

# 一些景观树对灾害天气事件的非对称响应<sup>\*</sup>

王 斐<sup>1</sup>, 张继权<sup>2</sup>

(1. 山东省林业科学研究院, 山东 济南 250014; 2. 东北师范大学 城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

**摘 要:** 2004–2008 年日本山口市的气候呈现出明显变化和波动的特点, 突出表现在 2004、2006 和 2007 年。夏季极端高温和强台风伴随着无雨和持续的干旱等类似的灾害天气事件诱发了许多乔灌木景观树明显的可视被害症状。用压力室法对北美枫香树叶的观测表明, 迎风面和被风面之间叶水势的差异来自于迎风面的叶、枝和树干对被风面的遮挡作用。因为台风或其他灾害天气事件持续地单向袭击树冠的一侧, 山口市的一些景观树种迎风面和被风面之间表现出明显的叶面积、树冠面积和 SPAD 值的差别。灾害天气事件袭击期间的自我遮挡和灾后恢复期间的不平衡生长成为山口市景观树木偏冠的两个主要起因。许多木本植物从末端到基部的脱水特性似乎是它们响应灾害天气事件的一种重要的机制。修枝可以人为地削减蒸腾表面积以维持植株水分平衡, 这使它成为一种修复被害树木的重要方式。

**关键词:** 景观树; 灾害天气事件; 偏冠; 自身遮挡; 非对称生长; 日本山口市

**中图分类号:** S761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–811X(2011)02–0005–06

对称性是正常生长的乔灌木枝叶和树冠结构发育的显著特征, 而且这种特征通常具有形态的遗传性<sup>[1]</sup>。然而, 不断增加的近期研究事实表明这种对称性仅表现为波动性的对称<sup>[2]</sup>, 树木只在持续不变的环境之中才发育对称的枝和树冠<sup>[3]</sup>。在某些环境条件下, 众多的内外因素阻止其对称性的发育。例如在有盛行风的地方, 树木由于风压而导致树冠变形<sup>[3–4]</sup>, 在近海岸地带的树冠变形被认为起因于盐雾危害<sup>[5]</sup>, 而在高山树线地带的变形树被认为是遭受机械摩擦、雪害或冰晶危害的结果。也有人认为强烈的风压伴随着严重的水分胁迫才是一些树木偏冠的主要原因<sup>[6]</sup>。事实上, 树木偏冠变形的原因往往是许多因素的综合作用, 这些因素的共同作用极大地降低了树木响应的临界值。从这种意义上讲, 持不同观点的研究人员在理解偏冠的原因方面各有其亮点所在。在研究树木变形或偏冠形成的历史中, 大量的研究聚焦于环境因子对树木的损害, 突出表现在追寻伤害的决定性因子<sup>[5]</sup>, 争议和冲突常常集中在几个物理或化学因素上面。但是, 自然环境中的树木通常受制于一系列生物或非生物因子, 表现出来的症状往往是树木对外界环境的响应, 且因遗传基础不同而异。对于那些树枝具有特殊的机械特性

的树种而言, 机械的驯化似乎对他们偏冠更重要<sup>[3]</sup>。对于那些盐敏感型的树种, 盐害似乎是非对称枝叶枯死的主要原因<sup>[7]</sup>。树木个体高大、空间结构复杂的特性常造成自我的遮挡效应。树冠无遮挡的部位或暴露于灾害袭击的部位受害更加严重。在水分胁迫下, 树冠外围或顶部, 裸露在外的树叶比树冠内部或下部的受害要重<sup>[8]</sup>。这种自我遮挡的持续常导致景观树明显的偏冠。在灾害天气事件袭击后的恢复期间, 不同部位的不对称生长或许是偏冠的另外一个成因。在众多的环境因子中, 直接或间接地明显改变树木响应特征的因素才应该是决定性的因素。

