

# 不同配方土对上海市 4 种行道树叶片净光合速率和蒸腾速率的影响及矢量关系分析

杨瑞卿<sup>1,2</sup>

(1. 上海市绿化管理指导站, 上海 200020; 2. 上海城市树木生态应用工程技术研究中心, 上海 200020)

**摘要:** 以上海市 4 种代表性行道树广玉兰 (*Magnolia grandiflora* Linn.)、香樟 [*Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl]、二球悬铃木 [*Platanus acerifolia* (Ait.) Willd.] 和银杏 (*Ginkgo biloba* Linn.) 的 3 年生扦插苗为研究对象, 采用  $L_{16}(4^3)$  正交试验设计进行 3 因子 4 水平栽培实验, 其中, 3 因子包括填充介质、混合土体积分数和土壤相对含水量, 填充介质分别为粒径 5、3 和 1 cm 的青石粒及街道土, 混合土体积分数分别为 20%、40%、60% 和 80%, 土壤相对含水量分别为最大田间持水量的 80%、60%、50% 和 40%; 对 4 种行道树叶片的净光合速率和蒸腾速率进行了比较, 并进行了多因素方差分析和矢量关系分析。结果表明: 不含街道土的各组广玉兰和银杏的净光合速率较高, 而含和不含街道土的各组香樟和二球悬铃木的净光合速率差异不明显; 含街道土的各组香樟和二球悬铃木的蒸腾速率总体上较高, 而含和不含街道土的各组广玉兰和银杏的蒸腾速率差异不明显。多因素方差分析结果表明: 3 个因子对香樟净光合速率的单独影响较小, 而对其余 3 种行道树净光合速率的影响却较大; 填充介质和土壤相对含水量对 4 种行道树蒸腾速率的单独影响均较大; 而 3 个因子的交互作用对广玉兰净光合速率的影响极显著, 对广玉兰、香樟和二球悬铃木蒸腾速率的影响也极显著。矢量关系分析结果表明: 广玉兰属于高能耗水型, 香樟属于高能耗水型和低能耗水型 2 个类型, 二球悬铃木和银杏均属于高能保水型、高能耗水型和低能保水型 3 个类型。研究结果显示: 从光合效能角度来看, 广玉兰适宜生长在填充介质为粒径 3 cm 青石粒、混合土体积分数为 40%、土壤相对含水量为最大田间持水量的 80% 的配方土中, 二球悬铃木适宜生长在填充介质为粒径 5 cm 青石粒、混合土体积分数为 40%、土壤相对含水量为最大田间持水量的 60% 的配方土中, 而香樟和银杏则适宜生长在填充介质为粒径 3 cm 青石粒、混合土体积分数为 20%、土壤相对含水量为最大田间持水量的 60% 的配方土中。

**关键词:** 上海市; 行道树; 配方土; 净光合速率; 蒸腾速率; 矢量关系分析

中图分类号: Q945.1; Q948.113; S687.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2018)01-0052-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.01.07

**Effects of different formula soils on leaf net photosynthetic rate and transpiration rate of four species of street trees in Shanghai City and vector relationship analysis** YANG Ruiqing<sup>1,2</sup>  
(1. Shanghai Green Management Guidance Station, Shanghai 200020, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Urban Trees Ecological Application, Shanghai 200020, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2018, 27(1): 52-59

**Abstract:** Taking three-year-old cutting seedlings of four representative species of street trees of *Magnolia grandiflora* Linn., *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl, *Platanus acerifolia* (Ait.) Willd., and *Ginkgo biloba* Linn. in Shanghai City as research objects, cultivation experiments with three factors and four levels were set up by using  $L_{16}(4^3)$  orthogonal test design. In which, three factors included packing medium, volume fraction of mixed soil, and relative water content of soil, packing medium was set as bluestone granules with diameter of 5, 3 and 1 cm, and street soil, respectively; volume fraction of mixed soil was set as 20%, 40%, 60%, and 80%, respectively; relative water content of soil was set as 80%,

收稿日期: 2017-09-26

基金项目: 上海市绿化和市容管理局科技攻关项目(G160507); 上海市科学技术委员会科技创新行动计划(17DZ2252000)

