

人工覆盖地表对北京典型绿化树光合特性的影响

汪旭明^{1,2} 陈媛媛^{1,2} 王效科^{1*}

(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)

摘要 地表硬化影响城市绿化树生长及生态服务功能的发挥, 研究人工覆盖地表下城市绿化树关键生理过程具有重要意义. 采用田间模拟试验方法, 布设对照(自然地表)、透水硬化和不透水硬化3种覆盖地表, 栽植北京2种典型绿化树白蜡和元宝枫, 栽植后第4年野外测定其叶片光合及相关生理生态参数, 分析人工覆盖地表对北京典型绿化树光合特性的影响. 结果表明: 白蜡和元宝枫光合作用对不同人工覆盖地表的响应存在差异, 对于白蜡而言, 透水硬化和不透水硬化地表均使其净光合速率显著降低, 对于元宝枫而言, 仅不透水硬化地表导致其净光合速率显著降低, 透水硬化地表并未对其造成显著影响. 透水硬化和不透水硬化地表的空气相对湿度和土壤体积含水率低于对照, 植物可利用水分减少, 叶片气孔导度下降是白蜡和元宝枫净光合速率降低的主要原因. 透水硬化和不透水硬化地表使白蜡 PS II 有效光化学量子产量(F_v'/F_m')下降, 不透水硬化地表使元宝枫 PS II 实际光化学量子效率(Φ_{PSII})和表观电子传递速率(ETR)升高.

关键词 透水硬化地表; 不透水硬化地表; 净光合速率; 叶绿素荧光; 城市绿化树

Impact of land pavement on photosynthetic characteristics of common greening trees in Beijing, China. WANG Xu-ming^{1,2}, CHEN Yuan-yuan^{1,2}, WANG Xiao-ke^{1*} (¹State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Land pavement has impacted urban tree growth and its ecosystem service, and it is necessary to investigate the key physiological processes of urban trees grown under land pavement. To study the impact of land pavement on photosynthetic characteristics of common greening trees in Beijing, a field experiment was designed with three treatments: the control (the non-paved), pervious pavement and impervious pavement, and the leaf net photosynthetic rates and related physiological-ecological parameters of two common greening trees (*Fraxinus chinensis* and *Acer truncatum*) in Beijing were measured in the 4th year after planting. Results showed that the photosynthesis of *F. chinensis* and *A. truncatum* showed different responses to different types of pavement, the net photosynthetic rate was significantly decreased for *F. chinensis* under both pervious and impervious pavements and for *A. truncatum* only under impervious pavement. The air relative humidity and soil volumetric water content under pervious and impervious pavements were lower than that under the control, which reduced water amount available for trees. The lower net photosynthetic rates of *F. chinensis* and *A. truncatum* under impervious pavement were mainly attributed to the decrease in leaf stomatal conductance. The PS II effective photochemical quantum yield (F_v'/F_m') of *F. chinensis* was significantly lower under pervious and impervious pavements, while the PS II actual photochemical quantum efficiency (Φ_{PSII}) and apparent electron transport rate (ETR) of *A. truncatum* were significantly higher under impervious pavement.

Key words: pervious pavement; impervious pavement; net photosynthetic rate; chlorophyll fluorescence; urban tree.

城市绿化植物对改善城市生态环境起着不可替代的作用,能够改善空气质量、固存 CO_2 、缓解热岛效应、减少噪音、降低地表径流、改善景观环境,具有重要的生态服务功能^[1-3].然而,随着城市化进程加快,城市地表硬化加剧,大量地面砖、混凝土和沥青等人工覆盖地表取代了原有的自然植被,导致城市植被面积缩小^[4],同时改变了城市小气候以及水分循环、热平衡和养分循环等,影响城市植物的生长及其生态服务功能的发挥^[5].因此,城市地表硬化对城市植物生长和植被绿化是一个严重挑战,已经引起了城市植物学和城市绿化工作者的广泛关注.

目前,国内外已经开展了关于地表硬化对城市植物生理生态影响的研究^[6-8].一般认为,地表硬化可对植物造成热胁迫、干旱胁迫和养分胁迫^[9-11],影响植物叶片的气体交换过程,表现为光合速率、蒸腾速率和气孔导度降低,进而抑制植物的初级生产,不利于植物生长^[12-13].地表硬化对植物的影响因硬化性质(硬化覆盖材料或是否透水等)而存在差异^[14],不同城市树种对地表硬化的响应亦不同^[15].迄今,城市建设中广泛使用的透水材料对植物生长及生理生态因子的影响研究尚处于初步阶段,且存在一些较为不一致的研究结果^[16-17].同时就研究方法而言,国内相关试验多选择在城市不同类型覆盖地表原位进行,对试验条件一致性的控制有限,存在周围环境和土壤本底差异以及人为因素干扰较大等问题.鉴于此,本研究采用田间模拟试验方法,布设不同类型覆盖地表,栽植北京 2 种常见绿化树白蜡(*Fraxinus chinensis*)和元宝枫(*Acer truncatum*),野外测定其叶片光合及相关生理生态参数,旨在探讨透水和不透水硬化地表对不同城市绿化树光合作用的影响及其主要影响因子,对改善城市植物生长环境和提高其生态服务具有重要意义,同时可为城市绿化与生态用地建设提供参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

试验地设在北京市昌平区种子管理站试验基地(40°12' N, 116°08' E),位于北京市西北部,属暖温带大陆性季风气候,全年四季分明,夏季多雨,春秋干旱,冬季寒冷干燥.年均气温 12.1 °C,年日照时数为 2684 h,无霜期约 200 d.年均降水量为 550.3 mm,降水集中于 6—8 月.土壤类型为潮土,质地为砂壤,土壤有机质质量分数为 16.4 g · kg⁻¹,全氮 0.9 g · kg⁻¹,速效磷 38.1 mg · kg⁻¹,速效钾 102.1

mg · kg⁻¹,土壤 pH 值为 8.3.

