TONGJI UNIVERSITY CAUP 同济大学建筑与城市规划学院

城市绿化植物应对气候变化的选择原理与方法

Principles and Methods of Landscape Plant Selection in Response to Climate Change

张德顺

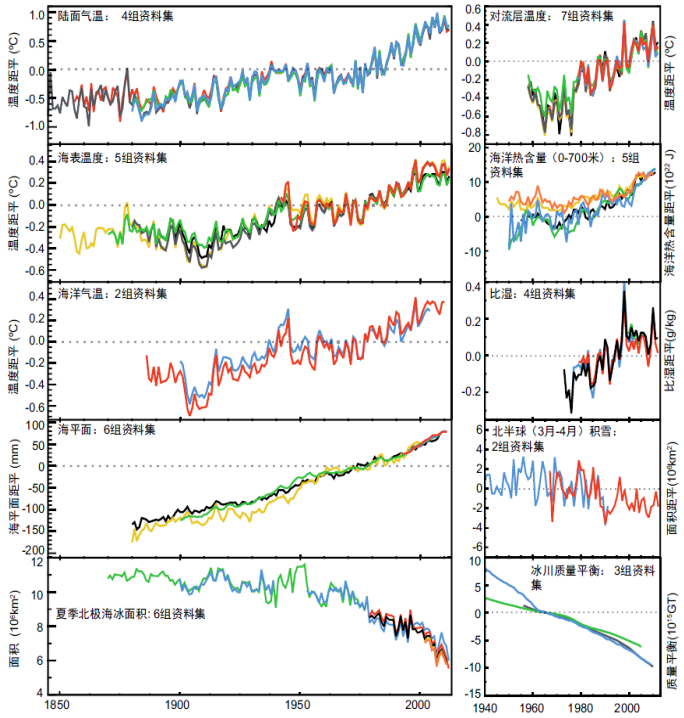
同济大学建筑与城市规划学院 教授、博导
德国德累斯顿大学客座教授
世界自然保护联盟物种生存委员会（IUCN/SSC)专家组成员
中国植物学会理事 植物园分会常务理事 上海市植物学会副理事长
中国风景园林学会专家 绿化植物与古树名木专委会副主任委员
Email: zds@tongji.edu.cn

气候变化与景观响应分实验室，学高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室

欢迎关注！

城市绿化植物应对气候变化的选择原理与方法

- 在2019年上海中国城市绿化学会年会上，IFLA（国际风景师联合会，International Federation of Landscape Architects）主席詹姆士·黑特(James Hayter) 先生提到目前世界面临的5大问题，即**气候变化**(Climate change)、农业和食品安全(Agriculture and food safety)、生活+福祉(Health + wellbeing)、社区参与设计（Community participation in design）本土文化认知(Recognition of indigenous culture)，其中响应气候变化列在第一位。近几年哈佛学者玛莎·沙尔茨（Martha Schartz）在中国也到处演讲，落脚在气候变化园林应对上。面对国际的倒逼，中国也需要在气候变化上用专业手段和学科视角深化研究。



工业革命以来的人类活动是造成目前全球变暖的主要原因，国际社会必须以人类命运共同体理念为引领，共同应对这一挑战，避免大量因气候变化带来的损失与风险。

2015年《巴黎协定》：全球控制温升不超过2°C并努力控制在1.5°C以内的长期目标。

2018年《全球升温1.5°C》特别报告：更加凸显应对气候变化紧迫性，强化并推进了全球本世纪中叶实现“碳中和”的目标导向以及长期低碳排放战略和路径的选择。

城市绿化植物应对气候变化的选择原理与方法

2020年联合国气候峰会

联合国秘书长古特雷斯2021年新年贺词中认为近年气候变化和新冠疫情的双重危机

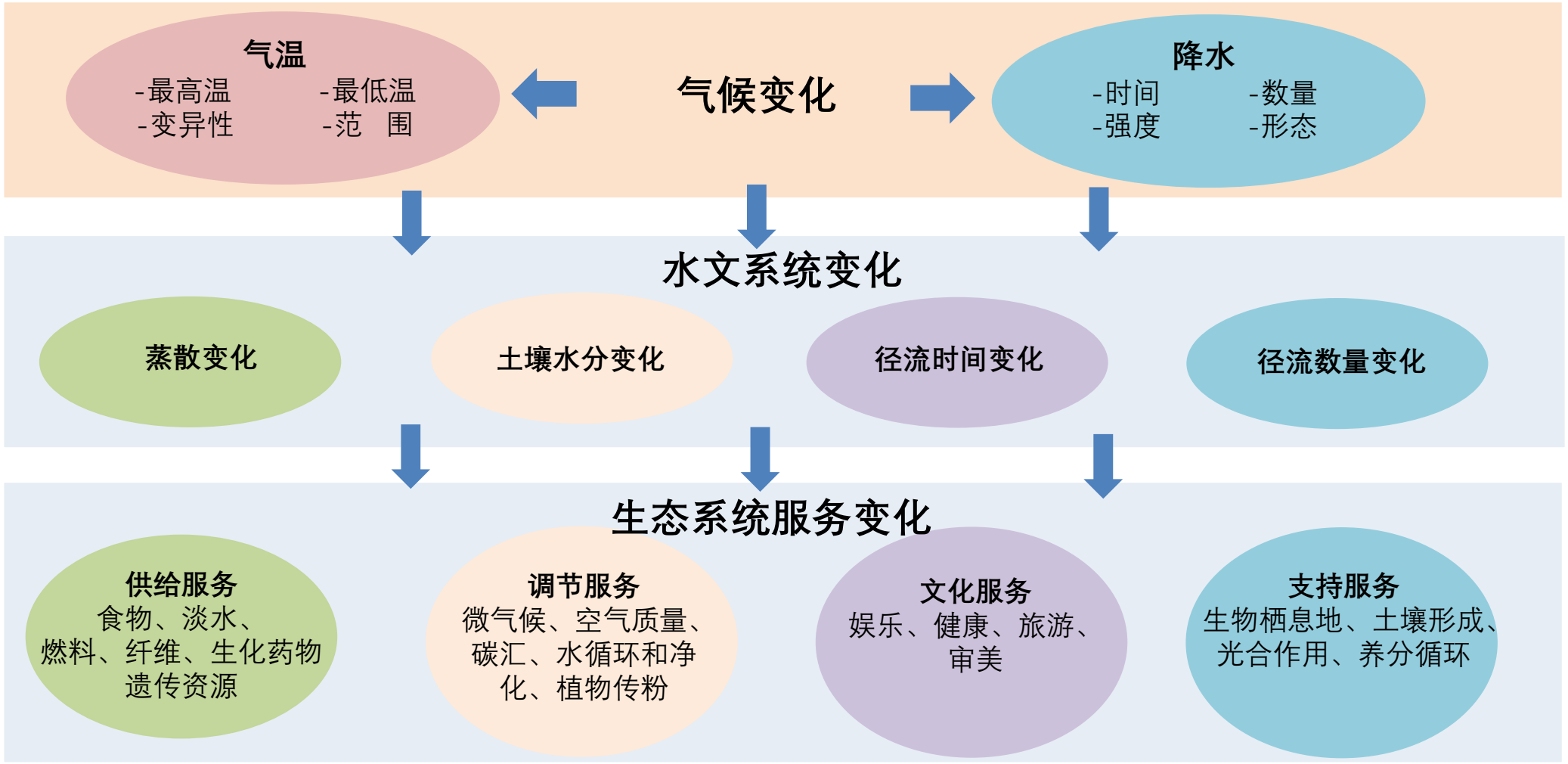
中国积极参与国际社会应对 气候变化进程，并作出郑重减排承诺，联合国的高度赞赏

地球科学面临的十大难题: 美国《科学》杂志发布（2021）

1.什么可以帮助保护海洋？（What could help conservation of the oceans?）
2.为什么会发生物种大爆发和大灭绝？（Why were there species explosions and mass extinction?）
3. 深层生物圈的规模、组成和意义是什么？（What is the volume, composition, and significance of the deep biosphere?）
4. 什么是重力？（What is gravity?）
5.我们可以阻止全球气候变化吗？（Can we stop global climate change?）
6.我们能把过量的二氧化碳存到何处？（Where do we put all the excess carbon dioxide?）
7.是什么创造了地球磁场（以及为什么它会移动）？（What creates the Earth's magnetic field (and why does it move)?）
8.我们能够更准确地预测灾害性气候事件（海啸、飓风、地震）？（Will we be able to predict catastrophic weather events (tsunami, hurricanes, earthquakes) more accurately?）
9.如果地球上所有的冰融化会怎样？（What happens if all the ice on the planet melts?）
10.我们能够生活在无化石燃料的世界吗？（Could we live in a fossil-fuel-free world?）

5，6，8，9, 10五个方面是关于气候变化、碳汇、气候灾害、地球变化、碳排放的议题。

气候变化会引起生态系统服务的连锁反应



- 气候变化、全球变暖、二氧化碳浓度升高、温室效应、物种灭绝、热带气旋、风暴潮、暴雨内涝、热浪干旱、海平面上升、海水入侵等术语频繁出现在各种学术刊物和舆论媒体中，这些气象灾害和极端气候事件正在改变着我们的大气圈的成分构成，水圈的空间分布，岩石圈地理环境、土壤圈的地域分异，生物圈的生境演变。人类赖以生存的自然地理环境陷入了空前脆弱境地，也给城市绿化系统造成了一系列前所未有的忧患和危机。
- 城市绿化学科面对挑战，应以自己的专业智慧增强绿化树种的生态抗性，提升绿化体系的生态韧性，促进系统服务的可持续性。本团队在提出宏观对策的基础上，梳理了绿化植物选择的生长、形态、生态、生理等指标体系，对500余种树木进行了抗寒性、耐热性、耐旱性、耐涝性、抗日灼、耐阴性、抗病虫害、抗风性、耐盐性和抗瘠薄的定量化测定和多元系统分析。以此提出了对不同区域、不同城市、不同立地的不同气候变化情形的“因地制宜”树种选择原理，为生态安全和绿化健康阐明技术方法。