作者简介: 杨瑞卿(1981—), 男, 河南商丘人, 硕士, 工程师, 主要从事城市行道树管理与技术指导工作。

60%, 50%, and 40% of the maximum field capacity, respectively. Leaf net photosynthetic rate and transpiration rate of four species of street trees were compared, and the multi-factor variance analysis and vector relationship analysis were also carried out. The results show that net photosynthetic rates of *M. grandiflora* and *G. biloba* in groups without street soil are higher, while differences in net photosynthetic rates of *C. camphora* and *P. acerifolia* between groups with and without street soil are not obvious. Transpiration rates of *C. camphora* and *P. acerifolia* in groups with street soil are mostly higher, while differences in transpiration rates of *M. grandiflora* and *G. biloba* between groups with and without street soil are not obvious. The results of multi-factor variance analysis show that the single effect of three factors on net photosynthetic rate of *C. camphora* is smaller, but that on net photosynthetic rate of other three species of street trees is larger; the single effects of packing medium and relative water content of soil on transpiration rate of four species of street trees are larger; while the interaction effect of three factors on net photosynthetic rate of *M. grandiflora* is extremely significant, and that on transpiration rate of *M. grandiflora*, *C. camphora*, and *P. acerifolia* is also extremely significant. The result of vector relationship analysis shows that *M. grandiflora* is belonging to high energy and water consumption type, *C. camphora* is belonging to two types including high energy and water consumption type and low energy and water consumption type, and *P. acerifolia* and *G. biloba* are belonging to three types including high energy and water conservation type, high energy and water consumption type, and low energy and water conservation type. It is suggested that from the perspective of photosynthetic efficiency, *M. grandiflora* is suitable for growing in formula soil containing packing medium of bluestone granules with diameter of 3 cm, volume fraction of mixed soil of 40%, and relative water content of soil with 80% of the maximum field capacity, *P. acerifolia* is suitable for growing in formula soil containing packing medium of bluestone granules with diameter of 5 cm, volume fraction of mixed soil of 40%, and relative water content of soil with 60% of the maximum field capacity, while *C. camphora* and *G. biloba* are suitable for growing in formula soil containing packing medium of bluestone granules with diameter of 3 cm, volume fraction of mixed soil of 20%, and relative water content of soil with 60% of the maximum field capacity.

**Key words:** Shanghai City; street tree; formula soil; net photosynthetic rate; transpiration rate; vector relationship analysis

城市土壤一般通过回填、混合和压实等人为活动形成<sup>[1]</sup>。随着城市的高速发展,城市土壤发生了巨大变化。行道树在城市生态系统中具有重要作用<sup>[2]</sup>,城市土壤的介质类型、养分含量和路表材料均可造成土壤透气性下降,进而阻碍行道树生长<sup>[1,3-4]</sup>,致使行道树长势较弱<sup>[5-6]</sup>,因此,亟需开展改善行道树生长土壤条件方面的研究。

植物光合作用对土壤变化敏感<sup>[7-8]</sup>,直接影响植物生长发育<sup>[9-11]</sup>,其中,净光合速率和蒸腾速率可直接体现植物的光合效能和蒸腾耗水量<sup>[12]</sup>。为此,采用 $L_{16}(4^3)$ 正交试验设计进行 3 因子 4 水平栽培实验,对上海市代表性行道树香樟 [*Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl]、广玉兰 (*Magnolia grandiflora* Linn.)、二球悬铃木 [*Platanus acerifolia* (Ait.) Willd.] 和银杏 (*Ginkgo biloba* Linn.) 3 年生扦插苗叶片的净光合速率和蒸腾速率进行比较,并进行多因素方差分析和矢量关系分析,以期明确不同配方土对各行道树生长的影响,初步选出适宜的配方土,为上海市城市土壤改良及行道树栽植和养护提供参考。

## 1 实验地概况和研究方法

### 1.1 实验地概况

实验在上海辰山植物园自控荫棚内完成,地理坐标为北纬 31°04'48"、东经 121°11'06"。该区域属北亚热带季风气候,气候温暖湿润、四季分明,年均温 15.4 °C,最高温 38.2 °C,最低温 -10.5 °C,无霜期 230 d。

### 1.2 材料

以上海辰山植物园自控荫棚内长势基本一致的广玉兰、香樟、二球悬铃木和银杏的 3 年生扦插苗为研究对象,平均株高分别为 2.3、2.0、3.1 和 2.9 m,平均胸径分别为 1.62、2.93、3.19 和 2.57 cm。

实验用青石粒为建筑工地常用的青石粒;街道土为上海市生长状态欠佳的行道树树穴中土壤;混合土由等体积的壤土和树叶等腐熟材料混合而成,其中,壤土为上海辰山植物园栽植地 0~30 cm 土层的土壤,混合土的全氮、全磷和有机质含量分别为 0.42、

0.38 和 6.57 g · kg<sup>-1</sup>, 水解氮、速效钾和有效磷含量分别为 47.10、46.90 和 1.37 mg · kg<sup>-1</sup>, pH 5.32。

### 1.3 方法

1.3.1 正交试验设计及苗木的栽培管理 采用 L<sub>16</sub>(4<sup>3</sup>)3 因子 4 水平正交试验设计配制配方土, 3 因子分别为填充介质、混合土体积分数和土壤相对含水量, 其中, 填充介质设置粒径 5、3 和 1 cm 的青石粒及街道土 4 个水平, 混合土体积分数设置 20%、40%、60% 和 80% 4 个水平, 土壤相对含水量设置最大田间持水量的 80%、60%、50% 和 40% 4 个水平。共 16 种配方土, 每树种每种配方土各 12 盆(每 3 盆为 1 组, 视为 1 个重复), 每盆种植 1 株, 共 768 盆。