于 2012 年 4 月在试验地布设 3 种覆盖地表:对照、透水硬化和不透水硬化地表,其中,以自然地表作为对照,采用透水砖(渗透力 > 0.4 mm · s⁻¹)和不透水砖(渗透率 ≈ 0)铺设地面分别代表透水硬化和不透水硬化地表.供试砖规格为 20 cm × 10 cm × 6 cm(长 × 宽 × 高).每种覆盖地表布设大小相同的 3 个地块作为 3 个重复,每地块面积均为 22.8 m × 17 m.栽植长势较一致的 1 年生白蜡和元宝枫苗木,苗木购自北京市怀柔区倚众绿篱苗圃.每地块每种树栽植 18 棵,分 4 行种植,行距和株距均为 2 m,铺设地面时预留 20 cm × 20 cm 的方形树坑.2015 年 8 月测得白蜡平均株高和基径分别为(4.48 ± 0.64) m 和(88.30 ± 14.80) mm,元宝枫平均株高和基径分别为(3.63 ± 0.64) m 和(62.66 ± 14.45) mm;9 月采用植物冠层仪(LAI-2000, Li-Cor, 美国)测得白蜡和元宝枫冠层叶面积指数(LAI)分别为 3.29 ± 0.79 和 3.37 ± 1.29.

1.2 测定方法

于 2015 年 8 月、9 月和 10 月采用便携式光合测定仪(Li-6400, Li-Cor, 美国),在自然条件下测定白蜡和元宝枫叶片的生理生态参数.每月选择晴朗、无风的 2 d 测定的平均值代表该月树木叶片生理生态状况.每天具体测定时间为 9:00—12:00,每地块每种树测定长势较一致的健康植株 2 株,每株选取高度约 3 m 的不同方位 3 片成熟健康向阳叶片进行测定.为反映自然状况下白蜡和元宝枫光合蒸腾特征与生态因子的关系,测定过程未对温湿度和 CO_2 进行控制,气体流速为 500 mmol · s⁻¹,设置光强与测定时段外界自然光强基本保持一致.

仪器自动计算和记录的参数包括:1) 叶片气体交换相关参数,包括净光合速率(P_n , $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度(g_s , $\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)、叶面饱和水汽压亏缺(VPD_l , kPa);2) 光适应下的叶绿素荧光指标,包括光下最小荧光(F_o')、光下最大荧光(F_m')、稳态荧光(F_s)、光下开放的 PS II 反应中心的原初光能捕获效率[即 PS II 有效光化学量子产量 $F_v'/F_m' = (F_m' - F_o')/F_m'$]、作用光存在时 PS II 反应中心部分关闭情况下的原初光能捕获效率[即 PS II 反应中心实际光化学量子效率 $\Phi_{\text{PSII}} = (F_m' - F_s)/F_m'$]、表观电子传递速率[$\text{ETR} = \Phi_{\text{PSII}} \times \text{PPFD} \times 0.5 \times 0.84$, PPFD 为光子通量密度($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),系数 0.5 表示光能

在 PS II 和 PS I 两个光系统中分配的比例,系数 0.84 表示在入射的光量子中被吸收的占比为 84%^[18]];3) 叶片周围环境参数,包括空气温度(T_a ,℃)、空气相对湿度(RH,%)、空气 CO₂ 浓度(C_a ,μmol·mol⁻¹)、气孔限制值(L_s ,%)的计算公式为 $L_s = (1 - C_i / C_a) \times 100\%$ 。

安装数据采集器(CR1000, Campbell, 美国)和土壤含水量监测系统(EC H₂O, Decagon, 美国),分别用于连续测定土壤温度(T_s ,℃)和土壤体积含水率(VWCS,%).

1.3 数据处理

数据整理、分析和制图分别采用 Microsoft Excel 2016、SPSS 17.0 和 Origin 8.0 软件进行.数据在分析前进行正态分布检验(Kolmogorov-Smirnov 检验)和方差同质性检验(Levene 检验),否则先将数据进行对数转换后符合正态分布再分析.采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验两组变量之间的差异性,采用皮尔逊相关系数(Pearson's correlation coefficient)分析两组变量之间的相关性,对数据标准化处理后再进行线性回归分析。

决策系数是通径分析中的决策指标,可把各自变量对因变量的综合作用进行排序,确定主要决策变量和限制变量^[19].决策系数的计算公式如下:

$$R^2_{(i)} = 2P_i r_{iy} - P_i^2$$

式中: $R^2_{(i)}$ 为自变量*i*的决策系数; P_i 为自变量*i*的直接通径系数; r_{iy} 为自变量*i*与因变量*y*的相关系数.决策系数最大的为主要决策变量,而决策系数小且为负值的为主要限制变量^[20]。

