

外来种火炬树光合作用日变化与环境因子的关系

郭二辉¹, 胡 聃², 田 朝阳^{1*}

(1. 河南农业大学 生命科学学院, 河南 郑州 450002; 2. 中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 为了研究外来植物火炬树的光合、蒸腾生理特征及其与环境因子的关系, 应用 LI-6400 便携式光合测定仪, 于 2008 年 8—11 月对外来植物火炬树的光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、水分利用效率(WUE)的日变化特征, 及其与环境因子的关系进行了研究。结果表明, 火炬树的光合速率日变化在 8 月为双峰曲线, 有明显的光合午休现象, 在 9—11 月, 光合日变化曲线则为单峰曲线, 光合速率随季节的推移而逐渐降低; 不同月份, 影响火炬树 P_n 、 G_s 和 T_r 日变化的主要因子也有所不同; 8—11 月, 火炬树的 WUE 呈逐渐增高的趋势, 说明随着季节的变化, 火炬树的 T_r 比 P_n 下降的幅度更大, 以适应环境因子的变化。

关键词: 火炬树; 光合作用; 日变化; 环境因子

中图分类号: S68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-3268(2010)06-0109-06

Daily Dynamics of Photosynthesis of *Rhus typhina* and Their Relationships with Environmental Factors

GUO Er-hui¹, HU Dan², TIAN Chao-yang^{1*}

(1. College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Research Center for Eco-environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The leaf daily dynamics of photosynthesis rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomata conductance (G_s), water use efficiency (WUE) of exotic plant-*Rhus typhina* were determined using LI-6400 portable photosynthesis system from August to November in 2008 and their relationships of the physiological characteristics of photosynthesis and transpiration rate with environmental factors were analysed. The daily change of photosynthesis appeared double peaks in August with an obvious midday depression of photosynthesis, while from September to November, single peak. The P_n reduced gradually with the elapse of season. In different months, the main factors affected the daily changes of P_n , G_s and T_r varied. From August to November, the P_n of *Rhus typhina* decreased, for T_r , even more, while the WUE gradually increased. All of these changes make *Rhus typhina* adapt the changes of environment.

Key words: *Rhus typhina*; Photosynthetic; Daily dynamics; Environmental factors

光合作用是植物生长发育和生物界获得能量及食物的基础, 也是植物的一种重要生理过程。因此, 光合作用一直是植物生理学、植物生态学的重要研究领域^[1-3]。火炬树(*Rhus typhina*), 属于漆树科盐

肤木属落叶灌木或小乔木, 原产于北美, 现在欧洲、亚洲及大洋洲等许多国家都有栽培。火炬树最早于 1959 年由北京植物园作为观赏树种引入, 随后陆续推广至华北、西北、东北、华中和西南许多省区。火

收稿日期: 2009-12-24

作者简介: 郭二辉(1984-), 男, 河南洛阳人, 在读硕士研究生, 研究方向: 景观与植物生态学。E-mail: guoerhui@126.com

*通讯作者: 田朝阳(1963-), 男, 河南驻马店人, 副教授, 主要从事景观生态学与园林植物学研究。

炬树有繁殖能力强,耐寒、耐旱、耐盐碱能力强,适应性广等优点,其雌花序及果穗红似火炬,自夏至秋缀于枝顶,极为美丽;秋叶变红,十分鲜艳,是优良的园林观赏树木^[4,9]。目前,国内外的许多学者对火炬树已从苗木培育、发育解剖、形态结构、组织培养、入侵特性、生物量特征等方面进行了较多的研究,但有关火炬树的光合生理特征方面研究还较少^[6-12]。鉴此,研究了北京地区8—11月火炬树的光合速率、蒸腾速率和气孔导度的日变化特征及其与光照、CO₂浓度、气温、空气湿度等生境生态因子之间的相互关系,为促进对外来植物火炬树的适应性机制的了解,以及城市绿化树种的合理配置提供科学依据和参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地在中国农业科学院院内,地处北京市海淀区,位于北京市区西北部,地理位置北纬39°53′~40°09′,东经116°03′~116°23′;地处华北平原的北部边缘地带。气候属温带湿润季风气候区,冬季寒冷干燥,盛行西北风,夏季高温多雨,盛行东南风。