水分是生命的基础, 草本植物中水分占鲜重的绝大部分, 在木本植物结构中水分也占鲜重的 50% 以上<sup>[9]</sup>。水分参与其光合作用过程, 维持细胞的膨胀状态, 且具有调节温度和辅助养分运输等功能。在极端水分胁迫条件下, 许多树木能够以牺牲部分器官为代价来拯救其自身<sup>[10]</sup>, 诸如落叶、落枝、枯叶和枯枝等<sup>[8–9, 11–16]</sup>, 尽管不同植物种表现出不同的可缩性和多样性。地中海类型的夏季干旱和热带风暴是两种特殊的气象现象, 它们常常诱发植物或树木的强烈响应。类似的气象灾害事件对森林和树木的严重扰动可发生于世界

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2010–09–01

基金项目: 国家自然科学基金(41071326); 全球变化研究国家重大科学研究计划(2010CBP51102)

作者简介: 王斐(1959–), 男, 山东人, 博士, 研究员, 主要从事灾害气象学和树木生态生理学和光谱分析等非接触、非破坏检测手段等研究. E-mail: wf–126@126.com

许多地区。夏季高温和强台风伴随着无雨和持续的干旱可诱发景观乔灌木树种明显的可视反应,如枯叶、枯枝以及器官的脱落<sup>[15,17-18]</sup>。台风 0613 和 2007 年夏季干旱对山口市的影响尤为突出。强台风 0613 号袭击之时,在日本山口最大瞬间风速达到了 42.4 m/s,台风袭击期间的降水量仅有 26 mm,且在风速达到最大时几乎没有什么降雨,紧接着就是长达一个多月的少雨期。在 2007 年夏季干旱事件期间,降水量仅仅是常年的 61.2%。受其影响,周围的景观树有的表现出明显的可见症状。此类灾害天气事件持续地单向袭击树冠的一侧诱发了枝条的不平衡生长和偏冠。本文通过气象数据的分析、图像解析等,分析了日本山口市台风 0418、台风 0613 和 2007 年夏季干旱期间灾害天气事件的突出特点,并对一些景观树的非对称响应进行了研究,旨在展示在既没有盛行风存在也没有严重的盐雾影响下树木发生偏冠的事例。

## 1 材料与方法

### 1.1 气象数据和相关的指数

研究地处日本山口市,调查是沿榎野河流域进行的。本研究的一部分基于对山口测候所的日本全自动气象数据观测系统之数据的分析,其地理位置距海岸约 13 km。从中选取逐日气温、降水量和超过 33 m/s 的最大瞬间风速来计算 5 h(或 d)累算干燥度指数( $AD5$ ); 5 h(或 d)累算湿润度指数( $HD5$ ); 最大瞬间风速超过 33 m/s 之台风的强风指数( $GW7$ ); 3 个月的干燥度指数( $TMAD$ )以及干热风灾害指数( $HI$ )。它们分别由式(1)~(5)计算而来。

$$AD5_i = \sum_{j=1}^5 MT_{i+j} / \sum_{j=1}^5 PR_{i+j}, \quad (1)$$

$$HD5_i = \sum_{j=1}^5 PR_{i+j} / \sum_{j=1}^5 MT_{i+j}, \quad (2)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, 48(60)$  且台风袭击当天凌晨 1 时(7 月 1 日)  $i=1$ 。  $MT$  是 1 h(或 d)平均温度,而  $PR$  是 1 h(或 d)的降水量。

$$GW7_i = Guwd_i / 7, \quad (3)$$

式中:  $i=0418$  和 0613, 分别发生于 2004 年和 2006 年, 且  $Guwd$  是台风袭击期间超过 33 m/s 的最大瞬间风速。

$$TMAD_i = \sum_{j=1}^3 MMT_{i+j} / \sum_{j=1}^3 MPR_{i+j}, \quad (4)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, 10$  和在 1 月  $i=1$ ;  $MMT$  是月最大温度值;  $MPR$  是月降水量值。

$$HI = GW \times \sum_{i=1}^5 MT_i / 30 \times \sum_{i=1}^5 PR_i, \quad (5)$$

式中: 在台风袭击日  $i=1$ ;  $MT$  是日最大温度值;  $PR$  是日降水量值;  $GW$  是台风袭击期间的最大瞬间风速。

### 1.2 图像分析指数

乔灌木树种树冠垂直剖面的各种指数由图像分析法估测而来。目标树垂直剖面的图片在平地上用 CCD 数码相机(佳能 IXY6.0)拍摄。拍摄距离依树冠大小而定,使得树冠刚好充满摄像屏幕为准。拍摄位置的确定依照对目标树的观察以确保拍摄到准确的侧面像。然后,根据式(6)计算迎风面和被风面的树冠面积比( $CAP$ ),其中迎风面和被风面的划分依主干的中央轴为参照。

