



高温热浪对亚热带园林植物危害的调查分析

柏晓瑜, 林韶娟, 郑城浩, 刘凯良, 叶祖云, 王振华

引用本文:

柏晓瑜, 林韶娟, 郑城浩, 等. 高温热浪对亚热带园林植物危害的调查分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2025, 33(1): 57–64.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4854>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

横县野生种子植物区系及与附近地区的比较研究

Flora Characteristics of Wild Seed Plants in Hengxian County and Its Comparison with Neighboring Areas

热带亚热带植物学报. 2020, 28(6): 615–623 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4163>

广州市植物多样性现状调查与分析

Investigation and Analysis of Plant Diversity in Guangzhou

热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 229–243 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4241>

华南地区裸子植物与被子植物季节性水分利用的比较研究

Comparative Studies on Seasonal Water Use of Gymnosperms and Angiosperms in South China

热带亚热带植物学报. 2020, 28(5): 463–471 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4179>

寄主植物的功能性状对桑寄生寄主专一性的影响初探

Preliminary Studies on Effects of Host Functional Traits on Host Specificity of Mistletoe Species

热带亚热带植物学报. 2019, 27(2): 187–195 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3936>

南亚热带磷限制水库中浮游植物群落对氮磷比变化的响应

Responses of Phytoplankton Communities to N/P Ratio Changes in Phosphorus-limited Subtropical Reservoir in Southern China

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 20–30 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4250>

向下翻页，浏览PDF全文

高温热浪对亚热带园林植物危害的调查分析

柏晓瑜, 林韶娟, 郑城浩, 刘凯良, 叶祖云, 王振华*

(宁德师范学院生物科学与工程学院, 福建省特色药用植物工程技术研究中心, 福建 宁德 352100)

摘要: 近年来, 全球高温热浪事件发生频次显著增加, 影响范围和持续时间逐渐扩大。持续的高温热浪会严重抑制植物的生长, 导致植物的枯萎甚至死亡。通过实地调查, 研究高温热浪对 105 种亚热带园林植物生长的影响, 并按照植物功能类群和产地来源分析植物的响应程度。结果表明, 植物类群和习性影响了植物对高温热浪的响应结果, 高温热浪下裸子植物的枯萎率显著高于被子植物, 其中 35.71% 的裸子植物严重受害, 而被子植物严重受害的比例仅为 6.59%; 落叶植物的枯萎率显著高于常绿植物, 其中 21.21% 的落叶植物严重受害, 而常绿植物仅 5.17% 严重受害。该研究为高温热浪下亚热带植物的保护和栽培管理指明了方向, 同时提供了可实施的科学建议。

关键词: 高温热浪; 亚热带植物; 功能类群; 枯萎

doi: 10.11926/jtsb.4854

CSTR:32235.14.jtsb.4854

Investigation Analysis of Hazards of High Temperature and Heat Wave to Subtropical Garden Plants

BAI Xiaoyu, LIN Shaojuan, ZHENG Chenghao, LIU Kailiang, YE Zuyun, WANG Zhenhua*

(School of Biological Science and Engineering, Ningde Normal University, Engineering Technology Research Center of Characteristic Medicinal Plants of Fujian, Ningde 352100, Fujian, China)

Abstract: In recent years, the frequency of global heat wave events has increased significantly, and the impact scope and duration have gradually expanded. Continuous high temperature and heat wave will seriously inhibit the growth of plants, resulting in plant wilt and even death. The effects of high temperature and heat wave on the growth of 105 species of subtropical garden plants were studied through field investigation, and the response degree of plants was analyzed according to plant functional groups and origin. The results showed that plant groups and habit affected the response to high temperature and heat wave. The wilt rate of gymnosperms was significantly higher than that of angiosperms under high temperature and heat wave, and 35.71% of gymnosperms suffered serious damage, while only 6.59% of angiosperms suffered serious damage. The blight rate of deciduous plants was significantly higher than that of evergreen plants, which 21.21% of deciduous plants were seriously damaged, and did only 5.17% of evergreen plants. Therefore, it was pointed out the direction for the protection and cultivation management of subtropical plants under high temperature and heat wave, and provided practical scientific recommendations.

Key words: Heat wave; Subtropical plant; Functional group; Wilting

近年来, 气候变化已经成为影响自然生态系统和人类社会的一个主要因素^[1]。在气象学上, 把连

续 3 d 及以上的日最高气温都超过 35 °C 的高温天气过程称为高温热浪天气^[2]。随着全球气候变化, 高

收稿日期: 2023-10-09

接受日期: 2023-12-04

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金项目(2021L3030); 福建省自然科学基金项目(2021J05256); 宁德师范学院科研项目(2022ZX01, 2021FZ03, 2020Y09); 福建省特色药用植物工程技术研究中心学生科研项目(PP2022014)资助

This work was supported by the Project for Science and Technology Development of Central Guidance Local (Grant No. 2021L3030), the Project for Natural Science in Fujian (Grant No. 2021J05256), the Project for Science Research of Ningde Normal University (Grant No. 2022ZX01, 2021FZ03, 2020Y09), and the Project for Student Research of Engineering Technology Research Center of Characteristic Medicinal Plants of Fujian (Grant No. PP2022014).