1.2 试验材料

于2008年4月中旬,选取生长良好、无病虫害、大小基本一致的3a生火炬树树苗,栽植于中国农业科学院院内的试验田中,行距和株距为1.2m左右,移栽后充分供水,以保证成活,待其正常生长后,常规管理。

1.3 植物光合气体交换参数的测定

于2008年8—11月,选择晴朗、无风的天气,采用美国LI-COR公司生产的LI-6400便携式光合测定仪从每天上午7:00开始测定,8:00—18:00间,每2h测定一次,选择健康植株3~5株,选取向阳面中上部生长方向基本一致的全展叶进行测定(每株取3~5片叶),待仪器稳定后,测定叶片的光合速率(P_n , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、蒸腾速率(Tr , $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、气孔导度(G_s , cm/s)、胞间CO₂浓度(C_i , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)、叶面水汽压亏缺(V_{pd} , kPa)、大气CO₂浓度(C_a , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)、光合有效辐射(PAR , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、相对空气湿度(RH , %)、大气温度(T_a , $^{\circ}\text{C}$)等光合指标,每片叶子记录3个值。另外计算水分利用效率(WUE , mmol/mol , $WUE = P_n/Tr$)、气孔限制值(L_s , %, $L_s = 1 - C_i/C_a$)。测定时使用开放气路,空气流速为0.5 L/min。

1.4 数据处理

试验数据采用Microsoft Excel软件绘图,用SPSS 12.0进行相关的统计分析。

2 结果与分析

2.1 火炬树生长的环境因子日变化规律

图1表明,8—11月,环境中的 PAR 的日变化均为单峰曲线。日出后, PAR 逐渐增大,在12:00左右达到全天的最大值,以后又逐渐减少,一天中的变化幅度很大,8—11月环境中的 PAR 呈逐渐下降趋势,各月份日均 PAR 的大小依次为8月($1457.14 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) > 9月($1285.71 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) > 10月($1207.14 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) > 11月($1044.29 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。8—11月, T_a 的日变化也为单峰曲线,日出后气温因太阳辐射而增加,到14:00左右达到最大,然后随太阳辐射的衰减而降低,8—11月环境中的 T_a 呈逐渐下降趋势,各月份日均 T_a 的大小依次为8月(34.10°C) > 9月(31.64°C) > 10月(24.02°C) > 11月(18.53°C)。 RH 在早晨最高,之后随着光合有效辐射和气温的升高而逐渐降低,8月、9月和11月的 RH 在14:00左右降到最低值,10月的 RH 最低值出现在12:00左右,而后又逐渐升高,各月份日均 RH 的大小依次为9月(40.10%) > 8月(25.98%) > 10月(19.44%) > 11月(14.98%)。 RH 与各月的气候因子如降水量等有较大的关系,各月份土壤的含水量依次为9月(17.42%) > 8月(13.58%) > 10月(11.56%) > 11月(10.15%)。 C_a 日变化起伏较小,早晨和晚上较高,各月份日均 C_a 的大小依次为9月($404.48 \mu\text{mol}/\text{mol}$) > 10月($391.28 \mu\text{mol}/\text{mol}$) > 11月($384.51 \mu\text{mol}/\text{mol}$) > 8月($378.78 \mu\text{mol}/\text{mol}$)。

2.2 火炬树 P_n 、 G_s 的日变化特征

随着 PAR 、 T_a 、 RH 、 C_a 等外界环境因子的日变化,火炬树的 P_n 、 G_s 也相应发生变化。图2表明,火炬树叶片的 P_n 的日变化在8月为双峰曲线,8:00左右 P_n 就达到了最大值($11.18 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),14:00左右有明显的光合午休现象,然后又有所回升。通常认为,午休现象是光照过强导致温度过高而使气孔关闭,这就限制了CO₂进入叶内,并影响光化学反应,从而对光合作用造成影响,使 P_n 显著降低^[13]。9月、10月和11月火炬树叶片的 P_n 日变化均为单峰曲线,全天的峰值分别出现在10:00($18.15 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、8:00($10.54 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)和10:00($7.20 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)左右。各月份 P_n 的日

平均值大小依次为 9 月 ($13.40\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) \gg 8 月 ($8.47\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) \gg 10 月 ($8.39\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) \gg 11 月 ($5.34\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)。