$$CAP = \frac{\text{树冠迎风面像素数}}{\text{树冠被风面像素数}}. \quad (6)$$

树冠绿色面积率( $CGAP$ )即树冠绿色部分和整个树冠剖面的像素比。测定之前,依据过渡色目视将树冠绿色和非绿色部位区分开来,在获取树冠绿色和非绿色部位的像素数后,用式(7)计算  $CGAP$ 。

$$CGAP = \frac{100 \times \text{绿色部位像素数}}{\text{整个树冠的像素数}}. \quad (7)$$

树冠迎风面和被风面之间单叶叶面积比( $LAR$ )是同一树冠内迎风面和被风面之单叶的平均像素数之间的比值。其计算应用式(8),所用的图像来自于平板扫描仪(佳能 d125u2)扫描的离体叶片。叶面积由 Photoshop 软件中读取的像素来表示,在获取像素值之前首先对图像进行处理以除去叶片以外的部分。

$$LAR = \sum_{n=1}^{30} lpw_n / \sum_{n=1}^{30} lpl_n, \quad (8)$$

式中:  $lpw_n$  是迎风面第  $n$  片树叶的图像像素数;  $lpl_n$  为被风面第  $n$  片树叶的图像像素数,  $N=1, 2, \dots, 30$ ; 叶片样本是无目的击落叶片后机械地选取的。

遭受灾害天气事件袭击后,偏冠变色和偏冠枯枝较常见于一些树种的树冠上<sup>[19]</sup>。这种偏冠变色和非对称枯枝由 Image-Tool 300 图像分析软件测得。活枝率( $LBP$ )为枝条活着部位的长度与枝条总长的比值,其计算参见式(9)。

$$LBP = 100 - (100 \times \sum_{i=1}^n la_i / \sum_{i=1}^n lt_i), \quad (9)$$

式中:  $la$  是枝条活着长度;  $lt$  是枝条总长度;  $n$  为测定的枝条总数。

### 1.3 叶片水势和叶绿素(SPAD)值

叶的水分状态是在山口大学的室内自然环境下测定的。北美枫香树的叶片水势用压力室(PMS600)于 2007 年 8 月 11 日一个晴好的大风天

测得。这天的 1 h 平均最大风速和最高气温分别是 7.1 m/s 和 31.7℃。迎风面和被风面各测定 10 叶, 测定在山口大学内进行, 样叶采取后立即进行测试。单叶的 SPAD 值是每叶 30 次重复的平均值, 它们来自于 SPAD-502 叶绿素计的无偏测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 灾害天气事件与北美枫香树的响应

2004-2008 年日本山口的气候多变, 伴随着一系列的灾害天气事件的发生, 诸如, 2004 年创记录地 10 次台风登陆日本列岛, 强风伴随着少雨的台风 0613 号以及 2007 年生长季持续的干旱少雨。

据观察, 在众多的气象因子中, 持续的干旱或少雨伴随着高温或强风常诱发树木的保护性反应。在 2004、2006 和 2007 年, 由于气候条件的差异, 景观树表现出不同的响应特征(图 1)。从 2004、2006 和 2007 年 10 月中旬北美枫香树的图像可见(图 1b), 2004 和 2006 年北美枫香树的绿色树顶与 2007 年的红或紫红的树顶形成鲜明的对比。在 2006 年北美枫香树的偏冠变色和落叶尤为显眼, 这与 2006 年的极高的灾害指数相对应(图 1a)。