前言

- 以温室气体增加为起因，以温室效应增强为主要特征，引起了天气、气候、气候系统的变化称之为气候变化（climate change），它是指气候平均值或距平出现显著变化。气候平均值的升降，表明气候平均状态的变化；气候距平值增大，表明气候状态不稳定性增加，气候异常愈明显。当前国际社会最关注是近10到100年的气候变化。
- 气候变化的影响是全方位、多方面的，主要表现形式是：高温热浪、海平面上升、风暴潮、极端干旱、冰川消融、生物多样性锐减等。气候变化是不争的事实，但是不同的国家、不同的区域、不同的城市、不同的立地气候变化的特征各不一样，多数区域变的气温升高，也有像中欧地区一样有局部变冷的迹象，高温热浪使得很多地区相对湿度变小而干旱，但很多城市发生暴雨内涝的现象，既有中美沿海地区的台风飓风频率增高、危害加剧的趋势，也有华北地区风场减弱、雾霾加剧的情形。真可谓“气候在变化，处处不相同”。
- 面对气候变化，气象、农业、林业、牧业、渔业、水利、生态、能源、建材、交通、国土、城建、环保、文物、旅游等各行各业均在应对。城市绿化是人居环境规划建设的主力军，是自然遗产和文化景观的传承者，是国土美化和生态修复的引领者，需要研究行业、专业、学科自己的对策，逐步形成响应气候变化的原理与方法。
- **（1）城市绿化体系的规划以生态规划为核心，生态规划以植物配置为龙头**

应强化规划中的树种成分和配置结构，减少对大地肌理的人为更改，树立可持续的园林管理策略。应统筹整合山水林田湖草沙的景观体系，软化下垫面结构，将水、土、大气、生物、岩石的因素纳入生态演替与进化的时空进程中。

- **（2）把握气候变化规律，保障城市绿化系统的生态安全和绿地健康**

尽管气候变化具有无序性，但在一定范围、一定时间内其变化还是有规律可循的。绿化火灾、病虫害和病原体、物种入侵、山体破坏、水土流失、野生动物生境破坏、流域衰退等问题，均可以进行有效的控制和调控，只有绿化系统的生态安全了，绿地、林地和湿地自身健康了，其服务功能才能健全和可持续发展。

- **（3）增强城市绿化系统的生态韧性，提升生态服务功能**

生态系统服务是人们从生态系统获得的好处，包括供应服务（食物和水）、调节服务（气候调节、生物控制）、支持服务（土壤形成、养分循环）以及文化服务（娱乐、精神、宗教和其他物质利益）。这些服务中的变化影响着人类福祉，诸如安全、生活所需、健康、社会文化关系，反过来，这些福祉成分也影响到人的自由和选择。生态韧性是系统在受到内外突发冲击或是慢性扰动时表现出的结构和功能稳定性和适应性。只有增强了绿化体系的生态韧性，才能保障生态服务功能发挥的稳定性和持续性。

- **（4）深化绿化植物生态习性和生物学特性的研究，准确掌握绿化植物的生态适应幅度**

提升生态韧性是应对环境变化的重要途径。生态韧性包括生态抗性、生态耐性和生态适应性。在把握气候变化规律的基础上，将了解绿化植物的“生态幅度”与“抗逆性”——科学“选择植物”——提高绿化体系“生态韧性”，作为城市绿化提升生态系统功能的科学应对策略。

提 纲

一、应对气候变化的绿化植物选择的指标体系

PART 1 Index System of Landscape Plant Selection in Response to Climate Change

二、实验树种

PART 2 Experimental Ttree Species

三、应对不同气候变化情形下的树种选择对策

PART 3 Strategies for Tree Species Selection in Response to Different Climate Change Senecios

一、应对气候变化的绿化植物选择的指标体系

PART 1　Index System of Greening Plant Selection in Response to Climate Change

- 从宏观时间上看，植物经历了上亿年的进化，所经历的气候变化远比我们人类要久远得多，其各种抗逆性基因都隐藏在不同的植物种类中得以传续。从微观角度上看，绿化植物个体的各种抗逆性在一定程度上决定了其种群的地理分布和植株个体的健康生长，故从各种植物的自身抗逆性视角出发，筛选出能够适应多种气候变化情景的绿化植物是应对气候变化的主动策略。

- 针对包括温度、降水、光照、病虫害、风力、土壤酸碱性、营养等气候变化因素，构建出应对气候变化的绿化植物选择的生长、形态、生态、生理等指标体系（表1）。

城市绿化植物应对气候变化的选择原理与方法

气候因素	抗性	指标类别	具体指标	相应机制
温度	抗寒性	生理	电解质外渗率	以电解质外渗率 50%作为临界致死低温的生理指标，同一低温下外渗率越大，其树种抗寒性越差
		生理	电阻值	植物细胞的电阻主要在于细胞质膜，在不同低温下电阻值变化缓慢，一般反映出树种抗寒性较强
		生理	组织水势	水势与植物抗寒能力呈线性关系，水势越高，植物细胞从周围环境吸水潜力越大，忍受冻害能力越强
		生理	气孔关闭率	气孔是植物体内水分调节的重要途径，它能在短时间内进行可逆变化，从而有效地增强叶片对冷环境的自我防御能力
	耐热性	生理	相对电导率	高温胁迫导致细胞渗透性增加和电解质的泄漏，结果表现为可直接测量的相对电导率增加
		生理	叶绿素含量	在炎热等逆境条件下，植物的叶绿素会发生变化，其荧光现象可以作为植物受胁迫程度的指标
		生理	相对含水量	植物叶片相对含水量反映了保水和抗脱水的能力，相对含水量越小说明水分亏缺越严重
		生理	脯氨酸（PRO）含量	植物处于逆境时，游离脯氨酸含量急剧增加，不同物种的积累量不一样
		生理	丙二醛（MDA）含量	高温胁迫下，丙二醛含量高，说明植物细胞膜质过氧化程度高，细胞膜受到的伤害严重
		生理	过氧化物歧化酶（SOD）含量	SOD 酶在减轻膜的伤害上起着一定的保护作用，SOD 酶的增加幅度一定程度上体现了物种的耐热性
		生理	气体交换参数	气体交换参数表明植物的光合能力和水分利用能力，耐热性强的植物在高温条件下一般维持较高的光合速率保证植物生长/生存的需要
		生理	叶绿素荧光参数	叶绿素荧光参数显示 PSII 原初光能转换效率与潜在活性、PSII 电子传递量子效率以及 PSII 的潜在热耗散能力，可以通过综合光合参数评定物种耐热性
		形态	叶片形态	在高温胁迫情况下，叶片出现卷曲、灼伤和落叶现象，根据生长状况可判断植物耐热级别
降水	耐旱性	形态	叶片材质	光滑或厚革质的叶片具备更强的耐旱性
		形态	叶背	叶背由于浓密的绒毛层或蜡层而呈现蓝色、银灰色或银白色的植物体现出较强的耐旱性
		形态	叶片形状	羽状复叶或深裂的叶子具备更强的耐旱性
		形态	叶片大小	一般叶片长度小于 10cm 的小叶子植物具有更强的耐旱性
		形态	刺	刺的特征是评估抗旱性的一个重要指标
		生理	树干液流通量	干旱条件会降低植物的树干液流量
		生理	导水率	植物耐旱特性与导水能力有关，根系、枝条和树干的导水对干旱胁迫的敏感性可以反映植株持续抗旱能力
	耐涝性	生长	植株整体	淹水胁迫下，顶芽和叶片形态会发生适应性变化，植株生长缓慢甚至停滞
		生理	叶绿素含量	植物在淹水胁迫下，由于根系缺氧限制有氧呼吸和叶片光合作用，与光合作用相关的酶活性受到影响，加之根系活力降低阻碍矿物质吸收，造成叶片营养不良，导致叶绿素合成能力下降，叶片变色，叶绿素含量减少
		生理	电导率	受涝害越严重，植物细胞膜通透性越大，细胞外渗物越多，电导率越高
		生理	比叶重	植物受到淹水胁迫后，由于光合作用受阻，生长速率减慢，生物量累计减少，同时由于根系缺氧影响水分吸收导致叶片含水量减少，因此一些树种的叶片单位面积重量减少，叶片变薄变轻
		生理	净光合速率	植物受到淹水胁迫后，生长受到明显的抑制，净光合速率、气孔导度显著下降
		生理	丙二醛（MDA）含量	丙二醛的含量可以从抗氧化的角度反映植物遭受逆境伤害的程度
		生理	脯氨酸（PRO）含量	脯氨酸含量一定程度上可以反映植物体内的水分情况，作为植物缺水情况的生理指标之一
光照	抗日灼	形态	叶片	叶片焦叶面积的大小以及灼伤程度反应植株的受害程度
		形态	枝干	日灼伤害程度加重体现为干皮从变色或变粗糙，到干缩死亡，最后脱落、木质部暴露纵裂
		生理	叶面温度	叶面温度和气温差值能作为不同光环境下研究叶片日灼伤害的代表性指标
		生理	光合速率	净光合速率一定程度上可以反映植物对于不同光环境的适应性
		生理	气孔导度	气孔导度是描述和反映植物叶片气孔开度的一个重要参数
		生理	蒸腾速率	蒸腾速率作为叶片气体交换参数的一种，能够很好地反映植物体对于环境因子的响应和自身气体交换的状态

表1 应对气候变化的绿化植物选择的生长、形态、生态、生理等指标体系

Table 1 Growth, Morphology, Ecology and Physiology Indicators System of Landscape Plant Selection in Response to Climate Change

- 从以上指标体系中不难看出，虽然绿化植物面对不同的气候变化有多种多样的响应机制，但一些重要抗逆指标可以用于指示植物多种抗性：

（1）电解质外渗率/电导率(Electrolyte Leakage Rate, ELR/Electrical Conductivity， EC)

植物细胞膜对维持细胞的微环境和正常代谢起着重要的作用，质膜透性在一定程度上反映膜的稳定性。当植物处在不良环境中时，原生质的结构常受到影响，原生质半透膜的通透性会发生改变，有机物和盐类从细胞中渗出，进入周围环境。受伤害越大，植物细胞质膜透性越大，细胞外渗物越多，电导率越高。