图 2 表明,火炬树叶片 G_s 的日变化在 8 月为双峰曲线,从早晨开始随着 PAR 和 T_a 的增加, G_s 逐渐增大,在上午 10:00 左右达到最大值,为 $0.12\text{cm}/\text{s}$,

14:00 左右有明显的降低,然后又有所回升。在 9 月、10 月和 11 月,火炬树叶片 G_s 日变化均为单峰曲线,全天的峰值分别出现在上午的 10:00 ($0.24\text{cm}/\text{s}$)、8:00 ($0.10\text{cm}/\text{s}$)和 10:00 左右 ($0.08\text{cm}/\text{s}$)。各月份 G_s 的日平均值大小依次为 9 月 ($0.16\text{cm}/\text{s}$) \gg 8 月 ($0.09\text{cm}/\text{s}$) \gg 10 月 ($0.08\text{cm}/\text{s}$) \gg 11 月 ($0.06\text{cm}/\text{s}$)。

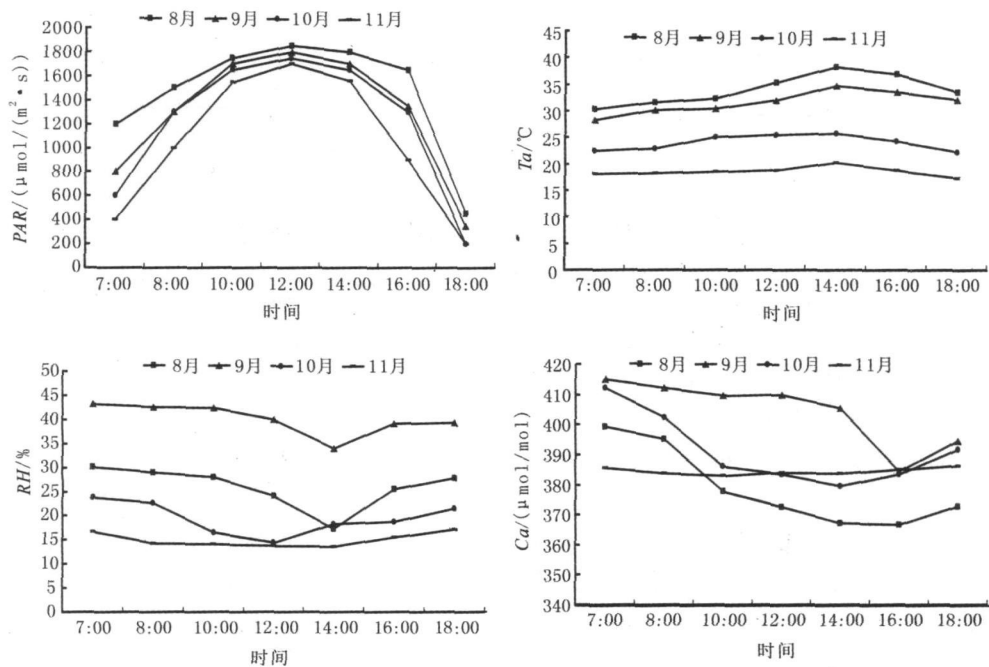


图 1 火炬树生长的环境因子日变化

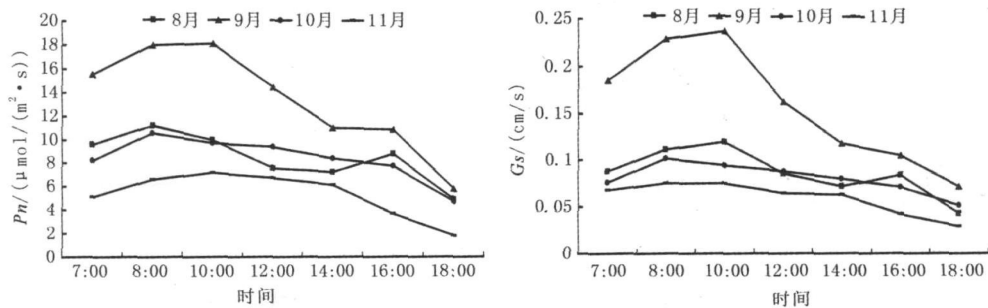


图 2 火炬树叶片光合速率、气孔导度日变化

2.3 火炬树 Tr 、 C_i 的日变化特征

图 3 表明,火炬树叶片 Tr 的日变化在 8 月、9 月和 10 月为单峰曲线,日变化规律较为相似。从早晨开始随着 PAR 和 T_a 的增加, Tr 逐渐增大,但各月份峰值出现的时刻和大小不同。8 月, Tr 的峰值出现在下午 14:00 左右,为 $4.33\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 9 月, Tr 的峰值出现在上午 10:00 左右,为 $4.44\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 10 月份, Tr 的峰值出现在上午 12:00 左右,为 $2.24\text{mmol}/$

($\text{m}^2\cdot\text{s})$; 而 11 月,火炬树叶片 Tr 分别在上午 10:00 和下午 14:00 左右,出现了 2 个峰值。由于植物的 Tr 受很多因素,特别是小气候因素的影响,因此在不同的月份,叶片 Tr 的日变化存在一定的差异。