

阳江 5 种滨海园林植物的光合特性和叶片元素

王卓敏¹, 薛 达², 薛 立^{1*}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642; 2. 山西省城乡规划设计研究院, 太原 030001)

摘 要: 对阳江 5 种园林植物的光合特性和叶片元素状况进行了研究。结果表明, 园林植物的净光合速率为马鞍藤>花叶假连翘>银边山菅兰>鹅掌藤>朱蕉, 花叶假连翘和马鞍藤的光合能力最强。海陵岛植物叶片的 C、N、P、K 和 Na 含量范围分别为 457.8~503.6、11.6~33.3、1.2~2.7、14.4~21.7 和 0.7~8.1 g·kg⁻¹。花叶假连翘的叶片 N、P 和 K 含量最高, 马鞍藤次之。5 种园林植物的 C:N 和 C:P 范围分别为 13.8~43.4 和 171.8~380.9, N:P 范围为 7.6~12.5, N:K 和 K:P 范围分别为 0.8~1.5 和 8.1~11.8。聚类分析表明, 5 种园林植物中, 花叶假连翘和马鞍藤的叶片养分含量高, 促进了光合作用。

关键词: 园林植物; 光合特性; 叶片元素; 聚类分析

中图分类号: S688.01

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2017)02-0277-06

Photosynthetic characteristics and leaf nutrients of five garden plants in Yangjiang, Guangdong Province

WANG Zhuomin¹, XUE Da², XUE Li¹

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642;

2. Shanxi Urban-Rural Planning Design and Research Institute, Taiyuan 030001)

Abstract: The photosynthetic characteristics and nutrient contents in garden plant leaves of five species were studied in Yangjiang, Guangdong Province. Results showed that net photosynthetic rate of the garden plants decreased in the order of *Ipomoea pes-caprae* > *Duranta repens* 'Variegata' > *Dianella ensifolia* 'White Variegated' > *Schefflera arboricola* > *Cordyline fruticosa*, and photosynthetic abilities of *I. pes-caprae* and *D. repens* were the strongest among garden plants of the five species. The contents of C, N, P, K and Na in the plant leaves ranged from 457.8-503.6, 11.6-33.3, 1.2-2.7, 14.4-21.7 and 0.7-8.1 g·kg⁻¹, respectively. N, P and K contents in *I. pes-caprae* were the highest and those in *D. repens* ranked the second among garden plants of the five species. The values of C: N and C: P in the garden plants ranged from 13.8-43.4 and 171.8-380.9, respectively. N:P ranged from 7.6-12.5, whereas N:K and K:P ranged from 0.8-1.5 and 8.1-11.8, respectively. The photosynthetic indexes and leaf nutrients of the garden plants were used for cluster analysis, and the results indicated that nutrient contents in *I. pes-caprae* and *D. repens* were high, which could promote their photosynthesis.

Key words: garden plant; photosynthetic characteristics; leaf element; cluster analysis

随着经济的快速发展, 人们对城市环境的要求越来越高, “生态园林”应运而生。生态园林重视园林植物的蒸腾吸热、碳氧平衡和养分循环等生态功能, 以缓解城市环境压力、改善城市生态环境^[1]。植物在生长过程中通过光合作用吸收 CO₂, 释放 O₂, 通过蒸腾作用增加大气湿度, 因此, 园林植物的光合生理特性受到广泛关注^[2-8]。叶片是植物进行光合

作用的重要同化器官, 而叶片养分影响植物的生长和光合, 因而成为生态系统的重要研究内容^[9]。然而叶片养分的研究集中于草本和森林^[10-16], 鲜有园林植物叶片养分的报道^[17-18]。

花叶假连翘 (*Duranta repens* 'Variegata')、马鞍藤 (*Ipomoea pes-caprae*)、银边山菅兰 (*Dianella ensifolia* 'White Variegated')、鹅掌藤 (*Schefflera*

