

DOI: 10.5846/stxb202107071811

崔博文,汪旭明,苏跃波,于伟伟,陈媛媛,王效科.城市林木生物量对硬化地表和种植密度的响应.生态学报,2022,42(11):4463-4472.

Cui B W, Wang X M, Su Y B, Yu W W, Chen Y Y, Wang X K. Responses of biomass of urban trees to pavement and spacing. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4463-4472.

城市林木生物量对硬化地表和种植密度的响应

崔博文^{1,2},汪旭明³,苏跃波⁴,于伟伟^{1,2},陈媛媛⁵,王效科^{1,2,*}

1 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

2 中国科学院大学,北京 100049

3 福建师范大学地理科学学院,湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室,福州 350007

4 深圳市环境科学研究院,深圳 518001

5 中国科学院武汉植物园,中国科学院水生植物与流域生态重点实验室,武汉 430074

摘要:以北京市典型绿化树种油松、白蜡和元宝枫为实验对象,设置不透水地表、透水地表和对照(自然地表)3种地表类型和低(株行距为2.0 m×2.0 m)、中(1.0 m×1.0 m)、高(0.5 m×0.5 m)3个种植密度,经过6年的生长,对树木的生长和生物量进行了测定。结果表明:相比于对照,不透水地表下油松、白蜡和元宝枫的树高生长受到抑制,白蜡和元宝枫的单株生物量分别降低2.1%—27.1%和33.6%—52.3%,根冠比分别增加3.4%—25.8%和15.7%—23.4%。相比于不透水地表,透水地表下白蜡和元宝枫的树高显著增加,白蜡的单株生物量增加5.3%—45.5%,根冠比下降11.4%—18.7%。随着密度的增加,3种树木的基径和单株生物量显著降低,但中低密度下的单位面积生物量无显著性差异。此外,硬化地表与种植密度对树木的基径、树高、单株生物量和根冠比均无显著的交互作用。因此,在城市绿化中,采用透水地表来替代不透水地表,有利于改善树木生境进而促进树木生长。白蜡相比元宝枫更能适应硬化地表的不利影响,是更好的城市绿化树种的选择。同时,合理的种植密度是保证城市树木生长的重要因素。

关键词:城市树木;硬化地表;种植密度;生物量;根冠比

Responses of biomass of urban trees to pavement and spacing

CUI Bowen^{1,2}, WANG Xuming³, SU Yuebo⁴, YU Weiwei^{1,2}, CHEN Yuanyuan⁵, WANG Xiaoke^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Science, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-Geographical Processes of the Ministry of Education, College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

4 Shenzhen Academy of Environmental Sciences, Shenzhen 518001, China

5 CAS Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China

Abstract: With the accelerating of urbanization, land pavement has been expanding rapidly in cities worldwide, leaving the limited space available for urban trees. Many trees have to be planted next to or within paved land. Land pavement prevents the exchanges of water, air, nutrient, and heat between soils and other environmental compartment, and changes the microclimate of urban trees, thus significantly influences the growth of urban trees. The spacing of trees will result in plant competition for light, water and nutrients and it is also an important factor which can affect the growth of urban trees. In this study, three urban tree species, including pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.), ash (*Fraxinus chinensis* Roxb.), and maple (*Acer truncatum* Bunge.), were planted on different pavement types (impervious brick pavement, pervious brick pavement,

基金项目:国家自然科学基金(41571053,71533005)

收稿日期:2021-07-07; 网络出版日期:2022-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxk@cees.ac.cn

and no pavement as the control) at three different spacings, including low (0.5 m×0.5 m apart), middle (1.0 m×1.0 m), and high (2.0 m×2.0 m). After 6 years of growing, the basal diameter, height, individual biomass, and its allocation of the three tree species were investigated. Compared with the control, the height of pine, ash, and maple under impervious pavement significantly ($P<0.05$) decreased 13.5%—23.9%, -4.6%—20.9%, and 15.5%—22.1%, respectively. The individual biomass of ash and maple under impervious pavement also significantly ($P<0.05$) decreased 2.1%—27.1% and 33.6%—52.3%. While the root to shoot ratio (R:S ratio) of ash and maple under impervious pavement significantly ($P<0.05$) increased 3.4%—25.8% and 15.7%—23.4%. Relative to impervious pavement, the height of ash and maple under pervious pavement significantly ($P<0.05$) increased 11.6%—37.0% and 11.2%—26.2%. The individual biomass of ash under pervious pavement significantly ($P<0.05$) increased 5.3%—45.5%, R:S ratio significantly ($P<0.05$) decreased 11.4%—18.7%. The basal diameter and individual biomass of the three tree species were inhibited with the increase of spacing. While there was no significant difference on biomass per area between low and middle spacing for the three tree species. In addition, there was no significant interactions between pavement and spacing inhibition of basal diameter, height, individual biomass, and R:S ratio in the three urban tree species. Therefore, pervious materials are more suitable for land pavement where trees will be planted. Ash showed more tolerance to land pavement than maple, indicating that the selection of tolerant tree species is essential for urban planting. The rational close planting is also an important factor to ensure the growth of urban trees.