（2）叶绿素含量(Chlorophyll Content)

叶绿素是高等植物和其他所有能进行光合作用的生物体含有的一类绿色色素。在逆境条件下，叶绿素的组成会发生变化，叶绿素含量在植物抗逆生理中有广泛的应用。

（3）光合速率（Photosynthetic Rate)

光合作用为植物的生长发育提供所需的物质和能量，是逆境环境胁迫下受影响的主要过程之一。净光合速率的大小能直接反映植物的生长情况，是标志植物遭受逆境胁迫的一个敏感指标。

（4）脯氨酸（Proline,PRO）含量

游离脯氨酸是细胞内主要起渗透调节作用的物质之一。正常情况下，植物体内的脯氨酸含量很低，但当其处于逆境时其含量将急剧增加，这是植物对不良环境的一种适应性反应。

（5）丙二醛（(Malondialdehyde,MDA)）含量

植物在逆境下通常会发生过氧化作用，丙二醛是膜质过氧化作用的最终分解产物，丙二醛的含量可以从抗氧化的角度反映植物遭受逆境伤害的程度。丙二醛含量高，说明植物细胞膜质过氧化程度高，细胞膜受到的伤害严重。

（6）过氧化物歧化酶（Superoxide Dimutase，SOD）含量

植物的抗性以及对环境的适应与过氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、过氧化氢酶（CAT）等抗氧化酶的含量密切相关。SOD是一切需氧有机体中普遍存在一种酶，SOD与植物的呼吸作用、光合作用及生长素的氧化等都有密切关系，是体内普遍存在的并且活性较高的适应性酶。许多研究证实，SOD酶能消除超氧化物自由基，控制膜的过氧化水平，在减轻膜的伤害上起着一定的保护作用。

除此之外，**水分代谢（water metabolism），水势（water potential），压力势（pressure potential），渗透势（osmotic potential），根压（root pressure），自由水（free water），渗透作用（osmosis），衬质势（matric potential），吐水（guttation），伤流（ bleeding），蒸腾拉力（transpiration pull），蒸腾效率（transpiration efficiency），蒸腾系数（transpiration coefficient），抗蒸腾剂（antitranspirant），吸胀作用（imbibition），永久萎蔫（permanent wilting），永久萎蔫系数（permanent wilting coefficient），内聚力学说（cohesion theory），植物的最大需水期（maximum water requirement of a plant），小孔扩散律（small pore diffusion law）**等等

二、实验树种

PART 2　Experimental Tree Species

- 基于常见绿化植物的分布情况和引种情况，选择500余种（品种）树种进行相应的抗性研究，实验树种列表如下：

表2 针对不同抗性研究的实验树种汇总表

Table 2 Summary of experimental tree species （cultivar） for different resistance studies

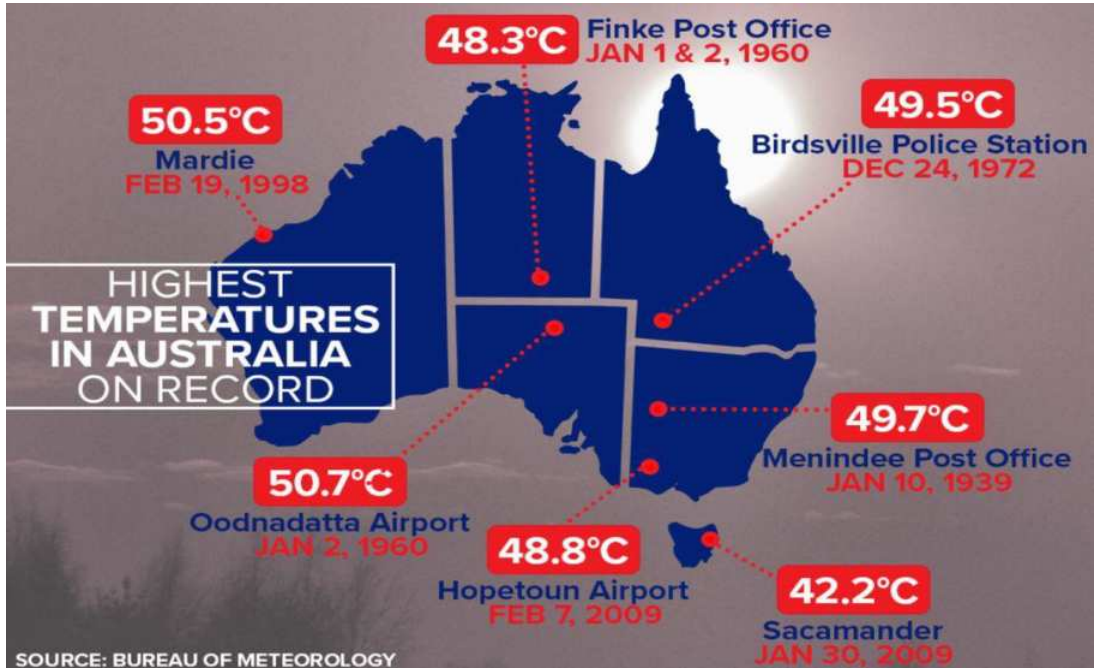
序号	抗性	实验树种
1	抗寒性	亚热带北缘的8种常绿阔叶植物：大叶女贞、蚊母、海桐、枸骨、黄杨、石楠、火棘、扶芳藤
2	耐热性	15种（品种）观赏山楂：摩登山楂'托巴'、红蕊山楂、华盛顿山楂、英国山楂'红云'、英国山楂'红保罗'、绿山楂'冬国王'、鸡矩山楂、俄罗斯山楂、皱叶山楂、阿尔泰山楂、湖北山楂、华中山楂、山楂、野山楂、山里红
3	耐旱性	常见耐旱树种：栓皮槭、三角枫、青皮槭、复叶槭、意大利槭、挪威槭、红花槭、佐辰槭、红花七叶树、臭椿、意大利栎木、灰栎木、垂枝桦、光叶山樱桃、鳞皮山樱桃、毛山核桃、欧洲栗、黄金树、小叶朴、高加索朴、美洲朴、鸡足香槐、君迁子、美洲柿、狭叶白蜡、欧洲白蜡、帕利斯白蜡、洋白蜡、四棱白蜡、银杏、山皂荚、美国皂荚、美国肥皂荚、朝鲜槐、'科诺斯基'海棠、美国蓝果树、欧洲铁木、黄檗、库页岛黄檗、二球悬铃木、一球悬铃木、银白杨、欧洲山杨、欧洲甜樱桃、西洋梨、欧洲野梨、黄背栎、土耳其栎、猩红栎、匈牙利栎、覆互状栎、高加索栎、大果栎、蒙大拿栎、沼生栎、岩生栎、绒毛栎、北美红栎、刺槐、槐、白光花楸、瑞典花楸、宽叶花楸、心叶椴、克里米亚椴树、糠椴、银毛椴、榔榆、榆树、榉树
4	耐涝性	常见耐涝树种：黑松、水松、彩叶杞柳、杂交柳、沼生栎、水紫树、海滨木槿、刚毛柽柳、金缕梅、喷雪花、金叶皂荚、美国红枫、复羽叶栾树、喜树、紫树、鳞叶柽柳、蔓生紫薇、短枝红石榴、重瓣红石榴、绒毛白蜡、美国连翘、紫花醉鱼草、花叶蔓长春花、黄金树、大花六道木、欧洲荚蒾、蓝刺柏、欧洲鹅耳栎、北美红栎、猩红栎、花叶马褂木、豪猪刺、金叶小檗、杨梅叶蚊母、红叶石楠、黄果火棘、金焰绣线菊、红花绣线菊、金叶风箱果、伞房决明、加拿大红叶紫荆、鱼鳔槐、金枝槐、美丽胡枝子、染料木、红叶臭椿、美国红栌、红枫、欧洲七叶树、花叶扶芳藤、密实卫矛、滨柃、红果金丝桃、花叶胡颓子、矮紫薇、花叶常春藤、秤锤树、金叶疣、枸杞、金叶接骨木、地中海荚蒾、小花毛核木、花叶锦带、杠柳、迷迭香
5	抗日灼	10种（品种）上海常见槭树科槭树属植物：三角枫、五角枫、鸡爪槭、中国红枫、'橙之梦'红枫、'三季红'红枫、'秋火焰'红花槭、'夕阳红'红花槭、'红国王'挪威槭、花叶复叶槭
6	耐阴性	24种（品种）具有较强耐阴性的植物：太平花、爬行卫矛、南蛇藤、接骨木、花叶西洋接骨木、西洋接骨木、卫矛、金银木、锦带花、华北珍珠梅、金银花、天目琼花、三裂绣线菊、红花忍冬、郁香忍冬、溲疏、绣球荚蒾、扶芳藤、鸡麻、猥实、鹅耳栎、香茶藨、陕西荚蒾、棣棠
7	抗病虫害	32种常见绿化植物：合欢、加拿利海枣、二球悬铃木、香樟、杜鹃、日本晚樱、苏铁、重阳木、垂柳、冬青卫矛、桂花、海桐、女贞、水杉、枫杨、栾树、三角枫、垂丝海棠、木槿、枸骨、苦楝、银杏、广玉兰、雪松、杜英、蚊母、紫叶小檗、蜡梅、八角金盘、石楠、白玉兰、山茶
8	抗风性	25种上海常见树种：杜仲、枫香、光皮树、广玉兰、黄连木、金丝楸、榉树、乐昌含笑、柳杉、栾树、马褂木、女贞、青桐、蚊母树、乌桕、无患子、五角枫、喜树、香樟、小叶朴、银杏、玉兰、中山杉、重阳木、棕榈
9	耐盐性	40种常见绿化植物：多花木蓝、分药花、豪猪刺、蔓生紫薇、地中海荚蒾、红花绣线菊、溲疏、金叶接骨木、加拿大紫荆、彩叶杞柳、蓝刺柏、蓝冰柏、紫花醉鱼草、园艺木槿、小花毛核木、金叶杨、红叶杨、密实卫矛、矮生紫薇、金叶莸、黄果火棘、花叶锦带、欧洲椴、花叶胡颓子、加拿大红叶紫荆、丝棉木、速生柏、麻栎、水松、短枝红石榴、紫穗槐、伞房决明、滨柃、绒毛白蜡、杠柳、迷迭香、大花六道木、柽柳、海滨木槿
10	抗瘠薄	上海30种常见绿化植物（29种固氮树种及1种对照植物）：染料木、合欢、常春油麻藤、紫藤、花叶胡颓子、胡颓子、江南桤木、多花木蓝、紫穗槐、杨梅、华东木蓝、鱼鳔槐、锦鸡儿、树锦鸡儿、红花锦鸡儿、牛奶子、多花胡枝子、美丽胡枝子、红花刺槐、胡枝子、黑荆、杭子梢、马棘、桤木、中华胡枝子、银合欢、白刺花、黄檀、伞房决明、海滨木槿