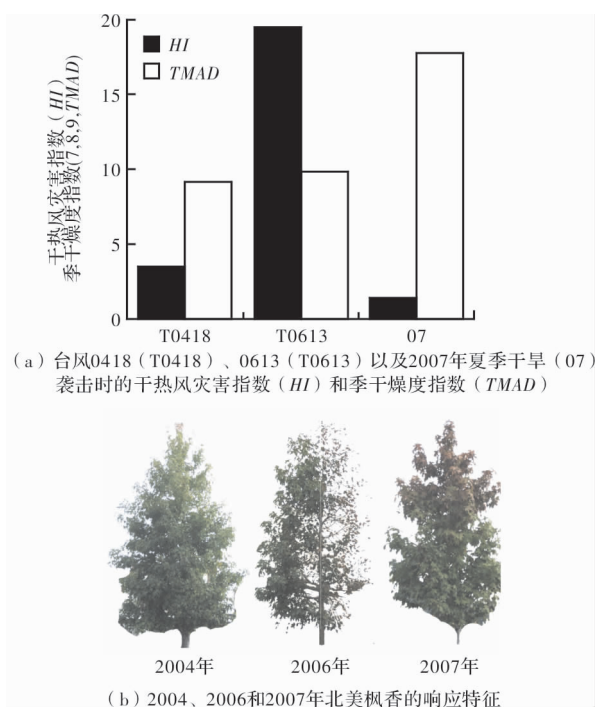


图1 北美枫香树在不同灾害天气事件中表现出不同的响应特征

在 2004 年, 多次台风袭击携带充足的雨水 (山口市为 2 224 mm) 倾泻到日本列岛。台风 0418 号超强的瞬间风速 (山口市 50.3 m/s) 也被笼罩在了一个巨大的湿润度峰值域中(图 2a), 这明显地

表现为较低的干热风灾害指数值(图 1a), 且直接导致许多景观树持续的营养生长, 这年秋季北美枫香树也没有明显的树梢变红现象(图 1b-2004)。相比之下, 2006 年的前 8 个月几乎与 2004 年相似, 北美枫香树持续的营养生长得益于丰沛的降水量。然而, 这年 9 月中旬台风 0613 号来袭期间, 无雨与强风峰值期相遇伴随着巨大的干热风灾害指数值的出现(图 1a、图 2b)。随后持续一个多月

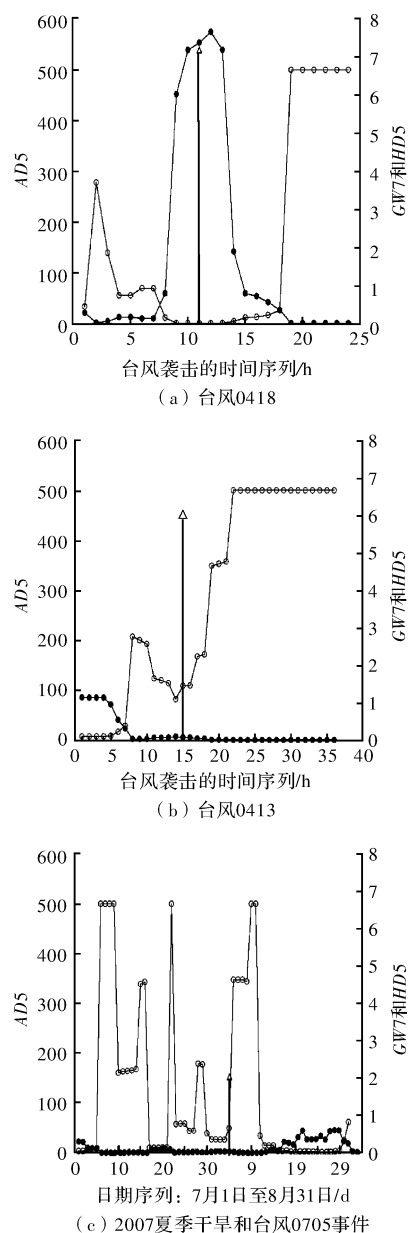


图2 台风 0418、0613 和 2007 夏季干旱期间的累算干燥度指数 (AD5, ○—○)、累算湿润度指数 (HD5, ●—●) 和台风 0418、0613 和 0705 期间的强风指数 (GW7; 标注为 ↑)

的干燥度峰值期无不增加了景观树的受害程度, 结果使北美枫香树的树冠从迎风面到被风面偏冠变色和叶枯。而且由于生长季湿润峰值突出, 秋季在树冠的被风面依然未见到树梢变红的现象

