

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

沈利娜¹, 蒋忠诚^{1,4}, 吴孔运², 梁铭忠¹, 覃星铭¹, 邓新辉³

(1. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2. 陕西核工业地质局, 西安 710024; 3. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412007; 4. 广西师范学院, 南宁 530023)

摘要: 运用 LI-6400 便携式光合测定系统, 测定弄拉峰丛洼地不同演替阶段优势种白茅、黄荆、红背山麻杆、黄杞和青冈的光合生理生态特性, 并比较它们的净光合作用速率、蒸腾作用速率、气孔导度、水分利用效率、表观量子效率等生理生态指标及其生境中对应的光合有效辐射、大气 CO₂ 浓度、气温、相对湿度的日变化。结果表明, 峰丛洼地生态环境因子日变化复杂, 黄杞有明显的“午休”现象, 先锋种黄荆、红背山麻杆的净光合作用速率、蒸腾速率和气孔导度较大, 先锋种中 C₄ 植物白茅水分利用效率最高, 演替后期优势种青冈和黄杞的表观光量子效率、利用岩溶区水分的效率和适应性更强。对净光合作用速率与生理生态影响因子进行相关性分析, 表明生理和生态因子共同影响植物的光合作用, 不同演替优势种的影响因子有差异。以逐步回归方式建立净光合作用速率和影响因子之间的回归方程模型, 5 个方程均有显著性意义和良好的预测性。

关键词: 峰丛洼地; 恢复演替; 优势种; 净光合作用速率; 生理生态因子

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2010)01-0075-07

Daily changes of photosynthetic ecophysiological characteristics of dominant species of restoration sere in a peak cluster depression region: a case study of Nongla, Mashan County, Guangxi

SHEN Li-Na¹, JIANG Zhong-Cheng^{1,4}, WU Kong-Yun²,
LIANG Ming-Zhong¹, QIN Xing-Ming¹, DENG Xin-Hui³

(1. *Institution of Karst Geology, Chinese Academy of Geology Sciences, Guilin 541004, China*; 2. *Shanxi Nuclear Industry Geology Board, Xi'an 710024, China*; 3. *Hunan Industry University, Zhuzhou 412007, China*; 4. *Guangxi Teachers Education University, Nanning 530023, China*)

Abstract: Photosynthetic ecophysiological characteristics of different dominant species were investigated by LI-6400 in the Nongla peak cluster depression. The daily changes of some indexes were measured including PAR(Photosynthetically Radiation), air CO₂ concentration(Ca), air temperature(Ta), relative humidity(RH), net photosynthetic rate(Pn), transpiration rate(E), stomatal conductance(Gs), water use efficiency(WUE) and apparent quanta efficiency

收稿日期: 2008-12-10 修回日期: 2009-07-08

基金项目: 国家“十一五”科技攻关项目(2006BAC01A10, 2008BAD98B07); 国家自然科学基金(40872214); 湖南省教育厅优秀青年项目(08B093); 广西师范学院八桂学者项目(08KE01)[Supported by the Key Technologies Research and Development Program of State Eleventh Five-Year Plan Project(2006BAC01A10, 2008BAD98B07); the National Natural Science Foundation of China(40872214); Excellent Youth Project of Hunan Education Department(08B093); Formation Processes and Evolution of Karst Secondary Forest in Guangxi, Fund from Guangxi Teachers Education University(08KE01)]

作者简介: 沈利娜(1982-), 女, 湖南湘潭市人, 博士生, 从事岩溶生态学、环境地质学研究, (E-mail)shl8242@163.com.

(AQE)etc. It's indicated that daily changes in environment factors were complicated. *Engelhardia roxburghiana* showed "midday depression" of photosynthesis obviously. P_n , E and G_s of *Vitex negundo* and *Alchornea treuioides* were higher in values. *Imperata cylindrica*, a C4 species, had the highest WUE. *Engelhardia roxburghiana* and *Cylobalanopsis glauca* had higher AQE and WUE in the karst region and were more adaptive in the karst environment. The correlation matrix of net photosynthetic rate and various factors was established by SPSS13.0. It showed that both plant physiological and environmental factors affected photosynthesis, but these factors were variational in different dominant species of restoration sere. Stepwise regression method was used to establish linear regression equations for net photosynthetic rate and various effecting factors. The 5 linear regression equations were statistically significant and could predict effectively.

