test of half-perimeter, half-width and half-area for *Ligustrum lucidum* Ait. and *Ligustrum quihoui* Carr.

参数 Parameter	大叶女贞 <i>L. lucidum</i>			小叶女贞 <i>L. quihoui</i>		
	半周长 Half-perimeter	半宽度 Half-width	半面积 Half-area	半周长 Half-perimeter	半宽度 Half-width	半面积 Half-area
有效样本 Number	393	393	393	401	401	401
正态均值 Normal Av.	0.002	0.029	−0.054	−0.029	−0.008	−0.051
正态标准差 Normal SD	0.622	0.162	1.211	0.253	0.117	0.363
K-S	0.586	0.740	0.766	0.998	1.1012	0.874
Asymp. Sig.	0.882	0.644	0.600	0.272	0.257	0.429

表 2 各采样点空气污染物浓度月均值

Table 2 Monthly average concentration of air pollutants in different sampling sites

采样点 Sampling site	空气污染物浓度月均值 Monthly average concentration of air pollutants/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)						
	SO_2	NO_2	CO	O_3		PM _{2.5}	PM ₁₀
				1 h 平均 1 hour average	8 h 平均 8 hour average		
1	30.21b	71.26c	43.07bc	30.87b	40.00ab	127.30b	123.82b
2	43.91a	83.64a	53.27a	37.44a	44.83a	127.64b	118.19b
3	22.97c	62.02c	47.28b	21.39c	29.19bc	117.61b	113.89bc
4	31.11b	61.63c	50.16a	32.89b	40.76ab	117.32b	125.10bc
5	34.24b	74.41b	48.27b	33.90b	41.35ab	101.38c	105.60c
6	30.96b	64.44c	48.16b	34.86b	41.24ab	139.00a	148.45a
7	35.28b	78.64ab	48.13b	33.32b	40.06ab	115.25b	122.56b
8	32.49b	58.05c	43.87bc	29.48bc	34.98b	129.60b	127.33b
9	36.19b	62.42c	42.29c	26.50c	33.22b	115.59b	120.58b

m⁻³,最小值为样点 8 曲江的 58.05 μg·m⁻³,各样点全部超过国家二级空气质量标准年均浓度 40 μg·m⁻³的要求,最大点兴庆小区超标 1 倍;由于是 NO₂ 交通污染的指示物质之一,说明交通污染是这些样点的主要污染来源。CO 浓度远远高于国家二级质量标准,分别是标准的 4~10 倍;O₃ 浓度满足二级质量标准要求。以 PM2.5 为代表的颗粒物浓度,远远高于二级质量标准的年均 35 μg·m⁻³,是标准的 3~4 倍。不同的污染物浓度在不同的采样点之间存在着显著的差异(表 2)。

2.3 不同采样点叶宽度、周长和面积的 FA 特征

大叶女贞和小叶女贞叶宽度、周长和面积的波动性不对称特征见表 3。对于大叶女贞而言,其叶周长 FA(FAP)最大值为样点 2(兴庆小区)的 0.067、最小值为样点 3(纺织城)的 0.033,平均为 0.051,样点之间具有极显著的差异($P=0.004$);其叶宽度 FA(FAW)最大值为样点 1(高压开关厂)的 0.094、最小值为样点 4(小寨)的 0.036,平均为 0.063,样点之间也具有极显著的差异($P=0.000$);其叶面积 FA(FAA)最大值为样点 7(经开区)的 0.140、最小值为样点 9(广运潭)的 0.046,平均为 0.082,样点之间同样具有极显著的差异($P=0.000$)。在大叶女贞叶的 3 个不同叶片 FA 特征参数中,FAA 的值最大,其次为 FAW,最小为 FAP,但这 3 个指标之间的相关性并不显著。

同时,对于小叶女贞来说,其叶周长 FA 最大的为样点 5(市体育场)的 0.067、最小的为样点 3(纺织城)和样点 4(小寨)的 0.035,平均为 0.045,样点

之间具有极显著的差异($P=0.004$);其叶宽度 FA 最大的为样点 1(高压开关厂)的 0.109、最小的为样点 9(广运潭)的 0.052,平均为 0.082,样点之间具有极显著的差异($P=0.000$);对于叶面积 FA 最大的为样点 1(高压开关厂)的 0.122、最小的为样点 4(小寨)的 0.080,平均为 0.102,样点之间具有极显著的差异($P=0.000$)。在小叶女贞的 3 个特征参数中,同样表现出 FAA 最大,其次为 FAW,FAA 最小,三者之间的相关关系同样不显著。

