

植物功能性状及其叶经济谱对硬化地表的响应

朱济友¹ 于强¹ 徐程扬¹ 姚姜铭² 王戈¹ 崔哲浩¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 广西大学林学院, 南宁 530005)

摘要: 为探究植物叶功能性状及其叶经济谱对城市硬化地表的响应,以北京市典型绿化树种白蜡(*Fraxinus chinensis*)、国槐(*Sophora japonica*)和栾树(*Koelreuteria paniculata*)为研究对象,选择城市环境中典型的3种地表类型:自然地表(CK)、透水硬化地表(T1)和不透水硬化地表(T2),测定其地表温度、土壤含水率及植物叶功能性状等指标。结果表明,硬化地表极显著地升高了城市地表温度($P < 0.01$),且由大到小表现为T1、T2、CK,而极显著地降低了土壤含水率($P < 0.01$),由大到小表现为CK、T2、T1;城市生态环境中,硬化地表对国槐和栾树的影响主要源于高温胁迫,而对白蜡的影响主要源于T2的干旱胁迫;3个树种叶功能性状间表现出相对一致的生态对策,以适应城市环境的变化,叶绿素含量与比叶面积呈显著正相关($P < 0.05$),且分别与叶干物质含量、叶组织密度呈极显著负相关($P < 0.01$),叶干物质含量与叶组织密度呈极显著正相关($P < 0.01$)。全球叶经济谱也存在于城市生态系统中,且总体上向快速投资收益型一端偏移,城市生态环境中植物通过减小气孔密度和比叶面积、缩小气孔面积、增加叶干物质含量和叶组织密度等策略,来适应城市生态系统中的高温、干旱等特殊生境。因此,在城市绿化植物的选择及配置上,建议根据其生态权衡规律,选择耐高温、耐旱的树种,同时通过增加降温、灌溉,减少生长季修枝等措施来降低不利影响。

关键词: 叶功能性状; 叶经济谱; 硬化地表; 生态对策

中图分类号: S161.1; S725.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0204-08

Response of Plant Functional Traits and Its Leaf Economics Spectrum to Urban Pavement

ZHU Jiyu¹ YU Qiang¹ XU Chengyang¹ YAO Jiangming² WANG Ge¹ CUI Zhehao¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract: To understand the adaptation mechanism of plants to the urban ecological environment from the perspective of functional ecology, three common tree species (*Fraxinus chinensis*, *Sophora japonica* and *Koelreuteria paniculata*) planted in three different treatment plots: pervious brick pavement with a permeability coefficient of more than 0.4 mm/s, impervious brick pavement with a permeability coefficient near zero, and non-pavement were selected to understand the effects of pavement on leaf functional characteristics and leaf economics spectrum. The result showed that surface temperature was significantly higher in the pavement treatments than that in the control treatment ($P < 0.01$), with a higher surface temperature noted for the pervious pavement than that for the non-pavement. Soil moisture content was significantly lower in the impervious pavement treatment than that in the pervious pavement and control treatments ($P < 0.01$). Pavement caused heat stress on *Sophora japonica* and *Koelreuteria paniculata*, and the impervious pavement caused drought stress on *Fraxinus chinensis* growth. Leaf functional traits showed relatively consistent ecological countermeasures to adapt to urban environmental changes. Pearson analyses indicated that leaf chlorophyll showed significant positive correlation with specific leaf area ($P < 0.05$), and highly significant negative correlation with leaf dry matter content and leaf tissue density, respectively ($P < 0.01$). Leaf dry matter content showed highly significant negative

收稿日期: 2018-09-22 修回日期: 2018-10-22
基金项目: 林业公益性行业科研专项(20140430102)
作者简介: 朱济友(1993—),男,博士生,主要从事生态林与城市林业培育理论与技术研究,E-mail: zhujy007@163.com
通信作者: 徐程扬(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事公益林与城市林业研究,E-mail: cyxu@bjfu.edu.cn

correlation leaf tissue density ($P < 0.01$). The results indicated that a spectrum of leaf economics also existed in urban pavement environment, and that of the represent species was generally more biased toward the fast investment-return on the leaf economics spectrum. In urban pavement environment, plants would increase leaf dry matter content, leaf tissue density, and reduce stomatal area, stomatal density, and specific leaf area to adapt to special habitats at high temperature and drought stress. Thus, it was necessary to select heat and drought tolerant tree species, manage land with shadowing or irrigation, and reduce trimming branches, in order to guarantee tree growth in paved urban environments.