Key words: peak cluster depression; resuming succession; dominant species; net photosynthetic rate; ecophysiological factors

岩溶峰丛洼地是受石漠化威胁最严重的一类岩溶地貌(李先琨等,2002)。岩溶植被的恢复与重建成为峰丛洼地生态恢复和石漠化防治的核心内容之一,研究其恢复演替过程中植物群落特征有重要的理论和实际意义。过去大多从植物区系(欧祖兰等,2004)、生物多样性(欧祖兰等,2005)、叶片形态结构(邓艳等,2004)、恢复生态学(庞冬辉等,2003)等方面进行了研究,最近也开展了数量生态方面的研究(沈利娜,2008),但对其生理生态方面的研究资料较少,仅对岩溶区经济和恢复物种金银花、苦丁茶、任豆树、枇杷、青冈栎、芒果和荔枝等的光合生理生态进行了测试(邓新辉等,2007;何成新等,2007;黄玉清等,2006;张中峰等,2008),而对于峰丛洼地自然恢复演替群落优势种的生理生态没有系统测试和研究。本文以弄拉不同演替阶段群落优势种为对象,研究其光合生理生态日变化特征,提供岩溶植被演替的生理生态的基础数据,结合岩溶环境特点,分析生理生态因子对植物光合作用的影响,并为峰丛洼地的生态恢复重建提供科学依据和新的思路。

1 研究区域概况

弄拉位于广西马山县东南部(108°19' E, 23°39' N),为典型的南亚热带峰丛洼地,多年的平均气温 19.84 °C、平均降雨量 1 700 mm,4~10 月降雨量占年降雨量的 82%,年均相对湿度 85%,地层为泥盆系东岗岭组中段(D₂d²),岩性较复杂,以含泥硅质的白云岩为主,局部有纯灰岩或纯白云岩出露,西北部山坡有部分白云岩夹钙质页岩。弄拉现有的植被主要为人为破坏后自然和人工诱导恢复的次生演替群落,经 2006~2007 年的调查,弄拉发育着裸地—草丛—次生灌草丛—暖性藤刺灌丛—热性竹林—石灰

岩常绿落叶阔叶混交林—常绿阔叶林的演替系列,不同地貌部位群落演替有差异,其顶级群落为青冈—化香群落,是典型的气候—地形—土壤演替顶极(沈利娜等,2007)。

2 研究方法

2.1 光合生理生态指标的测定

于 2007 年 7 月在弄拉按恢复演替序列选择草丛优势种白茅,灌草丛优势种黄荆,灌丛优势种红背山麻杆,落叶阔叶林优势种黄杞,常绿阔叶林优势种青冈共 5 种植物,选择健康植株,用美国产 Li-6400 便携式光合测定系统,采用普通叶室尺寸(2 cm×3 cm),从 8:00~18:00 时,每隔 2 h 测定一次,测试每株相同叶位 3 片叶片(成熟、长势健康)的净光合速率(P_n)、气温(T_a)、叶温(T_l)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(E),以及对应的环境指标:相对湿度(RH)、大气 CO₂ 浓度(C_a)、光合有效辐射(PAR)等,仪器校正好进入工作状态,手动记录每叶片连续 3 个稳定的数据。

2.2 数据处理

使用 Excel 2003 计算 9 片叶 27 个数据的平均值,作为每个演替阶段优势种的生理生态指标,并求标准差(表 1)。使用 Origin7.0 作图,水分利用效率 WUE 和表观量子效率 AQE 分别由公式(1)和(2)算出:

$$WUE = P_n / E \dots\dots\dots (1)$$

$$AQE = P_n / PAR \dots\dots\dots (2)$$

使用统计分析软件 SPSS13.0 分析不同演替阶段优势种的光合作用速率与生理因子(E 、 G_s 、 C_i)和生态因子(PAR 、 T_a 、 C_a 、 V_{pdl} 、 RH)的相关性,并运用逐步(Stepwise)回归方式建立优势种净光合作用

速率的线性回归方程模型(盛骤等,2002)。

3 结果与分析

3.1 光合生理生态因子的日变化

3.1.1 不同演替阶段优势种生态环境因子日变化

生态环境因子中光照、CO₂ 浓度、温度、水分等对植物的光合生理影响最显著。图 1 显示了不同演替优势种所在群落的生态环境因子日变化趋势。峰丛顶部辐射强烈,洼地底部山体遮蔽,山体不同地貌部位群落的 5 个优势种的 PAR 光合作用有效辐射数值上存在差异,但都有相似的变化趋势,在 14:00 时出现了最大值。所在群落环境不同,同一观测日测定的最大光合作用有效辐射黄杞比青冈大,黄荆大于红背山麻杆。大气 CO₂ 浓度出现了先下降,后上升的日变化趋势,在 12:00~14:00 时出现最低点,与净光合速

率日变化呈反向关系,原因是植物光合作用在不断消耗大气中的 CO₂。青冈在 8:00~16:00 时大气 CO₂ 浓度都处于较低的状态。岩溶区由于岩石强烈吸收太阳辐射,并以热长波辐射缓慢释放出来,所以岩溶地区的空气温度总的趋势是早上相对较凉,但上升很快,午后 14:00 时出现最高值,并缓慢降低,30 °C 以上的高温持续到 18:00 时,演替后期的群落对环境的调节能力增强,黄杞、青冈所在群落的气温达到最大值后,随太阳辐射降低可逐渐下降,到 18:00 时基本降低到 20 °C 左右。相对湿度 RH 的日变化较复杂,白茅和黄荆变化相似,红背山麻杆和黄杞相对湿度变化趋势相似,青冈的相对湿度日变化曲线呈现“V”字型。白茅,黄荆和青冈的相对湿度比红背山麻杆和黄杞大。辐射、气温、大气 CO₂ 浓度和相对湿度,都表现出一定变幅,表现出峰丛洼地特殊地貌对群落生态因子的显著影响。

