

岩溶石漠化治理优良先锋植物种类光合、蒸腾及水分利用效率的初步研究

黄玉清^{1,3}, 王晓英¹, 陆树华¹, 汪青^{1,2}, 赵平³

(1. 广西壮族自治区广西植物研究所, 广西桂林 541006; 2. 广西师范大学生命科学院, 广西桂林 541004; 3. 中国科学院华南植物园, 广东广州 510650)

摘要: 针对西南岩溶石漠化地区干旱缺水的特点, 采用 Li-6400 对其先锋树种任豆、金银花、狗骨木的光合、蒸腾及水分利用效率等特征进行分析, 以揭示先锋树种利用水分生理生态学特征, 从而提出植被恢复的对策。光响应模拟结果表明金银花和狗骨木符合 Walker 的非直线双曲线模型。蒸腾临界值狗骨木(幼树期)最小, 金银花次之, 任豆树较大, 说明阳性树种任豆具有较大的蒸腾拉力, 能够从土壤提取更多的水分, 以减少岩溶石漠化地区强光引起的高温灼伤。任豆树、金银花、狗骨木具有同地带干性或沙漠优势植物的光合速率特征。任豆树有较耐受强光的能力, 这与其在石漠化地区总是能够成为优势层片优势种的地位相符。三种植物光有效辐射与叶片蒸腾呈极显著的线性关系; 任豆树的蒸腾作用受气孔调节明显; 狗骨木有较高的水分利用效率。上午 9 点左右和下午 5:00~6:00 是这些石漠化地区植物水分利用最高时间段。可以说这三种植物具有适应石漠化地区干旱和高温的生理生态学适应特征和避旱避高温策略, 并保持旺盛的生物生产力。从植物固定碳水化合物效率并提高水分利用效率而言, 三种植物套种, 任豆树能够对藤灌植物适当遮荫, 对加速狗骨木生长, 提高金银花的产量将具有较好的效益。

关键词: 石漠化地区; 先锋植物; 光合蒸腾作用; 水分利用效率

中图分类号: Q945.79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2006)02-0171-07

Studies of photosynthesis, transpiration and water use efficiency of some dominant species in rocky desert area, Guangxi, China

HUANG Yu-qing^{1,3}, WANG Xiao-ying¹, LU Shu-hua¹,
WANG Qing^{1,2}, ZHAO Ping³

(1. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuangzu Autonomous Region and Academia Sinica, Guilin 541006, China;
2. Guangxi Normal University, Guilin 541004, China; 3. South China Botanical Garden, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Water issue is considered as a key problem existing in karst "rocky desert" area, which is an impact to restoration of the ecosystem. This paper is to analyze the photosynthesis, transpiration and water use efficiency (WUE) of pioneer species, which thereby indicate the water physiological ecology of the species, thereafter to propose a measurement of the vegetation restoration. The result show that the parameter of light curve is given up to Walker' Nonlinear-Hyperbolic Model of all 3 species; critical transpiration of *Cornus controversa* is the

收稿日期: 2005-08-05 修回日期: 2006-01-29

基金项目: 广西科技攻关项目(桂科攻 0322021); 中科院西部之光人才培养项目(2005); 广西自然科学基金(桂科回 0575009) [Supported by the Key Project of Science & Technology of Guangxi(0322021); Western Program for Fostering Personal Ability, CAS(2005); Provincial Natural Science Foundation of Guangxi(0575009)].

作者简介: 黄玉清(1967-), 女, 广西平果人, 副研究员, 博士生, 研究重点为喀斯特地区生态环境的恢复生态学和植物生理生态学。

lowest comparing to the other 2, while *Zenia insignis* is respectively the highest, consequently it is possible that *Z. insignis* process a higher evaporation potential, resulting in uptake more water from the soil in unit, thereby reduce the potential damage by sunburn. *Z. insignis* and *Lonicera maackii* and *C. controversa* are similar to the number of the subtropical dry forest and subtropical desert dominant species. *C. controversa* is much light-tolerance species that the other two, thereto signify the phenomena that it is growing better and is a pioneer dominant in Karst "rocky desert" area. The result also show a significant linear relationship between leaf transpiration and radiation of the 3 species. *Z. insignis* tends to be regulated by leaf stoma, but other two are not. The light saturated for WUE of *cornus controversa* is higher, which light level generally is the time around 9:00 AM, or 5:00~6:00 PM, showing the high WUE period of a day. Therefore it can be concluded that these 3 species can process a physiocological drought and thermal adaptation and develop a strategy to escape environmental stress. Considering efficiency of photosynthesis and WUE, these three species intercropping would outcome that *Z. insignis* can properly shade the other two species therefore reduce the summer radiation damage to the young *C. controversa* and *L. maackii* that may advance the grow of the young and increase the yield of *L. maackii* as an economic species.

Key words: rocky desert area; dominant species; photosynthesis and transpiration rate; water use efficiency

岩溶地区因其富 Ca 的岩、水、气循环系统,以及“土在楼上,水在楼下”的双层结构,造成其土壤贫瘠,保水能力差,植被生长环境相对干旱,并富含钙质。因此,岩溶地区发育的植被主要为喜钙、耐旱、石生的物种及种群,并且每一种植被类型都是长期历史发展的结果。目前,西南岩溶区主要植被覆盖类型有:次生裸地(石山)、草丛(草甸)、灌草丛及灌丛、乔木林等。每一种植被覆盖类型在人为因素作用和自然因素的影响下都会发生演替,都有继续顺向和逆向发展的趋势(姚长宏等,2001)。岩溶环境被视为与沙漠边缘一样的脆弱生态环境。种种因素制约了生态环境向有利的方向发展。在我国南方广大岩溶区,尽管降雨丰沛,但缺乏植被系统的调节,加之岩溶水分分布的不均匀性,以及蒸发量较大。因此,干旱问题十分突出。岩溶区石漠化现象正是水、土、植被三者不协调时产生的(何师意等,2001)。石漠化导致喀斯特土、水环境要素缺损,环境与生态之间的物质能量受阻,植物生境严酷(王世杰,2003)。

中国西南岩溶山区,面积达 50 多万 km^2 ,包括贵州大部分地区、广西、云南、四川、重庆、湖北、湖南等省的部分地区,是全球三大岩溶集中连片区中面积最大、岩溶发育最强烈的典型生态脆弱区(袁道先,1988)。据遥感调查,目前贵州省喀斯特石漠化面积已达 5 万 km^2 ,广西 4.7 万 km^2 ,并且以 $2\,500\,\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度在不断扩展,其扩张速度并不比中国北方沙漠化慢。喀斯特石漠化不仅破坏生态环境,使土地生产力衰减,而且严重影响农、林、牧业生产,甚至危及到人类生存,因此喀斯特石漠化已经成为制约中国