三、应对不同气候变化情形下的绿化树种选择对策

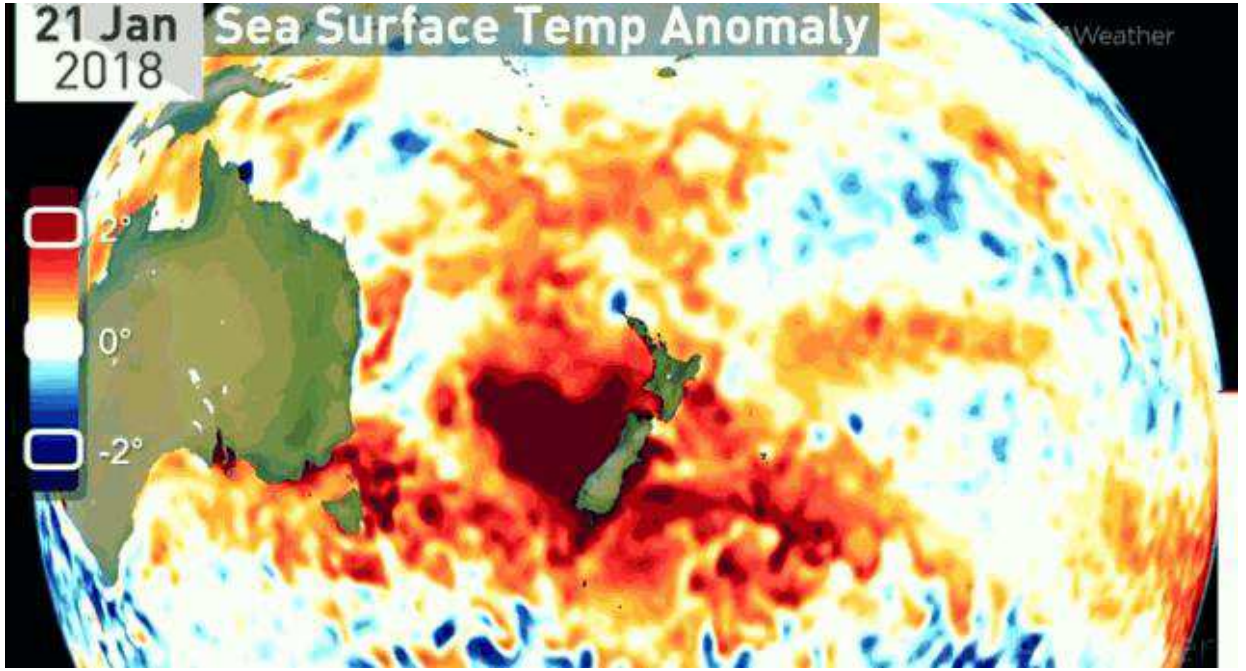
PART 3 Strategies for Tree Species Selection in Response to Different Climate Change Senecios

1.绿化植物抗寒性
2.绿化植物耐热性
3.绿化植物耐旱性
4.绿化植物耐涝性
5.绿化植物抗日灼
6. 绿化植物耐阴性
7. 绿化植物抗病虫害
8. 绿化植物抗风性
9. 绿化植物耐盐性
10. 绿化植物抗瘠薄

- 在全球气候变化的大背景下，许多区域的**气温条件**产生了显著变化，**高温天气和寒冷天气**的频现，以及城市的热岛效应等对城市园林绿化树种的选择产生了新的要求。因此，在温度变化的前提下，研究园林绿化树种的抗寒性、耐热性进而做出合理的植物选择显得十分重要。
- 在**降水变化**方面，近60年来我国华北、西南地区年平均降水量大多为减少趋势，且以秋季降水偏少的趋势最为显著，导致了秋季干旱增多以及秋冬连季干旱频繁。2000年以后，北方夏季降水呈减少趋势，而冬季降水趋于增加，南方秋季降水减少明显，而春季降水增多，西南地区秋冬春连旱偏多。另一方面，地区间降水具有不均衡性，强降雨导致的局部地区和城市内涝也经常发生。因此，城市绿化既要研究各地植物的抗旱性，也要研究城市植物的抗涝性。
- 在**光照变化**方面，绿化植物不可避免要经受光照强度、光质和光照时间变化的影响，它们需适应其生长的光环境才能生存。强光和高热会引起植物的灼叶和灼干伤害，低光照强度会引起植物的非正常生长。因此，抗日灼植物研究和耐阴植物研究对强化植物生态功能与满足特殊空间绿化需求具有重要意义。
- 气候变暖不仅改变了绿化植物的生长状况，同时也影响以植物为寄主的**病虫害的发生动态**趋势。绿化植物对病虫害的响应也会发生相应变化，导致传统的树种规划、生物多样性规划、绿化养护管理策略需要进行调整。通过探讨气候变暖对绿化植物与病虫害两者之间的影响，预测绿化树种抵抗病虫危害的趋势，为城市绿化树种的科学规划、植物造景、绿化养护管理，以及提升城市生态系统韧性提供指导依据。



2018年 澳大利亚被高温炙烤，部分地区温度创造历史新高，甚至突破了50度!



2018年新西兰保持了84年夏季最热记录被打破

2018年，极寒天气发威，几十年一遇的冷风暴席卷而过，**这是自90年代中期以来的最低气温，让大半个美国变成了大冰窖！**

干旱正在影响着非洲、中东、亚洲国家的生态系统

内涝成为很多城市挥之不去的夏季灾害

日灼因湿热综合作用引起绿化植物灾害

地下空间：建筑背阴面—高家桥路下面的周年光照胁迫

- **台风**危害已对我国东部沿海地区造成了严重的影响，其中对长江三角洲、珠江三角洲和南海海域人类社会经济系统的影响最为严重，也是损毁当地绿化植物的主要自然灾害之一。在过去30年里，台风在频率上虽然变化不大，但其持续时间和所释放的能量却增加了50%以上，具有更大的破坏性。有研究表明，随着海水表面温度的升高和全球气候变暖，西北太平洋将会出现更多强台风。预计到2050年左右，每年登陆我国的台风频次会比目前增多1-2个，引发的风暴潮频次也可能比目前增多0.6-1.5个。为了增强城市绿化对未来极端天气及环境的适应能力，有必要加强对抗风性的研究，选择具有抗风能力的树种对于提高生态系统韧性、维护绿地健康、保育生物多样性起重要作用。

- 随着全球气候变暖导致的海平面上升，加重了滨海地区**土壤盐渍化**程度。在滨海耐盐植物的资源引种、研究应用上，已经筛选出数百种耐盐性较好的植物进行了细化分级排序，研究成果已发挥了巨大效益。国内近年来耐盐植物种类筛选工作也得到了迅速发展，但关于绿化植物的耐盐性筛选一般缺乏生理实验数据支撑。
- 土壤是绝大多数植物的生存基础，**土壤贫瘠**是城市绿化中经常遇到的立地类型，要想提升生态系统的服务功能，首先要提升立地土壤肥力，其中，共生固氮植物是可肥土沃土的氮素的重要来源之一，也是城市绿化调控立地土壤，增强抗贫瘠能力，适应困难立地的有效措施之一。