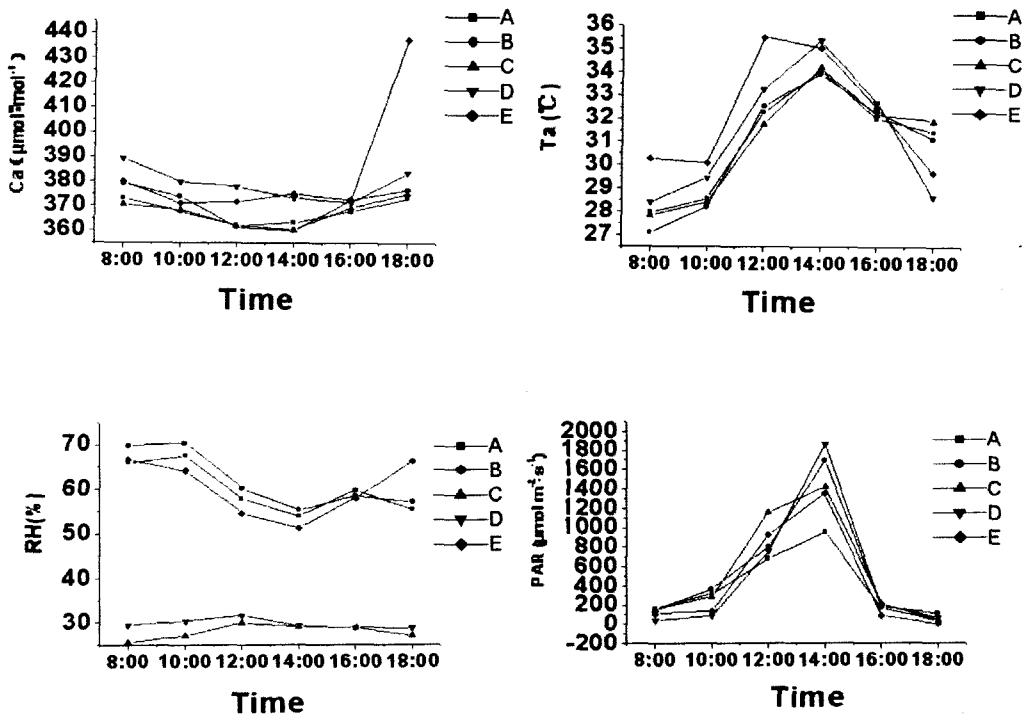


图 1 演替优势种生态环境因子日变化

Fig. 1 Daily change of different environmental factors

Ca. 大气 CO₂ 浓度; Ta. 气温; RH. 相对湿度; PAR. 光合有效辐射; A. 白茅; B. 黄荆; C. 红背山麻杆; D. 黄杞; E. 青冈。下同。
 Ca. CO₂ density of air; Ta. Temperature; RH. Relative humidity; PAR. Solar radiation. A. *Imperata cylindrica*; B. *Vitex negundo*; C. *Alchornea trewioides*; D. *Engelhardtia roxburghiana*; E. *Quercus glauca*; The same below.

3.1.2 不同演替阶段优势种净光合作用速率日变化

由图2可知,测试的5类演替优势种的净光合作用速率基本上是随光合有效辐射变化而变化,在14:00时,5个优势种都出现了最大的净光合作用速率,白茅、黄荆、红背山麻杆和青冈的净光合作用速率曲线为单峰,没有明显午休现象,与光合有效辐射的日变化曲线较一致,呈现出正相关关系。黄杞的净光合作用速率为双峰曲线,12:00时前后光合作用速率下降,此时它的气孔部分关闭,气孔导度明显降低(图4),蒸腾速率较低(图5),CO₂供应不足,限制了光合作用的正常进行,呈现“午休”现象。对比不同演替阶段优势种的平均净光合作用速率,从大到小依次是黄荆(10.30) > 红背山麻杆(8.42) > 白茅(7.55) > 青冈(7.15) > 黄杞(4.48)。在峰丛洼地演替前期的先锋物种具有较高的净光合作用速率,除灌丛优势种多是阳生性物种外,这与演替前期群落郁闭度小,光照充足等环境因素有关,从光合有效辐射日变化图也可看出。

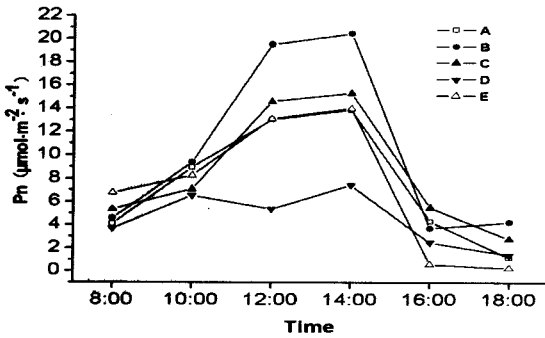


图2 演替优势种净光合作用速率日变化
Fig. 2 Daily changes of net photosynthetic rate in the succession dominant species