各月份 Tr 的日平均值大小依次为 9 月 ($3.51\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) \gg 8 月 ($3.43\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) \gg 10 月 ($1.75\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) \gg 11 月 ($0.99\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)。

图 3 表明,在 8—11 月,火炬树的 C_i 变化规律

也呈不同的变化趋势。各月份 C_i 的日平均值由大到小的顺序依次为: 9月 ($228.19 \mu\text{mol}/\text{mol}$) > 11月

($218.64 \mu\text{mol}/\text{mol}$) > 10月 ($199.75 \mu\text{mol}/\text{mol}$) > 8月 ($188.42 \mu\text{mol}/\text{mol}$)。

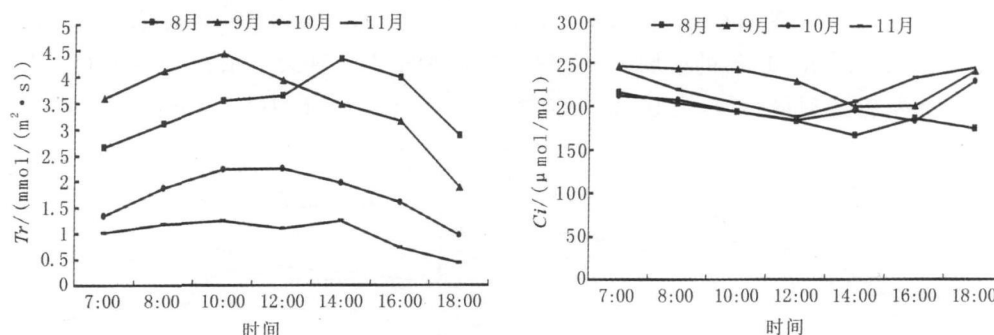


图3 火炬树叶片蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度日变化

2.4 火炬树 WUE 和 L_s 的日变化特征

WUE 是光合速率和蒸腾速率的比值, 即消耗单位质量的水, 植物所固定的 CO_2 量。 WUE 是衡量植物水分消耗与物质生产之间关系的重要综合性指标^[14, 15]。图4表明, 8—11月, WUE 变化规律也呈不同的变化趋势。8月和9月, WUE 日变化规律相似, 为双峰曲线。各月份 WUE 的日平均值由大到小的顺序依次为: 11月 ($5.25 \text{ mmol}/\text{mol}$) > 10月 ($4.90 \text{ mmol}/\text{mol}$) > 9月 ($3.74 \text{ mmol}/\text{mol}$) > 8月

($2.64 \text{ mmol}/\text{mol}$)。 L_s 反映了植物叶片对大气 CO_2 相对利用效率的大小。8—11月, L_s 日变化规律也有所不同。8月、9月和11月, 火炬树 L_s 的日变化规律均为单峰曲线, 但峰值的大小和出现时刻不同, 8月和9月的峰值均出现在14:00左右, 分别为0.55%和0.51%, 11月的峰值出现在12:00左右(0.51%)。各月份 L_s 的日平均值由大到小的顺序依次为: 8月 (0.50%) > 10月 (0.49%) > 9月 (0.44%) > 8月 (0.43%)。