2 结果与分析

2.1 人工覆盖地表对白蜡和元宝枫生态因子的影响

由白蜡和元宝枫 3 种覆盖地表 8—10 月的主要生态因子均值可以看出(表 1):人工覆盖地表主要

影响空气相对湿度(RH)和土壤体积含水率(VWCS),对于白蜡而言,透水硬化和不透水硬化地表的 RH 均显著低于对照($P < 0.05$),VWCS 表现为对照>透水硬化>不透水硬化($P < 0.05$);对于元宝枫而言,不透水硬化地表的 RH 最小且显著低于对照($P < 0.05$),不透水硬化地表的 VWCS 显著低于对照和透水硬化地表($P < 0.05$).2 种植物下,空气温度(T_a)和土壤温度(T_s)各覆盖地表间差异均不显著,可能由于植物较高的冠层叶面积指数(LAI)产生了较好的遮荫和蒸腾降温作用。

2.2 人工覆盖地表对白蜡和元宝枫气体交换特征的影响

由图 1 可以看出,白蜡净光合速率(P_n)除 8 月 3 种覆盖地表间差异不显著外,9 月和 10 月透水硬化和不透水硬化地表均显著低于对照($P < 0.05$),前两者相对于后者分别最高降低 35.5%和 41.3%;元宝枫 P_n 除 10 月 3 种覆盖地表间差异不显著外,8 月和 9 月不透水硬化地表显著低于对照和透水硬化地表($P < 0.05$),前者相对于后两者分别最高降低 31.0%和 34.8%.白蜡蒸腾速率(T_r)8 月 3 种覆盖地表间差异不显著,9 月不透水硬化地表显著低于对照($P < 0.05$),10 月表现为对照>透水硬化>不透水硬化($P < 0.05$);元宝枫 T_r 8 月透水硬化地表最高($P < 0.05$),9 月不透水硬化地表显著低于对照($P < 0.05$),10 月透水硬化和不透水硬化地表均显著低于对照($P < 0.05$).白蜡和元宝枫不同覆盖地表间气孔导度(g_s)差异比较,表现出与 P_n 差异比较结果一致的特征.白蜡胞间 CO₂ 浓度(C_i)表现为 9 月 3 种覆盖地表间差异不显著,8 月和 10 月不透水硬化地表均显著低于对照($P < 0.05$),元宝枫 C_i 8 月对照显著低于透水硬化地表($P < 0.05$).叶面饱和水汽压亏缺(VPD_i)除白蜡 9 月对照最低和元宝枫 8 月不透水硬化地表最高外($P < 0.05$),不同覆盖地表间总体差异不明显.白蜡气孔限制值(L_s)8 月、9 月和 10 月均

表 1 不同类型覆盖地表生态因子的差异性

Table 1 Difference of ecological factors under different types of pavement (mean±SD)

树种 Tree species	地表类型 Pavement type	空气温度 T_a (℃)	空气相对湿度 RH (%)	土壤温度 T_s (℃)	土壤体积含水率 VWCS (%)
白蜡 <i>Fraxinus chinensis</i>	对照 Control	29.88±3.87a	51.6±5.4a	19.97±2.83a	22.2±2.5a
	透水硬化 Pervious pavement	30.13±3.66a	49.4±4.3b	20.03±2.96a	16.5±3.2b
	不透水硬化 Impervious pavement	30.05±3.89a	48.3±4.3b	19.83±3.28a	9.5±2.7c
元宝枫 <i>Acer truncatum</i>	对照 Control	27.60±5.36a	48.7±3.0a	18.98±3.11a	21.5±1.6a
	透水硬化 Pervious pavement	27.66±5.97a	48.1±5.3ab	20.02±3.41a	21.0±0.8a
	不透水硬化 Impervious pavement	27.46±6.20a	46.1±6.5b	19.60±3.93a	18.3±1.0b

同列不同小写字母表示相同树种不同地表类型的差异显著($P < 0.05$) Different lowercase letters within the same column meant significant difference among different types of pavement of the same tree species at 0.05 level.