收稿日期: 2016-08-20

基金项目: 广东省林业局资助项目“林分改造优良乡土阔叶树种筛选”(粤财农 2015-159 号)资助。

作者简介: 王卓敏, 硕士研究生。E-mail: wangzhuomin1@126.com

* 通信作者: 薛 立, 博士, 教授。E-mail: forxue@scau.edu.cn

arboricola) 和朱蕉 (*Cordyline fruticosa*) 是广东滨海地区典型的园林植物, 尚未见到其叶片光合生理和养分的报道。本研究以生长于广东阳江滨海地区的这 5 种园林植物为研究对象, 测定其叶片光合参数和养分, 可以为南方滨海地区园林植物的筛选和养分管理提供参考。

1 试验地点和方法

1.1 试验地概况

本研究地位于阳江市西南端的南海北部海域, 距阳江市区 20 km (21.62° N, 111.9° E)。气候属南亚热带, 年平均气温 22.3°C, 年降雨量 1 816 mm, 年晴天 310 d, 冬无严寒, 夏无酷暑, 四季如春。5 种园林植物的概况见表 1。

表 1 园林植物的基本情况
Table 1 General status of the garden plants

植物 Plant	平均地径 Mean ground diameter	平均高 Mean height	平均冠幅 Mean crown width
花叶假连翘 <i>Duranta repens</i> 'Variegata'	0.84±0.21	31.40±1.67	28.20±6.10
马鞍藤 <i>Ipomoea pes-caprae</i>	0.28±0.13	23.20±6.30	21.00±9.19
银边山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	0.86±0.17	38.20±9.60	40.80±9.26
鹅掌藤 <i>Schefflera arboricola</i>	1.32±0.16	41.00±4.53	26.60±4.93
朱蕉 <i>Cordyline fruticosa</i>	1.84±0.57	125.00±27.38	52.60±9.84

1.3 叶片元素含量的测定

2014 年 11 月采集 5 种园林植物的成熟叶各 30 枚, 将采集的叶片小心封存于封口袋中, 带回实验室。将叶片样品混合烘至恒重, 求得干重后用粉碎机磨成粉末, 测定碳 (C)、氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 和钠 (Na) 含量。有机 C 的测定采用重铬酸钾氧化法测定; N 用重铬酸钾-浓硫酸消化后以半微量凯氏法测定; 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮样品后获得 P、K 和 Na 分析待测液, 试液中的磷用钼蓝比色法测定, 钾和钠用原子分光光度法测定^[19]。

1.4 数据统计及处理

本研究数据作图均由 Microsoft Excel 完成。用 SAS8.1 软件系统进行植物光合指标和叶片元素的多重比较和聚类分析。

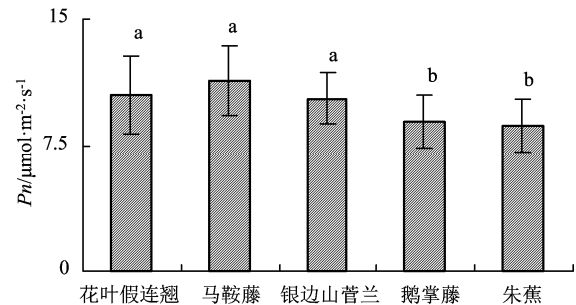
2 结果与分析

2.1 光合参数特征

海陵岛 5 种绿化植物净光合速率 (P_n) 为马鞍藤 > 花叶假连翘 > 银边山菅兰 > 鹅掌藤 > 朱蕉, 花叶假连翘、马鞍藤与银边山菅兰的 P_n 显著大于其他植物 ($P < 0.05$) (见图 1)。

1.2 光合参数的测定

2014 年 11 月选择晴朗无风的天气, 采用美国 LI-COR 公司生产的 Licor-6400 型便携式光合作用测定系统在开放气路下对所调查的滨海园林植物成熟叶片的气体交换参数进行测定。选取生长状况一致的 5 株植物, 由上而下在每株植物的第 3 位至第 8 位功能叶间选取 5 枚叶片进行测定。所有测定均在上午 9:00—11:00 时间段内完成。每次测量的光照强度设为 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度为 25~28°C, 空气的流量设为 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, CO₂ 浓度为测量时空气中的 CO₂ 浓度即 $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。气体交换参数包括净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 和胞间 CO₂ 浓度 (C_i)。



不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同
Different letters showed significant difference ($P < 0.05$). The same below