- 根据各种绿化植物生态适应幅度、形态生理生态等指标分析结果，阐明应对不同气候变化情形的树种选择策略。

台风引起风折、风倒和风拔

3.1 绿化植物抗寒性分类

- 将实验树种在-20℃以上的外渗率、电阻值、组织水势、气孔行为4项指标5组数据进行模糊聚类分析和主成分分析，分析树种综合指标的抗寒性。

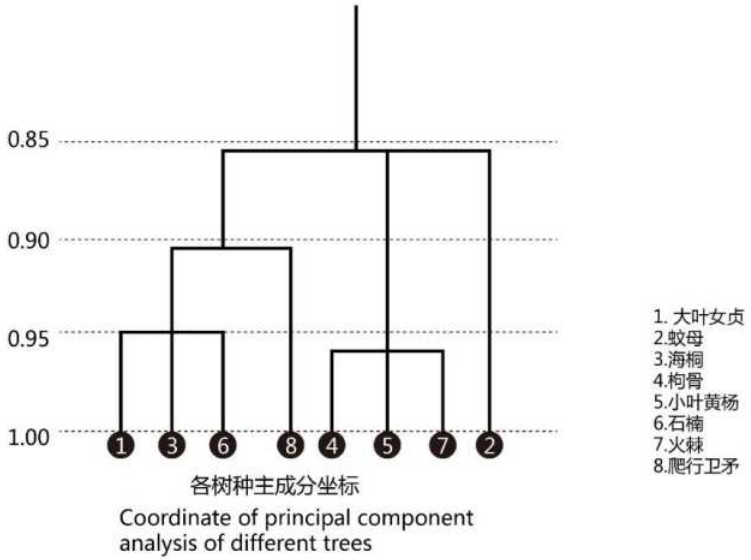


图 1 模糊树系图
Fig. 1 Fuzzy tree chart

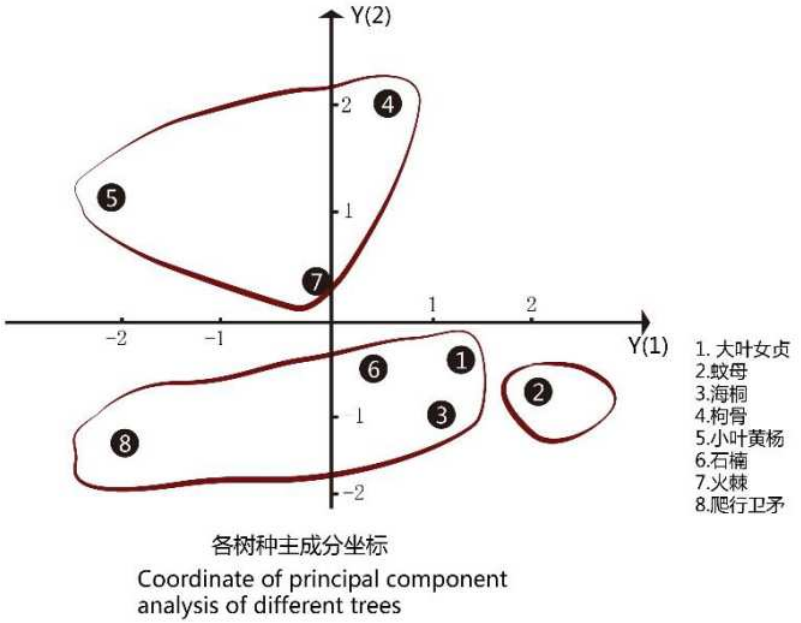


图 2 各树种主成分坐标
Fig. 2 Principal component coordinates of tree species

模糊聚类分析结果得出，当λ<0.9时，各树种的抗寒性能大体分为三类，第一类包括黄杨、扶芳藤、火棘、枸骨；第二类包括女贞、海桐、石楠；第三类包括蚊母。

主成分分析的结果与模糊聚类基本上是一致的（图 2）。

- 将原始数据标准化，用欧氏距离计算每个树种与各指标的抗寒性最大值之间的差异；定义优先比，根据优先比矩阵，依次选取置信水平λ的截集评出相似程度，其各树种优先比得分见表 3。

表 3 8种树种的优先比得分序号
Table 3 Priority Ratio Score Sequence of 8 Species

序号	树种	树种编号	置信水平λ
1	黄杨	5	0.7668
2	扶芳藤	8	0.6070
3	火棘	7	0.5610
4	构骨	4	0.5079
5	石楠	6	0.4921
6	海桐	3	0.3951
7	女贞	1	0.2332
8	蚊母	2	0.2276

根据综合分析结果，将实验树种按照抗寒性分为3类：第一类包括黄杨、扶芳藤、火棘。该类树种适应力强，抗-20℃以下低温，可以广泛应用于北方城市园林。第二类包括构骨、石楠、海桐、女贞。该类树种适应力中等，露地栽培可抗-10至-20℃低温，通过不断驯化有望在城市中推广。第三类蚊母，该类树种适应力差，露地栽培只抗-10℃左右低温，越冬尚须人为保护，暂时不能在城市中推广。

3.2 绿化植物耐热性分类

- 综合各类指标在正常温度和高温下的变化率，对观赏山楂10个种（品种）进行聚类分析，结果表明（图 3）：10个种（品种）山楂聚为3类。其中摩登山楂 ‘托巴’ 、皱叶山楂和阿尔法山楂聚为一类，其各项生理指标总体变化稳定；华盛顿山楂和英国山楂 ‘红云’ 为一类，其各项生理指标总体变化相对稳定；其余5种山楂聚为一类，其各项生理指标总体变化不稳定。

从研究结果看，国外引进的大多数观赏山楂具有一定的忍受或适应夏季高温气候的能力，其中耐热性较强的种（品种）如华盛顿山楂、摩登山楂 ‘托巴’ 以及红蕊山楂、绿山楂 ‘冬国王’ 具有在我国南部及亚热带地区园林应用的潜力，有待推广种植。

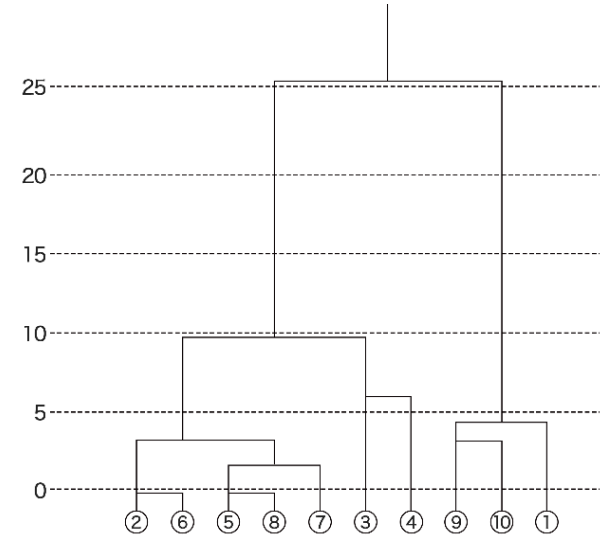


图 3 各供试山楂生理指标综合聚类
Fig. 3 Comprehensive clustering of physiological indexes of experimented *Crataegus* spp.

3.3 绿化植物耐旱性分类

- 根据耐旱性的形态解剖和生理生态指标，选出符合特定的寒旱胁迫耐受性标准的树种如下表4所示。

表4 “气候-树种矩阵”中耐寒耐旱指标体系的树种
Table Tree species in the index system of cold and drought tolerance in the Climate-Species Matrix

植物名	植物学名	英文名	指标数量	指标量化
栓皮槭	*Acer campestre*	Field maple	☼☼☼	3
三角枫	*Acer buergerianum*	Trident maple	☼☼☼☼	4
青皮槭	*Acer cappadocicum*	Cappadocian Maple	☼☼	2
复叶槭	*Acer negundo*	Ashleaf maple	☼☼	2
意大利槭	*Acer opalus*	Bosnian maple	☼☼☼	3
挪威槭	*Acer platanoides*	Norway maple	☼☼☼☼	4
红花槭	*Acer rubrum*	Red maple	☼☼☼☼☼	5
佐辰槭	*Acer x zoeschense*	Zoeschen maple	☼☼	2
红花七叶树	*Aesculus × carnea*	Red horse chestnut	☼	1
臭椿	*Ailanthus altissima*	Chinese tree-of-heaven	☼☼	2
意大利桤木	*Alnus cordata*	Italian alder	☼	1
灰桤木	*Alnus incana*	Grey alder	☼☼	2
垂枝桦	*Betula pendula*	Silver birch	☼☼	2
光叶山核桃	*Carya glabra*	Pignut hickory	☼☼	2
鳞皮山核桃	*Carya ovata*	Shagbark hickory	☼	1
毛山核桃	*Carya tomentosa*	Mockernut hickory	☼☼	2
欧洲栗	*Castanea sativa*	Sweet chestnut	☼	1
黄金树	*Catalpa speciosa*	Western catalpa	☼	1
小叶朴	*Celtis bungeana*	Bunge's hackberry	☼☼	2
高加索朴	*Celtis caucasica*	Caucasian hackberry	☼	1
美洲朴	*Celtis occidentalis*	Hackberry	☼	1
鸡足香槐	*Cladrastis delavayi*	Chinese yellowwood	☼☼	2
君迁子	*Diospyros lotus*	Date plum	☼☼	2
美洲柿	*Diospyros virginiana*	Persimmon	☼	1
狭叶白蜡	*Fraxinus angustifolia*	Narrow-leaved ash	☼☼	2
欧洲白蜡	*Fraxinus excelsior*	Common ash	☼☼	2

3.4 绿化植物耐涝性分类

- 通过对各变量与因子综合分析，上海市65种新优树种根据耐涝性被分为3类（图4）。建议在对树木耐涝性进行预判时，可以优先考虑与光合作用直接相关的叶绿素含量、比叶重和光合速率大小等指标。

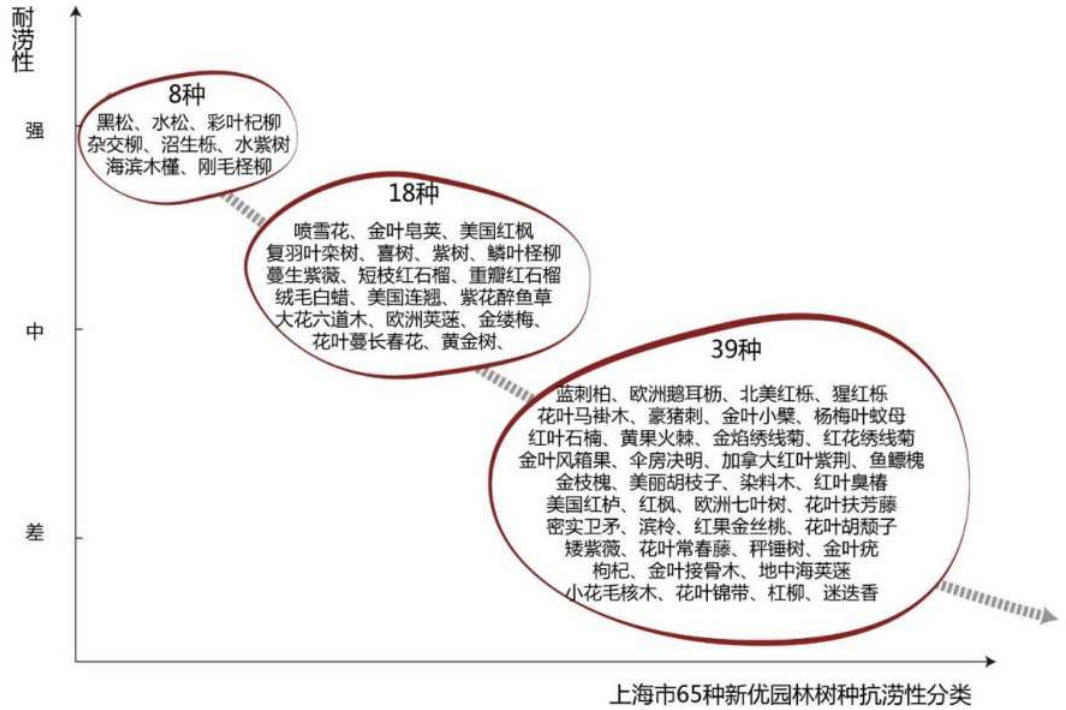


图 4上海市65种新优树种耐涝性分类
Fig.4 Classification of waterlogging resistance of 65 new introduced landscape tree species in Shanghai