另外,对大叶女贞和小叶女贞的 FAP、FAW 和 FAA 三个指标进行成对 t 检验,发现 FAP 和 FAA 在两个物种间具有较明显差异($P=0.079$),而 FAW 在物种之间具有显著差异($P=0.047$)。

以上结果说明大叶女贞和小叶女贞叶宽度、周长和面积的波动性不对称特征对空气环境反应都很敏感,且以叶左右半面积的不对称程度受样点环境因素的影响较大;两树种各 FA 参数对环境的反应存在明显差异,并以叶宽度不对称程度表现更明显。

2.4 叶 FA 与空气质量之间的关系

对大叶女贞和小叶女贞叶片 FAP、FAW 和 FAA 三个指标与立地主要空气污染物浓度的相关性进行分析(表 4),无论是大叶女贞还是小叶女贞,仅周长的波动不对称性 FAP 都与空气中 SO₂ 的浓度达到了 5%显著水平的正相关,大叶女贞的 FAW 与空气中 CO 具有 5%水平上的负相关;其他指标之间的相关关系均不显著。但从整体角度来看,FAP 与大多数环境因子之间的相关性要高于 FAW 和 FAA,说明空气环境对叶的影响,有可能对叶周

表 3 不同采样点大叶女贞、小叶女贞的叶半宽度、半周长和半面积的 FA 特征

Table 3 The FA value of half-perimeter, half-width and half-area about *L. lucidum* and *L. quihoui* for different sampling sites

采样点 Sampling site	大叶女贞 <i>L. lucidum</i>			小叶女贞 <i>L. quihoui</i>		
	FAP	FAW	FAA	FAP	FAW	FAA
1	0.047±0.039b	0.094±0.063a	0.100±0.058b	0.037±0.026c	0.109±0.088a	0.122±0.107a
2	0.071±0.032a	0.048±0.031c	0.078±0.051c	0.062±0.040a	0.068±0.042c	0.088±0.081c
3	0.033±0.030c	0.059±0.037b	0.058±0.050d	0.035±0.024c	0.064±0.050c	0.106±0.055ab
4	0.036±0.033c	0.036±0.024d	0.075±0.052c	0.035±0.031c	0.077±0.072b	0.080±0.065c
5	0.052±0.037b	0.049±0.044c	0.066±0.049c	0.067±0.051a	0.093±0.068a	0.118±0.073a
6	0.067±0.059a	0.060±0.036b	0.109±0.071b	0.039±0.023c	0.096±0.060a	0.103±0.065b
7	0.069±0.038a	0.076±0.062ab	0.140±0.086a	0.039±0.025c	0.096±0.064a	0.105±0.065b
8	0.050±0.035b	0.063±0.045b	0.067±0.047c	0.042±0.036bc	0.081±0.069ab	0.093±0.068bc
9	0.067±0.063a	0.086±0.078a	0.046±0.031d	0.050±0.048b	0.052±0.040d	0.100±0.070b
平均 Average	0.051	0.063	0.082	0.043	0.082	0.102

注:FAP、FAW 和 FAA 分别表示叶周长、宽度和面积的 FA
Note:The FAP, FAW and FAA is leaf fluctuating asymmetry of half-perimeter, half-width and half-area, respectively

表 4 叶 FA 特征与空气质量之间的相关性

Table 4 The correlation analysis between FA value and air environmental quality								
树种 Species	指标 Index	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃ 1 h 平均浓度 O ₃ 1 hour average	O ₃ 8 h 平均浓度 O ₃ 8 hour average	PM _{2.5}	PM ₁₀
大叶女贞 <i>L. lucidum</i>	FAP	0.765 *	0.534	0.124	0.54	0.442	0.227	0.279
	FAW	−0.08	−0.007	−0.782 *	−0.328	−0.3	0.14	0.105
	FAA	0.084	0.46	0.203	0.499	0.498	0.284	0.441
小叶女贞 <i>L. quihoui</i>	FAP	0.690 *	0.548	0.305	0.423	0.399	−0.407	−0.517
	FAW	−0.141	0.275	−0.046	0.457	0.503	0.166	0.275
	FAA	−0.305	0.206	−0.45	−0.177	−0.096	−0.237	−0.23