3.1.3 不同演替阶段优势种蒸腾作用速率日变化

植物通过调节蒸腾作用使光合作用最大化,减少水分散失并避免干旱引起的木质部栓塞等(Tyree, 1989; Whitehead, 1998; Sparks, 1999)。从图3可知,5个优势种的蒸腾速率曲线都是单峰型,随气温升高而升高,峰丛洼地岩石裸露率高,地面强烈吸收光能而释放以长波为主的热能,导致中午及午后温度极高,高温加速了蒸发的速率,到14:00时蒸腾速率达最大,导致大气相对湿度的减少,限制了光合速率和水分利用效率,之后又随气温下降蒸腾速率减小。黄荆、红背山麻杆和黄杞的蒸腾速率日变化相似,呈现倒“V”字形,有突出的单峰,白茅和青冈的

蒸腾速率日变化曲线成“梯形”,在12:00~14:00均有较大值。峰丛上部的青冈具旱生植物特点,有较厚的蜡质层、角质层以及浓密的表皮毛(邓艳, 2003),叶片通过这些特点发挥气孔调节作用,使叶片光合速率与水分的蒸腾与峰丛缺水的外界环境相适应。对比不同演替阶段优势种,平均蒸腾速率为黄荆(3.43) > 红背山麻杆(2.92) > 青冈(2.38) > 白茅(1.33) > 黄杞(1.11)。演替前期的优势种多为阳生植物,喜光耐旱,通过较强的蒸腾速率,能迅速调节叶温和水分运输,并提高光合作用使之适应演替前期岩溶区高温缺水不稳定的群落环境(赵平等, 2003)。

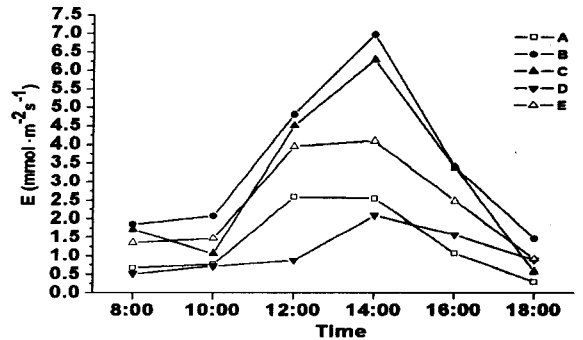


图3 演替优势种蒸腾作用速率日变化
Fig. 3 Daily changes of transpiration rate in the succession dominant species

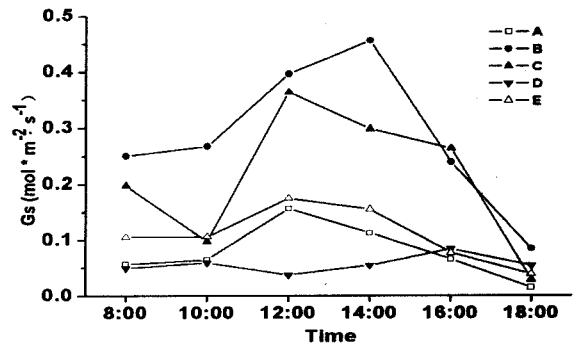


图4 演替优势种气孔导度日变化
Fig. 4 Daily changes of stomatal conductance in succession dominant species

3.1.4 不同演替阶段优势种气孔导度日变化

光照、气温、CO₂浓度、叶片含水量等因素都不同程度地影响气孔导度。由图4可知,白茅和青冈的气孔导度曲线变化相似,随光合有效辐射增大而增大,在12:00时出现最大值,随后逐渐减小,红背山麻杆的气孔导度变化也有类似趋势,但在10:00时出现了

明显的减小,并导致蒸腾作用速率降低。尽管在 12:00~14:00 时光合有效辐射一直增加,但气温迅速增大到最高值,均超过 35 °C,减小了气孔开度,所以在光合有效辐射最大时反而出现了气孔导度减小的现象。黄荆的气孔导度日变化曲线与其光合有效辐射日变化曲线一致性较强,在光合有效辐射峰值的 14:00 时有最大的气孔导度,并有最大的蒸腾速率和净光合作用速率,黄荆气孔张开要求的光强较高,并具有适应岩溶区高温干旱的特点。黄杞气孔导度日变化趋势与其净光合作用速率一致性较强,在 12:00 时明显降低,可能由于此时黄杞所在群落相对湿度大,叶片被水饱和,气孔部分关闭所致。对比不同演替阶段优势种的平均气孔导度,依次为黄荆(0.28) > 红背山麻杆(0.21) > 青冈(0.11) > 白茅(0.08) > 黄杞(0.06),演替前期的灌丛优势种气孔的调节能力更强,灌丛优势种在不断改善光合生理机制来适应演替初期干旱的岩溶环境。