Key Words: urban trees; pavement; spacing; biomass; root to shoot ratio

城市树木能够提供广泛的生态系统服务功能,如通过遮阴和蒸腾降温缓解城市热岛效应^[1];通过林冠截流减轻城市内涝^[2];以及为城市居民提供休闲娱乐的功能^[3]等。然而,随着城市化进程的加快,不透水地表的面积不断增加^[4],大量的树木不得不种植在不透水地表的生境中。不透水地表阻碍了土壤与大气间的水分和物质交换,进而改变了植物生存的气候、土壤和生物等环境因子^[5-8],最终影响城市植物的生长及其生态系统服务功能^[9]。同时,树木个体之间普遍存在的竞争关系影响树木的发育、生长和生存^[10-12]。林分密度影响植物生长的空间及冠层的发展,从而影响其对资源的利用^[13-14]。因此,探究不同地表类型及种植密度对城市树木生长的影响具有重要意义。

目前,国内外已经开展了较多关于硬化地表对城市树木生长影响的研究,研究发现硬化地表主要会对植物造成热胁迫、干旱胁迫和养分胁迫,降低植物的光合作用,进而抑制植物的生长^[6, 15-17]。硬化地表还会改变土壤细菌群落组成,降低土壤细菌的香依指数^[18]。同时,不同硬化地表类型(不透水、透水)对树木的生长也有不同的影响,Morgenroth and Visser^[19]和 Morgenroth^[16]发现,相比于不透水地表,透水地表显著增加了法桐(*Platanus orientalis*)幼苗的树高、胸径、地上和地下生物量。不同树种对硬化地表适应能力也有所不同,如 Wang^[20]发现硬化地表显著降低了银杏(*Ginkgo biloba* L.)的净光合速率、蒸腾速率、最大光合能力和最大羧化速率,而白蜡则表现为与对照间无显著性差异。当前,城市中硬化地表对树木生长的研究相对较多,但研究年限较短,缺乏长期的影响研究。此外,这些研究多受限于原位实验,主要是胸径和树高指标的表征,而树木生物量及其分配的研究相对较少。鉴于此,本研究通过建立较大面积的原位模拟实验场,设置不透水地表、透水地表和对照(自然地表)3个地表类型,及2.0 m×2.0 m、1.0 m×1.0 m、0.5 m×0.5 m共3种(低、中、高)种植密度,栽植北京市3种常见绿化树油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、白蜡(*Fraxinus chinensis* Roxb)和元宝枫(*Acer truncatum* Bunge),经过6年生长,测定树木的基径、树高和单株生物量,主要目的是探索不同地表类型、密度及其交互作用对树木生长和生物量分配的影响,以及不同树种对硬化地表的响应,为城市绿化管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于北京市昌平区马池口镇丈头村种子管理站(40°12'N, 116°08'E),地势平坦,周围无建筑物及

树木遮挡,属于温带大陆性季风气候,全年四季分明。年均气温 13.2 °C,年均日照时数 2684 h,无霜期约 200 d。年均降水量为 550 mm,主要集中在 6—9 月份(昌平统计年鉴,2009—2018)。土壤类型为潮土,质地为砂壤,土壤理化性质为:土壤容重为 1.5 g/cm³,土壤有机质含量为 16.4 g/kg,全氮含量为 0.9 g/kg,速效磷含量为 102.1 mg/kg,土壤 PH 值为 8.3。实验前该块地为普通农田,多年种植小麦和玉米。

1.2 实验设计与材料

实验共占地约 3510 m²(54 m×65 m,东西×南北),实验采用裂区试验设计,按照东西方向平均分成 3 个区域,从西到东分别设置不透水地表、透水地表处理和对照。不透水地表采用透水率几乎为 0 的不透水砖进行铺设,透水地表采用渗透率大于 0.4 mm/s 的透水砖铺设,以自然地表为对照,每种地表类型 3 个重复。同时每个重复内设置了低、中、高 3 个密度水平,种植间距分别为 2.0 m×2.0 m、1.0 m×1.0 m、0.5 m×0.5 m,占地面积分别为 80 m²(10 m×8 m)、25 m²(5 m×5 m)和 9 m²(3 m×3 m),分别种植树苗为 18 棵、23 棵和 23 棵。

2012 年 4 月进行整地并铺设地面,铺设时根据试验设计预留出 20 cm×20 cm 的方形树坑,4 月 16 日进行树苗移栽。实验选取北京市 3 种常见的绿化树种—油松、白蜡和元宝枫的一年生幼苗进行实验。栽植油松、白蜡和元宝枫一年生幼苗均为 576 棵,共计 1728 棵,栽植时树苗随机选取。油松、白蜡和元宝枫的平均基径分别为(14.0±0.5) mm、(14.8±1.0) mm、(6.7±0.3) mm,平均树高分别为(77.3±1.9) cm、(118.5±2.4) cm、(44.5±7.4) cm。为保障苗木的成活率,在种植初期进行常规灌溉,2013 年后停止灌溉。同时在每年夏季喷洒农药以防止害虫侵袭,保障树木健康生长。

1.3 测定方法

1.3.1 基径和树高

在 2017 年 9 月,测定所有树木的基径和树高。基径采用有数字显示的游标卡尺(CD-15, Mitutoyo, Kanagawa, Japan)测定距地面 3 cm 处的树干直径,游标卡尺精度为 0.01 mm。树高采用标准测高杆(10 M, 中宝,石家庄,中国)测定树木从地面根茎到树梢的高度。

1.3.2 单株生物量

2017 年 9 月—11 月采用整株收获法测定了树木的单株生物量。在每个小区,根据基径均值的一倍标准差(mean±sd)选择 5 株样木进行生物量测定。距离地面 3 cm 处将其伐倒,将整个树冠分成冠上、冠中、冠下三层测定枝叶生物量。每一层的树枝划分为新叶、老叶(油松),新枝、枯枝,和果实。待树叶与树干分离后,将树干按 1m 一段截取,截取处取 5 cm 厚圆盘一个。每部分鲜重采用电子天平(MP60K-1,上海舜宇恒平科学仪器,上海)称量。然后分别取样 500—1000 g 样品用于含水率的测定,如果样品鲜重小于 1000 g,则全部用于含水率的测定。树木的根系采用挖掘机将其全部挖出。由于细根(直径< 2 mm)具有很高的不确定性且占比较低,只有粗根(直径> 2 mm)纳入了统计。将清理干净的树根划分为树桩和粗根,然后进行称重。粗根和树桩分别随机取 500—1000 g 进行含水率的测定。对于小的样木,所有的根系进行烘干称重。所有的样品在烘干之前存放在保温箱里。