西南地区可持续发展最严重的生态地质环境问题(王世杰,2003)。开展岩溶地区退化生态系统恢复是目前生态学研究的前沿热点。退化岩溶生态系统植被恢复的最主要手段是构建各种具有生物多样性、高功能、抗逆性强、稳定的岩溶森林生态系统类型,首要任务是选择合适的建群植物种类,以保证系统能迅速地朝良性方向发展,对被筛选植物的生理生态特性的研究能为这方面工作提供可靠的科学依据(赵平,2003)。

很多研究认为森林演替早期树种往往光合能力强,叶片较厚,叶片的形态和生理可塑性较大,而演替后期树种则与之相反(David 等,1996; Scholes 等,1997; Kitao 等,2000)。演替早期树种不仅光合能力强,而且在强光下能进一步提高光合能力,利用更多的光能(Scholes 等,1997; Kitao 等,2000);同时增加热耗散,消耗掉过剩光能,防止光破坏(齐欣等,2004; David 等,1996; Scholes 等,1997; Kitao 等,2000)。因此在岩溶区进行人工诱导植被恢复时,评价被选用植物种类的光合、蒸腾等生理生态特性,了解和明确它们的生态适应性,为岩溶退化生态系统植被恢复过程中生产力、森林群落的蒸散及生态系统水量平衡研究,生产实践等提供理论依据。

1 研究地区与方法

1.1 试验区概况

试验区设在国家“十五”攻关计划项目示范区——广西平果县果化镇布尧村龙何屯,地处 $107^{\circ}23'$

E, 23°23' N, 属于典型的岩溶峰丛洼地地貌。峰丛洼地由众多高低错落的联座尖峭(锥状)山峰与其间形态各异的多边形封闭洼地(当地村民称“弄”)组成, 全屯共有 35 个弄。峰丛洼地底部标高 300~400 m 不等, 石峰高度可达 550 m。与示范区相距不远的右江河谷标高只有 100 m。示范区地层主要为 P_{1q} 和 P_{1m} , 局部地区出露有 P_2 和 T_2 , 岩石主要为纯石灰岩和硅质灰岩。该点生态环境的突出特点是: 岩石裸露、石漠化严重, 生态环境脆弱。由岩石风化形成的土层很薄, 峰丛洼地地区土壤稀少, 岩石裸露, 加之人对土地资源的不合理利用, 石漠化趋势明显。植被覆盖率和森林覆盖率很低, 植被覆盖率不足 10%, 主要为刺灌丛群落。森林覆盖率不足 1%。2001 年始, 在示范区内试验选择了几十种具有本土性的优良阔叶植物种类进行植被恢复造林。

1.2 供试植物材料与测定方法

选择造林成活率高、长势良好的常绿阔叶树种狗骨木(*Cornus controversa*)、落叶乔木树种任豆树(*Zenia insignis*)、藤本植物金银花(*Lonicera maackii*)进行研究, 这些植物均为原生于岩溶地区的阳性树种, 根系发达, 能在几乎不见土的石缝中生长旺盛。狗骨木为造林后第二年, 任豆树为造林后 4 a, 高 4 m, 金银花为种植第四年已开花。

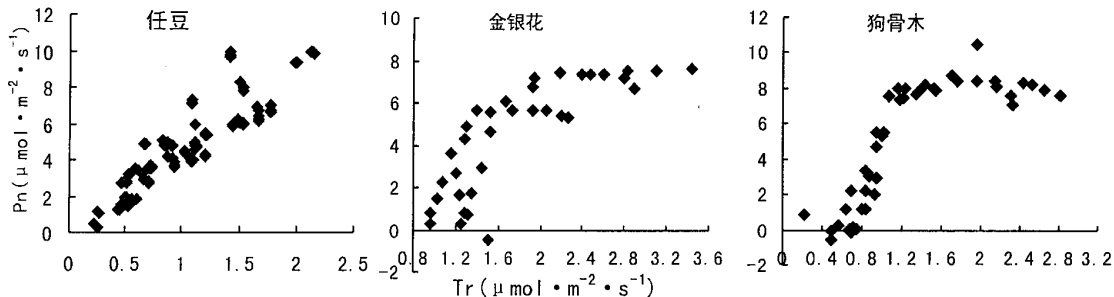


图 1 任豆、狗骨木、金银花的光合特征 P_n 与蒸腾 T_r 的关系

Fig. 1 The correlation between photosynthesis and transpiration of *Z. insignis*, *C. controversa* and *L. maackii*

2 结果与分析

2.1 叶片光合与蒸腾作用

叶片光合作用与蒸腾作用是两个同时进行的气体交换过程。气孔作为气体交换的门户, 调节和控制光合与蒸腾。光合与蒸腾决定叶片水平上的水分利用效率。在干旱缺水地区, 植物能够协调两者间的关系, 有些植物能以最少的水分消耗获得最大的光合生产, 发展个体和扩大种群。从图 1 看出, 金银

花和狗骨木, 在光水平较低时, 光合速率随蒸腾速率呈线性关系, 然后缓慢增加, 而增加到一定程度后, 光合速率不再随蒸腾增加。而任豆树, 由于观测时段内为阴天, 光辐射较小, 所以在这样低辐射范围内光合与蒸腾几乎呈线性关系。

用美国产 Li-6400 便携式光合测定系统测定每株相同叶位叶片(刚成熟、长势健康)的净光合速率(P_n)、气温(T_a)、叶温(T_l)、胞间 CO_2 浓度(C_i)气孔导度($Cond$)、蒸腾速率(Tr)、相对湿度(RH)、大气 CO_2 浓度(C_a)光合有效辐射(Par)等, 重复 4 次。测定中用 Li-6400-02B 红蓝光光源提供不同的光合有效辐射强度。于 5 月中下旬无雨天气对当年发育成熟的叶片测定。保持自然条件下的温度和湿度, 利用系统红蓝光源设置 2 200、1 800、1 500、1 200、800、500、300、150、75、50、30、10、5 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 光合有效辐射。同时进行自然状态下光合日变化测定, 从早上 8:00 到晚上 18:00, 每间隔 2 h 测定 1 次。测定以上参数并计算水分利用效率($WUE = P_n / Tr$)。仪器标定好进入工作状态后, 自动记录测定数据。所记录的数据导入计算机后, 用 Excel 读取, 用 SPSS 软件进行数据分析、曲线拟合和模型建立。