图 1 5 种园林植物的净光合速率
Figure 1 Net photosynthetic rates of the five garden plants

海陵岛 5 种绿化植物气孔导度 (G_s) 为花叶假连翘 > 马鞍藤 > 银边山菅兰 > 鹅掌藤 > 朱蕉, 其中花叶假连翘的 G_s 含量最高 ($0.15\ \text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 朱蕉的 G_s 含量最低 ($0.05\ \text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 前者达后者的 3 倍 ($P < 0.05$), 如图 2 所示。花叶假连翘与马鞍藤的 G_s 显著大于其他植物, 银边山菅兰、鹅掌藤、朱蕉的 G_s 存在显著差异 ($P < 0.05$)。

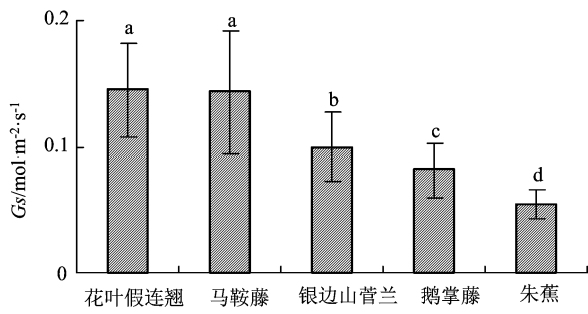


图 2 5 种园林植物的气孔导度

Figure 2 The stomatal conductance of the five garden plants

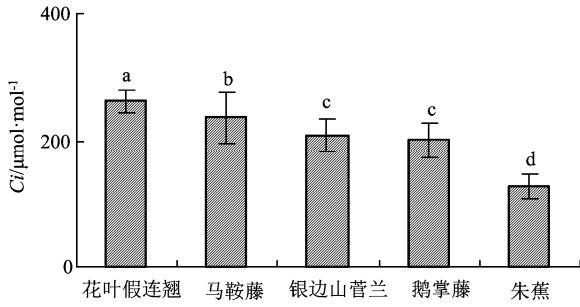


图 3 5 种园林植物的胞间 CO₂ 浓度

Figure 3 Intercellular CO₂ concentrations of the five garden plants

海陵岛 5 种园林植物胞间二氧化碳浓度 (C_i) 含量为花叶假连翘 > 马鞍藤 > 银边山菅兰 > 鹅掌藤

> 朱蕉, 花叶假连翘的 C_i 含量显著大于其他植物, 朱蕉的 C_i 含量显著小于其他植物 ($P < 0.05$), 如图 3 所示。

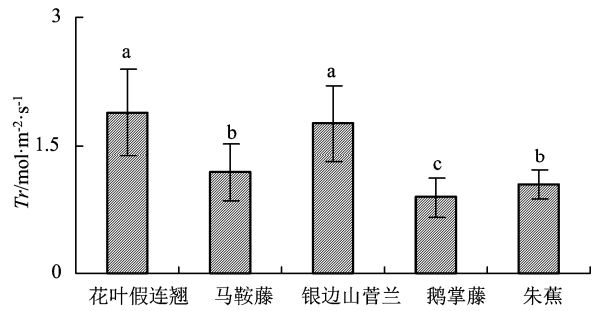


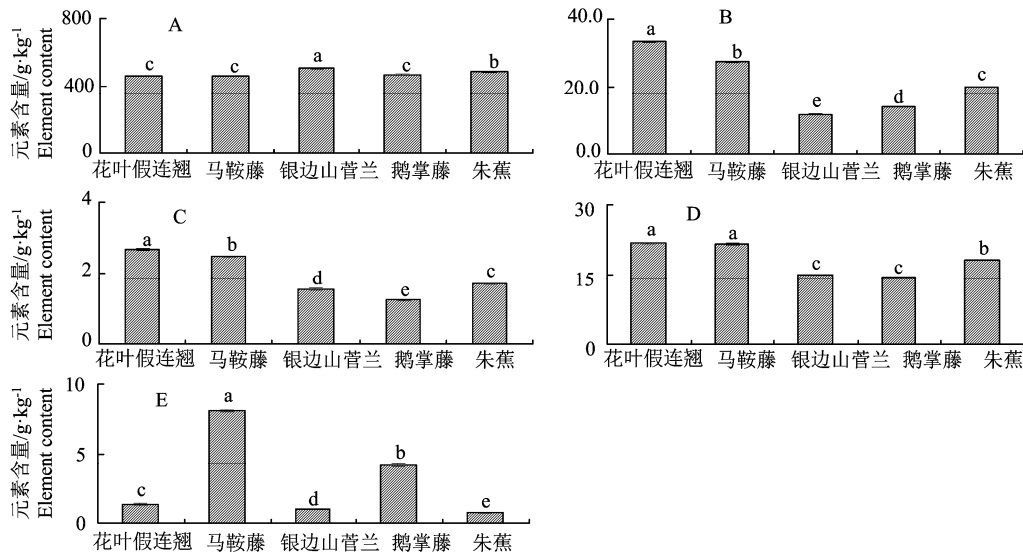
图 4 5 种园林植物的蒸腾速率

Figure 4 Transpiration rates of the five garden plants

5 种园林植物的蒸腾速率 (T_r) 为花叶假连翘 > 银边山菅兰 > 马鞍藤 > 朱蕉 > 鹅掌藤, 马鞍藤与朱蕉的 T_r 显著小于花叶假连翘与银边山菅兰, 显著大于鹅掌藤 ($P < 0.05$), 如图 4 所示。

2.2 叶片养分

5 种园林植物的叶片 C 含量为银边山菅兰 > 朱蕉 > 鹅掌藤 > 花叶假连翘 > 马鞍藤, 银边山菅兰的叶片 C 含量显著大于其他植物, 朱蕉显著大于鹅掌藤、花叶假连翘和马鞍藤 ($P < 0.05$), 如图 5 所示。