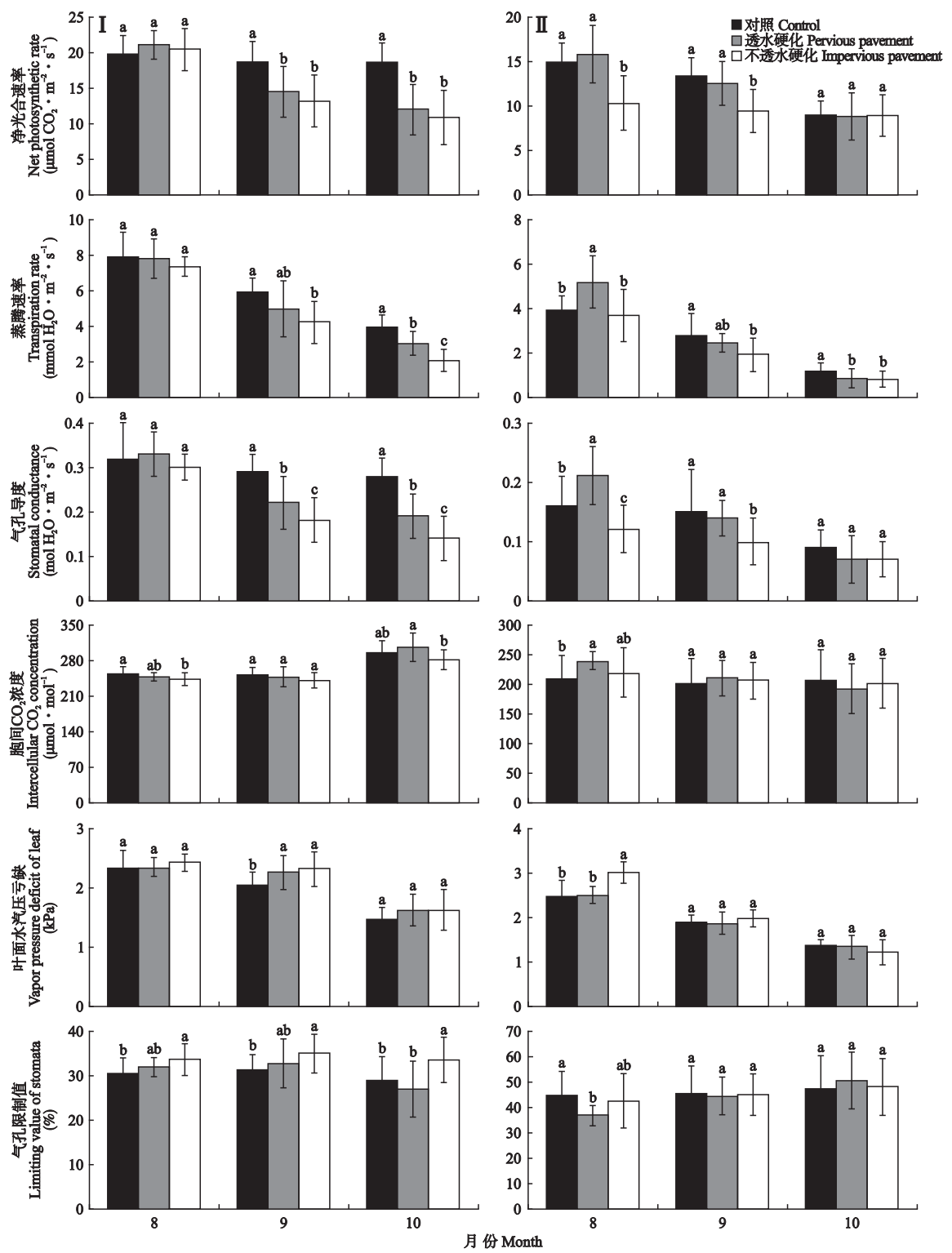


图1 不同覆盖地表条件下白蜡(I)和元宝枫(II)叶片气体交换特征
Fig.1 Leaf gas exchange characteristics of *Fraxinus chinensis* (I) and *Acer truncatum* (II) under different types of pavement (mean±SD).
不同小写字母表示相同月份不同地表类型间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercase letters meant significant difference among different types of pavement in the same month at 0.05 level. 下同 The same below.

表现为不透水硬化地表最高 ($P<0.05$), 元宝枫 L_s 除8月透水硬化地表显著低于对照外 ($P<0.05$), 9月和10月不同覆盖地表间差异均不显著。