光曲线理论模型采用非直线双曲线模型(Walker, 1989; Takahiro 等, 2002)。

$$A = \frac{\Phi \cdot Q + A_{\max} \sqrt{\{(\Phi \cdot Q + A_{\max})^2 - 4k \cdot \Phi \cdot Q \cdot A_{\max}\}}}{2k} - R_{\text{day}}$$

A: 净光合速率, Q: 光有效辐射, Φ : 表观量子效率, $A_{\max}$: 最大光合速率, k: 曲角, R_{day} : 光下呼吸速率。

花和狗骨木, 在光水平较低时, 光合速率随蒸腾速率呈线性关系, 然后缓慢增加, 而增加到一定程度后, 光合速率不再随蒸腾增加。而任豆树, 由于观测时段内为阴天, 光辐射较小, 所以在这样低辐射范围内光合与蒸腾几乎呈线性关系。

光合速率与蒸腾速率的非线性关系可从光合、蒸腾与光合有效辐射的关系中得到进一步证实。任豆树在光合有效辐射小于 400 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 、金银花和狗骨木小于 300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 时, 光合和蒸腾速率均呈线性增长, 以后光合缓慢增长并趋于

稳定,而蒸腾依然线性增加。超出此临界值的蒸腾即为奢侈蒸腾(王会肖等,2003)。从图 1 看出,这金银花和狗骨木的蒸腾临界值均比较低,分别为 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,与土山生长迅速的大叶相思和多花相思(约为 $3.5 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)相比(朱剑云等,2001)低得多,而任豆树的蒸腾临界值 $> 2.0 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,显然乔木值大于灌藤值。在石漠化地区生长良好的任豆具有十分

发达的根系,所以利用土壤水分能力较强。而狗骨木和金银花根系尚浅,特别是狗骨木,其小幼树利用水分的能力远不如任豆,也比金银花稍逊。

气孔是 CO_2 和水汽交换的通道,其行为同时控制叶片的光合与蒸腾。因此不应孤立地考虑气孔对光合或蒸腾作用的影响,而应将两者联系起来。Cowan(1977)提出气孔调节的最优化理论,认为在可蒸腾水量一定时,通过气孔开度的调节,尽可能实

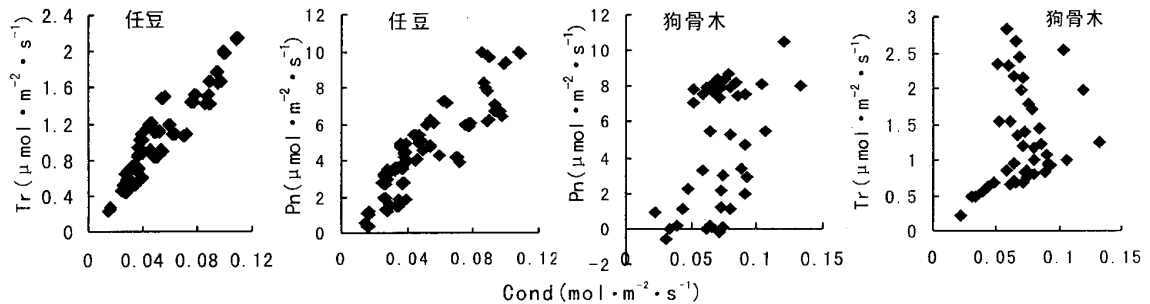


图 2 任豆树、狗骨木气孔导度 Cond 与净光合速率 Pn、蒸腾速率 Tr 关系
Fig. 2 The correlation between stomata conductance and photosynthesis and transpiration of *Z. insignis* and *C. controversa*

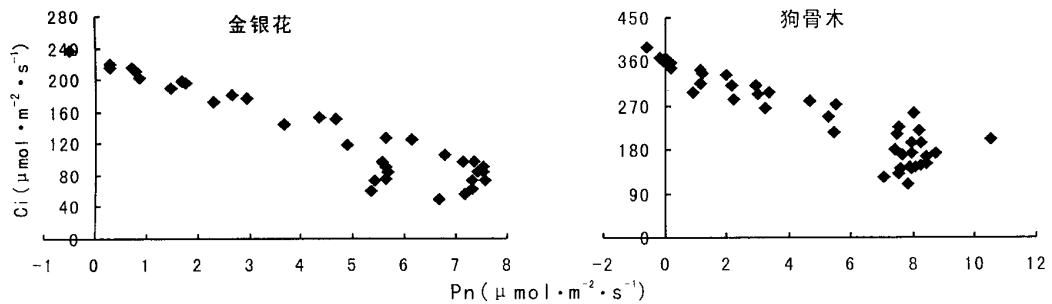


图 3 金银花与狗骨木叶片胞间 CO_2 浓度与净光合速率 Pn 的关系

Fig. 3 The correlation between intercellular CO_2 concentration and photosynthesis of *C. controversa* and *L. maackii*

现对水分的利用,这是一种适应水分亏缺的机制,而植物所有适应机制都是长期生存于逆境中的结果。图 2 表明任豆树的光合、蒸腾与气孔导度的关系均呈直线上升趋势,其中相关系数 r 分别为 0.875 和 0.943,均为显著相关。在本实验中任豆的光强 $< 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,所以光合、蒸腾与气孔导度的关系均呈极显著相关。但狗骨木采用的中内源光,设置最大光强达 $2\,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,因此总体上这种线性相关关系并不明显,但气孔导度 $< 0.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,与蒸腾速率呈线性关系,而后蒸腾急剧增大,而气孔导度增加变化不大,这与光合与气孔效应基本一致。在石漠化地区,即使是 5 月份湿润季节,地表也因为岩溶渗漏等原因常常十分干旱,而对大气降水依赖很大,而这时白天气温通常在 30°C 以上。在这种环境条件下,任豆树主要通过气