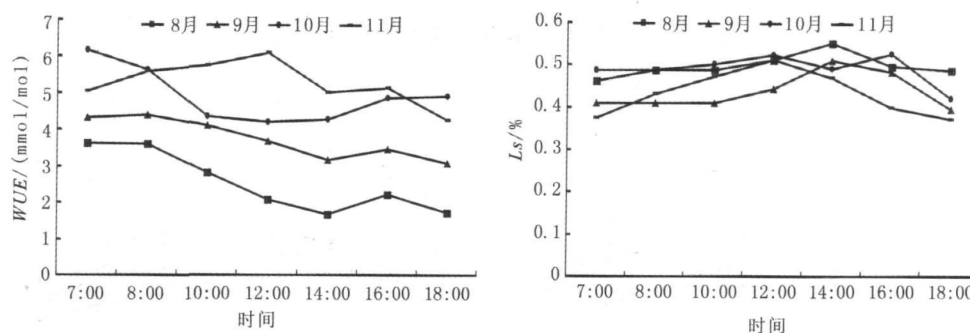


图4 火炬树水分利用效率和气孔限制值日变化

2.5 火炬树 P_n 、 Tr 、 G_s 与环境因子的相关性分析

植物的 P_n 、 Tr 和 G_s 不仅受环境因子的影响, 同时还受到植物内在的生理因子的影响。随着外界环境条件的变化, 影响植物 P_n 、 Tr 和 G_s 的主要因子也有所不同。表1表明, 8月火炬树的 P_n 与 G_s 呈极显著的正相关, 与 C_i 、 PAR 、 RH 呈正相关, 与 T_a 、 V_{pd} 呈负相关, 说明夏季的高温低湿是限制火炬树光合作用的主要因子; 9月火炬树的 P_n 与 Tr 、 G_s 呈极显著正相关; Tr 与 PAR 、 G_s 呈显

著的正相关; G_s 与 Tr 呈显著正相关, 与 V_{pd} 呈显著的负相关。10月火炬树的 P_n 与 G_s 呈极显著正相关, 与 PAR 、 Tr 呈显著正相关; Tr 与 PAR 呈极显著的正相关, 与 T_a 、 G_s 、 V_{pd} 呈显著的正相关; G_s 与 Tr 呈显著正相关。11月火炬树的 P_n 与 G_s 、 Tr 呈极显著正相关, 与 PAR 呈显著正相关; Tr 与 G_s 呈极显著的正相关, 与 RH 呈显著的负相关; G_s 与 Tr 有极显著的正相关关系。在8—11月, G_s 与 P_n 具有较强的相关性, 是制约火炬树 P_n 的主要因素。

表 1 火炬树的 P_n 、 Tr 、 G_s 与其影响因子的相关性

时间	项目	P_n	T_a	RH	G_s	C_i	Tr	V_{pd}
8 月	P_n	0.503	-0.488	0.398	0.923**	0.764*	0.687	-0.386
	Tr	0.710	0.888**	-0.856*	0.339	0.126	1	0.896**
	G_s	0.643	-0.413	0.298	1	0.602	0.339	-0.257
9 月	P_n	0.523	-0.610	0.613	0.977**	0.420	0.945**	-0.677
	Tr	0.769*	-0.343	0.352	0.873*	0.157	1	-0.414
	G_s	0.390	-0.697	0.727	1	0.564	0.873*	-0.772*
10 月	P_n	0.759*	0.396	-0.254	0.982**	-0.561	0.824*	0.302
	Tr	0.966**	0.815*	-0.735	0.821*	-0.775*	1	0.763*
	G_s	0.729	0.359	-0.243	1	-0.460	0.821*	0.264
11 月	P_n	0.804*	0.501	-0.833*	0.946**	-0.795*	0.975**	0.488
	Tr	0.753	0.598	-0.803*	0.948**	-0.714	1	0.531
	G_s	0.570	0.329	-0.630	1	-0.566	0.948**	0.241

注: *表示相关性达到显著水平($P<0.05$), **表示相关性达到极显著水平($P<0.01$)