所有样品置于 70 °C 恒温下烘干至恒重,测定样品含水率以计算各部分干重。地上生物量为树干、枝、叶片及果实的总和,地下生物量为根系的生物量,地下生物量比地上生物量为根冠比。株行距为 0.5 m×0.5 m 的油松苗木在第六年时,全部发生死亡,因此本研究中缺少该密度下油松的树高、基径和生物量资料。

1.4 数据分析

数据在分析之前,利用夏皮罗-威尔克检验(Shapiro-Wilk test)和巴特勒球形检验(Bartlett test)方法对数据进行正态分布和方差齐性检验,并对不满足上述条件的数据进行对数转换。数据统计分析基于 R v.4.0.0,采用双因素方差分析检验地表类型、种植密度及其交互作用对树木基径、树高、单株生物量及根冠比等测定指标的影响,并利用杜凯氏(Tukey's Honestly Significant Difference)分析进行多重分析的显著性检验。在所有分析中 $P < 0.05$ 时,认为处理间差异达到了显著性水平。文中图数据均为平均值和标准差(means±SD),画图由 origin 9.0 完成。

2 结果与分析

2.1 基径

地表类型显著影响元宝枫的基径($P<0.05$),但是对油松和白蜡的基径无显著影响(表1)。相比于对照,不透水地表和透水地表处理下,元宝枫的基径分别显著降低了8.2%—25.3%和8.6%—22.1%(图1c)。密度对油松、白蜡和元宝枫的基径均有显著影响($P<0.05$)。相比于低密度,中密度下油松的基径显著降低了10.7%—28.6%,中密度和高密度下白蜡的基径分别显著降低了21.4%—32.5%和27.2%—39.9%,元宝枫的基径分别显著降低了22.5%—33.4%和32.0%—44.7%(图1)。地表类型和密度对油松、白蜡和元宝枫的基径无显著的交互作用。

表1 地表类型和密度复合作用下3个树种基径、树高、单株生物量和根冠比的双因素方差分析结果

Table 1 Results of ANOVA (P values) for the individual effects and interactions of pavement type and spacing on basal diameter, height, individual biomass, and root to shoot ratio (R:S ratio) of pine, ash, and maple. Statistically significant effects ($P<0.05$) are marked in bold ($n=3$)

变量 Variable	树种 Specie	地表类型 Pavement	密度 Spacing	地表×密度 P×S
基径 Basal diameter	油松	0.0510	0.0031 **	0.4041
	白蜡	0.1410	<0.0001 ***	0.4250
	元宝枫	0.0110 *	<0.0001 ***	0.9180
树高 Height	油松	0.0222 *	0.0443 *	0.6975
	白蜡	0.0004 ***	0.4430	0.0780
	元宝枫	0.0001 ***	0.3802	0.7402
单株生物量 Individual biomass	油松	0.0382 *	<0.0001 ***	0.0241 *
	白蜡	0.0090 **	<0.0001 ***	0.0648
	元宝枫	<0.0001 ***	<0.0001 ***	0.1900
根冠比 R:S ratio	油松	0.2240	0.6930	0.5570
	白蜡	0.0024 **	0.0751	0.0885
	元宝枫	0.0354 *	0.0128 *	0.9708
单位面积生物量 Biomass per area	油松	0.5288	0.0211 *	0.5813
	白蜡	0.2260	<0.0001 ***	0.2960
	元宝枫	0.0055 **	<0.0001 ***	0.2264

*, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$

2.2 树高

地表类型对油松、白蜡和元宝枫的树高都有显著影响($P<0.05$)(表1)。相比于对照,不透水地表下油松、白蜡和元宝枫的树高分别显著降低了13.5%—23.9%、-4.6%—20.9%、和15.5%—22.1%;透水地表下油松的树高显著降低了16.1%—16.6%,而透水地表下白蜡和元宝枫的树高与对照无显著性差异;相比于不透水地表,透水地表下白蜡和元宝枫的树高增加了11.6%—37.0%和11.2%—26.2%。密度对油松的树高有显著影响($P<0.05$)。相比于低密度,中密度下油松的树高显著降低了9.2%—24.1%(图1)。地表类型和密度对油松、白蜡和元宝枫的树高同样无显著的交互作用。

2.3 单株生物量与根冠比

地表类型显著影响白蜡和元宝枫的单株生物量($P<0.05$)(表1)。相比于对照,不透水地表下白蜡和元宝枫的单株生物量显著降低了2.1%—27.1%和33.6%—52.3%;透水地表下元宝枫的单株生物量显著降低了28.5%—46.9%,而透水地表下白蜡的单株生物量与对照无显著性差异;相比于不透水地表,透水地表下白蜡的单株生物量增加了5.3%—45.5%。密度对油松、白蜡和元宝枫的单株生物量都有显著影响($P<0.05$)。相比于低密度,中密度下油松、白蜡和元宝枫的单株生物量分别显著降低了39.3%—66.1%、51.2%—64.7%和58.2%—66.4%,高密度下白蜡和元宝枫的单株生物量分别显著降低了67.4%—75.7%和71.4%—81.0%。相