孔调节蒸腾速率,同时又能保持较高的光合速率,说明其对此种恶劣环境具有较好的适应性。

分析金银花与狗骨木两种植物光合速率与胞间 CO_2 浓度的关系表明,两种植物光合速率随胞间 CO_2 浓度上升而下降(图 3)。许大全(1997)认为胞间 CO_2 分压降低是判定光合作用受气孔限制的不可缺少的条件,Ci 的增加则是光合作用非气孔限制的最可靠的判断。当投射到叶片表面的光强逐步降低时,光合速率和气孔导度也随着逐渐降低,与此同时,胞间 CO_2 分压却逐渐增高,这种情况下光合速率的降低不是由于气孔导度降低引起 CO_2 供应不足,即不是由于气孔限制,而是由于降低引起的 ATP 和 NADPH 供应不足,即同化力不足限制了光合碳同化。由此判断任豆树的光合蒸腾受对气孔调节,而金银花和狗骨木的气孔对光合和蒸腾不是主

要调节作用,而可能是其他原因如 ATP 和 NADPH 供应不足,即同化力不足限制了光合碳同化。

2.2 光合有效辐射对植物生理过程的影响

2.2.1 叶片光合与光合有效辐射 植物光合作用是植物体叶绿素利用太阳辐射能,将 CO₂ 和水合成为碳水化合物,同时将辐射能转化为化学能贮存于光合产物的过程。太阳辐射特别是其中的光合有效辐射决定植物叶片的光合速率。三种植物光有效辐射与光合速率关系如图 4,三者的光合曲线拟合模型为:

任豆树:

$$A=\frac{0.03\times Q+18.09-\sqrt{\{(0.03\times Q+18.09)^2-4\times 0.1\times 0.03\times Q\times 18.09\}}}{2\times 0.1}-1.02$$

$r^2=0.64$

金银花:

$$A=\frac{0.10\times Q+8.12-\sqrt{\{(0.10\times Q+8.12)^2-4\times 0.10\times 0.10\times Q\times 8.12\}}}{2\times 0.10}-1.00$$

$r^2=0.93$

狗骨木:

$$A=\frac{0.06\times Q+9.53-\sqrt{\{(0.06\times Q+9.53)^2-4\times 0.83\times 0.06\times Q\times 9.53\}}}{2\times 0.80}-1.00$$

$r^2=0.97$

乔木任豆树最大净光合速率达 18.09 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

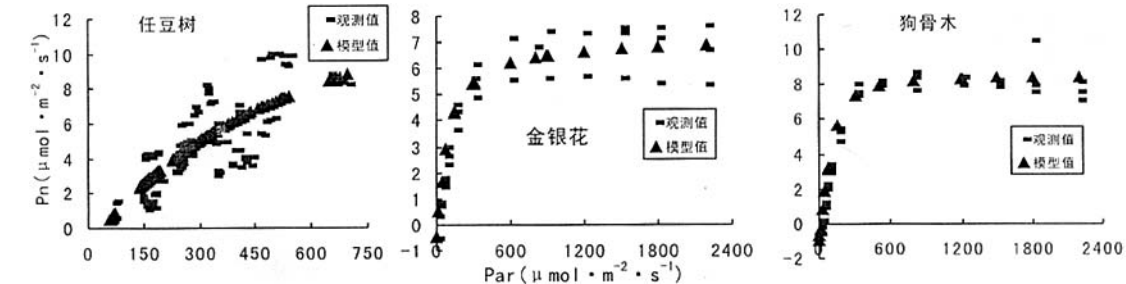


图 4 任豆、狗骨木、金银花的净光合速率 Pn 与光有效辐射 Par 的关系
Fig. 4 The correlation between photosynthesis and quantum of *Z. insignis*, *C. controversa* and *L. maackii*

也具有较高的光饱和点,说明其对环境的适应性也比较好。而属于小幼树期的狗骨木,则需要较小强度的光,说明小苗小树时期,这种植物需要一定的遮荫。

2.3.2 叶片蒸腾与有效辐射 植物叶片蒸腾是发生于叶片表面的水汽蒸发过程,需要来自太阳辐射能是驱动(朱剑云等,2001),光合有效辐射与叶片蒸腾存在较为密切关系,本试验中,通过线性回归和 ANOVA 方差分析,两者的相关系数金银花 $r=0.919$, $\text{Sig.}=0.000<0.001$,狗骨木 $r=0.945$, $\text{Sig.}=0.000<0.001$,任豆树 $r=0.717$, $\text{Sig.}=0.000<0.001$,均为极显著水平;三种植物的光有效辐射与叶片蒸腾的线性关系分别为:金银花 $\text{Tr}=1.212+0.01\text{Par}$,狗骨木 $\text{Tr}=0.767+0.01\text{Par}$,任豆树 Tr

$\text{Tr}=0.204+0.03\text{Par}$ (图 5)。很显然,光强是加速植物蒸腾的主要原因之一,在岩溶石漠化地区有效光辐射较大,温度也因此比较高,植物通过自身的蒸腾调节作用,以降低组织温度,使其免受灼伤。节水植物的研究中一大主攻方向是调控植物蒸腾。在石漠化地区开展人工诱导促进植被恢复时,在栽培植物过程中,要考虑能从光合有效辐射入手实施不同种类植物配备措施,如任豆树与狗骨木相伴,既可大大降低蒸腾又可改善光合,节水增效不言而喻。

2.3.3 水分利用效率与有效辐射 通过测定 WUE,能够阐明树木的气体交换特性以及抗旱性机理,从而选择出低耗水、生产效率高、抗性强的树种;也可以通过对现有森林植被水分利用效率与生长结构的系统

在南方石漠化地区,由于岩石裸露,地面对太阳光的反射较大,因此该区的总的光有效辐射比有林地区较大。任豆树具有较高的光饱和点,同时有较高的最大光合速率,说明对这种阳性环境具有很好的适应性。金银花是藤本植物,常常攀沿在岩石上,

研究,筛选出结构合理、节水性强生产力高的岩溶人工植被结构类型。由于自然界光强是随着时间变化的,通过测定水分利用效率与光响应特征,了解植物不同时段需水状态,在指导生产方面极具重要意义。

在夏季水分光照充足、植物生长旺盛期,任豆树采用外光源,金银花采用内置光源,三种植物的WEU-Par 响应曲线如图 6,可以看出,任豆树、金银

花、狗骨木的水分效率光饱点约为 $300\sim400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光强 $>400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 植物的水分利用效率呈下降趋势。后两种植物尤其明显。只此在石漠化地区,夏季午间太阳有效辐射一般都超过此值,引起植物过度无效耗水,这可能是岩溶地区土壤表层极易干旱的一个原因之一。同时金银花和幼苗幼树期的狗骨木适当遮荫有利于提高水分利用效率。