A. C 含量; B. N 含量; C. P 含量; D. K 含量; E. Na 含量

A. Content of carbon; B. Content of nitrogen; C. Content of phosphorus; D. Content of potassium; E. Content of sodium

图 5 5 种园林植物叶片的元素含量

Figure 5 Element contents in leaves of five garden plants

海陵岛 5 种园林植物叶片 N 含量为花叶假连翘 > 马鞍藤 > 朱蕉 > 鹅掌藤 > 银边山菅兰, 5 种植物的叶片 N 含量差异显著 ($P < 0.05$); 5 种园林植物

叶片 P 含量为花叶假连翘 > 马鞍藤 > 朱蕉 > 银边山菅兰 > 鹅掌藤, 5 种植物的叶片 P 含量差异显著 ($P < 0.05$); 5 种园林植物叶片 K 含量为花叶假连翘 >

马鞍藤>朱蕉>银边山菅兰>鹅掌藤, 朱蕉叶片的K含量显著小于花叶假连翘和马鞍藤, 显著大于银边山菅兰和鹅掌藤 ($P<0.05$); 海陵岛5种园林植物叶片Na含量为马鞍藤>鹅掌藤>花叶假连翘>银边山菅兰>朱蕉, 5种植物的叶片Na含量差异显著 ($P<0.05$)。

由表2可见, 5种园林植物的C:N和C:P范围分别为13.8~43.4和171.8~380.9, N:P范围为7.6~12.5, N:K和K:P范围分别为0.8~1.5和8.1~11.8。

相关分析结果显示, 园林植物光合速率与叶片N、P和K含量存在一定的相关性, 如图6所示。

表2 5种园林植物叶片C、N、P和K计量比

Table 2 Ratios of C, N, P and K contents in leaves of the five garden plants

植物 Plant	C:N	C:P	N:P	N:K	K:P
花叶假连翘 <i>Duranta repens</i> 'Variegata'	13.8	171.8	12.5	1.5	8.1
马鞍藤 <i>Ipomoea pes-caprae</i>	16.8	185.7	11.1	1.3	8.8
银边山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	43.4	329.3	7.6	0.8	9.8
鹅掌藤 <i>Schefflera arboricola</i>	33.6	380.9	11.3	1.0	11.8
朱蕉 <i>Cordyline fruticosa</i>	24.5	289.1	11.8	1.1	10.8