2.3 人工覆盖地表对白蜡和元宝枫叶绿素荧光特性的影响
由图2可以看出,白蜡光下开放的PS II有效光

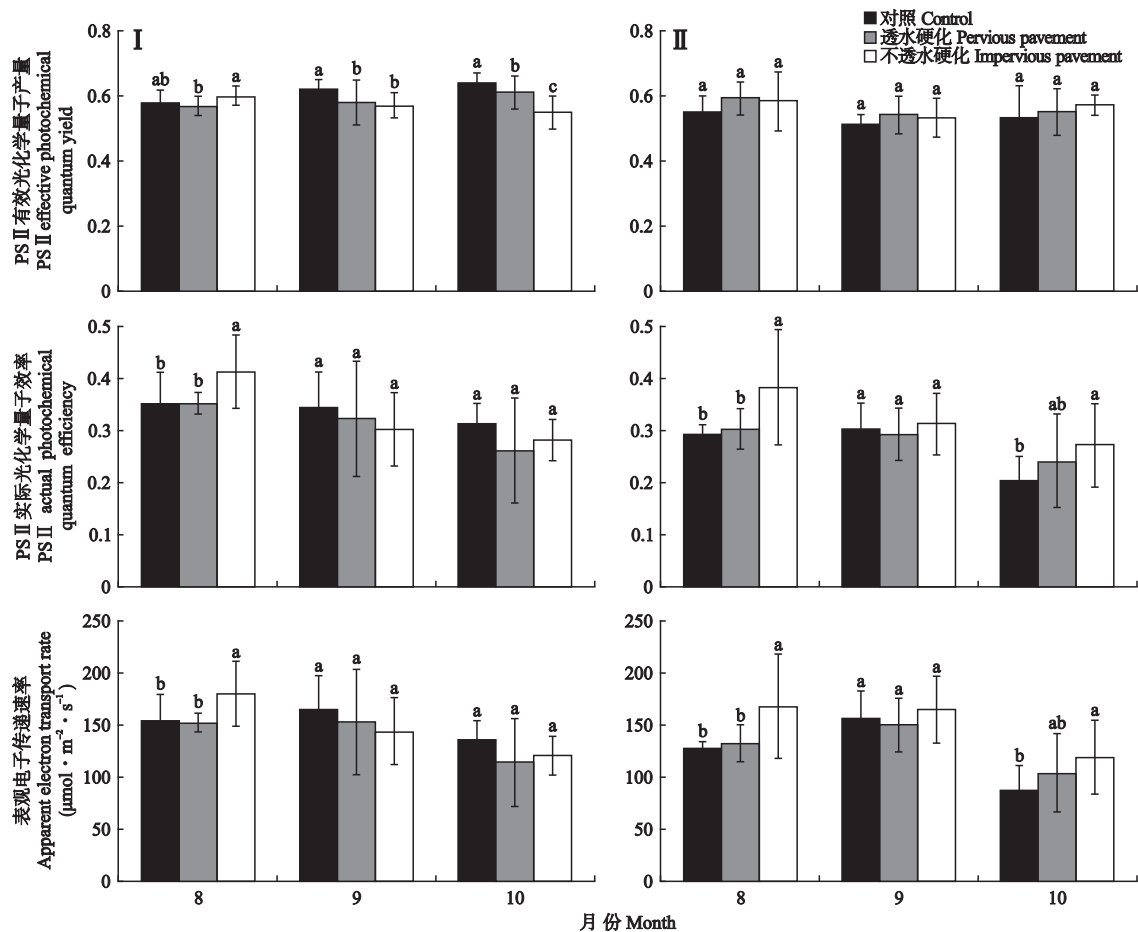


图 2 不同覆盖地表条件下白蜡(I)和元宝枫(II)叶绿素荧光特性
Fig.2 Chlorophyll fluorescence characteristics of *Fraxinus chinensis* (I) and *Acer truncatum* (II) under different types of pavement (mean±SD).

化学量子产量(F_v'/F_m')表现为 8 月透水硬化地表显著低于不透水硬化地表($P<0.05$), 9 月透水硬化和不透水硬化地表均显著低于对照($P<0.05$), 10 月表现为对照>透水硬化>不透水硬化($P<0.05$); 元宝枫 F_v'/F_m' 各月不同覆盖地表间差异均不显著. 白蜡 PS II 反应中心实际光化学量子效率(Φ_{PSII})和表观电子传递速率(ETR)均表现为 8 月不透水硬化地表最高($P<0.05$), 9 月和 10 月不同覆盖地表间差异均不显著; 元宝枫 Φ_{PSII} 和 ETR 均表现为 8 月不透水

硬化地表最高($P<0.05$), 10 月不透水硬化地表显著高于对照($P<0.05$).

2.4 白蜡和元宝枫净光合速率与生理生态因子的相关关系及主要影响因子

由白蜡和元宝枫净光合速率(P_n)与生理生态因子的 Pearson 相关分析可以看出(表 2): 对于白蜡而言, P_n 与 T_r 、 g_s 和 Φ_{PSII} 呈极显著正相关关系($P<0.01$), 与 T_a 、 T_s 和 ETR 呈显著正相关关系($P<0.05$); 对于元宝枫而言, P_n 与 T_r 和 g_s 呈极显著正

表 2 白蜡和元宝枫净光合速率与生理生态因子的 Pearson 相关系数
Table 2 Pearson's correlation coefficient between the net photosynthetic rate and physiological-ecological factors of *Fraxinus chinensis* and *Acer truncatum* ($n=18$)

树种 Tree species	空气温度 T_a	空气 相对湿度 RH	土壤温度 T_s	土壤体积 含水率 VWCs	蒸腾速率 T_r	气孔导度 g_s	胞间 CO_2 浓度 C_i	叶面饱和 水汽压亏缺 VPD_i	气孔 限制值 L_s	PSII有效光 化学量子 产量 F_v'/F_m'	PSII反应中心 实际光化学 量子效率 Φ_{PSII}	表观电子 传递速率 ETR
白蜡 <i>Fraxinus chinensis</i>	0.685 *	-0.389	0.710 *	0.513	0.885 **	0.984 **	-0.424	0.466	-0.050	0.344	0.839 **	0.748 *
元宝枫 <i>Acer truncatum</i>	0.740 *	0.620	0.648	0.576	0.863 **	0.962 **	0.628	0.569	-0.713 *	0.161	0.299	0.262

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

表 3 白蜡和元宝枫净光合速率各影响因子的决策系数
Table 3 Determination coefficient of influence factors on the net photosynthetic rates of *Fraxinus chinensis* and *Acer truncatum*

树种 Tree species	空气温度 T_a	空气相对 湿度 RH	土壤温度 T_s	土壤体积 含水率 VWCS	蒸腾速率 T_r	气孔导度 g_s	胞间 CO_2 浓度 C_i	叶面饱和 水汽压亏缺 VPD_l	气孔 限制值 L_s	PS II 有效光 化学量子 产量 F_v'/F_m'	PS II 反应 中心实际光 化学量子 效率 Φ_{PSII}	表观电子 传递速率 ETR
白蜡 <i>Fraxinus chinensis</i>	0.032	0.085	0.021	-0.021	0.055	0.964	0.070	-0.187	-0.128	0.092	0.106	-0.213
元宝枫 <i>Acer truncatum</i>	0.061	0.264	0.047	0.075	0.422	0.439	0.083	-0.706	-0.474	-0.003	-0.056	0.051

相关 ($P<0.01$), 与 T_a 呈显著正相关 ($P<0.05$), 与 L_s 呈显著负相关 ($P<0.05$). 白蜡和元宝枫 P_n 各影响因子的决策系数分析结果表明(表 3), g_s 和 Φ_{PSII} 为白蜡 P_n 的主要决策变量, ETR 为主要限制变量; g_s 和 T_r 为元宝枫 P_n 的主要决策变量, L_s 为主要限制变量.