作者简介: 柏晓瑜(2001 年生), 女, 研究方向为植物生态学。E-mail: 2091835356@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: eco_zhwang@163.com

温热浪事件频发,正逐渐成为严重的气象灾害之一,并越来越引起人们的广泛关注^[3]。IPCC 第六次评估报告指出,自 20 世纪 50 年代以来,高温热浪强度和频次显著增加,持续时间延长,并且在未来全球气候进一步变暖背景下,预计高温热浪的频率和强度将在 21 世纪持续增加^[4-5],成为新常态事件。2022 年夏季,我国多地出现持续高温天气,多个地区最高气温突破历史极值^[6]。

研究表明,当环境温度高于植物适宜生长温度时,将会影响植物的光合作用和蒸腾作用等生理过程^[7-9]。持续高温会导致植物光合作用关键酶失活,光系统 II 光化学的最大量子产量和产量值降低,从多种途径抑制植物光合作用的进行^[7,10]。研究表明,随着温度的升高,植物的水分利用效率下降,蒸腾速率增强,易造成植物严重失水及导管栓塞化现象^[8,11]。研究表明叶片对气候变化较为敏感,尤其是在高温下可能不利于裸子植物的生存^[12]。高温热浪会影响植物的各项功能,导致叶片容易脱落,降低植物的生长速度,改变植物的生物量分配^[13],引起一些植物死亡,最终影响生态系统的结构和功能^[14-15]。面对极端霜冻气候,常绿木本植物的抗冻性强于落叶木本植物^[16]。植物受到干旱胁迫后,较被子植物,裸子植物应对干旱表现出了更强的抵抗力^[17]。高温热浪下,植被的光合作用减弱甚至停滞,而呼吸作用增加,从而减少生态系统碳吸收。在 2003—2013 年间亚欧地区的高温热浪使当地的初级生产力降低并减少了生态系统的碳汇^[18-19]。目前高温热浪对植物的影响多集中于生理生化方面的研究,或者在生态系统生产力方面的研究,在物种尺度上亚热带地区不同植物生长对高温热浪的响应仍不清楚。

本研究以亚热带地区园林植物为调查对象,通过调查不同物种植物在持续高温热浪下形态特征的变化,研究高温热浪对不同植物生长的影响差异,并探究植物对高温热浪的响应是否与不同植物功能类群和产地来源有关,以期在高温热浪下科学合理进行园林植物维护提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 研究地点

调查地位于福建省宁德市,该地区属亚热带季风气候,年平均气温 17.5℃;降水充沛,年均降水量 1 811.2 mm,降水日数 178 d,无霜期 272 d;夏有酷暑,最热月为 7 月,平均气温 26.8℃,极端最高气温 43.2℃。选择 3 个地点进行调查,分别是宁德市北岸公园(119.575° E, 北纬 26.652° N)、镜台山公园(119.544° E, 26.683° N)、宁德师范学院东桥校区(119.599° E, 26.662° N)。2022 年 7 月、8 月,中国大部分地区经历了罕见的高温热浪,本研究地区同样经受了打破历史记录的极端高温天气,导致大量植物枯萎,甚至死亡。调查区域气象数据下载于国家气象信息中心数据(<http://data.cma.cn/>),统计 2019—2022 年每年 7 月—8 月日最高温超过 35℃ 的高温天数,结果分别为 6、18、13、49 d。2022 年的高温天数明显高于 2019—2021 年同期高温天数,甚至大于这 3 年同期高温天数总和。

1.2 植物高温响应程度划分标准

根据前人^[16,20]研究,本文综合依据植物的叶片和枝条的枯萎率对高温热浪的响应情况,将受害程度分为 4 个等级:健康、轻微、中度和严重(表 1)。

1.3 方法

2022 年 7 月、8 月严重的高温热浪之后,在 9 月中下旬,采用实地调查法,观察 3 个地点每种植物的生长情况,由 3 位调查人员分别估算每种植物的枯萎率并计算平均值,同时拍照记录调查的每种植物。根据高温热浪后每种植物的生长响应情况,把所有植物的受害情况进行等级划分。

全部调查完毕后,对 3 个地点调查的植物响应情况从不同植物功能类群、产地来源等方面分类。根据《中国植物志》的植物类群情况将所调查植物分为裸子植物和被子植物。依据植物生活型不同,将全部植物分为草本植物和木本植物 2 类,其中将竹类植物归在草本植物,木本植物依据不同叶习性