Key words: leaf functional trait; leaf economics spectrum; pavement; ecological strategies

0 引言

城市生态系统是人类活动干扰作用最强烈的区域^[1]。城市生态学(Urban ecology)不仅注重从生态学角度出发的生态系统结构合理及功能完整,而且强调生态系统能维持对人类的服务功能以及居民健康。城市化进程在推动社会发展的同时,对环境也造成了一系列负面影响^[1-2]。城市下垫面是城市生态系统中最重要载体,近年来,随着城市的迅猛发展,城市硬化地表持续扩张造成了自然地面的缩减,不断影响和改变着城市植被的生长环境,严重阻碍植物水分与能量的平衡,对城市植物的生长发育及其生态功能的发挥造成不利的影响^[3]。研究表明,绿化植物生长普遍存在衰退的现象,这与硬化地表面积扩张有较大关系^[3-4]。城市硬化地表对城市大气温度有明显的增强作用^[5],从而引起植物生长环境的改变,导致植物对所需水分、养分的吸收,呼吸作用、光合作用及蒸腾作用等重要生理活动发生了相应的变化^[6-7]。城市树木在城市生态系统中不仅充当着景观美化的角色,还发挥着削减辐射效应、改善小气候、净化降噪等重要生态功能,而植物叶片是植物内部结构与外部环境进行水气交换及调控的重要器官之一,其功能结构特征能有效反映植物在不同环境条件下的适应性及其生态权衡^[8]。

植物对生境变化的响应与适应一直都是生态学研究热点问题之一。植物功能性状(Plant functional traits)是其在环境中经过长期的自然选择及适应进化逐渐形成,并对生态系统功能有一定影响的内部生理结构及外部形态特征,各种性状间形成一定的权衡关系^[9]。叶片作为植物与外界环境接触面积最大的功能构造,是绝大多数植物能量物质生产与积累的重要载体。因此,在植物众多功能性状中,叶功能性状(Leaf functional traits)能直接反映植物适应环境变化的生态权衡策略,与植物对物质资源的获取、利用及其分配策略关系密切^[8-10]。叶经济谱(Leaf economics spectrum, LES)是一系列相互平衡或协同变化的功能性状组合,量化一系列稳定且连续变化的植物生态策略^[10-11]。

近年来,部分学者就城市地表硬化对植物生理生态的影响进行了初步探讨^[12-14],但研究对象相对单一,研究方法多采用盆栽大田实验模拟方法^[15]。由于研究区域距城区较远,且盆栽实验大多只能反映幼苗的响应情况,难以真实表征城市环境诸多因素对植物长期作用的综合生态效应。纵观国内外全球经济谱的研究,虽然植物经济谱的数据库已涵盖全球大部分地区,但在国内的相关研究仍存在较大空缺,对城市环境引起绿化植物的叶功能性状及其生态权衡策略的研究还未见报道。

基于此,本实验选取城市中 3 种常见的硬化地表类型,在开放环境下测定典型植物在硬化地表下的叶功能性状指标,旨在探究植物功能性状在不同城市硬化地表环境中表现出的生态权衡策略、植物功能性状间的相关关系,以及全球叶经济谱是否也存在于城市生态系统中。为合理配置城市植物,更好地发挥植物景观生态效益及优化绿化用地格局提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

研究地位于北京市奥体中心中轴广场(39°99' N, 116°08' E),周围开阔无高楼遮挡。分别选择生长在完全透水的自然草坪地面(CK)、透水率大于 0.4 mm/s 的长形砖地面(T1)和透水率几乎为 0 的大理石砖地面(T2)的 3 种常见绿化树种国槐、栾树和白蜡(图 1、表 1)。在每个地表类型环境中随机选择 60 株长势良好的林木,每个树种 180 株,总计 540 株。于 2017 年 7—10 月晴朗天气的 06:30—08:30,每株树分东西南北 4 个方位采集中冠层且完全暴露在阳光下成熟、健康的叶子 30 片,放于 5℃冰盒带回实验室测算指标。

1.2 方法

1.2.1 叶片功能性状指标测定

随机选取 10 片树叶在清水中浸泡 12 h,称取叶饱和鲜质量,并放入 105℃干燥箱中杀青后干燥至恒定质量,称取叶干质量。利用游标卡尺避开主脉测量叶厚度,然后利用叶面积扫描仪(LI-3000C



图 1 不同硬化地表类型
Fig. 1 Different surface types

表 1 植物生长情况
Tab. 1 Plant growth conditions

树种	树龄/a	胸径/cm	树高/m	冠幅/m		枝下高/m
				东西	南北	
国槐	16~18	18.5±2.7	11.4±2.4	2.5	2.3	4.6±1.2
栾树	16~18	19.2±3.2	9.3±2.5	3.8	4.2	3.5±1.5
白蜡	16~18	21.3±3.3	10.8±1.9	4.5	4.5	3.9±1.8

型,美国)测量叶面积。叶绿素使用丙酮和乙醇浸提法测定^[16-19]。叶干物质含量为叶干质量和饱和鲜质量比值,g/g;叶组织密度为叶干质量和叶体积比值,g/cm³;叶体积为叶厚度与叶面积乘积,cm³;比叶面积为叶面积和叶干质量比值,cm²/g。

1.2.2 气孔参数测定

采用“印迹法”制片。在每个植株中冠层的活体树枝上,随机选择 30 张健康且成熟的叶片,用脱脂棉球拭去表面杂质及水分后,在叶片背面均匀涂上印迹液,待 2~3 min 形成印迹膜后,分上、中、下 3 个部位避开主脉取下印迹,快速固定后进行制片,该过程在 1 h 内完成。将临时玻片带回实验室,利用光学显微镜(40 倍)进行气孔图像拍摄,每玻片随机选取 10 个视野。气孔参数利用 eCognition 图像处理软件测定^[20]。