于 2014 年 11 月中旬, 将 16 种配方土分别装入底部打孔且垫有托盘的控根容器(直径 50 cm、高 40 cm)中, 每容器装土 0.2 m<sup>3</sup>, 各容器均随机摆放, 间距 1.5 m。每周浇水 3 次, 采用 TZS-2X-G 多点土壤温湿度记录仪(上海精密仪器仪表有限公司)检测各配方土的相对含水量。

1.3.2 指标测定 于 2016 年 8 月 28 日(天气晴

朗), 每种配方土中各树种随机选取 3 株苗木, 采用 LI-6400 型便携式光合作用测量系统(美国 LI-COR 公司)测定植株中上部向阳面成熟、健康叶片的净光合速率和蒸腾速率。测量前, 加装红蓝光源和 CO<sub>2</sub> 注入系统, 控制光照强度为 800 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, CO<sub>2</sub> 浓度为 400 μmol · mol<sup>-1</sup>。每株检测 3 枚叶片, 每枚叶片各指标均重复读取 3 次, 结果取平均值。

### 1.4 数据处理及统计分析

采用 EXCEL 2010 及 SPSS 18.0 软件对实验数据进行处理分析, 使用 ANOVA 程序进行多因素方差分析和 Duncan's 多重比较; 参照文献[13-15]中的方法, 采用 SigmaPlot 12.5 软件绘制矢量关系图。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同配方土对行道树叶片净光合速率的影响

不同配方土对上海市 4 种行道树叶片净光合速率的影响见表 1。结果表明: T6 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒, 混合土体积分数为 40%, 土壤相对含水

表 1 不同配方土对上海市 4 种行道树叶片净光合速率的影响

Table 1 Effects of different formula soils on leaf net photosynthetic rate of four species of street trees in Shanghai City

处理组 Treatment group	因子和水平 Factor and level			净光合速率/μmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1.3</sup> ) Net photosynthetic rate <sup>3)</sup>			
	填充介质 <sup>1)</sup> Packing medium <sup>1)</sup>	混合土 体积分数/% Volume fraction of mixed soil	土壤相对 含水量/% <sup>2)</sup> Relative water content of soil <sup>2)</sup>	广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	二球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	银杏 <i>Ginkgo biloba</i>
T1	BG5	20	80	4.67±1.92ef	8.76±2.01ab	8.64±1.50a	6.59±1.40abcd
T2	BG5	40	60	7.46±1.90cde	10.11±2.53ab	8.65±0.74a	6.66±1.36abcd
T3	BG5	60	50	9.81±1.99abc	9.11±5.51ab	6.46±0.99abc	5.40±1.62bcd
T4	BG5	80	40	9.19±2.26bcd	9.62±2.20ab	6.17±1.10abc	7.56±2.24ab
T5	BG3	20	60	10.31±0.74abc	11.56±3.02a	8.62±0.59a	8.31±0.90a
T6	BG3	40	80	12.52±1.00a	9.62±1.20ab	7.82±2.33ab	6.77±0.51abc
T7	BG3	60	40	6.36±0.68de	9.56±1.84ab	3.83±2.67c	6.62±0.17abcd
T8	BG3	80	50	9.34±0.37bcd	10.71±1.52ab	5.04±2.91bc	5.59±0.52bcd
T9	BG1	20	50	5.67±2.01e	8.58±1.80ab	5.57±0.96abc	4.39±1.06cd
T10	BG1	40	40	10.87±1.34ab	8.75±1.39ab	6.68±1.50abc	6.31±0.80abcd
T11	BG1	60	80	10.36±0.31abc	7.07±2.38ab	4.95±1.28bc	6.49±1.44abcd
T12	BG1	80	60	7.28±2.94cde	6.87±1.69b	7.62±2.22ab	6.51±1.12abcd
T13	SS	20	40	2.31±0.63f	8.24±1.29ab	5.93±0.92abc	5.34±0.54bcd
T14	SS	40	50	9.36±1.75bcd	7.81±2.88ab	6.29±0.53abc	5.07±1.28cd
T15	SS	60	60	4.83±2.03ef	7.59±0.41ab	6.26±0.91abc	4.88±0.42cd
T16	SS	80	80	6.69±1.65de	7.78±0.61ab	5.91±1.74abc	4.36±1.90d
F 值 F value				8.267**	0.949	2.334*	2.499*

<sup>1)</sup> BG5: 粒径 5 cm 青石粒 Bluestone granules with diameter of 5 cm; BG3: 粒径 3 cm 青石粒 Bluestone granules with diameter of 3 cm; BG1: 粒径 1 cm 青石粒 Bluestone granules with diameter of 1 cm; SS: 街道土 Street soil.

<sup>2)</sup> 土壤含水量占最大田间持水量的比例 Percentage of soil water content accounting for the maximum field capacity.