表 1 植物高温响应程度等级划分标准

Table 1 Classification criteria of plant high temperature response degree

等级 Degree	枯萎率 Wilt rate /%	状态 Status
健康 Health	[0, 5)	植物叶片整体上几乎没有受害,长势良好
轻微 Slight	[5, 30)	植物叶片整体上较少枯萎
中度 Moderate	[30, 70)	植物叶片整体上较多枯萎
严重 Severity	[70, 100]	植物叶片枯萎很多,较多枯枝,个体甚至死亡

分为常绿植物和落叶植物。根据《中国植物志》记录的原产地是否在福建省及其周边省份(台湾省、广东省、江西省和浙江省),将所调查植物分为本土种植物和引进种植物。

采用 SPSS 27.0 软件的 t 检验(t -test)分析植物类群间枯萎率的差异显著性,使用卡方检验(χ^2 -test)分析植物对高温热浪的响应等级是否与多个植物功能类群和产地来源等因素有关。

2 结果和分析

2.1 高温热浪下植物生长状况

本研究总共调查了持续高温热浪影响下的 48 科

105 种植物(附录 1),其中裸子植物 14 种,被子植物 91 种,分别占总种数的 13.33%、86.67%;常绿植物 58 种,落叶植物 33 种,分别占 55.23%、31.43%;草本植物 14 种,木本植物 91 种,分别占 13.33%和 86.67%;本地种 57 种,引进种 48 种,分别占 54.29%、45.71%。由图 1 和附录 2 可见,不同植物在高温热浪下的受害情况不同,很多植物的叶片变黄、卷曲,严重者叶片大量掉落,仅剩枯枝,个体甚至干枯死亡,造成极大的破坏。在调查的 105 种植物中,健康植物有 23 种,占 21.90%;其余 82 种(78.10%)植物中轻微受害的 41 种、中度受害的 30 种、严重受害的 11 种,分别占 39.05%、28.57%、10.48%。有些物种仅某些个体干枯死亡,但整个群体没有完全死亡。



图 1 高温热浪后植物的生长情况。A~C: 健康; A: 糖胶树; B: 蓝花草; C: 朱缨花; D~F: 轻微受害; D: 棕竹; E: 葱莲; F: 鹅掌楸; G~I: 中度受害; G: 枫香树; H: 海桐; I: 山茶; J~L: 严重受害; J: 杜鹃; K: 红花檵木; L: 刺柏。

Fig. 1 Growth status of plants after high-temperature and heat wave. A~C: Health; A: *Alstonia scholaris*; B: *Ruellia simplex*; C: *Calliandra haematocephala*; D~F: Slight; D: *Rhapis excels*; E: *Zephyranthes candida*; F: *Liriodendron chinense*; G~I: Moderate; G: *Liquidambar formosana*; H: *Pittosporum tobira*; I: *Camellia japonica*; J~L: Severity; J: *Rhododendron simsii*; K: *Loropetalum chinense* var. *rubrum*; L: *Juniperus formosana*.

2.2 不同植物类群的受害情况

根据植物的科属分类,重点统计调查物种数含 3 种及以上的科,不同科植物对高温的抵抗力大不相同(图 1)。柏科(Cupressaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、杜鹃花科(Ericaceae)和无患子科(Sapindaceae)受害较严重,超过一半的物种受到中度或严重伤害。一些科的植物受害轻微,甚至没有受到伤害,如豆科(Fabaceae)、禾本科(Poaceae)、桑科(Moraceae)和棕榈科(Arecaceae)。而樟科(Lauraceae)、木兰科(Magnoliaceae)、桃金娘科(Myrtaceae)植物,尤其是樟科植物在经历高温热浪后,均健康生长。

从图 2: A 可见,高温热浪对裸子植物和被子植物的危害情况有显著差异($t=-3.35$, $df=103$, $P=0.001$)。从图 2: B 可见,高温热浪后,仍健康生长的裸子植物为 0,即所调查的裸子植物都受到了高

温热浪的影响,轻度受害的 28.57%,中度受害和严重受害的分别为 35.71%和 35.71%; 25.27%的被子植物仍健康生长,轻度受害的 40.66%,中度受害和严重受害的分别为 27.47%和 6.59%。裸子植物的整体受害程度较被子植物更高($\chi^2=14.10$, $df=3$, $P=0.003$)

2.3 不同叶习性植物的受害情况

从图 2: C 可见,高温热浪对常绿植物和落叶植物的影响存在显著差异($t=88$, $df=103$, $P=0.04$)。从图 2: D 可见,高温热浪后,常绿植物中健康生长的占 31.03%,受到轻微、中度、严重损伤的分别占 37.93%、25.86%、5.17%; 而落叶植物中健康生长的占 12.12%,受到轻微、中度、严重损伤的分别占 30.33%、36.36%、21.21%。统计结果表明落叶植物受害程度更高($\chi^2=9.17$, $df=3$, $P=0.03$)。