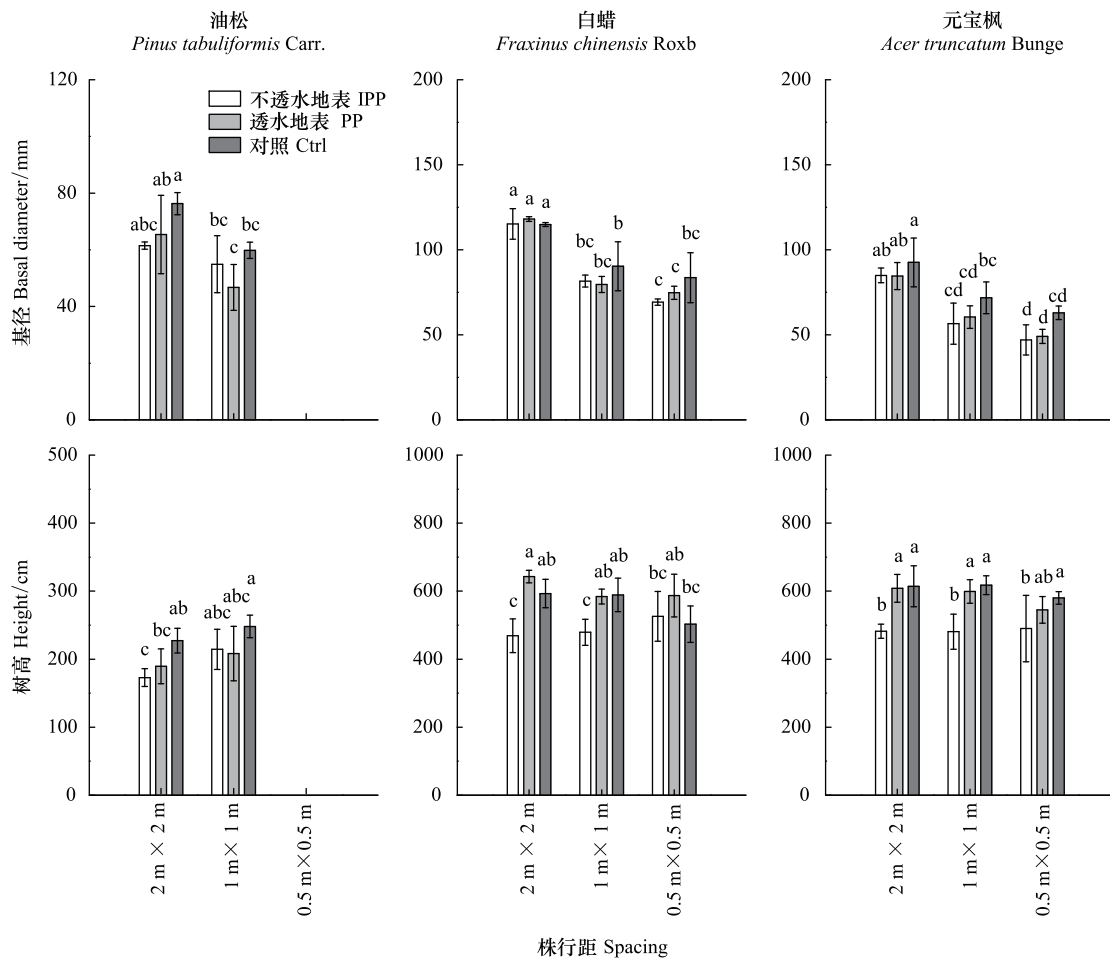


图1 地表类型和密度对油松、白蜡和元宝枫基径和树高的影响

Fig.1 Effects of pavement types (impervious pavement, pervious pavement, and control) and spacing (2.0 m×2.0 m, 1.0 m×1.0 m, and 0.5 m×0.5 m apart) on basal diameter and height of pine, ash, and maple

图中不同小写字母表示不同柱状图之间存在显著性差异($P < 0.05$);图中数据为平均值±标准差

比于中密度,高密度下白蜡的单株生物量显著降低了 12.1%—48.9% (图 2)。尽管不同密度下密度对不同地表类型下油松的单株生物量影响不同,但只有低密度下不同地表类型对单株生物量的影响出现显著差异,因此地表类型和密度对油松的单株生物量表现为显著的交互作用。

地表类型对白蜡和元宝枫的根冠比都有显著影响($P < 0.05$)。相比于对照,不透水地表下白蜡和元宝枫的根冠比显著增加了 3.4%—25.8%和 15.7%—23.4%;透水地表下白蜡和元宝枫的根冠比与对照均无显著性差异;同时相比于不透水地表,透水地表下白蜡的根冠比显著降低了 11.4%—18.7%。密度对元宝枫的根冠比有显著影响($P < 0.05$)。相比于低密度,高密度下的元宝枫的根冠比显著增加了 18.3%—22.0%;中密度与低密度和高密度的根冠比均无显著性差异(图 2)。地表类型和密度对油松、白蜡和元宝枫的根冠比同样无显著的交互作用。

2.4 基径、单株生物量和单位面积生物量与密度的关系

白蜡和元宝枫的基径和单株生物量与种植密度存在指数关系(图 4)。随着密度的增加,不同地表类型下树木的基径和单株生物量均呈现下降的趋势。油松、白蜡和元宝枫的单位面积生物量主要受密度影响($P < 0.05$)(表 1)。低密度的油松的单位面积生物量显著低于中密度;低密度和中密度的白蜡和元宝枫的单位面积生物量显著低于高密度,而白蜡和元宝枫的单位面积生物量在低密度与中密度间无显著性差异(图 3)。