<sup>3)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ). \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

量为最大田间持水量的 80%)、T10 组(填充介质为粒径 1 cm 青石粒,混合土体积分数为 40%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%)、T11 组(填充介质为粒径 1 cm 青石粒,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 80%)、T5 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒,混合土体积分数为 20%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 60%)和 T3 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 50%)广玉兰的净光合速率较高,分别为 12.52、10.87、10.36、10.31 和 9.81  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且这 5 组间广玉兰的净光合速率无显著差异,但均显著( $P < 0.05$ )高于填充介质为街道土的各组;T13 组(填充介质为街道土,混合土体积分数为 20%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%)广玉兰的净光合速率最低,仅 2.31  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,总体上显著低于其余各组。T5 组、T8 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒,混合土体积分数为 80%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 50%)和 T2 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 40%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 60%)香樟的净光合速率较高,分别为 11.56、10.71 和 10.11  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;并且,各组间香樟的净光合速率无显著差异。T2 组、T1 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 20%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 80%)和 T5 组二球悬铃木的净光合速率较高,分别为 8.65、8.64 和 8.62  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;T8 组、T11 组和 T7 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%)二球悬铃木的净光合速率较低,分别为 5.04、4.95 和 3.83  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;并且,T1 组、T2 组和 T5 组二球悬铃木的净光合速率显著高于 T7 组、T8 组和 T11 组。各组银杏的净光合速率总体上变化不明显,其中,T5 组和 T4 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 80%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%)银杏的净光合速率相对较高,分别为 8.31 和 7.56  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而填充介质为街道土的各组银杏的净光合速率均较低。

从 4 种行道树叶片净光合速率的  $F$  值来看,在供试的 16 种配方土中,广玉兰的净光合速率差异极显著( $P < 0.01$ ),二球悬铃木和银杏的净光合速率差异显著,而香樟的净光合速率差异不显著。

## 2.2 不同配方土对行道树叶片蒸腾速率的影响

不同配方土对上海市 4 种行道树叶片蒸腾速率的影响见表 2。结果表明:T6 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒,混合土体积分数为 40%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 80%)、T5 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒,混合土体积分数为 20%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 60%)和 T4 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 80%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%)广玉兰的蒸腾速率较高,分别为 2.18、2.00 和 1.83  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;T15 组(填充介质为街道土,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 60%)和 T13 组(填充介质为街道土,混合土体积分数为 20%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%)广玉兰的蒸腾速率较低,分别为 0.94 和 0.45  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;并且,T4 组、T5 组和 T6 组广玉兰的蒸腾速率显著( $P < 0.05$ )高于 T13 组和 T15 组。T16 组(填充介质为街道土,混合土体积分数为 80%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 80%)和 T14 组(填充介质为街道土,混合土体积分数为 40%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 50%)香樟的蒸腾速率较高,分别为 2.46 和 2.06  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;T6 组、T11 组(填充介质为粒径 1 cm 青石粒,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 80%)和 T13 组香樟的蒸腾速率较低,分别为 1.41、1.32 和 1.12  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;并且,T14 组和 T16 组香樟的蒸腾速率显著高于 T6 组、T11 组和 T13 组。T6 组、T5 组、T16 组、T1 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 20%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 80%)和 T3 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 50%)二球悬铃木的蒸腾速率较高,分别为 2.73、2.51、2.47、2.43 和 2.21  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,总体上显著高于其余各组。各组银杏的蒸腾速率总体上变化不明显,其中,T4 组、T13 组和 T7 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%)银杏的蒸腾速率相对较高,分别为 1.05、1.01 和 1.00  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从 4 种行道树叶片蒸腾速率的  $F$  值来看,在供试的 16 种配方土中,广玉兰、香樟和二球悬铃木的蒸腾速率差异极显著( $P < 0.01$ ),而银杏的蒸腾速率差异不显著。

表 2 不同配方土对上海市 4 种行道树叶片蒸腾速率的影响

Table 2 Effects of different formula soils on leaf transpiration rate of four species of street trees in Shanghai City

处理组 Treatment group	因子和水平 Factor and level			蒸腾速率/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1(3)}$ Transpiration rate <sup>(3)</sup>			
	填充介质 <sup>1)</sup> Packing medium <sup>1)</sup>	混合土 体积分数/% Volume fraction of mixed soil	土壤相对 含水量/% <sup>2)</sup> Relative water content of soil <sup>2)</sup>	广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	二球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	银杏 <i>Ginkgo biloba</i>
T1	BG5	20	80	1.48±0.36abcd	1.47±0.49bcd	2.43±0.36ab	0.68±0.26ab
T2	BG5	40	60	1.15±0.53cd	1.70±0.31bcd	1.58±0.38cde	0.74±0.35ab
T3	BG5	60	50	1.48±0.35abcd	1.54±0.44bcd	2.21±0.34abc	0.62±0.44ab
T4	BG5	80	40	1.83±0.41abc	1.26±0.38cd	1.97±0.34bcd	1.05±0.18a
T5	BG3	20	60	2.00±0.36ab	1.74±0.20bc	2.51±0.37ab	0.78±0.04ab
T6	BG3	40	80	2.18±0.60a	1.41±0.13cd	2.73±0.25a	0.97±0.29ab
T7	BG3	60	40	1.11±0.19cd	1.80±0.18bc	1.37±0.21de	1.00±0.23ab
T8	BG3	80	50	1.51±0.11abcd	1.67±0.13bcd	1.27±0.09e	0.73±0.19ab
T9	BG1	20	50	1.58±0.41abcd	1.57±0.44bcd	1.64±0.26cde	0.54±0.05b
T10	BG1	40	40	1.47±0.31abcd	1.74±0.38bc	1.55±0.42de	0.88±0.29ab
T11	BG1	60	80	1.28±0.49bcd	1.32±0.30cd	1.67±0.24cde	0.80±0.23ab
T12	BG1	80	60	1.62±0.31abcd	1.80±0.29bc	1.73±0.31bc	0.98±0.17ab
T13	SS	20	40	0.45±0.19e	1.12±0.20d	1.92±0.40bcde	1.01±0.20ab
T14	SS	40	50	1.57±0.48abcd	2.06±0.29ab	1.46±0.30de	0.66±0.25ab
T15	SS	60	60	0.94±0.29de	1.87±0.28bc	1.88±0.49bcde	0.83±0.03ab
T16	SS	80	80	1.31±0.30bcd	2.46±0.22a	2.47±0.44ab	0.55±0.22b
F 值 F value				3.595**	3.330**	5.221**	1.482