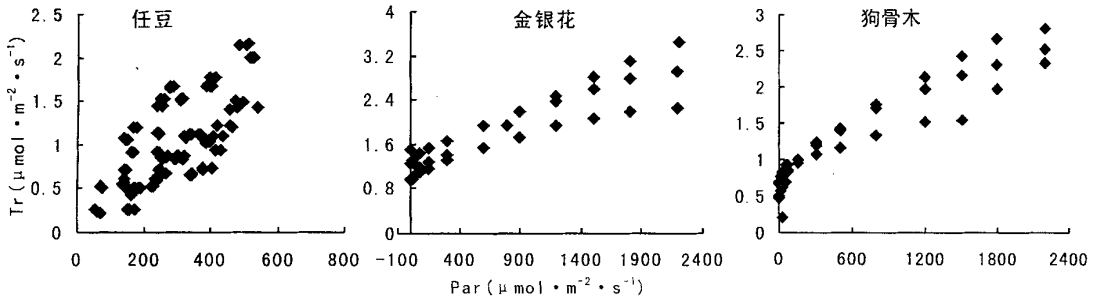


图 5 任豆、金银花、狗骨木蒸腾速率 Tr 与光有效辐射 Par 关系

Fig. 5 The correlation between transpiration and quantum of *Z. insignis*, *C. controversa* and *L. maackii*

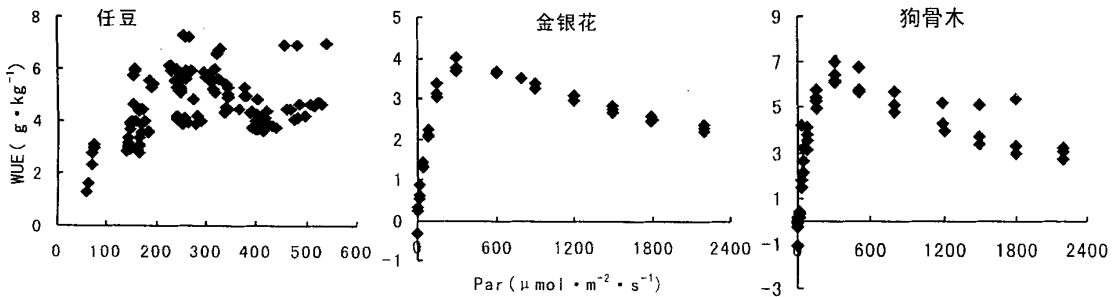


图 6 任豆、金银花、狗骨木光有效辐射 Par 与水分利用效率 WUE 关系

Fig. 6 The correlation between quantum and WUE of *Z. insignis*, *C. controversa* and *L. maackii*

3 结果讨论

本文分析了石漠化地区的先锋植物种类任豆、金银花、狗骨木的光合、蒸腾及水分利用效率等特征。通过光响应模拟,金银花和狗骨木均符合 Walker 的非直线双曲模型。蒸腾临界值狗骨木(幼苗幼树期)最小,金银花次之,任豆树较大,说明乔木树种具有较大的蒸腾拉力,在岩溶干旱区具有较好的水分利用能力。乔木任豆树最大净光合速率达 $18.09\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,远远比亚热带雨林的 $9.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (蒋高明,2004)大,说明在生境如此恶劣的岩溶区仍具有很好的适应性。藤本植物金银花的最大光合速率为相对较小,为 $8.12\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,新种(第二年)幼树狗骨木的最大净光合速率为也只有 $9.53\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,与亚热带荒漠植物

群落优势植物最大光合速率的 $9.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 相当。任豆树的光饱和点较高约为 $870\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,而狗骨木幼苗幼树和金银花分别约为 350 和 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,说明任豆树有较耐受强光的能力,从而也能够忍耐高温。这与其在石漠化地区总是能够成为优势层片优势种的地位相符。三种植物光有效辐射与叶片蒸腾的呈极显著的线性关系,任豆树的斜率较其他两种植物大,说明任豆树随光有效辐射的上升蒸腾增加较快,通过气孔调节,任豆从土壤中吸收更多的水分用于蒸腾,以减少环境高温不利因素等可能造成的伤害。从最大水分利用效率而言,狗骨木的较高,说明狗骨木同化形成有机物质所消耗的水分最少,节水替力最大。三种研究植物的水分利用效率光饱和点较低,仅为 $300\sim400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,这常常是上午 9 点左右和下午 5:00~6:00 时段光有效辐射,因此上午和下午的这些

时段是这些石漠化地区植物水分利用最高时间段。

从植物解剖学方面任豆树具有明显的抗旱结构(作者等另文),在岩溶区任豆树和狗骨木以及金银花都具有发达的根系,它们可分布在石缝中,即使地表十分干旱(含水量 $<10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),在蒸腾拉力的驱动下,其根系仍然能够从其所在的石缝里吸收水分,充分利用深层次的水资源,保证旺盛的光合作用,同时免受强高引起的高温灼伤;任豆树能够通过气孔调节,适应短时的水分不足。由此可见,这几种植物通过自身调节也有避旱避光策略,具有适应岩溶区高温干旱的生理生态学特征。在植物固定碳水化合物效率并提高水分利用效率而言,将三种植物套种,任豆树能够对藤灌植物适当遮荫,对加速狗骨木生长,提高金银花的产量将具有较好的效益。

参考文献:

王世杰. 2003. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 22(2): 120—126.
王会肖, 刘昌明. 2003. 作物光合、蒸腾与水分高效利用的试验研究[J]. 应用生态学报, 14(10): 1 632—1 636.
齐 欣, 曹坤芳, 冯玉龙. 2004. 热带雨林蒲桃属 3 个树种的幼苗光合作用对生长光强的适应[J]. 植物生态学报, 28(1): 31—38.
朱剑云, 叶永昌, 刘颂颂, 等. 2001. 从澳大利亚引进的两种相思植物光合速率和蒸腾效率的初步研究[J]. 广东林业科技, 17(3): 28—32.