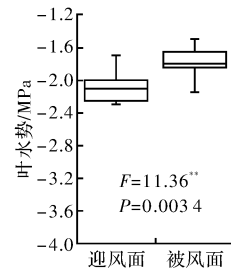
(图 1b-2006)。2007 年尽管没有强台风袭击日本山口,持续的高温干旱天气,特别是在 7-9 月中众多干燥峰值的出现(图 1a、图 2c)诱发北美枫香树秋季从顶部向下的非对称地树叶变红(图 1b-2007)。据观察,这种偏冠响应与干热风灾害指数相吻合(图 1a)。与台风 0613 相比,台风 0418 袭击期间的强降水抵消了超强风对景观树的危害,在此期间的干热风灾害指数值也较低(图 1a-T0418, T0613)。所以在台风 0418 袭击山口后,未发现从迎风面到被风面偏冠变色和枯叶的北美枫香树(图 1a、1b-2004)。可以认为 2007 年夏季较高的干燥度指数值(图 1a-07)成为北美枫香树树梢变红的重要诱因,而 2004 年和 2006 年的强降水抵消了夏季热波的影响。

## 2.2 一些景观树对台风 0613 号的偏冠响应

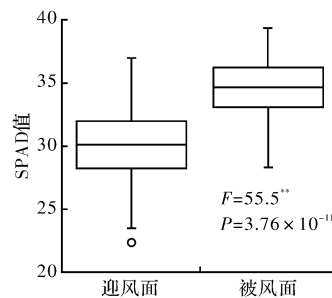
在 2007 年 8 月 11 日,一个夏季干热多风的天气中,平均最大风速 7.1 m/s,最高气温 31.7℃。在此条件下北美枫香树的迎风面和被风面的树叶出现不同的水势(图 3a),迎风面和被风面的水势比值( $\Psi_w/\Psi_L$ )为 0.86。据观察,干热风袭击期间迎风面枝叶和树干遮挡效应使被风面叶片几乎处于静止状态。尽管迎风面的叶片发生萎蔫,而被风面的叶片则保持膨胀状态。两天后,随着这次大风天的结束,迎风面和被风面的水势差消失,且没有看到明显的可见症状的发生。然而,超强风伴随着少雨台风 0613 的袭击却诱发同一棵北美枫香树迎风面树叶的焦枯以及由此而致的偏冠变色。即使到翌年春季树冠迎风面和被风面的树叶依然存在着 SPAD 值的差异(图 3b)。

2004-2008 年期间,在日本山口灾害天气事件对景观树的伤害没有能比得上台风 0613 号的。台风 0613 号袭击之后,在许多银杏树的迎风面看到了叶焦枯现象。迎风面和被风面焦枯叶片的数量和程度的差异使得该树种表现出明显的偏冠变色。不仅如此,从海岸到内陆也观测到了银杏树偏冠变色的区域变化(图 3c, ●—●)。在台风 0613 号袭击之后,距海岸不同距离的银杏树表现出明显的枝条回枯差异(图 3c, ○—○),而枝条回枯似乎是银杏树偏冠的另一个重要原因。若依照阈值曲线趋于稳定的标准来判断,枝条回枯的银杏树主要集中在距海岸线 8km 以内,尽管在距海岸 8 km 以外仍然可以看到一些生长在限制性立地上的、活力低下的银杏树出现抽枝死亡。图 3c 集合了树冠绿色面积率(CGAP)和活枝率(LBP)曲线,显然枝条的枯死和叶枯之间存在明显的地域

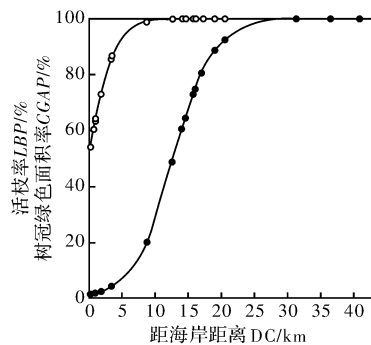
差异。这意味着即使整个树冠的树叶均焦枯的银杏树翌年仍有发芽展叶的。



(a) 2007年8月11日观测到的一株北美枫香树迎风面和被风面树叶的水势差别 ( $n=10$ )