<sup>1)</sup> BG5: 粒径 5 cm 青石粒 Bluestone granules with diameter of 5 cm; BG3: 粒径 3 cm 青石粒 Bluestone granules with diameter of 3 cm; BG1: 粒径 1 cm 青石粒 Bluestone granules with diameter of 1 cm; SS: 街道土 Street soil.

<sup>2)</sup> 土壤含水量占最大田间持水量的比例 Percentage of soil water content accounting for the maximum field capacity.

<sup>3)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ). \*\*:  $P < 0.01$ .

### 2.3 多因素方差分析

配方土对上海市 4 种行道树叶片净光合速率和蒸腾速率影响的多因素方差分析结果见表 3。结果表明:填充介质对广玉兰和银杏净光合速率的影响达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ),对香樟净光合速率的影响达到显著水平 ( $P < 0.05$ ),但对二球悬铃木净光合速率的影响不显著;混合土体积分数对广玉兰和二球悬铃木净光合速率的影响分别达到极显著和显著水平,

但对香樟和银杏净光合速率的影响不显著;土壤相对含水量对二球悬铃木和银杏净光合速率的影响分别达到极显著和显著水平,但对广玉兰和香樟净光合速率的影响不显著。并且,这 3 个因子的交互作用对广玉兰净光合速率的影响达到极显著水平,但对香樟、二球悬铃木和银杏净光合速率的影响不显著。

由表 3 还可见:填充介质对广玉兰蒸腾速率的影响达到极显著水平,对香樟和二球悬铃木蒸腾速率的

表 3 配方土对上海市 4 种行道树叶片净光合速率和蒸腾速率影响的多因素方差分析

Table 3 Multi-factor variance analysis on effect of formula soil on leaf net photosynthetic rate and transpiration rate of four species of street trees in Shanghai City

变异来源 <sup>1)</sup> Source of variation <sup>1)</sup>	自由度 Degree of freedom	净光合速率的 F 值 <sup>2)</sup> F value of net photosynthetic rate <sup>2)</sup>				蒸腾速率的 F 值 <sup>2)</sup> F value of transpiration rate <sup>2)</sup>			
		MG	CC	PA	GB	MG	CC	PA	GB
A	3	11.592**	3.456*	1.918	5.895**	5.954**	3.288*	3.130*	0.479
B	3	13.786**	0.384	4.010*	0.208	2.810	2.479	2.472	0.236
C	3	2.281	0.301	4.543**	3.582*	2.048	2.047	9.993**	4.531**
A×B×C	6	6.839**	0.302	0.624	1.406	3.581**	4.419**	5.256**	1.081

<sup>1)</sup> A: 填充介质 Packing medium; B: 混合土体积分数 Volume fraction of mixed soil; C: 土壤相对含水量 Relative water content of soil.