许大全. 1997. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 33(4): 241—244.
何师意, 冉景丞, 袁道先, 等. 2001. 不同岩溶环境系统的水文和生态效应研究[J]. 地球学报, 22(3): 265—270.
赵 平. 2003. 退化生态系统植被恢复的生理生态学研究进展[J]. 应用生态学报, 14(11): 2 031—2 036.
姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 2001. 西南岩溶地区植被喀斯特效应[J]. 地球学报, 22(2): 159—164.
袁道先. 1988. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社.
蒋高明. 2004. 植物生理生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 58.
Cowan IR. 1977. Stomata behavior and environment[J]. *Adv Bot Res*, 4: 117—228.
David WL, Baskaran K, Mansor M, et al. 1996. Irradiance and spectral quality affect Asian tropical rain forest tree seedling development[J]. *Ecology*, 77: 568—80.
Kitao M, Lei TT, Koike T, et al. 2000. Susceptibility to photoinhibition of three deciduous broadleaf tree species with different successional traits raised under various light regimes[J]. *Plant Cell and Environment*, 27: 265—272.
Scholes JD, Press MC, Zipperlen SW. 1997. Differences in light energy utilization and dissipation between dipterocarp rain forest tree seedlings[J]. *Oecologia*, 109: 41—48.
Takahiro ENDO, Toshinori OKUDO, Masasyuki TAMURA, et al. 2002. Estimation of net photosynthetic rate based on in-situ hyperspectral data[J]. *Agricultural and forest methodology*, 41: 564—570.
Walker. 1989. Automated measurement of leaf photosynthetic O_2 evolution as a function of photon flux density[M]. *Philosophical transactions of the Royal Society London B*, 323: 313—326.

(上接第 170 页 Continue from page 170)

同降(除)湿技术的效果,即以膜下滴灌最好,地下热循环冷凝次之,限量排气再次。

参考文献:

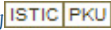
西南农业大学. 1986. 蔬菜研究法(修订本)[M]. 河南: 河南科学技术出版社, 214—219.
浙江农业科学编辑部. 1981. 农作物田间试验记载项目及标准[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 88—89.
西北农业大学植物生理生化教研室. 1987. 植物生理学实验指导[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 76—134.
杨守仁, 郑 尧. 1989. 作物栽培学概论[M]. 北京: 农业出版社, 53—125.
村田吉男[日]. 1982. 作物的光合作用与生态—作物生产的

理论及应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 272—275.
Pan JQ(潘锦泉), Li XY(李新义), Wang HY(王惠永), et al. 1989. Greenhouses introduced in our country and the development of inland greenhouses(我国引进的温室设施及国内温室的发展)[J]. *Acta Agriculture Engineering Sinica*(农业工程学报), 5(2): 64—72.
Pan JQ(潘锦泉). 1996. The development of sunlight greenhouse in China(我国日光温室的发展)[J]. *J Shihezi Agric Coll*(石河子农学院学报), 35(3): 1—4.
Wang YL(王耀林). 2000. The path of creation and sustainable development of energy-saving sunlight greenhouse (first)(节能日光温室创新增效及其可持续发展的途径(一))[J]. *China Vegetables*(中国蔬菜), (1): 52—54.

岩溶石漠化治理优良先锋植物种类光合、蒸腾及水分利用效率的初步研究

作者：[黄玉清](#)，[王晓英](#)，[陆树华](#)，[汪青](#)，[赵平](#)，[HUANG Yu-qing](#)，[WANG Xiao-ying](#)，[LU Shu-hua](#)，[WANG Qing](#)，[ZHAO Ping](#)

作者单位：[黄玉清](#),[HUANG Yu-qing](#)(广西壮族自治区, 中国科学院, 广西植物研究所, 广西, 桂林, 541006; 中国科学院, 华南植物园, 广东, 广州, 510650)，[王晓英](#),[陆树华](#),[WANG Xiao-ying](#),[LU Shu-hua](#)(广西壮族自治区, 中国科学院, 广西植物研究所, 广西, 桂林, 541006)，[汪青](#),[WANG Qing](#)(广西壮族自治区, 中国科学院, 广西植物研究所, 广西, 桂林, 541006; 广西师范大学, 生命科学学院, 广西, 桂林, 541004)，[赵平](#),[ZHAO Ping](#)(中国科学院, 华南植物园, 广东, 广州, 510650)

刊名：[广西植物](#)

英文刊名：[GUIHATA](#)

年, 卷(期)：2006, 26 (2)

被引用次数：48次

参考文献(16条)

1. [王世杰](#) 喀斯特石漠化—中国西南最严重的生态地质环境问题[期刊论文]-[矿物岩石地球化学通报](#) 2003 (02)
2. [王会肖](#); [刘昌明](#) 作物光合、蒸腾与水分高效利用的试验研究[期刊论文]-[应用生态学报](#) 2003 (10)
3. [齐欣](#); [曹坤芳](#); [冯玉龙](#) 热带雨林蒲桃属3个树种的幼苗光合作用对生长光强的适应[期刊论文]-[植物生态学报](#) 2004 (01)
4. [朱剑云](#); [叶永昌](#); [刘颂颂](#) 从澳大利亚引进的两种相思植物光合速率和蒸腾效率的初步研究[期刊论文]-[广东林业科技](#) 2001 (03)
5. [许大全](#) 光合作用气孔限制分析中的一些问题[期刊论文]-[植物生理学通讯](#) 1997 (04)
6. [何师意](#); [冉景丞](#); [袁道先](#) 不同岩溶环境系统的水文和生态效应研究[期刊论文]-[地球学报](#) 2001 (03)
7. [赵平](#) 退化生态系统植被恢复的生理生态学研究进展[期刊论文]-[应用生态学报](#) 2003 (11)
8. [姚长宏](#); [蒋忠诚](#); [袁道先](#) 西南岩溶地区植被喀斯特效应[期刊论文]-[地球学报](#) 2001 (02)
9. [袁道先](#) 岩溶环境学 1988
10. [蒋高明](#) 植物生理生态学 2004
11. [Cowan IR](#) Stomata behavior and environment 1977
12. [David WL](#); [Baskaran K](#); [Mansor M](#) Irradiance and spectral quality affect Asian tropical rain forest tree seedling development[外文期刊] 1996
13. [Kitao M](#); [Lei TT](#); [Koike T](#) Susceptibility to photoinhibition of three deciduous broadleaf tree species with different successional traits raised under various light regimes 2000
14. [Scholes JD](#); [Press MC](#); [Zipperlen SW](#) Differences in light energy utilization and dissipation between dipterocarp rain forest tree seedlings[外文期刊] 1997
15. [Takahiro ENDO](#); [Toshinori OKUDO](#); [Masasyuki TAMURA](#) Estimation of netphotosynthetic rate based on insitu hyperspectral data 2002
16. [Walker](#) Automated measurement of leaf photosynthetic O2 evolution as a function of photon flux density[外文期刊] 1989

本文读者也读过(10条)

1. [王腊春](#), [李道元](#), [左平](#), [吴国平](#) 岩溶山区石漠化治理生态需水量初步研究—以贵州普定后寨河流域为例[期刊论文]-[水资源保护](#) 2004, 20 (5)