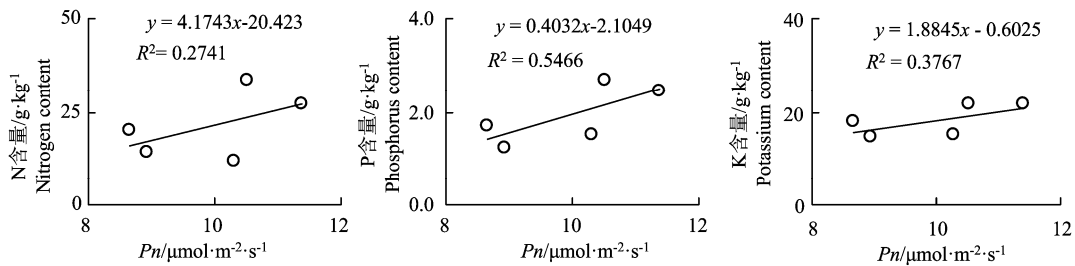


图6 净光合速率与叶片N、P和K含量的关系

Figure 6 Relationships between the P_n and N, P and K concentrations in the leaves

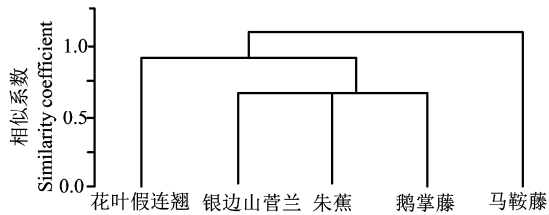


图7 5种园林植物聚类分析

Figure 7 The cluster analysis of the five garden plants

2.3 各地点植物生理指标聚类分析

5种园林植物的光合指标和叶片指标的聚类分析如图7所示。当阈值为0.75时, 可以分为3类, 第1类有花叶假连翘, 第2类有银边山菅兰、朱蕉和鹅掌藤, 第3类有马鞍藤。在5种园林植物中, 花叶假连翘叶片的 P_n 第2, 叶片的C含量第4, N、P、K含量最高, Na含量中等; 银边山菅兰、朱蕉和鹅掌藤叶片的 P_n 、 G_s 和 C_i 低, 朱蕉和鹅掌藤叶片的 T_r 小, 叶片C含量高, N、P、K含量低, Na含量无规律; 马鞍藤叶片的 P_n 最大, G_s 和 C_i 第2, T_r 中等, C含量低, N、P、K和Na含量高。

3 讨论与结论

净光合速率 (P_n) 与气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2

浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 关系密切。植物叶片的气孔影响与外界的交换气体, 也对植物叶片的蒸腾速率进行控制, 还与 T_r 有着密切的相关关系^[20-21]。本研究中, 花叶假连翘和马鞍藤的光合特性最好, 其 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 位居前2位, 说明其固碳释氧、降温增湿的能力最强, 耗水量也较大。朱蕉的光合特性最差, 其 P_n 、 G_s 和 C_i 最小, T_r 倒数第2, 说明其光合能力和蒸腾作用弱, 但耗水量小。花叶假连翘和马鞍藤由于 G_s 大, 所以植物叶片吸收外界的 CO_2 量大, 为光合作用提供了充足的原料。 G_s 大, 则蒸腾旺盛, 植物吸收的水分和溶于水分中无机养分多, 有利于植物叶片的光合作用^[1]。

植物的叶片是植物重要的同化器官^[9,22], 而叶片中的养分含量可以反映植物光合作用状态^[23-24]。多种因素影响植物的叶片养分含量, 其中包括物种、土壤养分状况等条件。不同物种的叶片结构和功能又存在着差异, 导致各自对养分的需求有所不同^[25]。本研究中, 5种园林植物的土壤来源相同, 叶片N、P、K和Na的养分含量多有显著差异, 主要是受树种遗传特性的影响, 反映出不同植物对C、N、P、K和Na的需求和选择吸收上的差异。5种园林植物中, 花叶假连翘的叶片N、P和K含量最高, 马鞍藤次

之, 说明这 2 种植物吸收养分的能力强, 与其光合能力强一致。马鞍藤的 Na 含量最高, 仍然有良好的光合表现, 表明其耐盐能力强。

C 是构成植物体干物质最主要的元素^[26], N 和 P 是植物生长所需的重要养分。本研究中, 5 种叶片 C 含量平均值为 $474 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于全球陆生植物叶片 C 平均含量 ($464 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[27]和我国黄土高原植被叶片 C 平均含量 ($438 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[28], 与云南普洱季风常绿阔叶林植物叶片 C 平均含量 ($470 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[29]相近。阳江处于亚热带季风气候区, 该区域光照充足, 水热条件良好, 因此园林植物的 C 储量能力强, 叶片有机 C 含量高。