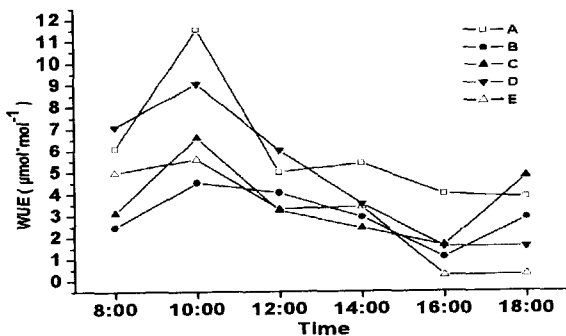


图 5 演替优势种水分利用效率日变化
Fig. 5 Daily changes of water use efficiency of the succession dominant species

3.1.5 不同演替阶段优势种水分利用效率日变化

植物水分利用效率(WUE)是植物蒸腾消耗单位重量的水分所同化的 CO₂ 的量,常用净光合速率与蒸腾作用速率的比值表示(张小全等,2000)。由于 WUE 同时受到光合作用速率变化和蒸腾作用速率变化的制约,通常将其作为评价植物生长适宜程度的综合指标(山仑等,1991)。从图 5 可见,白茅、黄荆、红背山麻杆、黄杞和青冈的 WUE 在 10:00 时都出现了最大值 11.54、4.52、6.59、9.05 和 5.59。白茅和青冈的水分利用效率日变化曲线相似,在 10:00 时出现最高值,随后下降,到 14:00 时略微上升后又下降。黄荆和红背山麻杆水分利用效率日变化曲线相似,随蒸腾作用增大水分利用效率迅速下降,

在 16:00 时出现最低值 1.09、1.62,到 18:00 时上升至 2.89、4.80。从 10:00 时开始,黄杞水分利用效率逐渐下降,在 18:00 时出现最低值 1.56。对比不同演替阶段优势种的平均水分利用效率,白茅(5.98) > 黄杞(4.81) > 红背山麻杆(3.63) > 黄荆(2.99) > 青冈(2.96),草本 C4 植物白茅较其它木本 C3 演替优势种有更高的水分利用效率,对干旱、高温、贫瘠等恶劣环境有更强的适应性,成为广泛分布在岩溶区演替前期的先锋种。黄杞、青冈是演替后期乔木层的优势种,根系发达,部分根系甚至能到达岩溶裂隙和管道(袁道先等,1988),较演替前期的灌丛优势种能更好地利用具有二元结构的岩溶水,顶级群落湿润稳定的环境下,二者的蒸腾速率也较演替前期优势种低,即使在旱季也能维持正常的生长。

3.1.6 不同演替阶段优势种表观量子效率日变化

表观量子效率主要反映低光照下植株利用太阳有效辐射的能力,是反映光化学变化效率的一个参数,本文使用净光合速率 P_n 与相应光合有效辐射 PAR 的比值来表示。从图 6 可知,5 个优势种基本呈现出先下降后上升的 U 型曲线,黄杞、黄荆、白茅和红背山麻杆都在 14:00 时出现最低的表现量子效率,分别为 0.004、0.012、0.015、0.011。青冈在 16:00 时出现最低值 0.007。对比不同演替阶段优势种的平均表现量子效率,青冈(0.041) > 黄杞(0.035) > 红背山麻杆(0.028) > 黄荆(0.025) > 白茅(0.024)。随演替顺向进行,不同演替优势种的潜在光合能力逐渐增强,在低光照度下仍然有较高的光合作用能力。

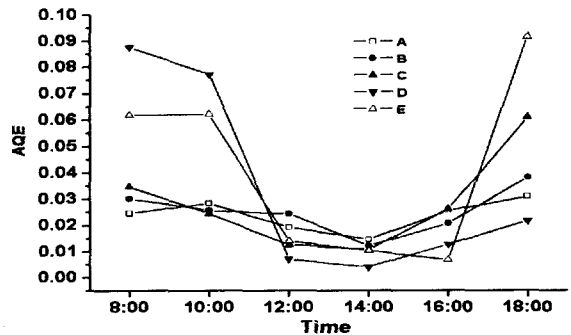


图 6 演替优势种表观量子效率日变化
Fig. 6 Daily changes of apparent quanta efficiency of succession dominant species

3.2 净光合作用速率与光合生理生态影响因子关系

3.2.1 不同演替优势种净光合作用速率与影响因子相关分析

白茅净光合作用速率与 G_s 、 E 、 Ca 、PAR

有较大极显著的正相关性,黄荆净光合作用速率与 G_s 、 E 、 C_i 、 T_a 、 PAR ,红背山麻杆净光合作用速率与 G_s 、 E 、 Ca 、 PAR ,黄杞净光合作用速率与 E 、 C_i 、 T_a ,青冈净光合作用速率与 8 个生理生态因子均具有较大极显著正相关性(表 1)。

3.2.2 不同演替优势种净光合作用速率与诸影响因子的回归方程模型 在 SPSS13.0 中使用逐步回归

Stepwise 的方式,在 F 显著水平值 ≤ 0.05 进入方程的条件下,分别建立不同演替阶段优势种净光合作用速率的回归方程模型(表 2)。从表 2 可知,经 t -检验, P 值均小于 0.01 水平,建立的 5 个方程均有显著性意义(郝黎仁等,2003),从方程可以看出,生理生态因子共同影响不同演替优势种的光合作用,不同演替优势种受到不同生理生态因子影响大小有差