(b) 台风0613袭击半年后依然观测到了该树迎风面和被风面的SPAD值的显著差别



(c) 台风0613号袭击后银杏树活枝率(LBP)与海岸距离的关系(○—○), 树冠绿色面积率(CGAP)与海岸距离之间的关系(●—●)

图3 台风 0613 等极端天气事件期间北美枫香等树种的非对称响应

## 2.3 台风 0613 号袭击后一些景观树的非对称性生长

树木生长势在很大程度上与树干、枝叶和芽的生物量累积有关,这直接反映它们的健康状况,包括他们获取水分和营养等的能力<sup>[20-21]</sup>。通常表现于不同的性状之中,如微管系统的发育程度特别是乔灌木树种恢复期的叶面积等等。台风 0613 号袭击后变色的银杏树,尽管大部分都展出了新叶,然而对其单叶叶面积比值(LAR)的观测表明迎风面和被风面之间存在着统计学有意义的差异,甚至发生在远离海岸 10 km 以外的银杏树上(图 4a,未修枝)。然而,这种差异在那些台风 0613 号袭击后不久进行强度修枝(仅留下一个约有几十年生的主干)的植株表现并不明显(图 4a,修

枝)。北美枫香街路树在台风 0613 号袭击之前当年修枝和没有修枝(图 4b)的植株其迎风面和被风面的树冠面积比明显地不一样。显然, 由于修枝而造成的根茎比的增加确保为新生枝条提供充足的水分。减少他们内部的资源竞争以至于在台风 0613 号袭击之后看不到显著的树冠非对称性。因此, 这表明相对资源的限制导致受伤严重的迎风面枝条在资源竞争中处于相对劣势, 从而诱导出它们的偏冠生长发育。

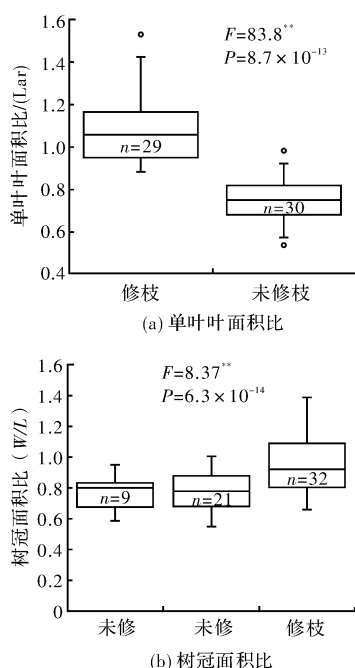


图4 修枝与否对银杏单叶和树冠的迎风面和背风面对称性的影响

## 2.4 一些景观树偏冠的典型特征

与海岸边和树线上的景观树不同, 在研究范围内的景观树中几乎看不到一边倒的旗形树, 因为此地几乎没有盛行风和盐雾的发生。然而, 在强台风等灾害天气事件的影响下, 从树冠一侧到另一侧或者从顶部到基部的偏冠树不难看到。如果水平地依树干中轴和垂直地依树冠中央线为基准把树冠区分成四个象限, 最典型的特征或许是树冠各象限之间的差异。由于台风的袭击和夏季热波的作用, 覆盖面积最小的当属第一象限; 而覆盖最大的则为第三象限, 这当然是来自于迎风面和上部枝条的遮挡作用。图 5 中的银杏、水杉和北美枫香树就是这种典型的景观树偏冠特征的实例。除此之外, 笔者还看到一些常绿灌木树之迎风面和被风面的单叶叶面积之间存在着显著差异, 特别是在第一和第三象限之间。在一些限制性立地条件上甚至落叶树种也可以看到这种不对称性。