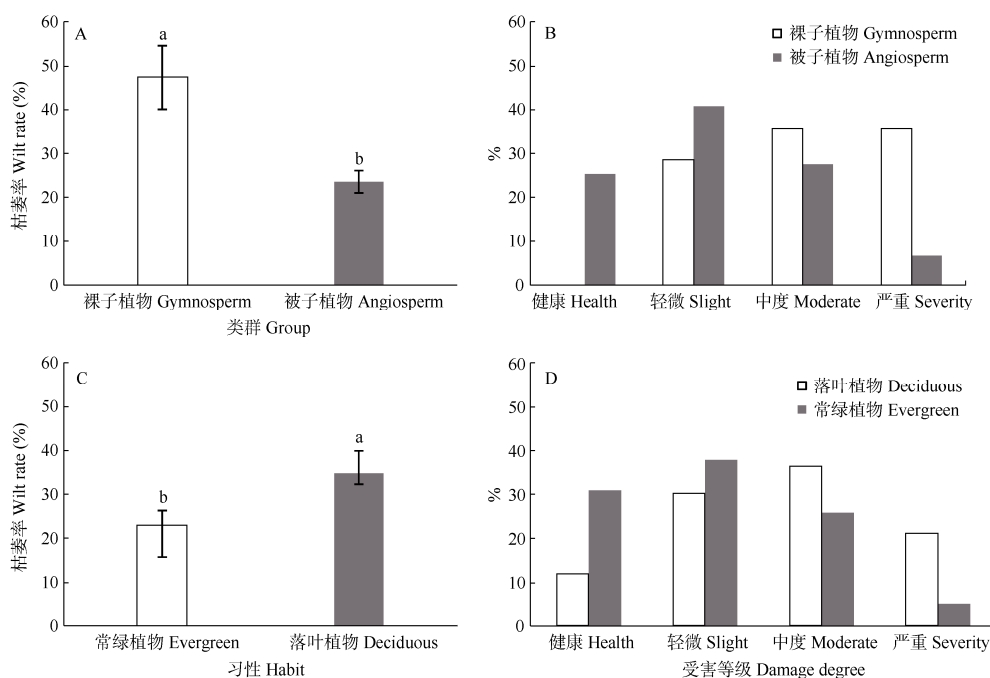


图 2 不同植物类群(A, B)和叶习性(C, D)的受害状况。柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Fig. 2 Victimization of different plant groups (A, B) and leaf habit (C, D). Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

2.4 不同生活型植物的受害情况

从图 3: A 可见,高温热浪对木本植物和草本植物的枯萎率没有显著差异($df=103$, $t=-0.54$, $P=0.59$)。从图 3: B 可见,高温热浪后,健康生长的草本植物占 7.14%,受到轻微、中度、严重损伤的分别占 64.29%、21.43%和 7.14%。健康生长的木本植物占 24.18%,受到轻微、中度、严重伤害的植物分别占 35.16%、

29.67%和 10.99%。卡方检验结果同样表明草本植物各受害等级之间的比例和木本植物各受害等级之间的比例对高温热浪的响应没有显著差异($df=3$, $\chi^2=4.70$, $P=0.12$)。

2.5 不同产地来源植物的受害情况

从图 3: C 可见,高温热浪对本土植物和引进植物的枯萎率没有显著差异($t=0.11$, $df=103$, $P=0.92$)。

从图 3: D 可见, 高温热浪后, 健康、轻微受害、中度受害、严重受害的本土种植物分别占 21.05%、42.11%、29.82%和 7.02%, 而引进种植物分别占 22.92%、35.42%、