长的影响大于其它。

3 讨 论

Kozlov 等^[15]对苏格兰松(*Pinus sylverstris*)的研究发现,在污染环境下即使其针叶的显微结构已经发生了明显的改变,但传统的生长速率、冠层透光强度以及叶失色绿等仍没有变化,而此时的叶长度和重量的波动性不对称指标与对照相比增长 40%和 30%,认为 FA 是灵敏的环境污染指示指标。Klisaric 等^[16]在刺槐(*Robinia pseudoacacia*)上的研究显示,污染区和对照区的 FA 具有显著的差异,刺槐的 FA 是一个有潜力的生物指示物。Shadrina 等^[17]发现白桦(*Betula platyphylla* S.)在化学和粉尘污染严重区域,叶的发育不稳定增加,FA 变化增大。因此,Retting 等^[18]认为 FA 提供了一个灵敏的可以反映低剂量胁迫的指标。但是,Wuytack 等^[11]在白柳上的研究发现 FA 对环境的变化并不敏感,他认为主要的原因可能与样本数量、白柳特性有关(白柳对环境胁迫不敏感);同时由于一些生理活动和形态变化能缓冲或减轻环境胁迫的影响,致使 FA 不敏感^[12]。本研究的 9 个采样点中,只有 NO₂ 和颗粒物污染物浓度超过了国家二级空气质量标准,同时采样调查过程中也没有发现大叶女贞和小叶女贞有明显的受害症状,但各个采样点间叶的 FAP、FAW、FAA 具有显著差异,说明这些指标可以较为灵敏地反映立地环境胁迫的危害。本研究中,大叶女贞和小叶女贞叶宽度、周长和面积的波动性不对称特征对空气环境反应都很敏感,且以叶左右半面积的不对称程度受样点环境因素的影响较大。叶片发育形成初生分生组织之后,不同区域生长速度出现了不同,远轴面长得快、近轴面长得慢,叶片向茎尖弯曲;同时伴随着近—远轴的不对称发育,叶片沿着中—一边轴向伸展,形成扁平的叶片^[19]。这一过程中,叶片的宽度和周长影响了叶面积的大小

和形状,叶面积对周长和叶宽的变异可能存在放大效应,致使大叶女贞和小叶女贞均表现出 FAA 最高。

遗传和环境因素是影响植物发育的主要形成机制,由于遗传产生的微小变异以及环境因素诱导的酶活性变化,会在不同层次上影响发育的稳定性^[20];而这种发育的非稳态化,可以缓冲不利条件对植物的伤害^[21],波动性不对称则表征了这种微小的偏差。由于环境条件是多因素的综合表现,城市的绿化植物除受空气环境监测的 SO₂、NO₂、O₃ 和各种颗粒物的影响之外,还受到了水分胁迫、热污染以及土壤污染的伤害,而这些胁迫也会对 FA 产生影响。在不同的立地环境中,植物叶片 FAP、FAW、FAA 的显著差异是这种综合环境因素协同效应的反映。Velickovic 等^[22]在车前草上的研究发现,即使同一植株的叶宽和叶脉宽度的波动性不对称值对环境的响应是不同的,说明了叶的部分 FA 特征可以表征为一些主导因素的影响。在本研究结果中,女贞叶片 FAW 和 FAA 与空气中 SO₂、NO₂、O₃ 和 PM₁₀、PM_{2.5} 颗粒物浓度的相关性不显著,仅仅 FAP 与空气 SO₂ 的浓度具有密切的正相关关系。这一方面可能由于空气中 O₃ 和 PM₁₀、PM_{2.5} 本身对女贞叶片的发育影响较小;另一方面城市环境中的大叶女贞和小叶女贞处于 N 素营养相对不足的环境,少量的 N 输入有利于生长发育而不出现胁迫,而植物对 S 的需求相对较少,其浓度较高时就易出现胁迫症状。如 Kozlov 等^[15]在苏格兰松上也发现 FA 与空气的 S 沉降有密切的关系。

环境对叶片 FA 的影响,主要通过资源和代谢物的分配来改变个体或群体的生理投资,叶 FA 的增加是生理投资分配的一个体现^[19]。但是,当植物完全适应了这种环境之后,其生理投资达到新的平衡,导致 FA 消失^[16]。因此,利用 FA 监测环境质量时,采用何种植物、植物叶的何种指标、样本数量以及植物年龄等均有待于进一步研究;如何建立 FA

与特征污染物的定量关系也应该是 FA 生物监测的关注点。

综上所述,在不同的城市环境条件下,大叶女贞和小叶女贞植物叶半周长、半宽度、半面积的波动性不对称特征存在一定的差异;同一环境下不同物种叶的波动性不对称特征也有较大差异;叶半周长的

波动性不对称与空气中的 SO₂ 浓度之间具有显著的线性关系。虽然植物叶的波动性不对称特征对不同环境条件具有敏感的反应,但存在物种的差异;同时植物叶的波动性不对称特征受到定居环境中各种因素的综合作用,建立叶的波动性不对称特征与空气中特征污染物的关系也是今后亟待研究的问题。

参考文献:

[1] PALMER A R, STROBECK C. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implication of non-normal distributions and power of statistical tests[J]. *Acta Zoologica Fennica*, 1992, 191: 57-72.