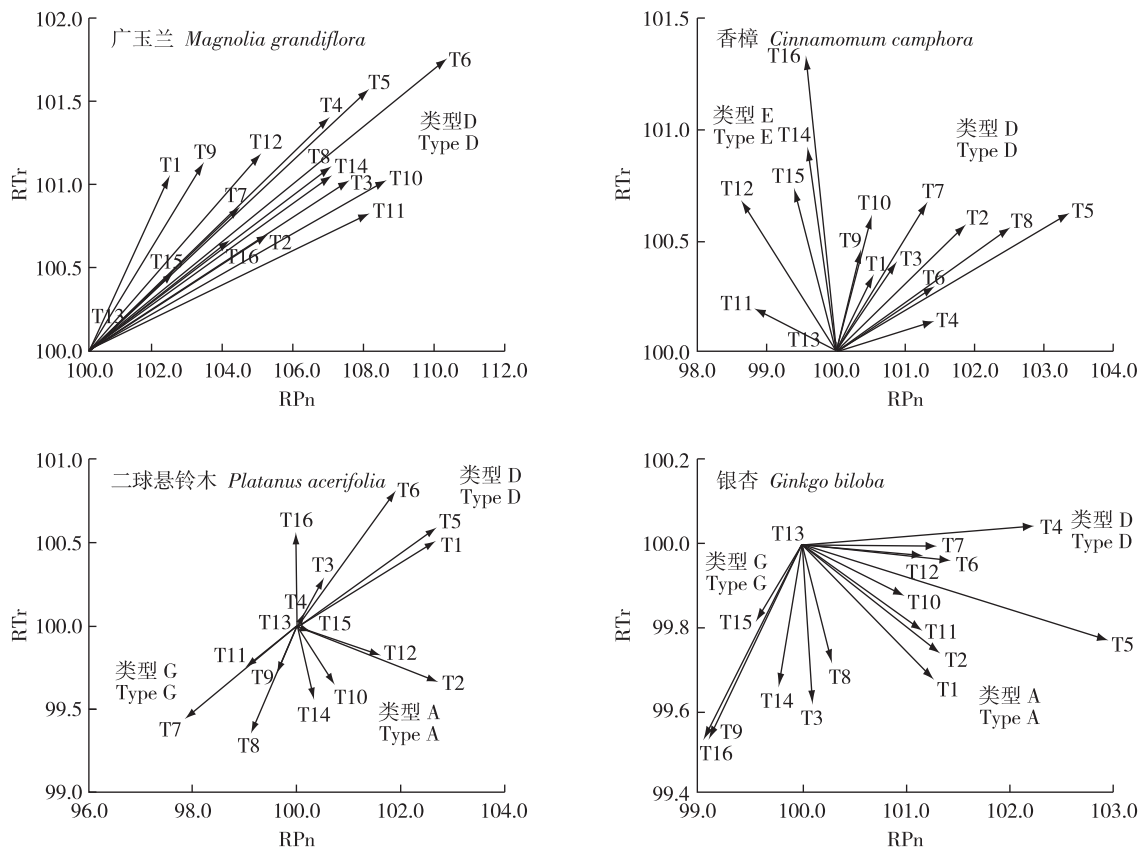
<sup>2)</sup> MG: 广玉兰 *Magnolia grandiflora* Linn.; CC: 香樟 *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl; PA: 二球悬铃木 *Platanus acerifolia* (Ait.) Willd.; GB: 银杏 *Ginkgo biloba* Linn. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

影响达到显著水平,但对银杏蒸腾速率的影响不显著;混合土体积分数对 4 种行道树蒸腾速率的影响均不显著;土壤相对含水量对二球悬铃木和银杏蒸腾速率的影响达到极显著水平,但对广玉兰和香樟蒸腾速率的影响不显著。并且,这 3 个因子的交互作用对广玉兰、香樟和二球悬铃木蒸腾速率的影响均达到极显著水平,但对银杏蒸腾速率的影响不显著。

2.4 矢量关系分析

以 T13 组(填充介质为街道土,混合土体积分数为 20%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%) 4 种行道树叶片的净光合速率和蒸腾速率为 100.0, 分别计算各行道树叶片的相对净光合速率和相对蒸

腾速率,并绘制不同配方土中上海市 4 种行道树叶片相对净光合速率和相对蒸腾速率的矢量关系图(图 1)。结果表明:各组广玉兰均属于类型 D,即高能耗水型。T1 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 20%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 80%)至 T10 组(填充介质为粒径 1 cm 青石粒,混合土体积分数为 40%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%)香樟属于类型 D;而 T11 组(填充介质为粒径 1 cm 青石粒,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 80%)、T12 组(填充介质为粒径 1 cm 青石粒,混合土体积分数为 80%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 60%)及



T1: A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>; T2: A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>; T3: A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>; T4: A<sub>1</sub>B<sub>4</sub>C<sub>4</sub>; T5: A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub>; T6: A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>; T7: A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>4</sub>; T8: A<sub>2</sub>B<sub>4</sub>C<sub>3</sub>; T9: A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>; T10: A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>4</sub>; T11: A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>; T12: A<sub>3</sub>B<sub>4</sub>C<sub>2</sub>; T13: A<sub>4</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>; T14: A<sub>4</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>; T15: A<sub>4</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; T16: A<sub>4</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>. A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>: 填充介质分别为粒径 5, 3 和 1 cm 的青石粒及街道土 Packing media of bluestone granules with diameter of 5, 3 and 1 cm, and street soil, respectively; B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>: 混合土体积分数分别为 20%、40%、60% 和 80% Volume fraction of mixed soil of 20%, 40%, 60%, and 80%, respectively; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>: 土壤相对含水量分别为最大田间持水量的 80%、60%、50% 和 40% Relative water content of soil of 80%, 60%, 50%, and 40% of the maximum field capacity, respectively.

类型 A、D、E 和 G 分别为高能保水型、高能耗水型、低能耗水型和低能保水型 Type A, D, E, and G are high energy and water conservation type, high energy and water consumption type, low energy and water consumption type, and low energy and water conservation type, respectively.