3 讨 论

已有研究表明, 地表硬化导致城市树木光合作用减弱、净光合速率降低^[12,21]. 本研究中, 9 月和 10 月白蜡净光合速率透水硬化和不透水硬化地表均显著低于对照, 8 月和 9 月元宝枫净光合速率不透水硬化地表显著低于对照和透水硬化地表(图 1), 亦表明硬化地表一定程度上削弱了城市绿化树的光合作用. 地表硬化通过改变光照、温度和水分等植物生长的重要生态因子, 进一步改变植物生理生化特征而影响植物光合作用. 地表硬化可引起热胁迫和干旱胁迫间接导致植物光合作用下降, 很多情况下热胁迫和干旱胁迫之间存在共同作用.

热胁迫和干旱胁迫下植物净光合速率(P_n)下降的主要原因包括: 1) 高温使植物蒸腾失水加剧, 为避免植物过量失水, 叶片气孔导度(g_s)降低, 但同时使 CO_2 传导受限, P_n 下降^[22]. 虽然本研究 2 种植物的 P_n 与空气温度(T_a)均存在显著正相关关系, 但是由于植物年限较长(5 年), 较高的冠层叶面积指数(LAI)产生了较好的遮荫和蒸腾降温作用, 使对照、透水硬化和不透水硬化地表的 T_a 和土壤温度(T_s)间差异均不显著(表 1), 因此温度并非引起不同覆盖地表上植物叶片 P_n 差异显著的直接原因. 已有研究总结了干旱胁迫下植物光合作用水平下降的直接原因包括 3 种, 即气孔因素(气孔关闭引起 CO_2 供应受阻)为主^[23]、非气孔因素(叶肉细胞光合活性下降)为主^[24]和两者的共同作用^[25]. Farquhar 等^[26]提出气孔限制值分析方法, 当光合速率下降的同时胞间 CO_2 浓度降低, 气孔限制值升高时, 光合速率

降低主要由气孔关闭引起; 而如果光合速率下降的同时胞间 CO_2 浓度上升, 但气孔限制值下降, 表明光合速率降低主要由非气孔因素引起. 本研究总体来看 2 种植物下, 2 种硬化地表的空气相对湿度(RH)和土壤体积含水率(VWCS)均小于对照(表 1), 虽然 RH 和 VWCS 与 P_n 的相关性均不显著(表 2), 无法判定植物是否面临干旱胁迫, 但至少可表明硬化地表上植物可利用的水分相对较少. 在这种情况下, 对于白蜡而言, g_s 对植物 P_n 的决策系数最大, 是其主要决策变量(表 3), 并且不透水硬化地表上植物叶片 P_n 最低、胞间 CO_2 浓度(C_i)最小、气孔限制值(L_s)最大(图 1), 同时叶面饱和水汽压亏缺(VPD_l)最大, 叶片容易失水^[27], 因此其最低的叶片 P_n 主要由气孔关闭引起, 同时导致其蒸腾速率(T_r)最低以避免产生较多的水分散失. 对于元宝枫而言, 植物 P_n 亦主要受 g_s 控制(表 3), 同时 8 月和 9 月不透水硬化地表上的植物叶片 g_s 显著小于其他 2 种覆盖地表(图 1), 可认为不透水硬化地表上 8 月和 9 月植物最低的 P_n 亦主要受气孔因素的影响. 2) 酶活性与温度紧密相关, 光合作用关键酶——Rubisco 亦受温度的影响, 使 P_n 对 T_a 敏感性较高^[28]. Rubisco 的最适活化温度为 25~30 °C, 其活性的高低直接影响光合速率的大小, 温度过高亦不利其活性从而影响光合作用^[29]. 本研究观测期间, 白蜡和元宝枫不同地表类型 T_a 的变化范围分别为 29.88~30.13 和 27.46~27.66 °C(表 1), 均为 Rubisco 活化的适宜温度区间, 说明本研究中硬化地表可能并未通过温度影响 Rubisco 活性使 P_n 下降. 3) 光呼吸随温度的升高而增强, 当 T_a 高于某一特定值, 虽然总光合速率仍然较高, 但由于光呼吸大幅度上升, 使 P_n 急剧下降^[30]. 本研究未测定白蜡和元宝枫的光呼吸作用, 无法确定硬化地表是否通过植物光呼吸而影响其光合作用, 今后将进一步加强相关方面的研究.