[2] FREEMAN D C, GRAHAM J H, EMLEN J M. Developmental stability in plants: symmetries, stress and epigenesis[J]. *Genetica*, 1993, 89: 97-119.

[3] MOLLER A P, SWADDLE J P. Asymmetry, Developmental Stability, and Evolution[M]. New York: Oxford University Press, 1997.

[4] GRAHAM J H, RAZ S, HEL-OR H, *et al.* Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications[J]. *Symmetry*, 2010, 2, 466-540; doi:10.3390/sym2020466.

[5] VELICKOVIC M, PERISIC S. Leaf fluctuating asymmetry of common plantain as an indicator of habitat quality[J]. *Plant Biosystems*, 2006, 140(2): 138-145.

[6] AMBO-RAPPE R, LAJUS D L, SCHREIDER M J. Heavy metal impact on growth and leaf asymmetry seagrass, *Halophila ovalis* [J]. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2011, 3(6):149-159.

[7] AMBO-RAPPE R, LAJUS D L, SCHREIDER M J. Translational fluctuating asymmetry and leaf dimension in seagrass, *Zostera capricorni* Aschers in a gradient of heavy metals[J]. *Environmental Bioindicators*, 2007, 2(2):99-116.

[8] MAL T K, UVEGES J L, TURK K W. Fluctuating asymmetry as an ecological indicator of heavy metal stress in *Lythrum salicaria*[J]. *Ecological Indicators*, 2002, 1(3): 189-195.

[9] KOZLOV M V, WILSEY B J, HAUKIOJA E. Fluctuating asymmetry of birch leaves increases under pollution impact[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33: 1 489-1 495.

[10] 张 浩,王祥荣. 城市环境胁迫下悬林木叶片发育稳定性及在环境指示中的应用研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 719-723.

ZHANG H, WANG X R. Leaf development stability of *Platanus acerifolia* under urban environmental stress and its implication for environmental indicator[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 719-723.

[11] WUYTACK T, WUYTS K, VAN D S, *et al.* The effect of air pollution and other environmental stressors on leaf fluctuating asymmetry and specific leaf area of *Salix alba* L. [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2 405-2 411.

[12] RAZ S, GRAHAM J H, HEL-OR H, *et al.* Developmental instability of vascular plants in contrasting microclimates at ‘Evolution Canyon’ [J]. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2011, 102(4): 786-797.

[13] CARRERAS H, CANAS M S, PIGNATA M L. Differences in responses to urban air pollutions by *Ligustrum lucidum* Ait. and *Ligustrum Lucidum* Ait. F. *Tricolor* (Rehd.) Rehd[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 93(2): 211-218.

[14] PALMER A R. Fluctuating Asymmetry Analyses: a Primer. Developmental Instability: Its Origins and Evolutionary Implications[M]. Springer Netherlands, 1994: 335-364.

[15] KOZLOV M V, NIEMELÄ P, JUNTILA J. Needle fluctuating asymmetry is a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) [J]. *Ecological Indicators*, 2002, 1: 271-277.

[16] KLISARIC N B, MILJKOVI C D, ARVAMOV S, *et al.* Fluctuating asymmetry in *Robinia pseudoacacia* leaves-possible *in situ* biomarker[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(22): 12 928-12 940.

[17] SHADRINA E, VOL’PERT Y, SOLDATOVA V, *et al.* Evaluation of environmental conditions in two cities of east Siberia using bio-indication methods (fluctuating asymmetry value and mutagenic activity of soils)[J]. *International Journal of Biology*, 2015, 7(1): 20-32.

[18] RETTING J E, FULLER R C, CORBETT A T. Fluctuating asymmetry indicates levels of competition in an even-aged poplar clone[J]. *Oikos*, 1997, 80: 123-127.

[19] QI J Y, WANG Y, YU T, *et al.* Auxin depletion from leaf primordia contributes to organ patterning[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(52): 18 769-18 774.

[20] VELICKOVIC M, T SAVIC. Patterns of leaf asymmetry changes in *Plantago major* (ssp. *major*) natural populations exposed to different environmental conditions[J]. *Plant Species Biology*, 2012, 27:59-68.

[21] PARSONS P A. Fluctuating asymmetry: a biological monitor of environmental and genomic stress[J]. *Heredity*, 1992, 68: 361-364.

[22] VELIČKOVIĆ M V. Reduced developmental stability in *Tilia cordata* leaves: effects of disturbed environment[J]. *Periodicum Biologorum*, 2010, 112(3): 273-281.

(编辑:裴阿卫)