27.08%和 14.58%。统计结果表明本土种植物和引进种植物对高温热浪的响应没有显著差异($df=3$, $\chi^2=1.83$, $P=0.61$)。

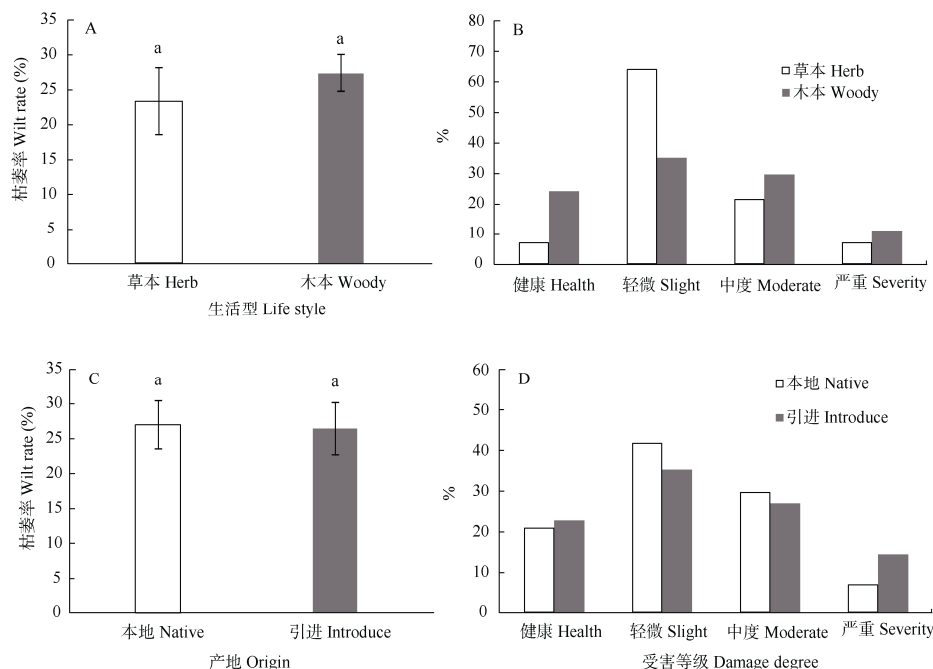


图 3 不同生活型(A, B)和产地来源(C, D)植物的受害情况

Fig. 3 Victimization of different life forms (A, B) and origins (C, D)

3 讨论和结论

本次调查的植物种类丰富, 共 105 种, 涵盖了不同的植物分类群、叶习性、生活型和产地来源, 不同植物对高温的响应情况不同。对于植物来说, 高温胁迫直接影响了光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等生理活动^[7-9], 进而影响植物的个体生长。植物对高温热浪最表观的反应是植株的形态变化^[21], 本次高温灾害中, 植物出现了叶片卷曲、萎蔫、变黄、焦枯和落叶等现象, 严重者甚至个体死亡。

3.1 高温热浪对裸子植物与被子植物的影响比较

植物分类是从形态和生理特征方面具有相似性的物种归于同一类别, 同类植物可能对环境的响应表现出一定共性^[16], 不同类别间会有所差异。被子植物可能有更强的快速栓塞修复能力^[22]。本研究结果表明裸子植物受伤害程度显著高于被子植物, 推测有 2 个原因: 一是与植物实际生长的环境有关, 大多数裸子植物生长在阳光直射处, 阳光照射面积大, 容易灼伤叶片, 这从种植在阳光直射处的木贼

麻黄(*Ephedra equisetina*)冠层叶片大部分枯萎, 而生长于阴凉处的圆柏(*Juniperus chinensis*)只有较少叶片枯萎上得到验证; 二是因为裸子植物水分运输的能力较差, 大量研究表明, 裸子植物的管道结构运输水分能力比被子植物的弱^[23-25], 裸子植物的水分传输效率低于被子植物。因此, 调查地区裸子植物受高温热浪影响程度高于被子植物。

3.2 高温热浪对本土种植物与引进种植物的影响比较

一般来说, 与引进种植物相比, 本土种植物应该更适应当地气候^[26], 更耐高温。但调查表明, 整体上本土种植物与引进种植物对于高温热浪的响应程度并无显著差异。原因可能是: 一、引进种为当地引进多年的植物, 已经能较好适应本地的栽培环境^[27], 所以能呈现出较好的抗高温能力; 二、引进种植物的原产地气候类型与本地的的气候类型相似, 有利于外来植物在当地的生存^[28], 一些来自热带或亚热带的引进种植物, 如原产于澳大利亚东部和东南部的红千层(*Callistemon rigidus*)、原产于美洲热带地区的马缨丹(*Lantana camara*), 其原产地气

候类型与当地气候相似,所以它们在高温热浪的胁迫下能呈现出较好的耐高温性。

3.3 高温热浪对常绿和落叶植物的影响比较

高温热浪下,仍健康生长的主要为常绿植物,而严重受害的植物中 70%是落叶植物,表现为大量叶片脱落、枝干枯死等现象,如紫叶李(*Prunus cerasifera* 'Atropurpurea')、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)等。常绿植物和落叶植物通常具有不同的叶寿命,尤其是在不利环境条件下,常绿植物的叶寿命会增加,而落叶植物的叶寿命则会减少^[29-30]。同时,有研究表明,常绿植物的叶片更新代谢较为缓慢,而落叶植物的相对较快^[31]。综合多种因素分析,在不利条件下,尤其是在高温热浪的环境下,落叶植物的叶寿命明显缩短,更容易出现大量落叶的情况。