1.2.3 地表温度与土壤含水率测定

2017 年 7—10 月,利用红外温度传感器(Optris CS, Optris GmbH, 德国)测定地表温度,将其架在距地面 1 m 的支架上,并在传感器顶端安装透明保护罩,以防止降水的影响。土壤含水率采用 ECH₂O

监测系统(Pullman, WA, 美国)测定,将传感器埋于地表下方 20 cm 处,15 次/min 自动采集数据。3 组仪器分别架设于 3 个不同城市地表类型样地中心。

1.2.4 数据处理

利用 Excel 2016、SPSS 20.0 对所得数据进行整理和处理,并在 SigmaPlot 12.5 中完成制图。

2 结果分析

2.1 硬化地表对地表温度和土壤含水率的影响

7—10 月对不同硬化地表温度测定结果表明,3 个树种的地表温度变化由大到小均表现为 T1、T2、CK(表 2)。与 CK 相比,国槐、栾树和白蜡平均地表温度在 T1 和 T2 上分别极显著提高了 6.81、6.34、5.77℃和 3.43、3.20、1.56℃($P < 0.01$),白蜡在硬化地表环境下的温度升高幅度相对较小。与 CK 相比,在 7—10 月硬化地表环境下,地表温度日最高值超过 40℃的时间明显增加。其中在 T1 和 T2 上,国槐和栾树地表温度日最高值超过 40℃的时间分别占整个生长季的 60.3%、55.6%,白蜡地表温度日最高值超过 40℃的时间相对有所降低。

与 T1 相比,T2 由于表层封闭及质地紧致性阻碍了土壤水分的渗透,土壤含水率极显著低于 CK 和 T1($P < 0.01$)。其中以白蜡的降低幅度最大,土壤含水率日均值低于 15%的时间占整个生长季的 85.8%。国槐和栾树生长下的 T1 土壤平均含水率高于 CK 的 1.21%,而白蜡生长下的 T1 相对 CK 低了 1.83%(表 3)。

表 2 不同地表类型间地表温度和土壤含水率均值样本 *T* 检验

Tab. 2 Paired *T* test of surface temperature and soil moisture among different types of land pavements of plant

指标	树种	均值差		
		透水地表-自然地表	不透水地表-自然地表	不透水地表-透水地表
地表温度/℃	国槐	(6.81±4.62)**	(3.43±2.37)**	(-2.95±1.31)**
	栾树	(6.34±3.87)**	(3.20±3.13)**	(-3.98±1.46)**
	白蜡	(5.77±3.56)**	(1.56±2.56)**	(-2.11±1.73)**
土壤含水率/%	国槐	(1.21±0.63)**	(-3.21±2.41)**	(-5.14±2.55)**
	栾树	(1.01±0.32)**	(-4.11±2.67)**	(-3.52±2.54)**
	白蜡	(-1.73±0.31)**	(-8.76±2.76)**	(-7.89±2.65)**

注:**表示 $P < 0.01$ 上差异极显著,下同。

表 3 不同地表间地表温度日最高值大于 40℃ 和土壤含水率日均值小于 15% 的时间

Tab.3 Total days when maximum value of surface temperature was more than 40℃ and daily mean value of soil moisture content was less than 15% d

指标	树种	自然地表	透水地表	不透水地表
地表温度	国槐	24	72	51
	栾树	21	66	47
	白蜡	0	40	44
土壤含水率	国槐	0	0	10
	栾树	0	0	34
	白蜡	0	8	103

2.2 硬化地表对叶功能性状的影响

2.2.1 对叶绿素的影响

如图 2 所示,在不同硬化地表类型下,国槐、栾树、白蜡的叶绿素含量存在显著差异($P < 0.05$),且在 7—10 月呈先升高后降低的变化,并在 8 月达到最高。国槐、栾树叶绿素含量由大到小依次为 CK、T2、T1。与 CK 相比,国槐、栾树在 8 月叶绿素含量在 T1、T2 上分别显著降低了 17.9%、13.9% 和 12.3%、10.5% ($P < 0.05$);与 T2 相比,国槐、栾树的叶绿素含量在 T1 分别降低了 8.9%、7.5%。白