5 种园林植物叶片 N 含量为 $11.6\sim 33.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中花叶假连翘和马鞍藤叶片 N 含量均高于全球平均 N 含量 ($20.09 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[30] 和全国平均水平 ($20.24 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[31], 其余 3 种园林植物的叶片 N 含量低于该水平, 表明 5 种园林植物叶片 N 含量差异较大。5 种园林植物叶片 P 含量为 $1.22\sim 2.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分布在全国尺度范围内 ($0.05\sim 10.27 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[31], 除了鹅掌藤外, 均大于全国平均水平 ($1.46 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[31], 花叶假连翘和马鞍藤叶片的 P 含量高于全球平均水平 ($1.77 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1.99 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[27,30]。可见, 所调查的园林植物的叶片 P 含量相对较高。

植物叶片是植物的主要光合器官, 其 C:N 和 C:P 反映了植物生长速度^[32]。5 种园林植物叶片 C:N 值在 $13.8\sim 43.4$, 其中, 银边山菅兰、鹅掌藤和朱蕉高于全球平均水平 (22.5)^[30]及我国草原区植物叶片平均水平 (17.9) 和黄土高原植物叶片平均水平 (21.2)^[28], 但低于浙江天童山常绿阔叶林 (39.9) 和常绿针叶林 (48.1)^[33]。不同森林类型植物叶片 C:P 值在 $171.8\sim 380.9$, 低于我国浙江天童山常绿阔叶林 (758.0) 和常绿针叶林 (677.9)^[33]。

N:P 比例可反映植物生长环境养分供应状况^[34]及植物生长是否缺 N 或 P^[35-37]。本研究中, 不同园林植物叶片 N:P 值在 $7.6\sim 12.5$, 小于中国的植物叶片平均 N:P (14.4)^[31]和全球平均水平 (13.8)^[30]。通常认为, 当植物 $N:P < 14$ 时, 植物生长表现为受 N 限制; 当 $N:P > 16$ 时, 表现为受 P 限制^[38]。本研究中 5 种园林植物叶片 $N:P < 14$, 说明植物生长受到 N 限制。

Odle Venterink 等^[39]提出 $N:K > 2.1$, 且 $K:P < 3.4$ 时, 植物的生长受 K 限制。本研究中园林植物叶片的 N:K 范围在 $0.8\sim 1.5$, K:P 范围在 $8.1\sim 11.8$, 表明园林植物的生长均不受 K 元素的限制。

5 种园林植物的光合速率与叶养分存在一定的

相关性。杨梦秋等^[40]也曾报道大别山油茶净光合速率与叶 N 和 K 含量存在明显的相关性。因此园林植物的光合速率可能受到其土壤养分水平的影响。目前园林的养护管理的施肥都较为粗放, 定期清除修剪后的枝叶, 往往造成植物所需养分的浪费。因此将其凋落物和修剪的枝叶归还土壤, 有利于提高土壤肥力, 促进植物生长。

参考文献:

- [1] 杨梦秋. 油茶林光合特性及其养分动态的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2011.
- [2] 郑素兰, 康红涛, 连先发. 漳州市 13 种园林植物光合及蒸腾特性[J]. 福建林业科技, 2015, 42(4): 37-41.
- [3] 幸宏伟, 代雪. 6 种热带园林植物在温室环境下的光合及蒸腾特性的研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(6): 64-68.
- [4] 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]. 农业科技与信息(现代园林), 2010, 7(12): 55-59.
- [5] 王月容, 谢军飞, 李薇, 等. 基于环境舒适度的 8 种园林植物光合特性研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(35): 124-130.
- [6] 蒋华伟, 罗红雨, 李静会, 等. 江苏省苏州市 32 种园林植物的光合及水分利用特征[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(3): 131-133.
- [7] 廖建雄, 史红文, 鲍大川, 等. 武汉市 51 种园林植物的气体交换特性[J]. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1058-1065.
- [8] 陈月华, 廖建华, 覃事妮. 长沙地区 19 种园林植物光合特性及固碳释氧测定[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(10): 116-120.
- [9] FIELD C B, BEHRENFELD J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [10] XUE L I, LUO S. Seasonal changes in the nutrient concentrations of leaves and leaf litter in a young *Cryptomeria japonica* stand[J]. Scand J Forest Res, 2002, 17(6): 495-500.
- [11] 阎凯, 付登高, 何峰, 等. 滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(4): 353-361.
- [12] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种草本植物叶片与土壤的化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 659-665.
- [13] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C, N, P 化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.
- [14] 江肖洁, 胡艳玲, 韩建秋, 等. 增温对苔原土壤和典型植物叶片碳、氮、磷化学计量学特征的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 941-948.
- [15] 马鑫雨, 方斌, 常艳春, 等. 闽海湿地植物叶片和土壤 C, N, P 季节动态及其累积[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 136-143.

- [16] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 等. 密度对四季竹叶片 C、N、P 化学计量和养分重吸收特征的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 893-899.
- [17] 韩世忠, 郑雄, 马红亮, 等. 不同园林树种叶片 N·P·K 养分内吸收作用[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(25): 10319-10322.
- [18] 邓文鑫. 合肥常见针叶树种养分利用效率及氮磷化学计量的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 郑凤英, 彭少麟. 植物生理生态指标对大气 CO₂ 浓度倍增响应的整合分析[J]. 植物学报, 2001, 43(11): 1101-1109.
- [21] 王建林, 杨新民. 气孔导度和叶片内部导度制约 C₃ 和 C₄ 作物光合作用的比较分析[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(1): 129-132.
- [22] FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTRÖM C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing[J]. Remote Sens Environ, 1995, 51(1): 74-88.
- [23] KAYAHARA G J, CARTER R E, KLINKA K. Site index of western hemlock (*Tsuga heterophylla*) in relation to soil nutrient and foliar chemical measures[J]. Forest Ecol Manag, 1995, 74(1/2/3): 161-169.
- [24] WANG G G. White spruce site index in relation to soil, understory vegetation, and foliar nutrients[J]. Can J Forest Res, 1995, 25(1): 29-38.
- [25] 童根平, 王卫国, 张圆圆, 等. 大田条件下山核桃林地土壤和叶片养分变化规律[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(4): 516-521.
- [26] 项文化, 黄志宏, 闫文德, 等. 森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2365-2372.
- [27] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [28] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J]. 自然科学进展, 2006, 16(8): 965-973.
- [29] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [30] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. P Natl Acad Sci USA, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [31] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytol, 2005, 168(2): 377-385.
- [32] ÅGREN G I. The C: N: P stoichiometry of autotrophs—theory and observations[J]. Ecol Lett, 2004, 7(3): 185-191.
- [33] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 等. 浙江天童常绿阔叶林, 常绿针叶林与落叶阔叶林的 C:N:P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 48-57.
- [34] DIJKSTRA F A, PENDALL E, MORGAN J A, et al. Climate change alters stoichiometry of phosphorus and nitrogen in a semiarid grassland[J]. New Phytol, 2012, 196(3): 807-815.
- [35] GÜSEWELL S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. New Phytol, 2004, 164(2): 243-266.
- [36] HE J S, WANG L, FLYNN D F B, et al. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes[J]. Oecologia, 2008, 155(2): 301-310.
- [37] VON OHEIMB G, POWER S A, FALK K, et al. N: P ratio and the nature of nutrient limitation in Calluna-dominated heathlands[J]. Ecosystems, 2010, 13(2): 317-327.
- [38] TESSIER J T, RAYNAL D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. J Appl Ecol, 2003, 40(3): 523-534.
- [39] OLDE VENTERINK H, WASSEN M J, VERKROOST A W M, et al. Species richness-productivity patterns differ between N⁻, P⁻, and K⁻ limited wetlands [J]. Ecology, 2003, 84(8): 2191-2199.
- [40] 杨梦秋, 丁正亮, 徐小牛, 等. 安徽油茶不同品种光合生理生态特性的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(3): 448-452.