3.4 影响植物对高温热浪响应的其他因素

植物对高温热浪的响应还受其它因素的影响,比如植物叶片性状、高温伴随的干旱胁迫、植物生长习性等。叶片是植物获取外界能量最基本的器官,叶片的大小、厚度、质地等都可能作为高温影响植物生长的决定性因素。程伟燕^[32]等研究表明,植株的叶片较厚,能够更充分的吸收光照,同时折光能力也较强,这可以减少夏季由于强光照射给植物带来损伤,这也是植物在高温天气下的一种自我保护措施,如樟科植物、桑科榕属(*Ficus*)植物大多叶片为革质,叶片较厚,因此不易受到高温伤害。不同的植物对高温强光的适应性有所不同,有的植物耐高温能力强,对光线适应性强,如蓝花草(*Ruellia simplex*)、印度榕(*F. elastica*)对高温热浪几乎不受影响;有的植物喜欢温暖的环境,为弱阳性树种,如高温热浪对鸡爪槭(*Acer palmatum*)有轻微影响;有的植物虽然喜欢阳光,但是忌高温,夏季高于 30 °C 就进入半休眠状态,如吊钟花(*Enkianthus quinqueflorus*)不耐高温,更容易受到高温热浪影响。持续高温常常伴随着干旱胁迫,高温和干旱是自然界中常见的非生物胁迫组合之一。高温和干旱分别能影响植物的生长、光合和抗氧化系统^[33-34],二者同时出现时会加剧彼此的影响,Jiang 等^[35]的研究表明高温和干旱对净光合速率的复合胁迫大于单个因子的作用。

3.5 高温热浪下植物维护的建议

高温热浪等极端气候事件在今后发生的频率将会越来越高,强度也会显著增加^[4-5],在此背景

下的植物保护显得越来越重要。本研究表明调查地区的裸子植物相比被子植物更容易受害,柏科植物中的刺柏(*Juniperus formosana*)、水杉、池杉(*Taxodium ascendens*)和水松(*Glyptostrobus pensilis*)应受到优先保护;此外,落叶植物比常绿植物更容易受害,无患子科的三峡槭(*Acer wilsonii*)、龙眼(*Dimocarpus longan*)和五角槭(*A. pictum* subsp. *mono*)等植物,蔷薇科植物中的海棠花、紫叶李、钟花樱桃(*Cerasus campanulata*)和月季花(*Rosa chinensis*)等以及杜鹃花科中的吊钟花(*Enkianthus quinqueflorus*)、杜鹃和红花檵木等都应受到优先保护。不同植物在高温热浪下的抗性有很大差异,盲目保护可能会造成人力、财力的浪费,因此高温热浪时应根据不同植物受害程度给予有效保护。

本研究调查了亚热带园林植物在经历高温热浪之后的生长情况,并按照不同植物功能类群和产地来源分析不同植物对高温热浪的响应程度。从植物分类群来看,研究区域的裸子植物比被子植物较容易受高温热浪的危害;从习性来看,研究区域的落叶植物比常绿植物更容易受害;从生活型来看,木本植物与草本植物对高温热浪响应程度无显著差异;从产地来源来看,引进种植物和本地种植物对高温热浪的响应也无显著差异。本研究同时为高温热浪下亚热带园林植物保护和栽培管理提供了一定的指导作用。

参考文献

- [1] WU X L, LIU Q S, LIU G H, et al. Risk assessment of heat waves: A review [J]. J Geo-Inf Sci, 2019, 21(7): 1029–1039. [武夕琳, 刘庆生, 刘高焕, 等. 高温热浪风险评估研究综述 [J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7): 1029–1039. doi: 10.12082/dqxxkx.2019.180544.]
- [2] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National standard of the People's Republic of China. GB/T 29457—2012 Grade of the heat wave [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 29457—2012 高温热浪等级 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.]
- [3] LI Q X, LI W, JU X H. Analysis on the persistent extreme warm period over China since 1998 [J]. Sci Technol Rev, 2006, 24(4): 37–40. [李庆祥, 李伟, 鞠晓慧. 1998 年以来中国气温持续极端偏暖的事实 [J]. 科技导报, 2006, 24(4): 37–40.]
- [4] ZHOU B T, QIAN J. Changes of weather and climate extremes in the