3.5 绿化植物抗日灼分类

- 对叶片日灼最大伤害指数、净光合速率、气孔导度、胞间CO_2浓度、蒸腾速率、最大光化学效率、PSII的潜在活性以及吸收光能为基础的性能参数等指标进行主成分分析，分析结果如图所示：

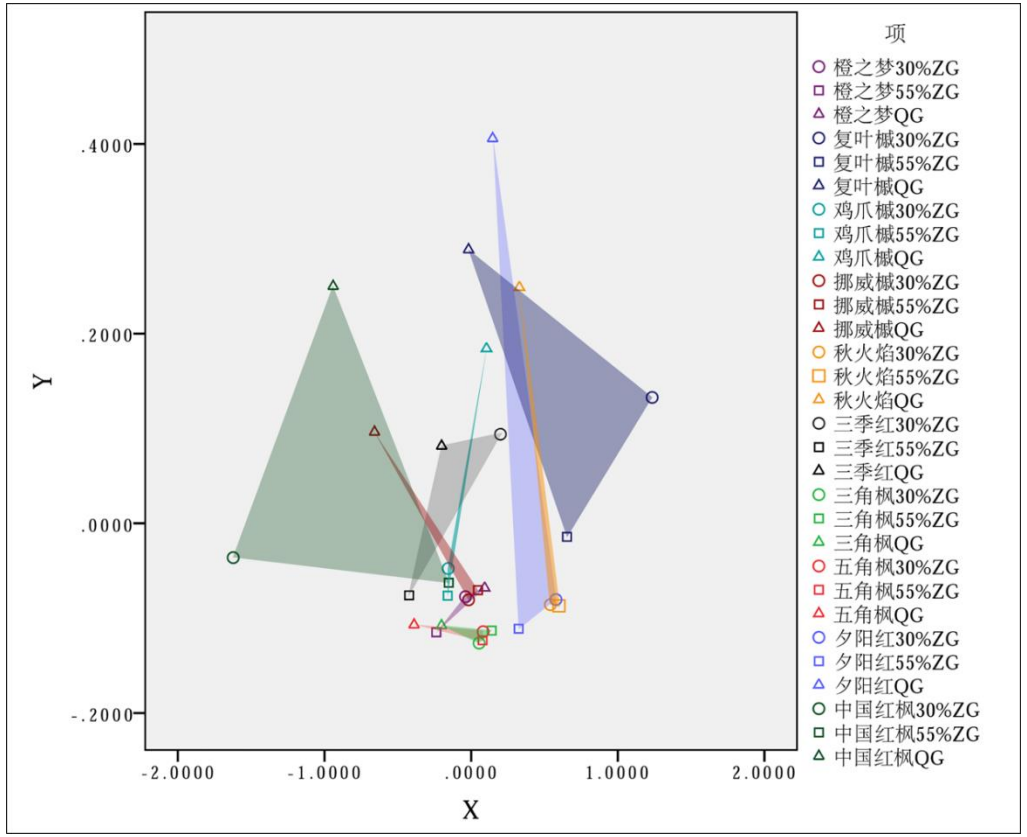


图5 叶片日灼伤害综合评价结果
Fig. 5 Comprehensive evaluation results of leaf sunburn injury

主成分分析之后综合的X坐标为生理坐标，Y坐标为形态总表，依据不同受试树种在不同光环境下携带的X、Y坐标的信息绘制散点图，并将同种树种的散点闭合，综合评价不同受试树种在不同光环境下生理表现和形态表现上的差异，可以将受试树种的叶片日灼伤害类型划分为4类：

（1）A类，包含受试树种复叶槭、中国红枫。类型特点是对应种间Y坐标和X坐标变化范围都较大。这些树种随着光环境的变化，在叶片日灼相关生理表现以及形态表现上出现极大的差异，遮阴能有效地改变叶片日灼伤害的形态表现程度并对相关生理指标有一定的影响。

（2）B类，包含受试树种夕阳红、秋火焰、鸡爪槭、挪威槭。类型特点是对应种间Y坐标变化较大、而X坐标变化很小。这些树种随着光环境的变化，在叶片日灼相关生理表现上差异很小但是在形态表现上差异较大，遮阴能有效地改变叶片日灼伤害的形态表现程度但对生理表现影响很小。

（3）C类，包含受试树种三角枫、五角枫。类型特点是对应种间X坐标变化较小，Y坐标变化极小。这些树种随着光环境的变化，在叶片日灼相关生理表现以及形态表现上差异较小，遮阴对这类树种叶片日灼伤害的形态表现和生理表现影响很小。

（4）D类，包含受试树种三季红、橙之梦。类型特点是对应种间X坐标变化较小，Y坐标变化较小。这些树种随着光环境的变化，在叶片日灼相关生理表现以及形态表现上有一定的差异但差异不大，遮阴对这类树种叶片日灼伤害的形态表现和生理表现影响较小。

- 基于叶片日灼伤害试验，初步得出了不同树种叶片日灼伤害的程度、叶片日灼伤害与光和特性、叶绿素荧光特性等的关系，对绿化树种的日灼伤害有了一定的认识，对日后深入研究树种的日灼伤害与一定的借鉴意义。进一步的工作应结合植物生理学、气象学等相关知识，对于日灼伤害发生的临界环境因子、日灼伤害机理以及动态反映进行深入探讨。未来可规划建立日灼伤害监测预报模型，更好地对日灼伤害进行管控和预防。

3.6 绿化植物耐阴性分类

- 为了宏观衡量各树种的耐阴能力，将24个树种的7项生理指标进行模糊聚类分析和主成分分析，并进行排序以便从综合指标上划分各树种的耐阴性能。

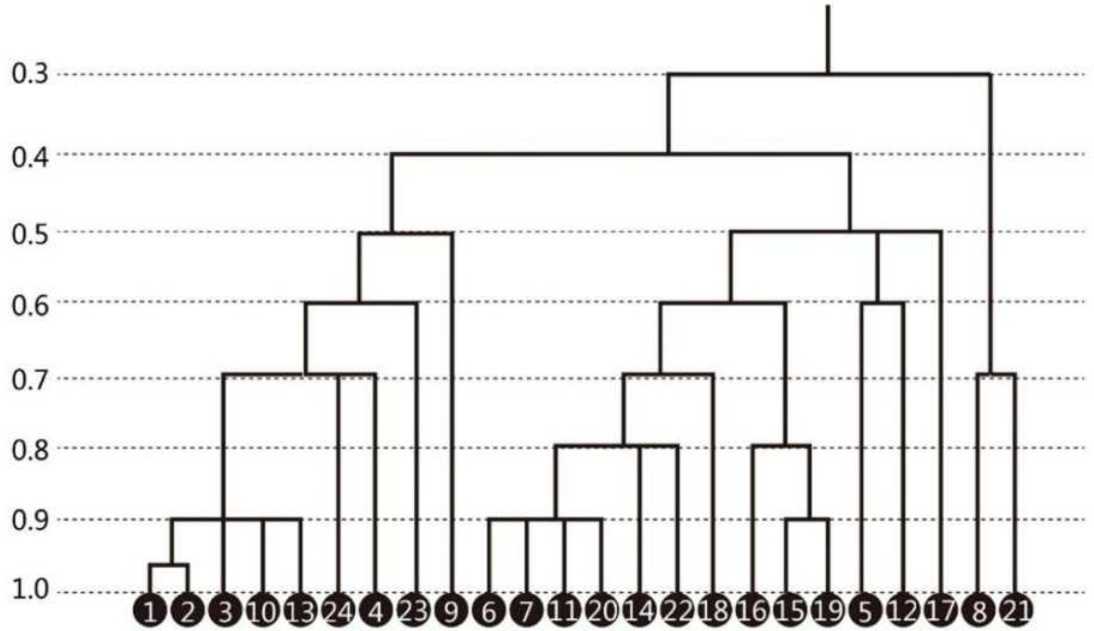
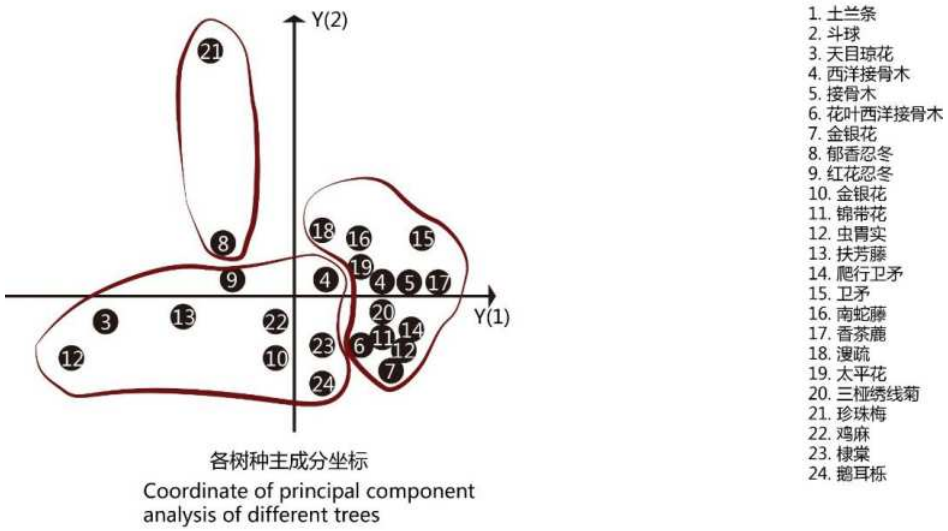