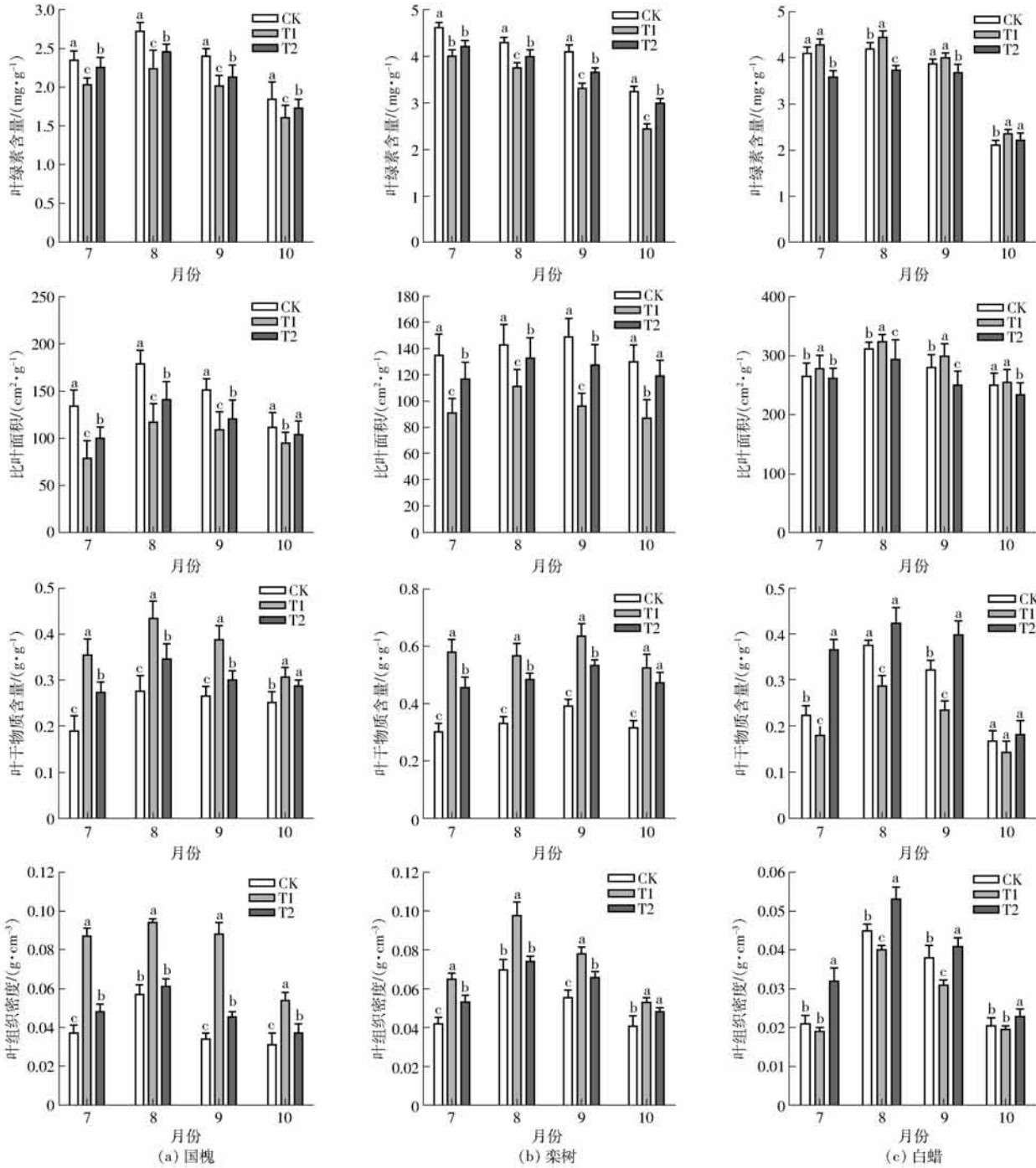


图 2 硬化地表对植物叶功能性状的影响

Fig.2 Effect of hardening land surface on plant functional traits

蜡叶绿素含量总体上以 T1 最高,CK 次之,T2 最低。与 T1 相比,8 月白蜡叶绿素含量在 T2 和 CK 上分别降低了 16.2%、6.9%。

2.2.2 对比叶面积的影响

国槐、栾树、白蜡的比叶面积在不同硬化地表下存在显著差异($P<0.05$) (图 2)。国槐、栾树的比叶面积由大到小依次为 CK、T2、T1,与 CK 相比,国槐、栾树在 T2 和 T1 的比叶面积分别显著降低了 21.1%、10.4% 和 34.7%、22.3%;与 T2 相比,国槐、栾树在 T1 的比叶面积显著降低了 17.0%、16.4% ($P<0.05$)。白蜡比叶面积以 T1 最大,CK 次之,T2 最小。与 T1 相比,8—9 月白蜡比叶面积在 CK 和 T2 分别显著降低了 14.3%、15.6% ($P<0.05$)。

2.2.3 对叶干物质含量的影响

硬化地表对国槐、栾树、白蜡的叶干物质含量影响存在显著差异($P<0.05$) (图 2)。国槐、栾树的叶干物质含量由大到小依次为 T1、T2、CK。与 T1 相比,8 月国槐、栾树叶干物质含量在 T2 和 CK 上分别显著降低了 20.3%、21.4% 和 36.4%、49.4%;与 T2 相比,国槐、栾树叶干物质含量在 CK 分别显著降低了 20.2%、35.6% ($P<0.05$)。在硬化地表下,白蜡的叶干物质含量变化和国槐、栾树不一致,由大到小依次为 T2、CK、T1。与 T2 相比,白蜡叶干物质含量在 CK 和 T1 上分别显著降低了 11.34%、32.3%;与 CK 相比,白蜡叶干物质含量在 T1 上显著降低 23.6% ($P<0.05$)。

2.2.4 对叶组织密度的影响

国槐、栾树的叶组织密度由大到小依次为 T1、T2、CK。与 T1 相比,国槐、栾树的叶组织密度在 T2 和 CK 上分别显著降低了 35.1%、24.5% 和 39.4%、28.6% ($P<0.05$);与 T2 相比,叶组织密度在 CK 环境下分别降低了 6.5%、5.4%,差异不显著($P>0.05$)。白蜡的叶组织密度由大到小依次为 T2、CK、T1。与 T2 相比,白蜡叶组织密度在 CK 和 T1 上分别显著降低了 15.1%、24.5%;与 CK 相比,白蜡叶组织密度在 T1 上显著降低了 11.1% ($P<0.05$)。