表 1 演替优势种净光合作用速率与生理生态影响因子的相关系数

Table 1 Correlation matrix of the succession dominant species' net photosynthetic rate and ecophysiological factors

因子 Factor	气孔导度 G_s	蒸腾速率 E	细胞间隙 CO_2 浓度 C_i	气温 T_a	大气 CO_2 浓度 Ca	相对湿度 RH	光合有效 辐射 PAR	叶温下蒸 气压亏缺 V_{pdl}
A 的相关系数 A correlatio	0.74**	0.81**	0.24**	0.45**	0.97**	0.27**	0.85**	0.29**
单尾显著性检验概率 Significant leve	0	0	0	0	0	0	0	0
B 的相关系数 B correlatio	0.80**	0.83**	0.73**	0.57**	0.83**	0.32**	0.87**	0.23**
单尾显著性检验概率 Significant leve	0	0	0	0	0	0	0	0
C 的相关系数 C correlatio	0.69**	0.72**	0.06	0.15*	0.95**	0.18*	0.89**	0.23**
单尾显著性检验概率 Significant leve	0	0	0.26	0.04	0	0.02	0	0
D 的相关系数 D correlatio	0.04	0.55**	0.69**	0.54**	0.7**	0.49**	0.46**	0.47**
单尾显著性检验概率 Significant leve	0.35	0	0	0	0	0	0	0
E 的相关系数 E correlatio	0.77**	0.88**	0.87**	0.84**	0.85**	0.81**	0.76**	0.82**
单尾显著性检验概率 Significant leve	0	0	0	0	0	0	0	0

注:“**”为极显著 Significant at the 0.01 level; “*”为显著 Significant at the 0.05 level.

表 2 演替优势种净光合作用速率与生理生态因子的回归方程模型

Table 2 Net photosynthetic rate and ecophysiological factors regression equation model of the succession dominant species

优势种 Species	相关系数 R	方差 F 值	残差均方差 σ^2	回归方程模型 Model	经 t -检验的 P 值
白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	0.985	1001.815	0.717	$P_n = 249.745 - 0.531Ca - 1.214Ta + 2.291E - 37.949G_s - 0.241RH$	Ca : 0.000 Ta : 0.000 E : 0.000 G_s : 0.000 RH : 0.000
黄荆 <i>Vitex negundo</i>	0.972	663.786	3.009	$P_n = 27.332 + 0.002PAR - 0.086C_i + 28.473G_s - 1.489V_{pdl}$	PAR : 0.000 C_i : 0.000 G_s : 0.000 V_{pdl} : 0.002
红背山麻杆 <i>Alchornea trewioides</i>	0.970	677.112	1.159	$P_n = 307.808 - 0.542Ca - 2.071Ta - 0.687RH$	Ca : 0.000 Ta : 0.000 RH : 0.000
黄杞 <i>Engelhardtia roxburghiana</i>	0.948	343.451	0.620	$P_n = 10.918 - 0.029C_i + 4.087E - 2.428V_{pdl}$	C_i : 0.000 E : 0.000 V_{pdl} : 0.000
青冈 <i>Quercus glauca</i>	0.994	1342.378	0.336	$P_n = 17.144 + 3.075E - 0.047C_i - 4.298V_{pdl} + 0.001PAR + 0.031Ca - 13.524G_s - 0.112RH$	E : 0.000 C_i : 0.000 V_{pdl} : 0.000 PAR : 0.000 Ca : 0.000 G_s : 0.008 RH : 0.008

异,这与遗传特性和群落生态环境有关。

4 讨论与结论

岩溶峰丛洼地特殊的小地形导致不同的光、热、水、气等存在质和量的差异,不同演替群落调节小气候能力不同(向悟生等,2004),二者对不同演替阶段的优势种的光合生理生态产生了直接影响。不同演替阶段优势种长期生活在峰丛洼地,逐渐适应岩溶环境水热等条件的限制,在光合速率和光合作用的调节运转机制、光合途径等方面发生相应的改变,白茅、黄荆、红背山麻杆和青冈没有午休现象,更耐干旱,青冈、黄杞发达的根系和青冈叶片中生偏旱的结构(邓艳,2003)以及较高的表观量子效率,是形态结构和生理功能上对演替后期岩溶环境的适应。白茅是典型的低蒸腾高水分利用效率的植物,通过减少蒸腾实现控制水分散失的目的,在水分利用方面具有较大的优势,适合演替初期干旱和高温胁迫的环境,但表观量子效率较低。黄荆和红背山麻杆的蒸腾作用速率和气孔导度较高,可有效调节体内水分,降低叶温适应高温环境,促进其光合作用。峰丛洼地多样的小地形和群落的组合,复杂的水热条件,使不同演替阶段优势种在不同的生理指标上表现不同的优势。高温胁迫也是造成该区植物同化 CO₂ 减少的原因,可见能否耐受高温和干旱胁迫,是适应岩溶环境,成为群落优势种的必备条件。(1)岩溶峰丛洼地不同演替阶段群落的生态环境因子日变化复杂,特殊的地貌特点使气温、光合有效辐射、大气 CO₂ 浓度和相对湿度表现垂直变幅,早、中、晚差异明显。(2)白茅、黄荆、红背山麻杆和青冈的净光合作用速率日变化为单峰曲线,黄杞具双峰曲线,有明显的“午休”现象;5 种优势种的蒸腾速率日变化为单峰型曲线,14:00 时两者均达到最大值;表观量子效率日变化基本呈现出先下降后上升的 U 型曲线,14:00 时出现较低值;气孔导度受多种因素影响,日变化复杂;白茅、红背山麻杆、青冈的水分利用效率日变化为双峰曲线。(3)对比不同演替优势种各生理指标,平均净光合作用速率为黄荆>红背山麻杆>白茅>青冈>黄杞;平均蒸腾速率为黄荆>红背山麻杆>青冈>白茅>黄杞;平均气孔导度为黄荆>红背山麻杆>青冈>白茅>黄杞;平均水分利用效率为白茅>黄杞>红背山麻杆>黄荆>青冈;平均表观量子效率为青冈>黄杞>红背山麻杆>黄荆