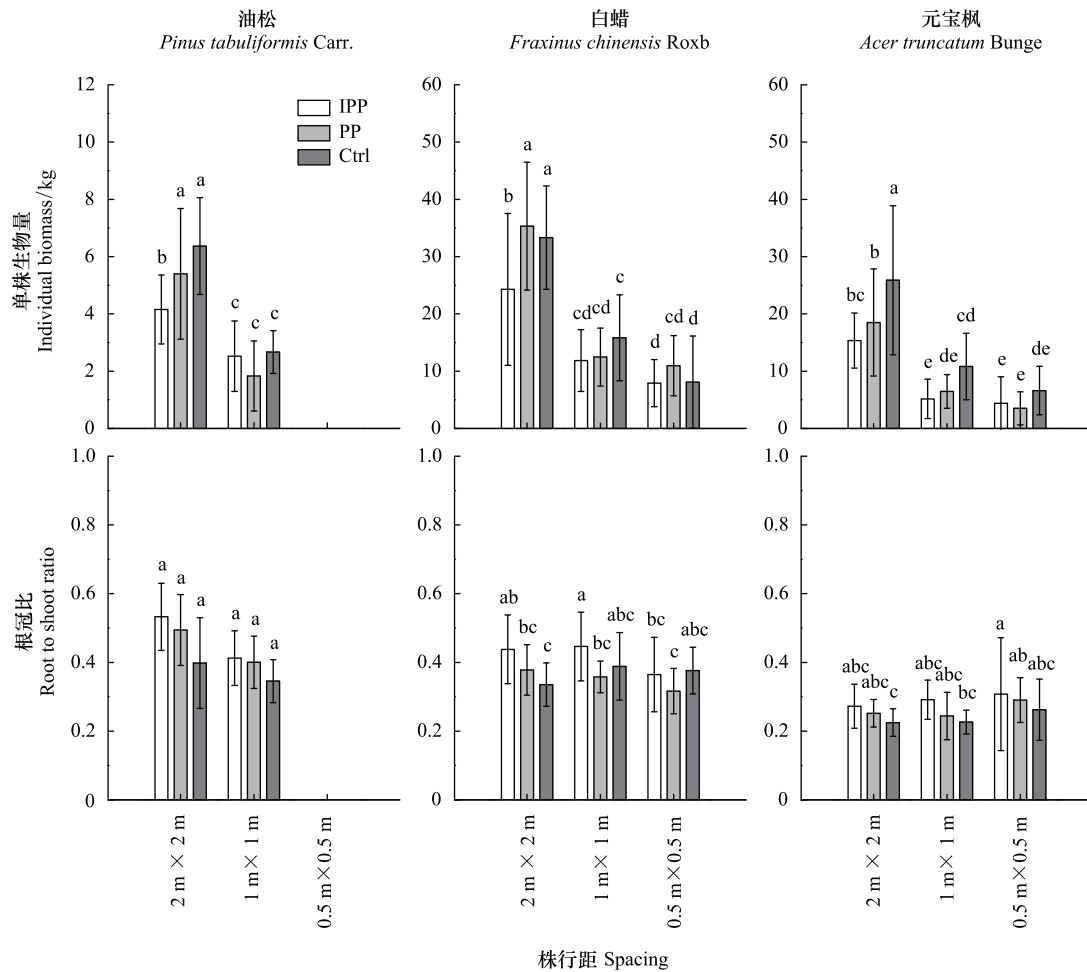


图2 地表类型和密度对油松、白蜡和元宝枫单株生物量和根冠比的影响

Fig.2 Effects of pavement types (impervious pavement, pervious pavement, and control) and spacing (2.0 m×2.0 m, 1.0 m×1.0 m, and 0.5 m×0.5 m apart) on individual biomass and root to shoot ratio (R:S ratio) of pine, ash, and maple

图中不同小写字母表示不同柱状图之间存在显著性差异 ($P < 0.05$); 图中数据为平均值±标准差

3 讨论

3.1 硬化地表对树木生长的影响

硬化地表会造成树木的环境胁迫,进而影响树木的生长。Mueller 和 Day^[5]发现砾石、混凝土及沥青等硬化地表显著降低了夹竹桃 (*Nerium oleander* L.) 的相对生长速率。Moser^[15]等对硬化地表下的心叶槲 (*Tilia cordata* mill.) 进行观测,也发现硬化地表上树木的胸径增长量显著低于草地。本研究中,相比于对照,不透水地表显著降低了元宝枫的基径,油松、白蜡和元宝枫的树高,以及白蜡和元宝枫的单株生物量(图1,图2)。这可能是由于硬化地表对树木造成的热胁迫和干旱胁迫的影响。城市中硬化地表粗糙度较高,反射率小,从而吸收了更多的太阳辐射;同时又阻止了土壤水分蒸发,因此硬化地表具有较高的地表温度和土壤温度^[21]。土壤含水率的高低取决于水分输入、土壤蒸发和植物蒸腾^[22]。相比于自然地表,硬化地表改变了这些过程,不透水地表由于阻止了降雨入渗因而具有较低的土壤含水率。前期的环境因子测定也支持了这一观点^[23]。此外,对于大部分温带树种,当土壤温度高于 30 °C 时将不利于根系的生长^[24]。干旱胁迫也会抑制树木的光合作用,影响树木的生长。因此,出现了不透水地表抑制城市树木生长的现象。