2.3 硬化地表对气孔发育的影响

2.3.1 对气孔密度的影响

如图 3 所示,不同硬化地表下气孔密度存在一定差异。与自然地表相比,8 月国槐、栾树气孔密度在 T2、T1 上分别降低了 5.7%、1.6% 和 8.9%、4.2%,但处理间差异不显著;9 月和 10 月气孔密度相对 8 月均显著减小($P<0.05$)。不同硬化地表下,7—9 月白蜡气孔密度由大到小依次为 CK、T1、T2。与 CK 相比,8 月白蜡气孔密度在 T1 上降低了 2.7%,在 T2 上显著降低了 16.3% ($P<0.05$);在 9—10 月气孔密度比 8 月显著减小($P<0.05$);不同地表类型间差异不显著。

2.3.2 对气孔面积的影响

如图 3 所示,不同硬化地表环境下,植物叶片气孔面积存在一定差异,由大到小总体上表现为 CK、T2、T1。与 CK 相比,国槐在 T1、T2 环境下的气孔面

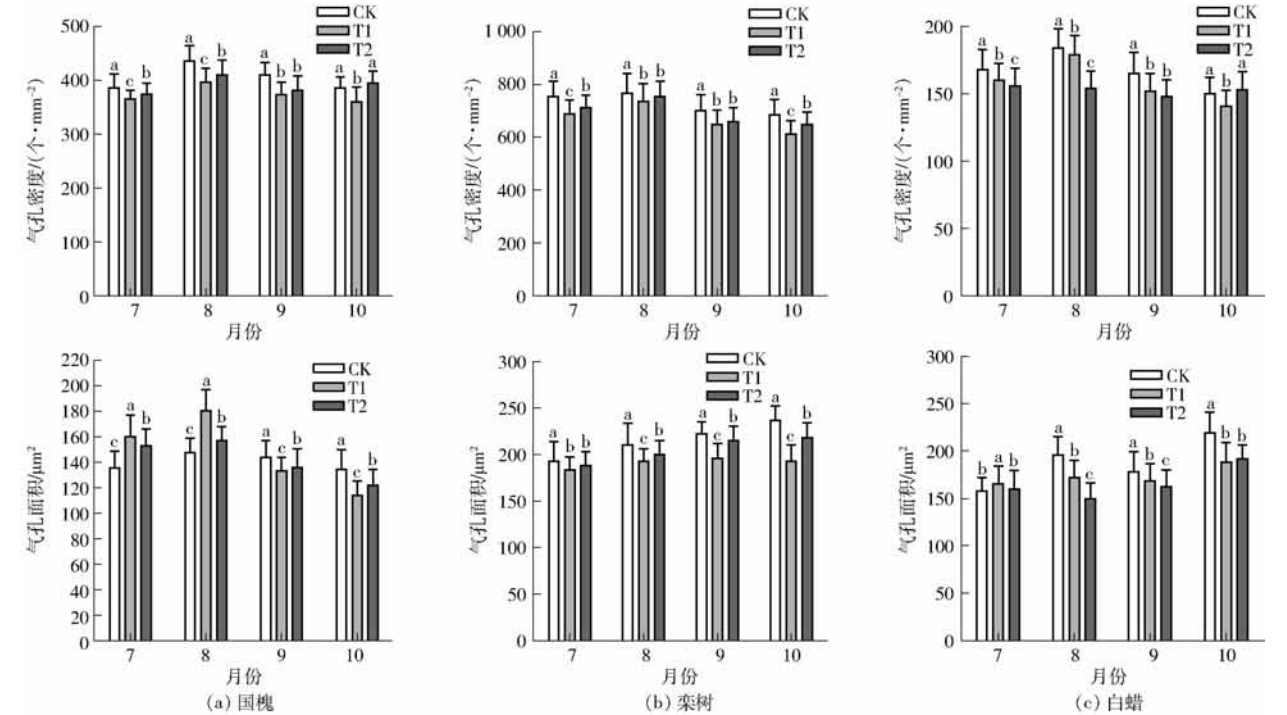


图 3 城市硬化地表对气孔发育的影响

Fig. 3 Effect of urban hardening land surface on stomatal growth

积分别减小了 7.5%、5.2%，但差异不显著。与 CK 相比，8 月栾树气孔面积在 T1 和 T2 上分别降低了 8.5%、4.7%，在 9—10 月 T1、T2 环境下的气孔面积均有所减小，但在 T1 环境中降低幅度更大且达到显著水平($P < 0.05$)。与 CK 相比，8 月白蜡气孔面积在 T2、T1 环境中分别显著降低了 12.2%、23.4% ($P < 0.05$)，到 10 月气孔面积仍以 CK 的最大，T1 与 T2 的气孔面积差异不显著($P > 0.05$)。