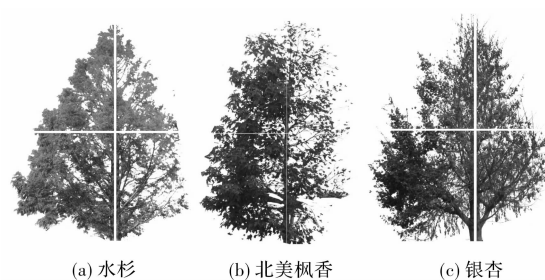


图5 三种落叶树偏冠的典型事例

## 3 讨论

灾害天气事件对树木的伤害往往通过改变树木的内在状态来实现。除了机械损伤以外, 通常认为风对树木的损害在于诱导水分亏缺<sup>[6,22-23]</sup>, 也有人认为盐害同样通过诱导水分胁迫危害树木<sup>[24-25]</sup>, 甚至机械摩擦也被认为是通过减少叶表皮失水的阻力形成危害的<sup>[26]</sup>。丰沛的降水不仅可以为土壤系统提供足够的补充水源, 而且改变空气的蒸气压、减少蒸发蒸腾强度。在强台风袭击之时, 降水防止植物或树木因脱水而死亡。修枝直接地降低了蒸腾表面积, 增加树木的根茎比, 从而保持其水分的平衡。因此, 修枝后的树木能承受得住强台风和夏季热波的袭击则不足为奇。在许多限制性立地条件下, 如石质山地、瘠薄沙地和根系生长受限地等, 水分和营养的匮乏通常是树木对极端环境做出强烈反应的主要原因。增温本身也倾向于通过影响饱和水蒸气密度而增加蒸腾强度<sup>[27]</sup>, 且加大水分胁迫的强度。因此, 不难理解许多景观树从遭受袭击到可见的受害症状出现往往有个响应的过程<sup>[28]</sup>。

事实上, 由这些因子引发的症状常具有一些共性, 像叶尖焦枯、枝条回枯以及器官脱落<sup>[15,17,29]</sup>等。有倾向表明在强烈和急性的胁迫状态下, 许多景观树对极端环境做出的响应是从顶端到基部, 例如叶尖、小枝尖、树冠顶部等远离水源和营养源的部位以及低活力的部位。在极端致命的环境中, 许多树种似乎都具有拯救自己的生命以牺牲局部末梢, 甚至使用超敏感反应似的 (HR-like) 手段<sup>[16]</sup>。在极端环境条件下, 许多树木在伤及其主体之前迅速削减部分资源消耗器官或组织。

在 2004、2006 和 2007 年间, 有迹象表明短期的地中海类型的高温干旱和超强台风的袭击有可能导致对景观树木的伤害, 特别是那些生长在限制性立地条件的植株, 即使在山口这个降水量达

1 800多毫米的湿润地区。当袭击伴随着持续的干旱期时,这种伤害则会更加严重。据调查,台风袭击时瞬间风速达到最大而没有降水且伴随着持续的少雨天气是诱发树木或作物焦枯的一种主要形式。

在遭受强热带风暴袭击之时的自我遮挡使得树冠被风面受影响较轻。在恢复生长期的资源竞争导致树冠被风面生长更快,从而使景观树发生偏冠。但是,如果在较为适宜环境条件下,没有后续的极端事件的影响,受害较轻之树木的迎风面能够恢复如初。据观察,景观树常接连不断地遭受灾害天气事件的袭击。经常是还没有从一次袭击之中完全恢复过来第二次袭击又发生了。持续的伤害导致这些景观树难以有效地防御来自生物的和非生物的伤害,从而诱使他们的活力下降或畸形甚至衰老和枯死。正是这种持续地对同一植株的单向伤害导致他们的偏冠。

修枝特别是全面修枝直接增加其根茎比,减少器官或组织之间的资源竞争,提高了景观树应对强台风的能力。事实上,在日本山口市树木修枝业已成为当地一种流行的景观树管理方式,且造型树多种多样。业已证明修枝是一种修复偏冠和重造树形的有效方法。