图 6 耐阴性模糊树系图
Fig. 6 shading tolerance fuzzy tree plot

由图6可见，各树种大体分为3类：第一类包括：陕西荚蒾、绣球荚蒾、天目琼花、金银花、扶芳藤、鹅耳枥、西洋接骨木、棣棠、红花忍冬；第二类包括花叶西洋接骨木、金银木、锦带花、三裂绣线菊、爬行卫矛、鸡麻、溲疏、南蛇藤、卫矛、太平花；第三类包括接骨木、猥实、香茶藨、郁香忍冬、华北珍珠梅。



对24个树种几项生理指标进行综合分析的结果表明：这些树种可划分为3类，第一类有太平花、爬行卫矛、南蛇藤、接骨木、花叶西洋接骨木、西洋接骨木、卫矛、金银木、金银花、锦带花、珍珠梅、天目琼花、三裂绣线菊13种，具有较强的耐阴性。第二类有红花忍冬、郁香忍冬、溲疏、陕西荚蒾、扶芳藤、鸡实、猥实、鹅耳枥、香茶藨9种，耐阴性中等。第3类有绣球荚蒾和棣棠2种，耐阴性较弱。

图 7 各树种耐阴性主成分坐标图

Fig. 7 Principal component coordinate map of shading tolerance of 24 tree species

- 通过实验测量光补偿点、叶绿素含量、光合作用产物含量等指标得出的植物耐阴性评价的结论，对绿化植物种植、景观配置提供了较为科学的依据，是当前植物耐阴性研究的重要方法，有利于因地制宜、适地适树，充分发挥绿地的生态效益。然而影响植物耐阴性的因素很多，评价其耐阴性时应尽量全面综合的考量。并且在植物配置的过程中，在考虑植物耐阴性的同时，应考虑到植物形态美感、发育期等多方面要素，使绿化植物的种植满足生态、社会、经济多方面的需求。

3.7 绿化植物抗病虫害分类

- 在绿化树种抗病虫害等级划分时，为了便于量化处理，将各参评绿化树种总抗性等级相关值的范围保持在[0,1]之间，且将各参评指标按照抗性大小划分为5级，将参选的绿化树种分为乔木组和灌木组，根据每组绿化树种抗性指标值所对应的区间，按照高感（0-0.2）、易感（0.2-0.4）、低抗（0.4-0.6）、中抗（0.6-0.8）、高抗（0.8-1）进行排序，32种绿化树种抗病虫害能力的分级图如下：

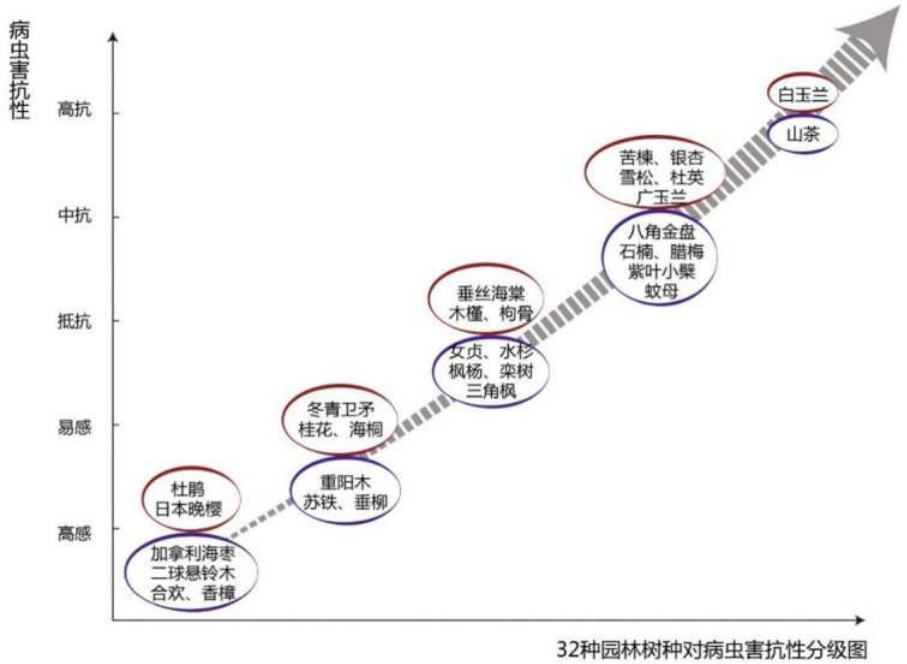


图 8 32种树种对病虫害抗性分级图
Fig. 8 Classification map of resistance of 32 greening tree species to diseases and pests

高感树种抗病虫害最弱，原则上不宜规划种植，对于已经种植的绿化树种，要进行有针对性的养护管理，根据各绿化树种病虫害的发生、发展特点进行预防、防治。对于易感树种可进行点缀种植，低抗树种不建议大面积成片种植，中抗树种可以适当增加种植面积。高抗树种是抗病虫害能力最强的树种，可较广泛的应用于园林绿化中。

3.8 绿化植物抗风性分类

- 为对25种树种的综合抗风性进行客观评价，本文对8项因子进行主成分分析，并绘制二维图如下：

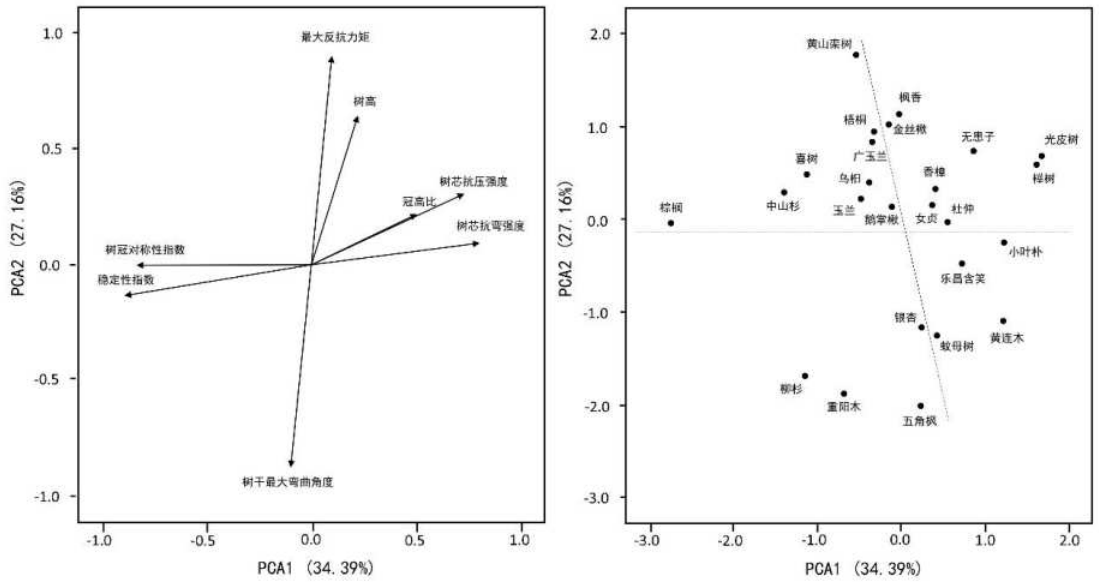


图 9 因子分析与树种抗风性定位图

Fig. 9 Factor analysis and mapping of wind resistance of 25 tree species

由图9可知，第一主成分主要由树芯木材材性因子组成，第二主成分主要由静态拉力因子注册。据此，可将25种受试树种大致分为两大类：第一类是以广玉兰、梧桐、金丝楸、枫香为中心的静态拉力较大、弯曲角度较小的刚性树种，另一类是以银杏为中心的静态拉力较小、弯曲角度较大的韧性树种，这两类不同的树种反映出对风害胁迫不同的应对策略。刚性树种的机械抗拉力较大，且木材材质较高，能抵御一定的风压，但一旦超过风压阈值就会发生风折风倒现象。而韧性树种的树干弯曲变形较大，树冠枝叶茂密，材质弹性较大，受大风胁迫时，能通过产生阻尼震荡而消耗能量，以保证树体安全。树种抗风性评价不能仅仅只关注单因子指标，而需要综合地分析其他相关因子，而这些因子之间有时是具有矛盾性的，更需要综合权衡分析，具体情况具体对待。

应对台风侵袭的树种选择和种植规划对策

（1）平衡拉力、形态与稳定性指数和树木材质分析可以初步得出如下结论，在常见上海市的25种树种中，乌桕、喜树、重阳木、柳杉、蚊母、五角枫、杜仲、女贞、棕榈、小叶朴、中山杉**11种树种具有相对较强的综合抗风性能**；鹅掌楸、广玉兰、枫香、无患子、梧桐、香樟、黄连木、榉树、银杏**9种树种具有中等抗风性能**，风折、风倒的几率较高；玉兰、光皮树、金丝楸、乐昌含笑、黄山栾则**5种树种抗风能力最差。**

（2）在长江口岛屿（崇明岛、长兴岛、横沙岛）、临港新城和杭州湾北岸沿线尽量在绿地系统尤其是**沿海防护林**中配置使用乌桕、喜树、重阳木、柳杉、蚊母、五角枫、杜仲、女贞、棕榈、小叶朴、中山杉等风倒和风折几率低的树种。

（3）在**城区**公园绿地、街道绿地、居住区绿地、单位附属绿地中因有城市建筑围合镶嵌可在第一类的基础上增加鹅掌楸、广玉兰、枫香、无患子、梧桐、香樟、黄连木、榉树、银杏等树种。

（4）玉兰、光皮树、金丝楸、乐昌含笑、黄山栾等容易在大风强风条件下倒伏和折断的树种可在高层建筑群的绿化环境中，在**城乡结合部的郊野公园中**有限使用，且新植树木要配合三角形扶架、扁担式扶架、井字形支柱、标杆式扶桩和连排网络形扶架等抗风措施，定期对树冠进行修整，以保持通透、疏朗的树形。

（5）除了树种的抗风特性外，园林种植设计的树种搭配和株行距设置与防风性能密切相关，目前新建园林中的“高大密厚”快速成效的设计手法增加了种植群落有效抑制横向风速的防风效果但也增加了迎风面植株倒伏和树干折断的风险。**一般短林带种植、带状配置方向平行于台风主导方向、疏朗通透的空间布局**对于绿地的生态安全和绿化抗风性能的提升有正向效果。