相比于不透水地表,透水地表通常能够促进树木的生长。Morgenroth & Visser^[19]和 Morgenroth^[16]发现透

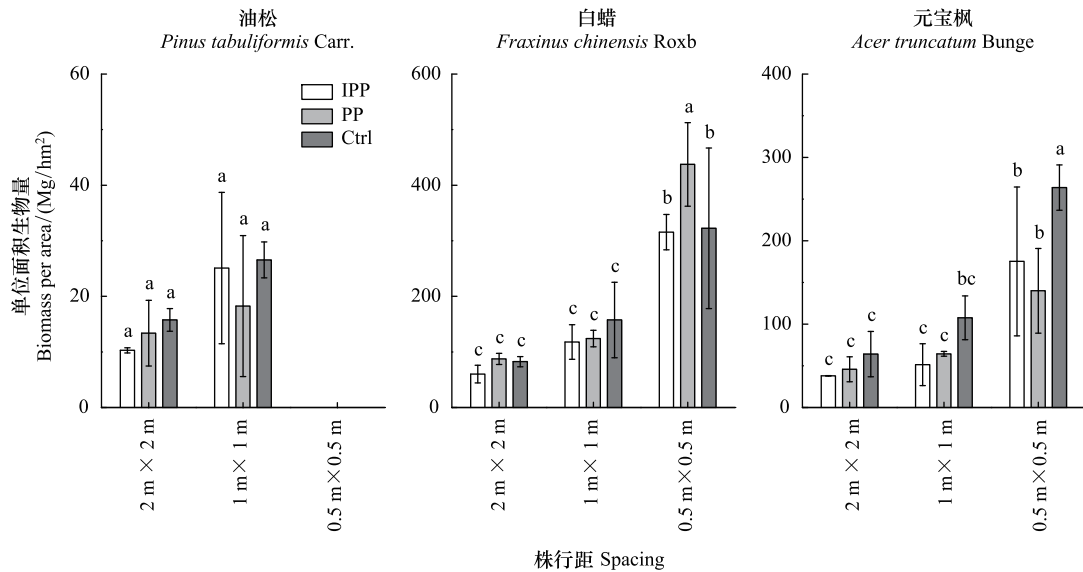


图3 地表类型和密度对油松、白蜡和元宝枫单位面积生物量的影响

Fig.3 Effects of pavement types (impervious pavement, pervious pavement, and control) and spacing (2.0 m×2.0 m, 1.0 m×1.0 m, and 0.5 m×0.5 m apart) on biomass per area of pine, ash, and maple

图中不同小写字母表示不同柱状图之间存在显著性差异 ($P < 0.05$); 图中数据为平均值±标准差

水地表下三球悬铃木的树高、胸径、地上和地下生物量显著高于不透水地表。本研究也有类似的研究结果,相比于不透水地表,透水地表显著增加了白蜡的树高和单株生物量、元宝枫的树高。这可能是由于透水地表实现了水分和气体交换从而缓解了树木地下的环境胁迫^[25-26]。

植物从大气中获取碳,并将其分配到不同的器官以应对环境和生长的限制^[27-28]。最优分配理论认为植物将分配更多的资源给受限制的资源的器官^[29-30]。因此,当受限制的资源在地下时,即水和养分,植物分配更多的碳到根系,所以白蜡和元宝枫在不透水地表下显著增加了根冠比。透水地表相比不透水地表增加了土壤含水率,缓解了干旱胁迫,因此透水地表和对照间白蜡和元宝枫的根冠比没有显著差异。

3.2 密度对树木生长的影响

树木个体之间普遍存在的竞争关系影响着树木的发育、生长和生存^[10-12]。因此随着密度的增加,树木个体间对光照、水分、养分及空间资源的竞争增加,进而影响植物的单株生长量和生物量。本研究中,中高密度下植物个体的基径和单株生物量显著低于低密度。张艳杰^[31]也发现单木根系总生物量随林分密度增大而减小的结果。有研究表明,植物高度不受密度的影响,本研究中白蜡与元宝枫确实表现出不同的种植密度下树高无显著性差异。但油松表现为低密度下的油松树高显著低于高密度,这可能是由于油松生长相对较慢,低密度的油松一直未达到郁闭水平,不存在光照资源的竞争压力,个体间竞争较弱,而中密度的油松已达到郁闭水平,空间、光照资源竞争较强,因此低密度的油松树高低于中密度。

元宝枫低密度的根冠比显著低于高密度。也就是说,在高密度的元宝枫林分,分配到地下的生物量比例增加。这与20年生油松林地上、地下生物量分配随林分密度的变化趋势抑制^[32]。一般来说,随着土壤养分和水分的降低,分配到根系的生物量比例增加。另一方面,地上生物量的分配比例又会随光照资源的限制而增加^[33]。因此,可能是由于高密度的元宝枫受到水分、养分资源的限制大于光照资源的限制,出现高密度的元宝枫将更多的碳分配到地下部分的现象。

对于单位面积生物量,中密度和低密度的白蜡和元宝枫的单位面积生物量无显著性差异,表明合理密植并不会降低单位面积树木的固碳功能,这符合总生物量遵循产量恒定法则。高密度的单位面积生物量显著高于中密度和低密度,这主要是由于树木刚刚达到郁闭水平,且种植面积相对较小,部分树木占用种植区域外面