图 1 不同配方土中上海市 4 种行道树叶片相对净光合速率 (RPn) 和相对蒸腾速率 (RTTr) 的矢量关系分析  
 Fig. 1 Vector relationship analysis on leaf relative net photosynthetic rate (RPn) and relative transpiration rate (RTTr) of four species of street trees in Shanghai City in different formula soils

T14 组(填充介质为街道土,混合土体积分数为 40%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 50%)至 T16 组(填充介质为街道土,混合土体积分数为 80%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 80%)香樟则属于类型 E,即低能耗水型。T2 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 40%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 60%)、T10 组、T12 组、T14 组和 T15 组(填充介质为街道土,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 60%)二球悬铃木属于类型 A,即高能保水型;T1 组、T3 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 50%)至 T6 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒,混合土体积分数为 40%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 80%)及 T16 组二球悬铃木属于类型 D;T7 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒,混合土体积分数为 60%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%)至 T9 组(填充介质为粒径 1 cm 青石粒,混合土体积分数为 20%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 50%)和 T11 组二球悬铃木属于类型 G,即低能保水型。T1 组、T2 组、T3 组、T5 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒,混合土体积分数为 20%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 60%)、T6 组、T8 组(填充介质为粒径 3 cm 青石粒,混合土体积分数为 80%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 50%)及 T10 组至 T12 组银杏属于类型 A;T4 组(填充介质为粒径 5 cm 青石粒,混合土体积分数为 80%,土壤相对含水量为最大田间持水量的 40%)和 T7 组银杏属于类型 D;T9 组及 T14 组至 T16 组银杏属于类型 G。

### 3 讨论和结论

净光合速率和蒸腾速率能够直接体现植物的光合效能和蒸腾耗水情况<sup>[12]</sup>。总体上看,供试 4 种行道树叶片的净光合速率和蒸腾速率在不同配方土间差异较大。在含街道土的配方土中,广玉兰和银杏的净光合速率大多低于不含街道土的配方土,而香樟和二球悬铃木的净光合速率却与不含街道土的配方土差异不明显,说明广玉兰和银杏适宜种植在透气性较大的土壤中,而香樟和二球悬铃木的适应性较强,能够在透气性较小的土壤中较好地生长。在含街道土的配方土中,香樟和二球悬铃木的蒸腾速率大多较

高,而广玉兰和银杏的蒸腾速率则与其他配方土无明显差异。综上所述,在相同生长条件下,同一树种的净光合速率和蒸腾速率并不同步,这可能是因为植物的光合作用和蒸腾作用虽然均受到保卫细胞的调控作用,但彼此相对独立<sup>[12]</sup>。

邵永昌等<sup>[16]</sup>认为,植物叶片的净光合速率与蒸腾速率呈正相关。本研究中,广玉兰和香樟的净光合速率和蒸腾速率均较高,二球悬铃木的蒸腾速率较高,说明广玉兰和香樟的光能利用效能高、蒸腾耗水量较大,二球悬铃木的蒸腾耗水量较大,可能对城市的降温增湿作用显著<sup>[17]</sup>。另外,本研究中广玉兰(3 年生)蒸腾速率的最高值为  $2.18 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与 3 至 5 年生广玉兰的蒸腾速率<sup>[18]</sup>相近,而与 12 至 15 年生广玉兰的蒸腾速率(约  $1.00 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )差异较大<sup>[16]</sup>,这可能是因为植物的蒸腾速率与树龄和自身长势密切相关,并与叶温、土壤相对湿度、空气相对湿度和外界水汽压亏缺等环境因子有关<sup>[18]</sup>。

植物的光合作用对土壤条件高度敏感<sup>[18-19]</sup>,并受到其自身呼吸作用、体内环境和外界环境等多重因子的影响,包括叶含水率、水势、光合有效辐射、气温及空气相对湿度等环境因子<sup>[20-23]</sup>。填充介质、混合土体积分数和土壤相对含水量对广玉兰、二球悬铃木和银杏净光合速率的单独影响均较大,而对香樟净光合速率的单独影响较小;3 个因子的交互作用对广玉兰净光合速率影响极显著,而对其余 3 种行道树净光合速率的影响却较小。填充介质和土壤相对含水量对 4 种行道树蒸腾速率的单独影响较大,且 3 个因子的交互作用对银杏蒸腾速率的影响较小,而对其余 3 种行道树蒸腾速率的影响却极显著。

根据不同配方土中供试 4 种行道树叶片的净光合速率和蒸腾速率的矢量关系分析结果,供试 16 种配方土中生长的广玉兰均属于高能耗水型,香樟属于高能耗水型和低能耗水型 2 个类型,二球悬铃木和银杏均属于高能保水型、高能耗水型和低能保水型 3 个类型。综合分析认为,栽植环境对广玉兰光合效能和蒸腾耗水量的影响较小;在透气性较大的土壤中香樟的光合效能较高且蒸腾耗水量较大,而在透气性较小或混有一定比例街道土的土壤中其光合效能较低但蒸腾耗水量较大;二球悬铃木表现复杂,在透气性较大的土壤中其光合效能较高且蒸腾耗水量较大,在透气性和养分均中等的土壤中其光合效能较低且蒸腾耗水量较小,而在透气性较差但养分较高的土壤中其光