3.9 绿化植物耐盐性分类

- 通过对40种绿化植物在生长期进行60天盐池耐盐试验，根据试验期间不同植物的生长表现（存活率、高生长、冠幅增量），同化能力（叶绿素含量）初步确定其耐盐能力和耐盐极限（图10）。

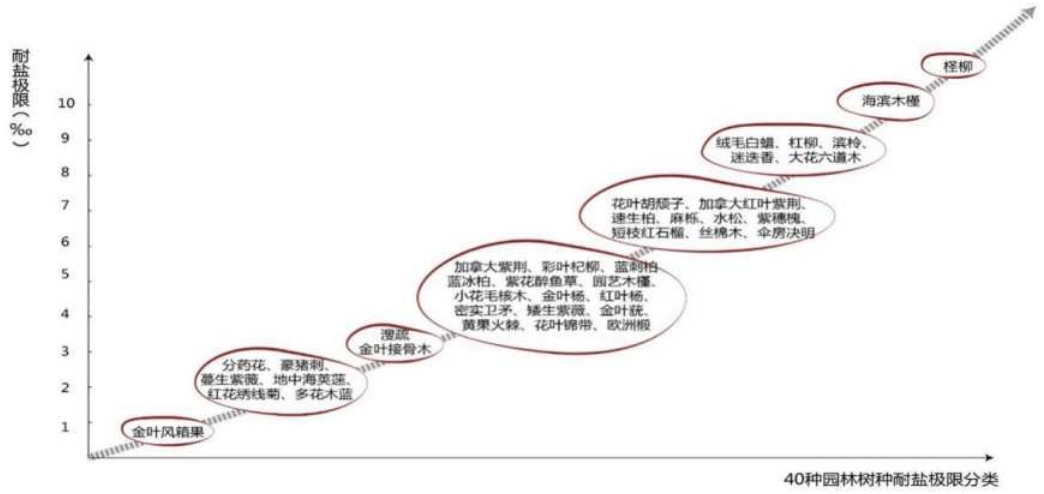


图 10 40种树种耐盐极限分类
Fig. 10 Limit classification of salt tolerance of 40 landscape tree species

耐盐能力分为不耐盐碱、耐轻度盐碱（1‰-2‰），耐中度盐碱（2‰-4‰）、耐重度盐碱（4‰-6‰）、耐特重盐碱（>6‰）。根据实验结果，金叶风箱果耐盐碱能力最差，柽柳耐盐碱能力最强。

- 植物的耐盐机理是一个极为复杂综合的生理过程，单一性状或者指标的测定结果，难以准确反映植物抗盐性的强弱上海21种常见树种在5个不同盐分浓度胁迫下的11项因子指标进行主成分分析的结果如下：

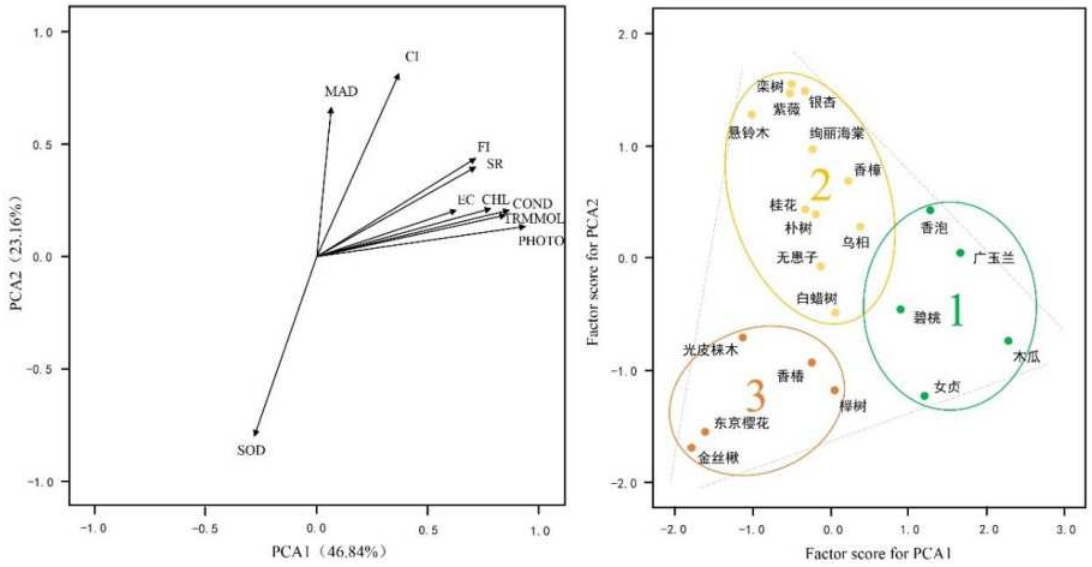


图 11 主成分荷载图与树种得分分布

Fig. 11 Principal component load map and score distribution of 21 tree s.pecies

根据主成分分析结果可将21种植物分为3个组群，第一组为木瓜、广玉兰、香泡、女贞、碧桃5种植物，耐盐性较强；第二组包括香樟、乌桕、银杏、栾树、绚丽海棠、紫薇、朴树、桂花、白蜡、无患子、悬铃木11种，对盐分胁迫表现出较强的生理应激反应，可以通过自身的生理调节来适应不利的盐分胁迫，具有一定的耐盐能力；第三组主要由榉树、香椿、光皮梾木、东京樱花、金丝楸5种树种组成，各项因子均处于较低水平，耐盐性较差。建立在耐盐生理指标上的种类选择能够有效提高耐盐树种的筛选效率，现有对单一或多种类的交叉对比耐盐性研究，对建立耐盐性评价体系具有重要作用。

3.10 绿化植物抗瘠薄分类

- 综合考虑植物肥田指标（固氮效率、落叶含氮量）和生长指标（年相对高、径生长量），将供试植物分为以下4种类型（表5）。
- （1）**固氮效率、落叶含氮量高，生长量大**：江南桤木、胡颓子、花叶胡颓子、常春油麻藤、紫藤、染料木。
- （2）**固氮效率、落叶含氮量高或中等，生长量中等**：合欢、杨梅、多花木蓝。
- （3）**固氮效率、落叶含氮量中等，生长量中等或小**：紫穗槐、华东木蓝、鱼鳔槐、锦鸡儿、树锦鸡儿、红花锦鸡儿、牛奶子、美丽胡枝子、多花胡枝子、红花刺槐、胡枝子、黑荆、桤木、伞房决明。
- （4）**固氮效率中等，落叶含氮量低，生长量中等或小**：杭子梢、马棘、中华胡枝子、银合欢、白刺花、黄檀。

表 5 30种供试固氮植物固氮特性综合评价

Table 5 Comprehensive Evaluation of N-fixing Characters of 30 N-fixing trees

序号	植物名称	固氮效率	鲜叶含氮量	落叶含氮量	年相对高生长	年相对茎生长
1	染料木	+++	+++	+++	+++	+++
2	合欢	+++	+++	+++	++	++
3	常春油麻藤	+++	+++	+++	+++	+++
4	紫藤	+++	+++	+++	+++	+++
5	花叶胡颓子	+++	+++	+++	+++	+++
6	胡颓子	+++	+++	+++	+++	+++
7	江南桤木	+++	++	+++	+++	+++
8	多花木蓝	+++	++	++	++	++
9	紫穗槐	+++	++	++	++	++
10	杨梅	++	++	+++	++	++
11	华东木蓝	++	++	++	++	++
12	鱼鳔槐	++	++	++	++	++
13	锦鸡儿	++	++	++	++	+
14	树锦鸡儿	++	++	++	++	++
15	红花锦鸡儿	++	++	++	++	+
16	牛奶子	++	+	++	++	++
17	多花胡枝子	++	++	++	++	++
18	美丽胡枝子	++	++	++	++	++
19	红花刺槐	++	++	++	++	++
20	胡枝子	++	++	++	++	++
21	黑荆	++	++	++	+	+
22	杭子梢	++	+	+	+	+
23	马棘	++	+	+	+	+
24	桤木	++	++	++	++	++
25	中华胡枝子	++	+	+	++	++
26	银合欢	++	+	+	+	+
27	白刺花	++	+	+	++	++
28	黄檀	++	+	+	+	++
29	伞房决明	++	++	++	++	++
30	海滨木槿（CK）	+	++	+	++	++

不同固氮植物之间的固氮效率皆有差异，且与非固氮对照植物海滨木槿有显著区别。江南桤木、胡颓子、花叶胡颓子、常春油麻藤、紫藤、染料木为固氮效率较高的优良树种。高固氮效率使它们叶片含氮量丰富、生长量大，对提高土壤肥力、改良土壤有积极作用。

总 结

- 城市绿地系统中，绿化植物始终是生态系统功能和服务承担的主体，针对不同立地环境进行适地适树的树种选择是实现绿化生态效益最大化的根本途径。虽然气象似乎瞬息万变，具有无序性，但在一定范围、一定时间内，气候变化还是有规律可寻的。不同城市、不同地区的气候变化特征各不相同。正确把握当地气候变化特征与变化趋势，才可有目的、有计划做出针对性的响应策略。
- 正确认知绿化植物的生态幅度、抗寒性、抗热性、耐阴性、耐旱性、抗瘠薄、抗风性、耐涝性、耐盐性、抗日灼和抗病虫害等各种抗性，科学认识和了解绿化植物的“个性”，提升树种选择的科学性和精准性，才能保障城市绿化系统的生态安全和绿地健康，才能维护绿地、林地、草地、荒漠和湿地健全可持续发展。

TONGJI UNIVERSITY CAUP 同济大学建筑与城市规划学院

Q&A

THANK YOU FOR YOUR ATTENTION

Department of Landscape Study College of Architecture and Urban Planning

Tongji University, Shanghai, China

zds@tongji.edu.cn

Tel: 0086-13761395573

Welcome to Study or Cooperative Research in Tongji University
as Msc, PhD , post-doctor and visiting scholar in ecological planning and landscape plants