## 参考文献:

- [1] Greulach V A. Plant structure and function [M]. New York: Collier - Macmillian Publishers, 1973: 525 - 528.
- [2] Kozlo M V. Are fast growing birch leaves more asymmetrical [J]. OIKOS, 2003, 101: 3.
- [3] Lawrance D. Some feature of the vegetation of the Columbia river Gorge with special reference to asymmetric to forest trees [J]. Ecological Monographs, 1939, 9: 217 - 257.
- [4] Noguchi Y. Deformation of trees in Hawaii and its relation to wind [J]. J Eco, 1979, 67: 611 - 618.
- [5] Boyce S G. The salty spray community [J]. Eco. Monograph, 1954, 24(1): 29 - 67.
- [6] Wardler P. Engelmann spruce (*Picea Engelmannii* Engel.) at its upper limits on the front range, Colorado [J]. Ecology, 1968, 49(3): 483 - 495.
- [7] Van Der Valk A G. Environmental factors controlling the distribution of forbs on coastal foredunes in Cape Hatteras National Seashore [J]. Canadian Journal of Botany, 1974, 52: 1057 - 1073.
- [8] Kozlowski T T. Water supply and leaf shedding [M]//Water deficits and plant growth. New York: Academic Press, 1976: 191 - 222.
- [9] Kramer P J. Water relation of plants [M]. New York: Academic Press, 1983: 187 - 213.
- [10] Tyree M T, Zimmermann M H. Xylem structure and the ascent of sap [M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 174.
- [11] Orshan G. Surface reduction and its significance as a hydroecological factor [J]. J Ecol, 1954, 42: 442 - 444.
- [12] Addicott F T, Lyon J L. Physiological ecology of abscission [M]//Kozlowski T T. Shedding of plant parts. New York: Academic Press, 1973: 85 - 119.
- [13] Addicott F T. Abscission [M]. London: University of California Press, 1982: 205 - 207.
- [14] Yapp R H. *Spiraea Ulmaria* and its bearing on the problem of xeromorphism in marsh plants [J]. Ann Bot, 1912, (2): 815 - 870.
- [15] Kozlowski T T. Shedding of plant parts [M]. New York: Academic Press, 1973: 1 - 117.
- [16] Günthardt Goerg M S, Vollenweider P. Linking stress with macroscopic and microscopic leaf response in trees, New diagnostic perspectives [J]. Environ Pollut, 2007, 147: 467 - 488.
- [17] LIU Y B, ZHANG T G, LI X R, et al. Protective mechanism of desiccation tolerance in *Reaumuria soongorica*: Leaf abscission and sucrose accumulation in the stem [J]. Science in China Ser C: Life Sciences, 2007, 50(1): 15 - 21.
- [18] Millington W F, Chaney W R. Shedding of shoots and branches [M]//Kozlowski T T. Shedding of plant parts. New York: Academic Press, 1973: 149 - 204.
- [19] Frey B R, Lieffers V J, Hogg E H, et al. Predicting landscape patterns of aspen dieback: mechanisms and knowledge gaps [J]. Can J For Res, 2004, 34: 1379 - 1390.
- [20] Robichaud E, Methven I R. Tree vigor and height growth in Black Spruce [J]. Trees, 1991, 5: 158 - 163.
- [21] Maguire D A, Kanaskie A. The ratio of live crown length to sapwood area as a measure of crown sparseness [J]. Forest Science, 2002, 48(1): 93 - 100.
- [22] Whitehead F H. Experimental studies of the effect of wind on plant growth and anatomy [J]. New phytol, 1963, 62: 80 - 85.
- [23] Maki T, Suzuki Y, Kamoda F, et al. Meteorological disaster in agriculture and the countermeasure [M]. Tokyo: Yokendo press, 1991: 110 - 137.
- [24] Munns R. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses [J]. Plant, Cell and Environment, 1993, 16: 15 - 24.
- [25] Pammenter N W, Smith V R. The effect of salinity on leaf water relations and chemical composition in the sub - Antarctic tussock grass *Poa cookii* Hook F [J]. New Phytologist, 1983, 94: 585 - 594.
- [26] Grace J. The effect of wind and a reduced supply of water on the growth and water relations of *Festuca arundinacea* Schreb [J]. Ann Bot, 1982, 49: 217 - 225.
- [27] Fitter A H, Hay R K M. Environmental physiology of plants [M]. New York: Academic Press, 2002: 162 - 190.
- [28] Rust S, Roloff A. Acclimation of crown structure to drought in *Quercus robur* L.: the abscission zone and its physiological consequences [J]. Basic and Applied Ecology, 2004, 5: 293 - 299.
- [29] Treshow M. Environment and plant response [M]. McGraw - Hill Publications in the Agricultural science, 1970: 22 - 34.