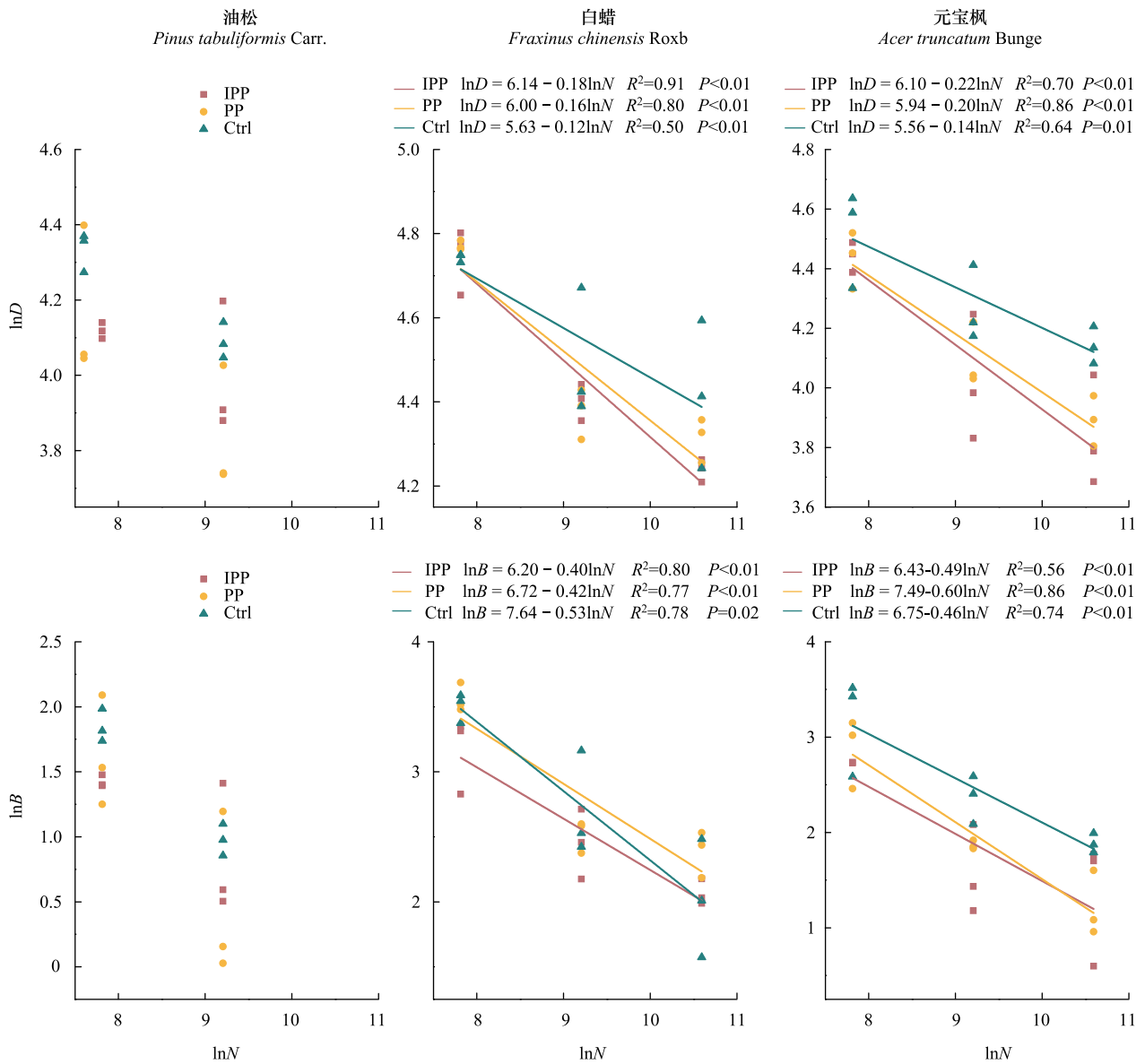


图4 油松、白蜡和元宝枫的基径(D)、单株生物量(B)与种植密度(N)的对数关系

Fig.4 Log-log relationship between basal diameter (D) & biomass and density (trees per hectare, N) of pine, ash, and maple

的空间,因此未发生树木个体因竞争加剧而死亡的自疏现象^[34]。因此,在城市绿化当中我们还是要合理密植,保证树木的正常生长。

3.3 不同树种对硬化地表和种植密度的响应

相比于基径和树高,单株生物量可以更好的指示植物对不同处理的响应^[35-36]。通过三个树种不同地表类型下单株生物量的比较,我们可以看出:油松在6年的实验处理后没有显现出硬化地表带来的不利影响;白蜡表现为主要受不透水地表的抑制作用,透水地表下白蜡的单株生物量与对照无显著性差异;元宝枫表现为同时受到不透水地表和透水地表的抑制作用,单株生物量均显著低于对照。不透水地表下白蜡的根冠比显著低于透水地表和对照,进一步说明透水地表对白蜡的生长确实有改善作用。这与之前的研究结果一致,即白蜡在透水地表下的净光合速率显著高于不透水地表^[37]。透水地表下元宝枫的根冠比与不透水地表无显著性差异,则进一步表明相比不透水地表,透水地表对元宝枫的生长无显著的改善作用。这与之前的研究结果一致,即不透水地表和透水地表下元宝枫的净光合速率均显著低于对照^[38]。

通过三个树种在不同密度下根冠比的比较,只有元宝枫低密度的根冠比显著低于高密度,表明当密度增加时,相比油松和白蜡,元宝枫对地下水分及养分的竞争显著高于地上光照资源的竞争。

4 结论

不透水地表显著抑制了城市林木的生长和生物量积累。相比不透水地表,透水地表对城市林木的生长有一定的改善作用:增加了白蜡的树高和单株生物量,增加了元宝枫的树高。随着种植密度的增加,树木的基径和单株生物量均显著降低,但中、低密度间单位面积生物量无显著性差异,因此在城市绿化当中要注意合理密植,以保证城市林木的正常生长。根据三个树种的生物量及其分配对硬化地表的响应,我们发现白蜡相比元宝枫是更好的城市绿化树种的选择。同时,通过高种植密度下显著增加的根冠比,我们发现元宝枫可能更容易受到地下资源的限制。

参考文献(References):