2. [何成新, 黄玉清, 李先琨, 王晓英, 汪青, HE Cheng-Xin, HUANG Yu-Qing, LI Xian-Kun, WANG Xiao-Ying, WANG Qing](#) 岩溶石漠化地区几种生态恢复植物的生理生态学特征[期刊论文]-[广西植物](#)2007, 27(1)
3. [王明章, WANG Ming-zhang](#) 贵州巨木地下河流域石漠化地学治理实验及其意义[期刊论文]-[中国岩溶](#)2010, 29(2)
4. [陈洪云, 熊康宁, 兰安军, 贺祥, 常黎, Chen Hongyun, Xiong Kangning, Lan Anjun, He Xiang, Chang Li](#) 喀斯特峡谷地区不同等级石漠化治理的生态效应——以贵州省花江石漠化生态综合治理示范区为例[期刊论文]-[中国水土保持科学](#)2007, 5(6)
5. [宋林, 殷天卉](#) 贵州省石漠化治理植被恢复效益监测点布局研究——以晴隆县为例[期刊论文]-[现代农业科技](#) 2011(10)
6. [苏维词](#) 中国西南岩溶山区石漠化治理的优化模式及对策[期刊论文]-[水土保持学报](#)2002, 16(5)
7. [黄惠, HUANG Hui](#) 广西平果县石漠化治理模式[期刊论文]-[广西林业科学](#)2005, 34(3)
8. [王鸿, 罗爱忠](#) 毕节地区石漠化治理存在问题及对策[会议论文]-2009
9. [谭秋, TAN Qiu](#) 贵州连续性石灰岩小流域石漠化景观格局研究[期刊论文]-[矿物岩石地球化学通报](#)2009, 28(3)
10. [黄金国, 李森, 魏兴琥, HUANG Jin-guo, LI Sen, WEI Xing-hu](#) 粤北岩溶山区土地石漠化治理与农业综合开发模式研究[期刊论文]-[中国沙漠](#)2008, 28(1)

引证文献(48条)

1. [戴宏芬, 邱燕萍, 袁沛元, 李志强, 王晓容](#) 螺旋环剥对幼龄'桂味'荔枝果期光合和蒸腾作用的影响[期刊论文]-[园艺学报](#) 2010(8)
2. [邓新辉](#) 岩溶峰丛山区苦丁茶的生理特性分析[期刊论文]-[株洲师范高等专科学校学报](#) 2007(5)
3. [张中峰, 尤业明, 黄玉清, 李先琨, 张金池, 张德楠, 何成新](#) 模拟岩溶水分供应分层的干旱胁迫对青冈栎光合特性和生长的影响[期刊论文]-[生态学杂志](#) 2012(9)
4. [曹宁, 郭德俊, 徐贤](#) 植物生理的研究在岩溶环境植被恢复中的应用[期刊论文]-[安徽农业科学](#) 2010(36)
5. [张盼盼, 胡远满, 李秀珍, 肖笃宁, 殷洁, 李阳兵](#) 基于GIS的喀斯特高原山区石漠化景观格局变化分析[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2009(12)
6. [WU Yan-you, 吴沿友, 邢德科, 朱咏莉, 梁铮](#) 营养液pH对3种藤本植物生长和叶绿素荧光的影响[期刊论文]-[西北植物学报](#) 2009(2)
7. [张中峰, 黄玉清, 莫凌, 袁维园](#) 岩溶区4种石山植物光合作用的光响应[期刊论文]-[西北林学院学报](#) 2009(1)
8. [余龙江, 刘彦, 李为, 项俊, 吴耿, 栗茂腾](#) 不同地质背景下黄荆的光合蒸腾及水分利用效率比较[期刊论文]-[生态环境](#) 2008(3)
9. [吴耿, 栗茂腾, 刘建民, 孙静, 余龙江](#) 广西弄拉几种适生药材叶片对岩溶环境的生态适应[期刊论文]-[现代生物医学进展](#) 2008(2)
10. [李为, 吴耿, 余龙江, 刘彦, 夏坤, 栗茂腾](#) 桂林岩溶试验场不同地貌部位黄荆蒸腾作用的比较研究[期刊论文]-[武汉植物学研究](#) 2007(3)
11. [步秀芹, 徐学选, 康博文, 郭劲松](#) 黄土丘陵区铁杆蒿光合特性[期刊论文]-[林业科学](#) 2007(9)
12. [杨红兰, 梁士楚, 黄雅丽, 田华丽](#) 桂林岩溶石山光蜡树响应曲线的研究[期刊论文]-[安徽农业科学](#) 2012(34)
13. [柳新红, 何小勇, 王军峰, 李因刚](#) 翅荚木苗木田间抗寒能力的地理种源变异[期刊论文]-[林业科学研究](#) 2009(3)
14. [王晓英, 黄玉清, 王冬梅, 陆树华, 覃家科](#) 青檀光合作用和荧光特性对岩溶区不同生境的响应[期刊论文]-[林业科学研究](#) 2009(4)
15. [张桂清, 李锋, 蒋水元, 韦霄, 蒋运生, 王满莲](#) 两种土壤含水率下匙羹藤的光合及水分利用率的初步研究[期刊论文]-[广西植物](#) 2007(3)