3 结论与讨论

由于影响光合速率的环境因子(温度、光照、水分、 CO_2)在不同时期发生明显的变化,因此,光合速率也呈现出相应的变化规律。本试验结果表明,8月由于中午的温度、光照较高,蒸腾强,而相对湿度较低,叶片水分减少,火炬树的光合日变化出现了明显的光合午休现象,植物叶片 P_n 中午降低的自身因素主要有 2 个:即气孔因素和非气孔因素。根据 Farquhar 和 Sharkey 等^[16,17]的观点,只有当光合速率和胞间 CO_2 浓度变化方向相同,两者都减少,且气孔限制值增大,才可认为光合速率的下降主要由气孔导度引起的,据此可以判定,火炬树在 8 月出现光合午休现象的主要原因是气孔导度的下降;9—11 月,光合日变化曲线均为单峰曲线,光合速率随季节环境的变化和植物生长势的减弱而逐渐降低。9 月的 P_n 、 G_s 、 Tr 等高于 8 月的,与适宜的光照、温度和较高的土壤含水量有密切的关系。光合作用与蒸腾作用分别是 CO_2 和水汽分子通过气孔的扩散过程,因此,气孔在植物水分散失和 CO_2 气体交换过程中具有显著调控作用,气孔导度的变化对植物水分状况及 CO_2 同化有着重要影响,气孔导度增大,蒸腾快,反之蒸腾减弱。本试验结果表明,火炬树叶片 G_s 的日变化在 8 月为双峰曲线,在 9 月、10 月和 11 月则为单峰曲线,这与植物的生理特性和外界环境条件有关。

叶片的水分利用效率是光合速率和蒸腾速率的比值, WUE 的大小也可以反映植物对逆境适应能

力的强弱^[18]。本试验结果表明,8—11 月,火炬树的水分利用效率呈逐渐增高的趋势,说明随着季节的变化,火炬树的光合速率呈下降的趋势,但蒸腾速率降低的幅度更大,这可能是植物适应外界环境变化的一种方式。火炬树有许多良好的生物学特性,但又具有许多入侵种的特性,因而对于火炬树的大规模推广利用还存在较大的争议,在光合生理特征、资源利用效率及其克隆繁殖策略等方面还需进一步深入研究和分析。

参考文献:

[1] 冯强,胡聃,李娜,等.典型城区与郊区环境下大叶黄杨光合特性的比较[J].城市环境与城市生态,2008,21(2):13-16.

[2] 许大全,沈允钢.植物光合作用效率的日变化[J].植物生理学报,1997,23(4):410-416.

[3] 王孟本,李洪建,柴宝峰,等.树种蒸腾作用、光合作用和蒸腾效率的比较研究[J].植物生态学报,1999,23(5):401-410.

[4] 张明如,翟明普,贾黎明,等.火炬树克隆植株生长和生物量特征的研究[J].林业科学,2004,40(3):39-45.

[5] 马淑英,胡正海.火炬树分泌道的发育解剖学研究[J].西北植物学报,1997,17(5):112-117.

[6] Brigitte Frohlich, Ruth Niemetz, Georg G. Gross. Gallo-tannin biosynthesis: two new galloyltransferases from *Rhus typhina* leaves preferentially acylating hexa- and heptagalloylglucoses[J]. Planta, 2002, 216: 168-172.

(下转第 159 页)