- [1] Coutts A M, White E C, Tapper N J, Beringer J, Livesley S J. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 124(1/2): 55-68.
- [2] Berland A, Shiflett S A, Shuster W D, Garmestani A S, Goddard H C, Herrmann D L, Hopton M E. The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 167-177.
- [3] Ayala-Azcórraga C, Diaz D, Zambrano L. Characteristics of urban parks and their relation to user well-being. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189: 27-35.
- [4] 李伟峰, 王轶. 城市硬化地表格局特征及尺度效应遥感研究. *国土资源遥感*, 2010, (1): 69-72.
- [5] Mueller E C, Day T A. The effect of urban ground cover on microclimate, growth and leaf gas exchange of oleander in Phoenix, Arizona. *International Journal of Biometeorology*, 2005, 49(4): 244-255.
- [6] Viswanathan B, Volder A, Watson W T, Aitkenhead-Peterson J A. Impervious and pervious pavements increase soil CO₂ concentrations and reduce root production of American sweetgum (*Liquidambar styraciflua*). *Urban Forestry & Urban Greening*, 2011, 10(2): 133-139.
- [7] 于伟伟, 陈媛媛, 汪旭明, 王效科. 硬化地表对不同树种土壤微生物群落结构和功能的影响. *生态学报*, 2019, 39(10): 3575-3585.
- [8] 宋英石, 李锋, 王效科, 付芝红, 赵丹. 城市地表硬化对银杏生境及生理生态特征的影响. *生态学报*, 2014, 34(8): 2164-2171.
- [9] Volder A, Viswanathan B, Watson W T. Pervious and impervious pavement reduce production and decrease lifespan of fine roots of mature Sweetgum trees. *Urban Ecosystems*, 2014, 17(2): 445-453.
- [10] Weigelt A, Jolliffe P. Indices of plant competition. *Journal of Ecology*, 2003, 91(5): 707-720.
- [11] Canham C D, LePage P T, Coates K D. A neighborhood analysis of canopy tree competition: effects of shading versus crowding. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(4): 778-787.
- [12] Anning A K, McCarthy B C. Competition, size and age affect tree growth response to fuel reduction treatments in mixed-oak forests of Ohio. *Forest Ecology and Management*, 2013, 307: 74-83.
- [13] Canham C D, Papaik M J, Uriarte M, McWilliams W H, Jenkins J C, Twery M J. Neighborhood analyses of canopy tree competition along environmental gradients in new England forests. *Ecological Applications*, 2006, 16(2): 540-554.
- [14] Coates K D, Canham C D, LePage P T. Above- versus below-ground competitive effects and responses of a guild of temperate tree species. *Journal of Ecology*, 2009, 97(1): 118-130.
- [15] Moser A, Rahman M A, Pretsch H, Pauleit S, Rötzer T. Inter- and intraannual growth patterns of urban small-leaved lime (*Tilia cordata* mill.) at two public squares with contrasting microclimatic conditions. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(6): 1095-1107.
- [16] Morgenroth J. Root growth response of platanus orientalis to porous pavements. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2011, 37(2): 45-50.
- [17] 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. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(1): 19-29.
- [18] Yu W W, Hu Y H, Cui B W, Chen Y Y, Wang X K. The Effects of Pavement Types on Soil Bacterial Communities across Different Depths. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(10): 1805.
- [19] Morgenroth J, Visser R. Aboveground growth response of platanus orientalis to porous pavements. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2011, 37(1): 1-5.
- [20] Wang X M, Wang X K, Su Y B, Zhang H X. Land pavement depresses photosynthesis in urban trees especially under drought stress. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 120-130.

- [21] Fini A, Frangi P, Mori J, Donzelli D, Ferrini F. Nature based solutions to mitigate soil sealing in urban areas: Results from a 4-year study comparing permeable, porous, and impermeable pavements. *Environmental Research*, 2017, 156: 443-454.
- [22] Daly E, Porporato A. A review of soil moisture dynamics: From rainfall infiltration to ecosystem response. *Environmental Engineering Science*, 2005, 22(1): 9-24.
- [23] Chen Y Y, Wang X K, Jiang B, Wen Z, Yang N, Li L. Tree survival and growth are impacted by increased surface temperature on paved land. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 68-79.
- [24] Graves W R. Urban soil temperatures and their potential impact on tree growth. *Journal Of Arboriculture*, 1994, 20(1): 24-27.
- [25] Collins K A, Hunt W F, Hathaway J M. Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern north Carolina. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2008, 13(12): 1146-1157.
- [26] Morgenroth J, Buchan G D. Soil moisture and aeration beneath pervious and impervious pavements. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2009, 35(3): 135-141.
- [27] Hodge A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, 2004, 162(1): 9-24.
- [28] Poorter H, Niklas K J, Reich P B, Oleksyn J, Poot P, Mommer L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 2012, 193(1): 30-50.
- [29] Reynolds J F, Thornley J H M. A shoot-root partitioning model. *Annals of Botany*, 1982, 49(5): 585-597.
- [30] Johnson I R, Thornley J H M. A model of shoot-root partitioning with optimal-growth. *Annals of Botany*, 1987, 60(2): 133-142.
- [31] 张艳杰, 温佐吾. 不同造林密度马尾松人工林的根系生物量. *林业科学*, 2011, 47(3): 75-81.
- [32] 贾全全, 罗春旺, 刘琪璟, 刘丽婷, 李俊清. 不同林分密度油松人工林生物量分配模式. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(6): 87-92.
- [33] Poorter H, Nagel O. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: a quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology*, 2000, 27: 595-607.
- [34] 李博, 陈家宽, 沃金森 A R. 植物竞争研究进展. *植物学通报*, 1998, (4): 18-18.
- [35] Sevillano I, Short I, Grant J, O'Reilly C. Effects of light availability on morphology, growth and biomass allocation of *Fagus sylvatica* and *Quercus robur* seedlings. *Forest Ecology and Management*, 2016, 374: 11-19.
- [36] Weber A, Leckie S, Kimmins J P, Gilbert B, Blanco J A, Lo Y-H. Survival and growth as measures of shade tolerance of planted western redcedar, western hemlock and amabilis fir seedlings in hemlock-fir forests of northern Vancouver Island. *Forest Ecology and Management*, 2017, 386: 13-21.
- [37] 陈媛媛, 江波, 王效科, 李丽. 北京典型绿化树种幼苗光合特性对硬化地表的响应. *生态学报*, 2017, 37(11): 3673-3682.
- [38] 陈媛媛, 江波, 王效科, 李丽. 元宝枫幼苗生长和光合特性对硬化地表的响应. *生态学杂志*, 2016, 35(12): 3258-3265.