- IPCC AR6 [J]. *Climate Change Res*, 2021, 17(6): 713–718. [周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713–718. doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2021.167.]
- [5] YAO Y, LUO Y, HUANG J B, et al. Comparison of monthly temperature extremes simulated by CMIP3 and CMIP5 models [J]. *J Climate*, 2013, 26(19): 7692–7707. doi: 10.1175/jcli-d-12-00560.1.
- [6] CHEN G N. China is a sensitive zone for global climate change [J]. *Ecol Econ*, 2022, 38(10): 9–12. [陈国宁. 中国是全球气候变化敏感区 [J]. 生态经济, 2022, 38(10): 9–12.]
- [7] DU Y D, LI J L, WANG H, et al. Effects of high temperature stress on the flag leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of rice [J]. *Chin J Ecol*, 2012, 31(10): 2541–2548. [杜尧东, 李健陵, 王华, 等. 高温胁迫对水稻剑叶光合和叶绿素荧光特征的影响 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2541–2548. doi: 10.13292/j.1000-4890.2012.0365.]
- [8] ZHONG C, ZHANG M D, HU X Q, et al. Effects of temperature variation on the light-response characteristics of tobacco leaf photosynthesis [J]. *Chin J Ecol*, 2012, 31(2): 337–341. [钟楚, 张明达, 胡雪琼, 等. 温度变化对烟草光合作用光响应特征的影响 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 337–341. doi: 10.13292/j.1000-4890.2012.0066.]
- [9] ZHENG Y F, CHEN J L, XIAO F, et al. Effects of different temperatures on photosynthetic characteristics and expression of photosynthesis-related genes in *Amaranthus tricolor* [J]. *J Plant Resour Environ*, 2022, 31(5): 50–57. [郑友峰, 陈家兰, 肖盼, 等. 不同温度对苋菜光合特性及光合作用相关基因表达的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(5): 50–57. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2022.05.06.]
- [10] REN S H, LI Y Y, ZOU J, et al. Influence of high temperature stress on chlorophyll fluorescence parameters in four kinds of Orchidaceae [J]. *N Hort*, 2017(12): 70–74. [任少华, 李媛媛, 邹军, 等. 高温胁迫对四种兰科植物叶绿素荧光参数的影响 [J]. 北方园艺, 2017(12): 70–74. doi: 10.11937/bfy.201712018.]
- [11] CHEN Y J, MAENPUEN P, ZHANG Y J, et al. Quantifying vulnerability to embolism in tropical trees and lianas using five methods: Can discrepancies be explained by xylem structural traits? [J]. *New Phytol*, 2021, 229(2): 805–819. doi: 10.1111/nph.16927.
- [12] MA H Z, CROWTHER T W, MO L D, et al. The global biogeography of tree leaf form and habit [J]. *Nat Plants*, 2023, 9(11): 1795–1809. doi: 10.1038/s41477-023-01543-5.
- [13] TESKEY R, WERTIN T, BAUWERAERTS I, et al. Responses of tree species to heat waves and extreme heat events [J]. *Plant Cell Environ*, 2015, 38(9): 1699–1712. doi: 10.1111/pce.12417.
- [14] PIAO S L, ZHANG X P, CHEN A P, et al. The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: A review [J]. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62(10): 1551–1563. [朴世龙, 张新平, 陈安平, 等. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(9): 1321–1334. doi: 10.1007/s11430-018-9363-5.]
- [15] WANG D, HECKATHORN S A, MAINALI K, et al. Effects of N on plant response to heat-wave: A field study with prairie vegetation [J]. *J Integr Plant Biol*, 2008, 50(11): 1416–1425. doi: 10.1111/j.1744-7909.2008.00748.x.
- [16] LI X, YIN X, XI H C, et al. Investigation and analysis of impact from high frost on vascular plants in the Kunming Botanical Garden [J]. *Plant Divers Resour*, 2014, 36(5): 639–652. [李雄, 尹欣, 郝厚诚, 等. 霜冻对昆明植物园维管植物危害的调查分析 [J]. 植物分类与资源学报, 2014, 36(5): 639–652. doi: 10.7677/ynzwjy201414005.]
- [17] LI X Y, PIAO S L, WANG K, et al. Temporal trade-off between gymnosperm resistance and resilience increases forest sensitivity to extreme drought [J]. *Nat Ecol Evol*, 2020, 4(8): 1075–1083. doi: 10.1038/s41559-020-1217-3.
- [18] BASTOS A, GOUVEIA C M, TRIGO R M, et al. Comparing the impacts of 2003 and 2010 heatwaves in NPP over Europe [J]. *Biogeosci Discuss*, 2013, 10(10): 15879–15911. doi: 10.5194/bgd-10-15879-2013.
- [19] YUAN W P, CAI W W, CHEN Y, et al. Severe summer heatwave and drought strongly reduced carbon uptake in southern China [J]. *Sci Rep*, 2016, 6(1): 18813. doi: 10.1038/srep18813.
- [20] ZHANG Y C, HAN S N, WANG L, et al. Comprehensive evaluation of the physiological response and heat tolerance of six *Dahlia pinnata* Cav. cultivars to high-temperature stress [J]. *Plant Sci J*, 2023, 41(2): 245–255. [张映婵, 韩胜男, 王璐, 等. 六个大丽花品种对高温胁迫的生理响应及耐热性综合评价 [J]. 植物科学学报, 2023, 41(2): 245–255. doi: 10.11913/psj.2095-0837.22167.]
- [21] ZHANG B, HU Y H, LIU Q H. Study on the drought tolerance of several sedums on roof garden [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, 24(5): 272–276. [张斌, 胡永红, 刘庆华. 几种屋顶绿化景天植物的耐旱性研究 [J]. 中国农学通报, 2008, 24(5): 272–276.]
- [22] CHOAT B. Predicting thresholds of drought-induced mortality in woody plant species [J]. *Tree Physiol*, 2013, 33(7): 669–671. doi: 10.1093/treephys/tpt046.
- [23] RUEHR N K, GROTE R, MAYR S, et al. Beyond the extreme: Recovery of carbon and water relations in woody plants following heat and drought stress [J]. *Tree Physiol*, 2019, 39(8): 1285–1299. doi: 10.1093/treephys/tpz032.
- [24] NIU C Y, SHOU W K, YANG X T, et al. Study on adaptation strategies of *Quercus variabilis*, *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* to drought in Taihang Mountain [J]. *For Res*, 2022, 35(6): 73–82. [牛