- [8] 金玉娟, 刘自镭, 任建平. 芽孢杆菌和欧文氏菌的原生质体融合的研究[J]. 微生物学杂志, 2002, 22(3): 10-11.
- [9] 陈五岭, 张芳琳, 景建洲, 等. 灭活原生质体融合技术选育苏云金杆菌新菌种——原生质体融合条件的研究[J]. 西北大学学报, 1998, 28(2): 147-149, 184.
- [10] 黎永学, 张德纯, 李代昆. 双歧杆菌和酿酒酵母原生质体融合子筛选方法的探讨[J]. 食品科学, 2006, 27(2): 84-86.
- [11] 黄勤妮, 刘佳, 宋秀珍, 等. 大肠杆菌和枯草芽孢杆菌的原生质体融合[J]. 首都师范大学学报, 2002, 23(1): 55-59.
- [12] 王怡平, 英荣, 陈伟元, 等. 球形红假单胞菌和荚膜红假单胞菌的原生质体融合[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(2): 297-302.
- [13] Chenw, Ohmiyak, Shimizu S. Intergeneric protoplast fusion between *Fusobacterium varium* and *Enterococcus faecium* for enhancing dehydrodivanillin degradation[J]. Appl Environ Microbiol, 1987, 53(3): 542-548.
- [14] 蒋文泓, 黄青云. 禽多杀性巴氏杆菌与大肠杆菌科间原生质体融合的研究[J]. 畜牧兽医学报, 1999, 30(3): 267-272.
- [15] 石海波, 雷虹, 张铁丹, 等. 通过抗药性筛选产生广谱高效肽类天然防腐剂的融合菌株[J]. 中国食品添加剂, 2006(4): 82-85.
- [16] 王成涛, 牛天贵, 岳晓禹, 等. 应用原生质体融合技术构建高效降解胆固醇的乳酸菌[J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(3): 1-5.
- [17] 张莉滢, 张德纯. 双歧杆菌与乳杆菌原生质体的融合及筛选[J]. 生物技术, 2003, 13(4): 14-15.
- [18] 吕兵, 项建琳. 应用原生质体融合技术改善双歧杆菌的耐氧性[J]. 食品科学, 2005, 26(4): 83-86.
- [19] 金玉娟, 刘自镭, 任建平. 芽孢杆菌和欧文氏菌的原生质体融合的研究[J]. 微生物学杂志, 2002, 22(3): 10-11.
- [20] 韦革宏, 陈文新. 豌豆根瘤菌与新疆中华银瘤菌原生质体的属间融合研究[J]. 生物工程学报, 2001, 17(5): 534-538.
- [21] 张广志, 杨合同, 李纪顺, 等. 褐球固氮菌和荧光假单胞菌原生质体制备条件的研究[J]. 山东科学, 2006, 9(6): 15-18.
- [22] 许燕滨, 江霞. 高效含氯有机化合物降解工程菌的构建研究[J]. 重庆环境科学, 2001, 23(2): 46-48, 51.
- [23] 周德明. 原生质体融合构建高效降解工程菌的研究[J]. 中南林学院学报, 2001, 21(2): 42-46.
- [24] 程树培, 邓良伟. 光合细菌与酵母原生质体融合子连续发酵豆制品废水研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(3): 372-377.
- [25] 裴娟萍, 周宁一. 以原生质体融合技术构建广谱抗噬菌体菌株[J]. 中国病毒学, 1995, 10(4): 362-366.
- [26] 肖在勤, 周俊初. 金针菇与凤尾菇科间原生质体融合研究[J]. 食用菌学报, 1998, 5(1): 6-12.

(上接第 113 页)

- [7] Wayne C Zipperer. Species composition and structure of regenerated and remnant forest patches within an urban landscape[J]. Urban Ecosystems, 2002, 6: 271-290.
- [8] 毛学文, 施文甫, 王弋博. 火炬树腺毛的形态结构和发育的研究[J]. 西北植物学报, 1997, 17(6): 137-139.
- [9] 喻晓丽, 邸雪颖, 宋丽萍. 水分胁迫对火炬树幼苗生长和生理特性的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(11): 57-61.
- [10] 张川红, 郑勇奇, 李继磊, 等. 北京地区火炬树的萌芽繁殖扩散[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 978-985.
- [11] 刘全儒, 于明, 周云龙. 北京地区外来入侵植物的初步研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2002, 38(3): 399-404.
- [12] 段新玲, 任东岁, 赵树珍. 火炬树的组织培养及植株再生[J]. 植物生理学通讯, 2000, 36(6): 535.
- [13] 刘玉华, 史纪安, 贾志宽, 等. 旱作条件下紫花苜蓿光合蒸腾日变化与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1811-1814.
- [14] 朱教君, 康宏樟, 李智辉, 等. 水分胁迫对不同年龄沙地樟子松幼苗存活与光合特性影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2527-2532.
- [15] 郭卫华, 李波, 黄永梅, 等. 不同程度的水分胁迫对中间锦鸡儿幼苗气体交换特征的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2716-2722.
- [16] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomata conductance and photosynthesis[J]. Ann Rev Physiol, 1982, 33: 317-345.
- [17] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241-244.
- [18] 刘金祥, 麦嘉玲. CO₂ 浓度增强对沿阶草光合特性的影响[J]. 中国草地, 2004, 26(3): 13-18.