>白茅。黄荆和红背山麻杆的净光合作用速率、蒸腾作用速率和气孔导度较高,白茅水分利用效率最高,青冈和黄杞潜在光合能力和利用岩溶水分的能力更强,不同演替阶段优势种长期适应高温、缺水、贫瘠等恶劣岩溶环境形成与生境相适应的光合生理调节机制。(4)相关和回归分析表明,大气 CO₂ 浓度、气温、光合有效辐射是影响演替优势种光合作用的主要生态因子,特殊岩溶环境的水、光、热等生态因子,限制了岩溶植被的自然恢复,对峰丛洼地恢复演替的研究不仅要重视优势种内部生理机制,还要结合外部生态环境的变化。

参考文献:

- 郝黎仁,樊元,郝哲欧,等. 2003. SPSS 实用统计分析[M]. 北京:中国水利水电出版社
- 袁道先,蔡桂鸿. 1988. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社
- 潘瑞炽,董愚得. 1995. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社
- 盛骤,谢式千,潘承毅. 2000. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社
- Deng XH(邓新辉), Jiang ZC(蒋忠诚), Shen LN(沈利娜), et al. 2007. Comparison and analysis of physiological characters of several plants in karst peak-cluster mountain area(岩溶峰丛山区几种经济植物的生理特性比较分析)[J]. *Res Agric Moder* (农业现代化研究), 28(6): 763-766
- Deng Y(邓艳). 2003. Study on water physiological ecology of *Quercus glauca* leaf in typical fengcong depression ecological system in Nongla(弄拉典型峰丛洼地生态系统中青冈叶片水分生理生态研究)[D]. 22-29
- Deng Y(邓艳), Jiang ZC(蒋忠诚), Cao JH(曹建华), et al. 2004. Characteristics comparison of the leaf anatomy of *Quercus glauca* and its adaption to the environment of typical karst(弄拉典型峰丛岩溶区青冈栎叶片形态特征及对环境的适应)[J]. *Guihaia* (广西植物), 24(4): 317-322
- He CX(何成新), Huang YQ(黄玉清), Li XK(李先琨), et al. 2007. The ecophysiological traits of three karst rocky desert restoration species(岩溶石漠化地区几种生态恢复植物的生理生态学特征)[J]. *Guihaia*(广西植物), 27(1): 53-61
- Huang YQ(黄玉清), Wang XY(王晓英), Lu SH(陆树华), et al. 2006. Studies of photosynthesis transpiration and water use efficiency of some dominant species in rocky desert area Guangxi, China(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)[J]. *Guihaia*(广西植物), 26(2): 171-177
- Li XK(李先琨), He CX(何成新). 2002. Comprehensive development of western China and ecological rehabilitation and reconstruction in tropical and subtropical karst regions(西部开发与热带亚热带岩溶脆弱生态系统恢复重建)[J]. *Syst Sci Comp stud Agric*(农业系统科学与综合研究), 18(1): 13-16
- Ou ZL(欧祖兰), Li XK(李先琨), Su ZM(苏宗明). 2004. Flora of Karst vegetation in Guangxi(广西岩溶植被植物区系)[J]. *Guihaia*(广西植物), 24(4): 302-31
- Ou ZL(欧祖兰), Li XK(李先琨), Su ZM(苏宗明). 2005. Popu-

longus, cymbiformis vel infundibularis, in calcar validum incurvum limbo brevius attenuatum, ore horizontali acuto(Plate I: F-J).