与“表观性”的气体交换参数相比, 叶绿素荧光参数更具有反映“内在性”的特点^[31], 分析叶绿素荧

光参数的变化有助于探明光合机构的功能及其受环境胁迫的影响^[32], 可用于进一步分析植物光合作用所受影响的内在光化学机制。 F_v'/F_m' 为 PS II 有效光化学量子产量, 反映光下开放的 PS II 反应中心原初光能捕获效率; Φ_{PSII} 为 PS II 实际光化学量子效率, 反映 PS II 反应中心部分关闭情况下的原初光能捕获效率; ETR 为表观电子传递速率, 一定程度上反映潜在的最大光合能力^[33-34]。一般情况下, F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 和 ETR 降低, 植物光合作用下降^[35]。本研究中, 对于白蜡而言, 透水硬化和不透水硬化地表使其 F_v'/F_m' 下降, 但 F_v'/F_m' 与 P_n 相关性不显著 (表 2); P_n 与 Φ_{PSII} 和 ETR 呈显著正相关 (表 2), Φ_{PSII} 和 ETR 对 P_n 具有促进作用, 8 月不透水硬化地表白蜡 Φ_{PSII} 和 ETR 最高 (图 2), 可能是导致 8 月不透水硬化地表白蜡 P_n 并未低于其他 2 种类型覆盖地表的原因, 但整体而言, 3 种类型覆盖地表白蜡 Φ_{PSII} 和 ETR 差异不显著, 表明 Φ_{PSII} 和 ETR 并非 3 种类型覆盖地表白蜡 P_n 存在差异的原因。对于元宝枫而言, 不透水硬化地表上树木 Φ_{PSII} 和 ETR 最高, 可能由于叶片气孔关闭导致蒸腾耗水作用下降, 一定程度地保持叶片中的水分, 增加由水裂解出的电子数量, 有利于电子传递速率和光化学量子效率的提高^[36], 但 Φ_{PSII} 和 ETR 对 P_n 的影响不显著 (表 2)。

值得指出的是, 不同树种光合作用对不同类型硬化地表的响应存在差别, 具体而言在于透水或不透水硬化地表是否使不同树种光合作用下降或下降幅度的差异。本研究中, 白蜡 9 月和 10 月 P_n 透水硬化和不透水硬化地表均显著低于对照 (图 1), 即 2 种硬化地表均导致其光合作用明显降低; 元宝枫 8 月和 9 月 P_n 不透水硬化地表显著低于对照和透水硬化地表 (图 1), 即仅不透水硬化地表导致其光合作用明显降低, 而透水硬化地表并未对其造成显著影响。因此, 在城市地表硬化的不可逆趋势背景下, 为减轻硬化地表对城市绿化树生长造成不利影响, 城市建设者采用透水材料进行铺装对特定树种是有利的。

4 结 论

硬化地表削弱城市绿化树的光合作用, 不同树种光合作用对不同类型硬化地表的响应存在差别。对于白蜡而言, 透水硬化和不透水硬化地表均使其净光合速率显著降低, 对于元宝枫而言, 仅不透水硬化地表导致其净光合速率显著降低, 透水硬化地表并未对其造成显著影响。

透水硬化和不透水硬化地表的空气相对湿度和土壤体积含水率低于对照, 使植物可利用水分减少, 叶片气孔导度下降是白蜡和元宝枫净光合速率降低的主要原因。

透水硬化和不透水硬化地表使白蜡 PS II 有效光化学量子产量下降, 不透水硬化地表使元宝枫 PS II 实际光化学量子效率和表观电子传递速率升高。

参考文献

- [1] Akbari H. Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants. *Environmental Pollution*, 2002, **116**: S119-S126
- [2] Grimm NB, Faeth SH, Golubiewski NE, et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, **319**: 756-760
- [3] Chen B (陈波), Liu H-L (刘海龙), Zhao D-B (赵东波), et al. Relationship between retention PM_{2.5} and leaf surface AFM character of six greening trees during autumn in Beijing West Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(3): 777-784 (in Chinese)
- [4] Nowak DJ, Greenfield EJ. Tree and impervious cover change in U.S. cities. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2012, **11**: 21-30
- [5] Li F (李锋), Wang R-S (王如松). Method and practice for ecological planning of urban green space: Yangzhou City as the case study. *Urban Environment and Urban Ecology* (城市环境与城市生态), 2003, **16**(5): 46-48 (in Chinese)
- [6] Smiley ET, Calfee L, Fraedrich BR, et al. Comparison of structural and noncompacted soils for trees surrounded by pavement. *Arboriculture and Urban Forestry*, 2006, **32**: 164-169
- [7] Volder A, Watson T, Viswanathan B. Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2009, **8**: 249-256
- [8] Song Y-S (宋英石), Li F (李锋), Wang X-K (王效科), et al. Effects of urban imperious surface on the habitat and ecophysiology characteristics of *Ginkgo biloba*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(8): 2164-2171 (in Chinese)
- [9] Wang J (王佳), Qian Y-G (钱雨果), Han L-J (韩立建), et al. Relationship between land surface temperature and land cover types based on GWR model: A case of Beijing-Tianjin-Tangshan urban agglomeration, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(7): 2128-2136 (in Chinese)
- [10] Gregory JH, Dukes MD, Jones PH, et al. Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, **61**: 117-124
- [11] Lorenz K, Lal R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils. *Environment International*, 2009, **35**: 1-8
- [12] Mueller EC, Day TA. The effect of urban ground cover on microclimate, growth and leaf gas exchange of oleander in Phoenix, Arizona. *International Journal of Biometeorology*, 2005, **49**: 244-255
- [13] Song Y-S (宋英石), Li F (李锋), Fu Z-H (付芝红), et al. Seasonal impact of impervious surface on