- 存洋, 寿文凯, 杨喜田, 等. 太行山区栓皮栎、刺槐和侧柏对干旱的适应策略研究 [J]. 林业科学研究, 2022, 35(6): 73–82. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.006.008.]
- [25] LIU M M. Quatitive relationship between xylem conduits structure and hydraulics [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. [刘萌萌. 植物木质部管道结构和水力特性的关系 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. doi: 10.27409/d.cnki.gxbnu.2017.000083.]
- [26] SHEPPARD C S, SCHURR F M. Biotic resistance or introduction bias? Immigrant plant performance decreases with residence times over millennia [J]. Glob Ecol Biogeogr, 2019, 28(2): 222–237. doi: 10.1111/geb.12844.
- [27] BUCKLEY Y M, CATFORD J. Does the biogeographic origin of species matter? Ecological effects of native and non-native species and the use of origin to guide management [J]. J Ecol, 2016, 104(1): 4–17. doi: 10.1111/1365-2745.12501.
- [28] QIAN H. Intercontinental comparison of phylogenetic relatedness in introduced plants at the transition from naturalization to invasion: A case study on the floras of South Africa and China [J]. Plant Divers, 2023, 45(4): 363–368. doi: 10.1016/j.pld.2023.02.003.
- [29] FENG Q H, SHI Z M, DONG L L. Response of plant functional traits to environment and its application [J]. Sci Silv Sin, 2008, 44(4): 125–131. [冯秋红, 史作民, 董莉莉. 植物功能性状对环境的响应及其应用 [J]. 林业科学, 2008, 44(4): 125–131. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2008.04.023.]
- [30] VAN OMMEN K A E E, DOUMA J C, ORDOÑEZ J C, et al. Global quantification of contrasting leaf life span strategies for deciduous and evergreen species in response to environmental conditions [J]. Glob Ecol Biogeogr, 2012, 21(2): 224–235. doi: 10.1111/j.1466-8238.2011.00667.x.
- [31] PENG A H, WANG G X, LUO J, et al. Leaf functional traits of main plants in a mixed evergreen and deciduous broad-leaved forest in Mt. Gongga [J]. Chin J Ecol, 2016, 35(10): 2599–2605. [彭阿辉, 王根绪, 罗辑, 等. 贡嘎山常绿落叶阔叶混交林主要树种叶功能性状 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2599–2605. doi: 10.13292/j.1000-4890.201610.035.]
- [32] CHENG W Y, ZHANG W G, HASIQIMUGE. Observation of the Rec *Medicago sativa* L.'s morphological anatomy [J]. J Inner Mongolia Univ National, 2003, 18(3): 241–244. [程伟燕, 张卫国, 哈斯其木格. 特莱克紫花苜蓿的形态解剖学观察 [J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2003, 18(3): 241–244. doi: 10.3969/j.issn.1671-0185.2003.03.013.]
- [33] BARNABÁS B, JÄGER K, FEHÉR A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals [J]. Plant Cell Environ, 2008, 31(1): 11–38. doi: 10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x.
- [34] RIZHISKY L, LIANG H J, SHUMAN J, et al. When defense pathways collide. The response of *Arabidopsis* to a combination of drought and heat stress [J]. Plant Physiol, 2004, 134(4): 1683–1696. doi: 10.1104/pp.103.033431.
- [35] JIANG Y W, HUANG B R. Effects of drought or heat stress alone and in combination on Kentucky bluegrass [J]. Crop Sci, 2000, 40(5): 1358–1362. doi: 10.2135/cropsci2000.4051358x.
- 附录 1** 受调查的植物名录和分类信息
http://jtsb.ijournals.cn/ajax/common/download_attache_file.aspx?seq_id=20240418222948001&file_no
- 附录 2** 不同归类方法下的植物受害数目
http://jtsb.ijournals.cn/ajax/common/download_attache_file.aspx?seq_id=20240418222948002&file_no