2.4 植物叶片各性状间的关系

如表 4 所示，不同城市环境下，植物叶片功能性状间存在一定的相关性。3 个树种叶绿素含量和比叶面积呈显著正相关($P < 0.05$)，和叶干物质含量、叶组织密度呈极显著负相关($P < 0.01$)；叶干物质含量与叶组织密度呈极显著正相关($P < 0.05$)。气孔

密度与气孔面积、比叶面积均呈负相关，但差异不显著($P > 0.05$)。

2.5 地表温度与土壤含水率和植物功能性状的关系

由表 5 可知，在城市生态系统中，由于硬化地表类型的不同造成的地表温度及土壤含水率的差异，从而导致植物在叶片功能性状上表现出了一定的生态权衡与响应规律。地表温度与叶绿素含量呈极显著负相关($P < 0.01$)，与比叶面积、气孔密度和气孔面积均呈显著负相关($P < 0.05$)，与叶干物质含量呈极显著正相关($P < 0.01$)，与叶组织密度呈正相关，但差异不显著。土壤含水率与比叶面积、气孔密度、气孔面积均呈极显著正相关($P < 0.01$)，与叶绿素含量、叶组织密度分别呈正相关和负相关，但差异不显著($P > 0.05$)。

表 4 植物功能性状间的相关性系数
Tab.4 Correlation coefficients of leaf functional traits

叶性状	叶绿素含量	比叶面积	叶干物质含量	叶组织密度	气孔密度	气孔面积
叶绿素含量	1					
比叶面积	0.232 *	1				
叶干物质含量	-0.561 **	-0.632 **	1			
叶组织密度	-0.616 **	-0.814 **	0.457 **	1		
气孔密度	0.012	-0.203	0.102	0.006	1	
气孔面积	0.201	-0.193	0.093	0.028	-0.221	1

注：* 表示 $P < 0.05$ 上差异显著，下同。

表 5 环境因子与植物功能性状间的相关系数
Tab.5 Correlation coefficients of environmental factors and leaf functional traits

环境因子	叶绿素含量	比叶面积	叶干物质含量	叶组织密度	气孔密度	气孔面积
地表温度	-0.872 **	-0.223 *	0.402 **	0.076	-0.205 *	-0.221 *
土壤含水率	0.141	0.593 **	-0.398 **	-0.058	0.524 **	0.312 **

2.6 硬化地表下植物生态策略及其叶经济谱分析

如图 4 所示，城市绿化植物在硬化地表的影响下，表现出了相对一致的权衡策略^[8,21]。植物叶经济谱是一系列密切关联的功能性状组合，表征不同

类型的植物根据其功能需求在自身性状之间进行的资源权衡配置^[21]。城市硬化地表环境中，绿化植物将根系吸收来的养分更多地用于防御构造的构建，采取降低气孔密度、气孔面积、比叶面积，增加叶干物质含量和增加叶组织密度的策略来增强其耐旱力和防御力，以缓解蒸腾作用导致过量失水或高温灼伤。这进一步验证了在城市生态系统中，全球叶经济谱也同样存在，且植物功能性状特征在该谱系中更趋于快速投资收益型。

3 讨论

城市生态系统中，城市硬化地表极显著地提高了地表温度，由大到小依次为透水地表、不透水地表、自然地表。城市硬化地表对地表温度的影响主要表现在两方面：①硬化地表改变了城市下垫面，地表对太阳辐射的吸收、储存及传导能力提高^[22-23]。②硬化地表结构的致密性，增大了太阳净辐射在潜

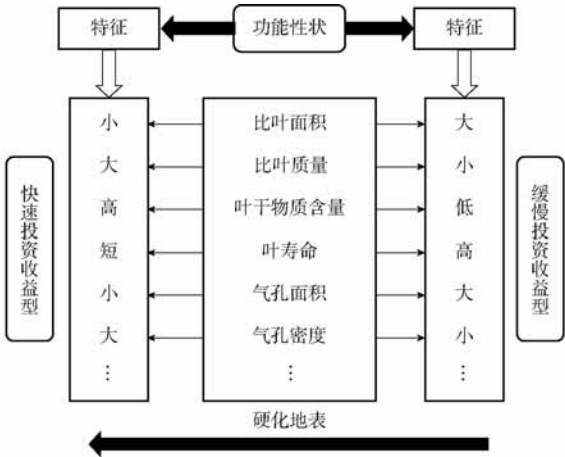


图 4 植物叶经济谱概念示意图

Fig. 4 Conceptual illustration of leaf economics spectrum

热的分配比例,而自然地表的蒸散能力有利于热能的吸收、分配和释放^[24-25]。本研究结果表明,3种典型的城市地表类型中,不透水地表降低树木土壤含水率最为明显,且白蜡受到的影响最大,可能是由于硬化地表的铺设隔绝了地上与地下的连通性,造成水分渗透和贮存能力下降所致。透水地表因密集的孔隙结构增强了水分的渗透,极显著地提高了国槐和栾树的土壤含水率。与自然地表相比,国槐、栾树和白蜡在7—10月生长旺季中,透水地表和不透水地表的温度分别显著增加了5.77~6.81℃和1.56~3.43℃,这与众多学者关于城市地表的研究结果基本一致^[20,25-27]。