花部形态补充描述:花展开,长达 2.5—3 cm,白色,粉红色或紫色,内面具橙色斑点。侧生萼片 4,外面的侧生萼片绿色,斜圆形,长 8—15 mm,质较厚,具多条脉,中脉明显,顶端具小尖;里面的侧生萼片,阔卵形,长 0.5—1 mm。旗瓣圆形,宽 10—15 mm,顶端二裂,背面中肋增厚;翼瓣具柄,长约 3 cm,2 裂,基部裂片镰刀状扇形,上部裂片长圆形,合生成 2 裂的片状,背部具不明显的小耳。唇瓣檐部舟状或漏斗状,长 12 mm,口部平展,宽 15 mm,基部急狭成内弯短于檐部的短距。

China. Guangxi(广西): Longzhou(龙州), H. B. Morse 308(holotype, K!); S. X. Yu 3087(PE); Guangxi Exped. 3265 (IBK); D. Fang & K. J. Yan 76377 (GXMI); Napo(那坡), H. N. Qin *et al.* 2303(PE).

In the original description this species was recognized only having 2 lateral sepals. Recently, during checking the type specimen borrowed from KEW, we found it have 4 lateral sepals, and further studying not only in the herbarium but also in the field found it is true with 4 lateral sepals.

致谢 感谢以下标本馆(K、P、PE、IBSC、IBK、GXMI)提供借阅或查阅标本。

参考文献:

- 陈艺林. 2001. Balsaminaceae[M]//中国植物志. 北京:科学出版社,47(2):38—39
- Chen YL(陈艺林). 1987. A new species of *Impatiens* from Hainan(海南凤仙花属一新种)[J]. *Guihaia*(广西植物),7(1):9—11
- Hook JD. 1908. Hooker's *Icones Plantarum*[J]. *Dulyu & Co. London*,9(3):2 874
- (上接第 81 页 Continue from page 81)
- lation variation and species diversity in succession process of karst vegetation in Yangshuo, Guangxi(广西阳朔岩溶植被演替过程种群变化及物种多样性)[J]. *Ecol Sci*(生态科学),24(4):295—297
- Pang DH(庞冬辉), Li XK(李先琨), He CX(何成新), *et al.* 2003. Environmental characteristics and ecological rehabilitation and optimization of eco-agricultural system in karst peak cluster areas in Western Guangxi(桂西峰丛岩溶区的环境特点及农业生态系统优化设计)[J]. *Guihaia*(广西植物),23(5):408—413
- Shen LN(沈利娜). 2008. Plant community succession research of resuming ecosystem in peak cluster depression——a case study of Nongla in Mashan County of Guangxi(峰丛洼地生态系统恢复演替过程中植物群落研究——以广西马山弄拉峰丛洼地为例)[D]. 63—64
- Shen LN(沈利娜), Deng XH(邓新辉), Jiang ZC(蒋忠诚), *et al.* 2007. Features of karst soil microbe at different vegetation successions——a case study on the peak cluster depression in Nongla, Mashan, Guangxi(不同植被演替阶段的岩溶土壤微生物特征——以广西马山弄拉峰丛洼地为例)[J]. *Carsol Sin*(中国岩溶), 26(4):310—314
- Sparks JP, Black RA. 1999. Regulation of water loss in populations of *Populus trichocarpa*: the role of stomatal control in preventing xylem cavitation[J]. *Tree Physiol*,19(7):453—459
- Tyree MT, Sperry JS. 1989. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism[J]. *Ann Rev Plant Physiol*,40:19—38
- Whitehead D. 1998. Regulation of stomatal conductance and transpiration in forest canopies[J]. *Tree Physiol*,18:633—644
- Shan L(山仑), Xu M(徐萌). 1991. Water-saving agriculture and its physio-ecological bases(节水农业及其生理基础)[J]. *Chin J Appl Ecoy*(应用生态学报)2(1):70—76
- Shan L(山仑). 1994. Water use efficiency of plant and agricultural water-saving in semi-arid area in China(植物水分利用效率与半干旱地区农业节水)[J]. *Plant Physiol Commun*(植物生理学通讯),30(1):61—66
- Xiang WS(向悟生), Li XK(李先琨), Lu SH(吕仕洪), *et al.* 2004. The daily dynamics of primary microclimatic factors in the different successional of karst vegetation in Guangxi(广西岩溶植被演替过程中主要小气候因子日变化特征)[J]. *Ecol Sci*(生态科学),23(1):25—31
- Zhang XQ(张小全), Xu DY(徐德应), Zhao MS(赵茂盛). 2000. The responses of 17-years old Chinese fir shoots to elevated CO₂ (增长对杉木中龄林针叶光合生理生态的影响)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报),20(3):390—396
- Zhang ZF(张中峰), Huang YQ(黄玉清), Mo L(莫凌), *et al.* 2008. Preliminary study on the relation between photosynthetic rate and environment factors of *Quercus glauca* in Guilin karst area(桂林岩溶区青冈栎光合速率与环境因子关系初步研究)[J]. *Guihaia*(广西植物),28(4):478—48
- Zhao P(赵平), Zeng XP(曾小平), Peng SL(彭少麟). 2003. Ecological adaptation of leaf gas exchange of trees used for re-vegetation under different experimental light regimes(植被恢复树种在不同实验光环境下叶片气体交换的生态适应特点)[J]. *Chin Ecol*(生态学杂志),22(3):1—8