合效能较高但蒸腾耗水量较小;银杏与二球悬铃木相似,在透气性较大且养分中等的土壤中其光合效能较高但蒸腾耗水量较小,在透气性大或养分较高的土壤中其光合效能较低且蒸腾耗水量较小,在透气性中等且养分较高的土壤中其光合效能较高且蒸腾耗水量较大。

从光合效能角度来看,填充介质为粒径3 cm 青石粒、混合土体积分数为40%、土壤相对含水量为最大田间持水量的80%的配方土适宜广玉兰生长,填充介质为粒径5 cm 青石粒、混合土体积分数为40%、土壤相对含水量为最大田间持水量的60%的配方土适宜二球悬铃木生长,而填充介质为粒径3 cm 青石粒、混合土体积分数为20%、土壤相对含水量为最大田间持水量的60%的配方土适宜香樟和银杏生长。

#### 参考文献:

- [1] 卢 瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤的特性及其管理[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 206-209.
- [2] 李丽雅, 丁蕴铮, 侯晓丽, 等. 城市土壤特性与绿化树生长势衰弱关系研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2006, 38(3): 124-127.
- [3] 韩继红, 李传省, 黄秋萍. 城市土壤对园林植物生长的影响及其改善措施[J]. 中国园林, 2003, 19(7): 74-76.
- [4] GODEFROID S, MONBALIU D, KOEDAM N. The role of soil and microclimatic variables in the distribution patterns of urban wasteland flora in Brussels, Belgium [J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 80: 45-55.
- [5] 侯晓丽, 丁蕴铮, 王焕新, 等. 土壤钻孔通气法对行道树生长的改善[J]. 中国城市林业, 2005, 3(5): 48-50.
- [6] 郟光发, 彭镇华, 王 成. 北京城区银杏行道树生长现状与健康状况研究[J]. 林业科学研究, 2013, 26(4): 511-516.
- [7] HIDAYATI N, TRIADIATI, ANAS I. Photosynthesis and transpiration rates of rice cultivated under the system of rice intensification and the effects on growth and yield [J]. Hayati Journal of Biosciences, 2016, 23: 67-72.
- [8] 童方平, 宋庆安, 龙应忠, 等. 不同地理种源翅荚木苗期光合特征的日变异规律[J]. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(4): 1-7.
- [9] FUNG L E, WANG S S, ALTMAN A, et al. Effect of NaCl on growth, photosynthesis, ion and water relation of four poplar genotypes [J]. Forest Ecology and Management, 1998, 107: 135-146.
- [10] 朱教君, 康宏樟, 李智辉. 不同水分胁迫方式对沙地樟子松幼苗光合特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 57-63.
- [11] 丁俊祥, 邹 杰, 唐立松, 等. 克里雅河流域荒漠-绿洲交错带3种不同生活型植物的光合特性[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 733-741.
- [12] 张宇鹏, 周国模, 周宇峰, 等. 5个常见绿化树种对极端高温的光合响应特征[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 301-309.
- [13] HAASE D L, ROSE R. Vector analysis and its use for interpreting plant nutrient shifts in response to silvicultural treatments [J]. Forest Science, 1995, 41: 54-56.
- [14] 魏红旭, 徐程扬, 马履一, 等. 缓释肥和有机肥对长白落叶松容器苗养分库构建的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1731-1736.
- [15] LI X W, GAO Y, WEI H X, et al. Growth, biomass accumulation and foliar nutrient status in fragrant rosewood (*Dalbergia odorifera* T. C. Chen) seedlings cultured with conventional and exponential fertilizations under different photoperiod regimes [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2017, 63: 153-162.
- [16] 邵永昌, 庄家尧, 王柏昌, 等. 上海地区主要绿化树种夏季光合特性和固碳释氧能力研究[J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43(1): 94-101.
- [17] 张朋伟, 余树全, 伊力塔, 等. 不同类型园林树木光合特性研究[J]. 现代园林, 2010(12): 55-59.
- [18] 薛 雪, 李娟娟, 郑云峰, 等. 5个常绿园林树种的夏季光合蒸腾特性[J]. 林业科学, 2015, 51(9): 150-156.
- [19] 王 冉, 李素英, 任丽娟, 等. 锡林浩特草原区27种植物净光合速率影响因素的多因子分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 272-278.
- [20] JONES H, BLACK T A, JASSAL R S, et al. Water balance, surface conductance and water use efficiency of two young hybrid-poplar plantations in Canada's aspen parkland [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 246: 256-271.
- [21] 徐惠风, 刘兴土, 金研铭, 等. 沼泽植物泽泻气孔导度日变化的研究[J]. 生态科学, 2003, 22(3): 218-221.
- [22] 司建华, 常宗强, 苏永红, 等. 胡杨叶片气孔导度特征及其对环境因子的响应[J]. 西北植物学报, 2008, 28(1): 125-130.
- [23] 杨瑞卿, 楚秀丽, 杨万霞, 等. 不同种源青钱柳苗期光合特征及变异分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 41-45.

(责任编辑: 佟金凤)