植物叶功能性状能较直观地反映出植物对环境变化的响应策略,其中比叶面积、叶干物质含量、叶绿素含量、叶组织密度等指标直接影响植物的基本行为、功能及其生态对策,常被认为是植物对环境资源利用轴上的最佳变量之一^[28]。研究表明,比叶面积与叶干物质含量能在一定程度上表征植物对环境资源的利用能力,与适应环境策略关系密切相关^[29]。其中,比叶面积与植物叶片捕获弱光的能力密切相关,能够反映植物对资源获取与利用的权衡关系^[29-30]。叶干物质含量表征植物对资源、养分和能量的保持能力,叶干物质含量越低的植物叶片具备更强的生产能力^[31]。本研究中,不同树木在城市硬化地表下形成了不同的生境,从而对树木生长的影响也表现出一定的差异。国槐和栾树在硬化地表下的生长主要是受到热胁迫,其中透水地表对地表温度的影响更为显著。硬化地表对白蜡的影响则主

要源于不透水地表形成的干旱胁迫,白蜡在不透水地表的土壤日均含水率低于15%的时间占整个生长期的85.8%。这可能由于生长旺盛期,白蜡冠幅较大、郁闭度较高、凋落物多,对硬化地表形成的热胁迫有一定的缓解作用^[32-33]。植物功能性状间存在一定的相关性,比如植物叶绿素含量与比叶面积呈显著正相关,叶绿素含量、比叶面积分别与叶干物质含量、叶组织密度呈现极显著负相关,叶干物质含量与叶组织密度呈显著正相关,进一步证实了前人的研究结果^[34]。地表温度与叶绿素含量呈极显著负相关,与比叶面积、气孔密度和气孔面积均呈显著负相关,与叶干物质含量呈极显著正相关。3种典型绿化植物对城市生态环境的适应表现出相对一致的生态权衡策略,但不同树种对硬化地表环境的生态权衡程度存在一定差异,说明了叶经济谱的种间差异^[35]。

4 结束语

全球叶经济谱在城市生态系统也同样存在,且典型绿化植物叶片在叶经济谱谱系中位于靠近快速投资收益型一端。为了充分发挥植物的生态效益,在城市绿地及园林规划设计时,建议选择透水透气性能较好的地表材料,从而有效地促进土壤与大气的的水分和气体的流通、交换。同时,在选择树种时,为缓解城市硬化地表对其生长的不利影响和生态服务功能的发挥,应选择耐旱和耐热的植物,适当采取降温 and 灌溉措施,并在保证植物美观和正常生长的情况下,在生长季减少修枝等抚育干扰,以降低城市硬化地表的影响。

参 考 文 献

[1] 李伟峰, 欧阳志云, 陈求稳, 等. 基于遥感信息的北京硬化地表格局特征研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(4): 603-612. LI Weifeng, OUYANG Zhiyun, CHEN Qiuwen, et al. Study on the spatial pattern of impervious surface using remote sensing data with in the urban area of Beijing[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(4): 603-612. (in Chinese)

[2] BEDNOVA O V, KUZNETSOV V A, TARASOVA N P. Eutrophication of an urban forest ecosystem: causes and effects[J]. Doklady Earth Sciences, 2018, 478(1): 124-128.

[3] VOLDER A, VISWANATHAN B, WATSON W T. Pervious and impervious pavement reduce product and decrease lifespan of fine roots of mature Sweetgum trees[J]. Urban Ecosystems, 2014, 17(2): 445-453.

[4] MULLANEY J, LUCKE T, TRUEMAN S J. The effect of permeable pavements with an underlying base layer on the growth and nutrient status of urban trees[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(1): 19-29.

[5] LUNDHOLM J T, LARSON D W. Relationships between spatial environmental heterogeneity and plant species diversity on a limestone pavement[J]. Ecography, 2010, 26(6): 715-722.

[6] BREZEL S W, SELOVER N, VOSE R, et al. The tale of two climates: Baltimore and Phoenix urban LTER sites[J]. Climate Research, 2000, 15(2): 123-135.

[7] MULLANEY J, LUCKE T. Practical review of pervious pavement designs[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2014, 42(2): 111-124.

[8] FUNK J L, CORNWELL W K. Leaf traits within communities: context may affect the mapping of traits to function[J]. Ecology, 2013, 94(9): 1893-1897.

[9] BAKKER M A, CARREÑO-ROCABADO G, POORTER L. Leaf economics traits predict litter decomposition of tropical plants and differ among land use types[J]. Functional Ecology, 2001, 25(3): 473-483.

[10] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum[J]. Nature, 2004, 428(6985): 821-827.

[11] LAVOREL S, GRIGULIS K. How fundamental plant functional trait relationships scale-up to trade-offs and synergies in ecosystem services[J]. Journal of Ecology, 2015, 100(1): 128-140.