16. 柳新红, 何小勇, 袁德义, 王军峰, 葛永金. 翅荚木地理种源苗期遗传性状变异[期刊论文]-林业科学研究 2007(6)
17. ZHANG Panpan, HU Yuanman, XIAO Duning, LI Xiuzhen, YIN Jie, HE Hong S. Rocky Desertification Risk Zone Delineation in Karst Plateau Area: A Case Study in Puding County, Guizhou Province[期刊论文]-中国地理科学(英文版) 2010(1)
18. 林春蕊, 陈秋霞, 潘玉梅, 蒲高忠, 唐赛春. 飞机草水提液对任豆种子萌发和幼苗生长的影响[期刊论文]-林业科技 2008(5)
19. 邓新辉, 蒋忠诚, 沈利娜, 吴孔运, 覃新明, 杨新文, 邓燕. 岩溶峰丛山区几种经济植物的生理特性比较分析[期刊论文]-农业现代化研究 2007(6)
20. 步秀芹, 徐学选, 郭劲松. 黄土丘陵区铁杆蒿光合蒸腾特性的研究[期刊论文]-中国草地学报 2007(2)
21. 陈婷, 马姜明, 梁士楚. 巨尾桉在岩溶石山生境中的适应性研究(I):春季光合生理生态学特性[期刊论文]-广西植物 2012(2)
22. 沈利娜, 蒋忠诚, 覃星铭, 吴孔运, 梁铭忠, 马祖陆, 李晖. 峰丛洼地恢复树种光合生理生态特征日变化研究——以广西马山弄拉峰丛洼地为例[期刊论文]-广西师范大学学报(自然科学版) 2010(1)
23. 周珺, 魏虹, 吕茜, 李昌晓, 王振夏, 高伟, 陈伟. 土壤水分对湿地松幼苗光合特征的影响[期刊论文]-生态学杂志 2012(1)
24. 沈利娜, 蒋忠诚, 吴孔运, 梁铭忠, 覃星铭, 邓新辉. 峰丛洼地恢复演替系列优势种光合生理生态特征日变化研究——以广西马山弄拉峰丛洼地为例[期刊论文]-广西植物 2010(1)
25. 覃星铭, 蒋忠诚, 邓艳, 罗为群, 吴华英, 沈利娜. 岩溶峰丛洼地不同地貌部位扶芳藤的生理生态适应特征[期刊论文]-农业现代化研究 2009(4)
26. 何应会, 马锦林, 梁文汇, 张日清, 邓小军. 六个油茶优良无性系光响应曲线分析[期刊论文]-湖北农业科学 2013(7)
27. 庞冬辉, 沈利娜, 蒋忠诚, 覃星铭, 梁铭忠, 吴孔运, 邓艳, 尹辉. 广西弄拉峰丛洼地灌丛岩生优势种光合生理生态特征日变化研究[期刊论文]-中国岩溶 2010(3)
28. 金孝芳, 贾尚智, 闵彩云, 陈勋. 鄂茶系列光合特性的比较研究[期刊论文]-中国农学通报 2009(24)
29. 莫凌, 黄玉清, 覃家科, 王晓英, 陆树华, 袁维圆. 西南喀斯特地区四种植物水分生理的初步研究[期刊论文]-广西植物 2008(3)
30. 陈托兄, 郝文军, 陈小兵, 卢欣石. 10个紫花苜蓿品种光合特性的比较[期刊论文]-中国草地学报 2009(2)
31. 张中峰, 黄玉清, 莫凌, 覃家科, 王晓英, 袁维圆. 桂林岩溶区青冈栎光合速率与环境因子关系初步研究[期刊论文]-广西植物 2008(4)
32. 徐祥明, 曹建华, 李小方, 莫彬, 陶毅明, 覃灵华. 岩溶环境下牧草光合速率日动态和水分利用效率研究[期刊论文]-江苏农业科学 2007(3)
33. 黄玉清, 张中峰, 何成新, 赵平, 袁维园, 焦继飞, 尤业明. 岩溶区青冈栎整树蒸腾的季节变化[期刊论文]-应用生态学报 2009(2)
34. 杜雪莲, 王世杰, 葛永罡, 容丽, 罗绪强. 喀斯特石漠化过程的植物叶片 $\delta^{13}C$ 值变化及其环境分析[期刊论文]-自然科学进展 2008(4)
35. 王志伟, 田静, 林丽婷, 张志勇. 棉花不同节位叶片的光合特性研究[期刊论文]-广东农业科学 2011(15)
36. 何成新, 黄玉清, 李先琨, 王晓英, 汪青. 岩溶石漠化地区几种生态恢复植物的生理生态学特征[期刊论文]-广西植物 2007(1)

37. [张中峰](#), [黄玉清](#), [莫凌](#), [尤业明](#), [焦继飞](#) [岩溶植物光合-光响应曲线的两种拟合模型比较](#) [期刊论文] - [武汉植物学研究](#) 2009(3)
38. [陈芳清](#), [谢宗强](#) [三峡库区濒危植物疏花水柏枝的生理生化特性研究](#) [期刊论文] - [广西植物](#) 2008(3)
39. [赵哈林](#), [曲浩](#), [周瑞莲](#), [赵学勇](#), [云建英](#), [李瑾](#), [王进](#) [沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响](#) [期刊论文] - [生态学报](#) 2013(18)
40. [陈芳清](#), [郭成圆](#), [王传华](#), [许文年](#), [樊大勇](#), [谢宗强](#) [水淹对秋华柳幼苗生理生态特征的影响](#) [期刊论文] - [应用生态学报](#) 2008(6)
41. [穆兵](#), [魏媛](#), [胡刚](#), [杨萍](#) [喀斯特山地不同景观树种光合色素含量研究——以贵阳市郊区为例](#) [期刊论文] - [湖北农业科学](#) 2012(20)
42. [何小勇](#), [袁德义](#), [柳新红](#), [赵思东](#), [张琳](#), [魏来](#) [珍稀速生树种翅荚木的特性及开发利用\(综述\)](#) [期刊论文] - [亚热带植物科学](#) 2007(1)
43. [赵哈林](#), [曲浩](#), [周瑞莲](#), [赵学勇](#), [云建英](#), [李瑾](#), [王进](#) [沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响](#) [期刊论文] - [生态学报](#) 2013(18)
44. [郎莹](#), [张光灿](#), [张征坤](#), [刘顺生](#), [刘德虎](#), [胡小兰](#) [不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟](#) [期刊论文] - [生态学报](#) 2011(16)
45. [吕茜](#), [魏虹](#), [李昌晓](#) [土壤水分条件对枫杨幼苗光合生理的影响](#) [期刊论文] - [西南大学学报\(自然科学版\)](#) 2010(3)
46. [何跃军](#), [钟章成](#) [喀斯特地区植被恢复过程中适生植物的生理生态学研究进展](#) [期刊论文] - [热带亚热带植物学报](#) 2010(5)
47. [曹建华](#), [袁道先](#), [童立强](#) [中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策](#) [期刊论文] - [草业科学](#) 2008(9)
48. [郎莹](#), [张光灿](#), [张征坤](#), [刘顺生](#), [刘德虎](#), [胡小兰](#) [不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟](#) [期刊论文] - [生态学报](#) 2011(16)

引用本文格式: [黄玉清](#), [王晓英](#), [陆树华](#), [汪青](#), [赵平](#), [HUANG Yu-qing](#), [WANG Xiao-ying](#), [LU Shu-hua](#), [WANG Qing](#), [ZHAO Ping](#) [岩溶石漠化治理优良先锋植物种类光合、蒸腾及水分利用效率的初步研究](#) [期刊论文] - [广西植物](#) 2006(2)