- photosynthetic characteristics of *Ginkgo biloba* and its stress analysis. *Urban Environment and Urban Ecology* (城市环境与城市生态), 2013, **26**(4): 27–30 (in Chinese)
- [14] Morgenroth J. Root growth response of *Platanus orientalis* to porous pavements. *Arboriculture and Urban Forestry*, 2011, **37**: 45–50
- [15] Zhao D (赵丹), Li F (李锋), Wang R-S (王如松). Effects of ground surface hardening on plant eco-physiological processes in urban landscapes. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(14): 3923–3932 (in Chinese)
- [16] Morgenroth J, Buchan GD. Soil moisture and aeration beneath pervious and impervious pavements. *Arboriculture and Urban Forestry*, 2009, **35**: 135–141
- [17] Volder A, Viswanathan B, Watson WT. Pervious and impervious pavement reduce production and decrease lifespan of fine roots of mature Sweetgum trees. *Urban Ecosystems*, 2014, **17**: 445–453
- [18] Force L, Critchley C, van Rensen JJS. New fluorescence parameters for monitoring photosynthesis in plants. *Photosynthesis Research*, 2003, **78**: 17–33
- [19] Jin T-T (靳甜甜), Fu B-J (傅伯杰), Liu G-H (刘国华), et al. Diurnal changes of photosynthetic characteristics of *Hippophae rhamnoides* and the relevant environment factors at different slope locations. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(7): 1783–1793 (in Chinese)
- [20] Yuan Z-F (袁志发), Zhou J-Y (周静芋), Guo M-C (郭满才), et al. Decision coefficient: The decision index of path analysis. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry* (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2001, **29**(5): 131–133 (in Chinese)
- [21] Zhao D (赵丹), Li F (李锋), Song Y-S (宋英石), et al. Relationship between diurnal changes of photosynthesis of *Ginkgo biloba* and environmental factors under different ground surfaces. *Urban Environment and Urban Ecology* (城市环境与城市生态), 2012, **25**(6): 5–9 (in Chinese)
- [22] Song Y-Y (宋于洋), Ta Y-E (塔依尔), Wang B-J (王炳举), et al. Daily changing rule between leaf net photosynthetic rate and plant environment factors in *Hippophae rhamnoides* L. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2007, **22**(1): 8–11 (in Chinese)
- [23] Teskey RO, Fites JA, Samuelson LJ, et al. Stomatal and nonstomatal limitations to net photosynthesis in *Pinus taeda* L. under different environmental conditions. *Tree Physiology*, 1986, **2**: 131–142
- [24] Liu MY, Chen PY. Effects of stomatal and nonstomatal factors on wheat photosynthesis under water stress. *Plant Physiology Communications*, 1990, **4**: 24–27
- [25] Zhang SY, Zhang GC, Gu SY, et al. Critical responses of photosynthetic efficiency of goldspur apple tree to soil water variation in semiarid loess hilly area. *Photosynthetica*, 2010, **48**: 589–595
- [26] Farquhar GD, Sharkey TD. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, **33**: 317–345
- [27] Lambers H, Chapin FS, Pons TL. Plant Physiological Ecology. Second edition. New York: Springer, 2008
- [28] Xu Q, Huang B. Effects of differential air and soil temperature on carbohydrate metabolism in creeping bentgrass. *Crop Science*, 2000, **40**: 1368–1374
- [29] Salvucci ME, Portis AR, Ogren WL. Light and CO₂ response of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activation in *Arabidopsis* leaves. *Plant Physiology*, 1986, **80**: 655–659
- [30] Gao Y-Z (高煜珠), Wang Z (王忠). On the relationship between photorespiration and photosynthesis II: Effects of environmental factors on photosynthesis and its relation to photorespiration. *Acta phytophysiologia sinica* (植物生理学报), 1982, **8**(4): 373–384 (in Chinese)
- [31] Zhang S-R (张守仁). A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chinese Bulletin Botany* (植物学报), 1999, **16**(4): 444–448 (in Chinese)
- [32] Wang J-H (王建华), Ren S-F (任士福), Shi B-S (史宝胜), et al. Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Forsythia suspens*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(7): 1811–1817 (in Chinese)
- [33] Li X (李晓), Feng W (冯伟), Zeng X-C (曾晓春). Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2006, **26**(10): 2186–2196 (in Chinese)
- [34] Zhu C-G (朱成刚), Chen Y-N (陈亚宁), Li W-H (李卫红), et al. Effect of drought stress on photochemical efficiency and dissipation of excited energy in photosystem II of *Populus euphratica*. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学报), 2011, **46**(4): 413–424 (in Chinese)
- [35] Yuan L (袁琳), Zhang L-Q (张利权), Gu Z-Q (古志钦). Responses of chlorophyll fluorescence of an invasive plant *Spartina alterniflora* to continuous waterlogging. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2010, **30**(4): 882–889 (in Chinese)
- [36] Hamerlynck EP, Huxman TE. Ecophysiology of two Sonoran Desert evergreen shrubs during extreme drought. *Journal of Arid Environments*, 2009, **73**: 582–585

作者简介 汪旭明,男,1989年生,博士研究生.主要从事城市生态学研究. E-mail: xmwang_st@rcees.ac.cn

责任编辑 杨弘