[12] 于强, 岳德鹏, DI Yang, 等. 基于 EnKF-MCRP 模型的生态用地扩张模拟研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9):

- 285–293.
- YU Qiang, YUE Depeng, DI Yang, et al. Simulation on ecological land use expansion based on EnKF–MCRP model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 285–293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160939&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.039. (in Chinese)
- [13] 张耘, 于强, 李梦莹, 等. 基于 EnKF–3DVar 模型的海淀区地表温度模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 166–172. ZHANG Yu, YU Qiang, LI Mengying, et al. Simulation of surface temperature in Haidian district based on EnKF–3DVar model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 166–172. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170921&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.021. (in Chinese)
- [14] LEE W B, CHO K T, KIM K H, et al. The effect of the cementite phase on the surface hardening of carbon steels by shot peening[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527(21): 5852–5857.
- [15] NIU S, CLASSEN A T, LUO Y. Functional traits along a transect[J]. Functional Ecology, 2018, 32(1): 4–9.
- [16] ABE N, MIATTO R C, BATALHA M A. Relationships among functional traits define primary strategies in woody species of the Brazilian “cerrado”[J]. Brazilian Journal of Botany, 2018, 41(2): 1–10.
- [17] CRAINE J M, FROECHLE J, TILMAN D G. The relationships among root and leaf traits of 76 grassland species and relative abundance along fertility and disturbance gradients[J]. Oikos, 2001, 93(2): 274–285.
- [18] ORDOÑEZ J C, BODEGOM P M V, WITTE J P M, et al. A global study of relationships between leaf traits, climate and soil measures of nutrient fertility[J]. Global Ecology & Biogeography, 2010, 18(2): 137–149.
- [19] GALMÉS J, FLEXAS J, SÁVÉ R, et al. Water relations and stomatal characteristics of Mediterranean plants with different growth forms and leaf habits: responses to water stress and recovery[J]. Plant & Soil, 2007, 290(1/2): 139–155.
- [20] 朱济友, 徐程扬, 吴鞠. 基于 eCognition 植物叶片气孔密度及气孔面积快速测算方法[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(5): 37–45. ZHU Jiyu, XU Chengyang, WU Ju. Fast estimation of stomatal density and stomatal area of plant leaves based on eCognition [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(5): 37–45. (in Chinese)
- [21] DONOVAN, LISA A, MAHERALI, et al. The evolution of the worldwide leaf economics spectrum[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2011, 26(2): 88–95.
- [22] MONTAGUE T, KJELGREN R K. Energy balance of six common landscape surface and the influence of surface properties on gas exchange of four containerized tree species[J]. Scientia Horticulturae, 2004, 100(1/4): 229–249.
- [23] NUGIS E, KUHT J, ETANA A, et al. Effects of seedbed characteristics and surface layer hardening on crop emergence and early plant growth[J]. Agronomy Research, 2009, 7(2): 847–854.
- [24] ASaeda T, CA V T, WAKE A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(3): 413–427.
- [25] KJELGREN R, MONTAGUE T. Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces[J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(1): 35–41.
- [26] 汪旭明, 陈媛媛, 王效科. 人工覆盖地表对北京典型绿化树光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2423–2430. WANG Xuming, CHEN Yuanyuan, WANG Xiaoke. Impact of land pavement on photosynthetic characteristics of common greening trees in Beijing, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2423–2430. (in Chinese)
- [27] WENG Q, DENGSHENG L U. A sub-pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States [J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2008, 10(1): 68–83.
- [28] HETHERINGTON A M, WOODWARD F I. The role of stomata in sensing and driving environmental change[J]. Nature, 2003, 424(6951): 901–908.
- [29] 陈媛媛, 江波, 王效科, 等. 元宝枫幼苗生长和光合特性对硬化地表的响应[J]. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3258–3265. CHEN Yuanyuan, JIANG Bo, WANG Xiaoke, et al. Responses of growth and photosynthetic characteristics of *Acer truncatum* seedlings to hardening pavements[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(12): 3258–3265. (in Chinese)
- [30] PIERCE S, BRUSA G, SARTORI M, et al. Combined use of leaf size and economics traits allows direct comparison of hydrophyte and terrestrial herbaceous adaptive strategies[J]. Annals of Botany, 2012, 109(3): 1047–1053.
- [31] REICH P B. The world-wide “fast-slow” plant economics spectrum: a traits manifesto[J]. Journal of Ecology, 2014, 102(2): 275–301.
- [32] HIGASHIYAMA H, SANO M, NAKANISHI F, et al. Field measurements of road surface temperature of several asphalt pavements with temperature rise reducing function[J]. Case Studies in Construction Materials, 2016, 4(C): 73–80.
- [33] SCHINDELBECK R R, VAN ES H M, ABAWI G S, et al. Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management[J]. Landscape and Urban Planning, 2008, 88(2): 73–80.
- [34] 朱济友, 于强, 刘亚培, 等. 植物功能性状及其叶经济谱对城市热环境的响应[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(9): 1–10. ZHU Jiyu, YU Qiang, LIU Yapei, et al. Response of plant functional traits and leaf economics spectrum to urban thermal environment[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(9): 1–10. (in Chinese)
- [35] 朱济友, 于强, YANG Di, 等. 叶生态特征及其相关性对下垫面热效应的生态权衡[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 201–209. ZHU Jiyu, YU Qiang, YANG Di, et al. Ecological balance of leaf ecological characteristics and their correlation to thermal effects of underlying surfaces[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 201–209. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181124&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.024. (in Chinese)