

太行山低山丘陵区 5 种木本植物光合特性的比较

李小俊¹, 张明如², 张利阳¹, 吴 刚¹

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 旅游与健康学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 植物种的选择是太行山低山丘陵区植被恢复与重建的关键问题之一。利用 LI-6400XT 光合系统分析仪研究了 5 种木本植物的光合日进程特性、光能利用效率及水分利用效率。结果表明: ①火炬树 *Rhus typhina*, 刺槐 *Robinia pseudoacacia*, 臭椿 *Ailanthus altissima*, 荆条 *Vitex negundo* var. *heterophylla*, 酸枣 *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* 的最大净光合效率出现在中午 12:00, 均无光合午休现象; ②比较 5 种木本植物的光能利用效率后发现, 火炬树的光能利用效率最高, 其光能利用效率与臭椿、荆条的光能利用效率差异显著 ($P < 0.05$), 与刺槐、酸枣的光能利用率差异不显著 ($P > 0.05$), 说明火炬树、刺槐及酸枣的光能利用效率较高; ③除酸枣外, 5 种木本植物的水分利用效率日变化曲线均呈“V”型曲线, 酸枣的水分利用效率呈“W”型曲线。火炬树的水分利用效率最高, 与臭椿、荆条、酸枣的水分利用效率差异显著 ($P < 0.05$), 与刺槐差异不显著 ($P > 0.05$), 表明火炬树和刺槐的水分利用效率较高。因此, 火炬树和刺槐在秋季具较高的光能及水分利用效率, 基于两者为外来树种, 需慎重考虑将它们作为该地区的植被恢复树种。图 4 表 1 参 31

关键词: 森林生物学; 植被恢复; 光合日进程; 光能利用效率; 水分利用效率

中图分类号: S718.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2011)02-0180-07

Photosynthesis, light-use efficiency and water-use efficiency for woody species in the hilly area of the Taihang Mountains

LI Xiao-jun¹, ZHANG Ming-ru², ZHANG Li-yang¹, WU Gang¹

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Tourism, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To determine woody species for vegetative restoration in the hilly areas of the Taihang Mountains, the diurnal photosynthetic course of five woody plants (*Rhus typhina*, *Robinia pseudoacacia*, *Ziziphus jujuba* var. *spinosa*, *Ailanthus altissima*, and *Vitex negundo* var. *heterophylla*) was measured using a LI-6400XT portable photosynthetic system. Light-use efficiency and water-use efficiency were calculated and analyzed with formulas $E_{LU} = P_n/P_{AR}$ and $E_{WU} = P_n/E$ respectively. Results showed that: (1) maximum net photosynthetic efficiency for all five trees occurred at 12:00 noon with no midday depression. (2) Light-use efficiency of *R. typhina*, *R. pseudoacacia*, and *Z. jujuba* var. *spinosa* were not significantly (LSD, $P > 0.05$) different, but they were significantly greater ($P < 0.05$) than *A. altissima* and *V. negundo* var. *heterophylla*. (3) The diurnal changes curves of water-use efficiency in *Z. jujuba* var. *spinosa* belonged to a “W-type”, while the other four woody species a “V-type”. Water-use efficiency of *R. typhina* was not significantly different from *R. pseudoacacia* ($P > 0.05$), but was significantly different from *Z. jujuba* var. *spinosa*, *A. altissima*, and *V. negundo* var. *heterophylla* ($P < 0.05$). Thus, light and water-use efficiencies of the exotic species *R. typhina* and *R. pseudoacacia* were better than the other three species. [Ch, 4 fig. 1 tab. 31 ref.]

收稿日期: 2010-05-31; 修回日期: 2010-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771709); “十一五”国家林业科技支撑计划项目(20060BAD03A11-04); 浙江农林大学研究生科研创新基金资助项目(2112009001)

作者简介: 李小俊, 从事种群生态学研究。E-mail: lxiaojun999@126.com。通信作者: 张明如, 教授, 博士, 从事植被恢复、景区环境监测和生物入侵研究。E-mail: mrzheco@yahoo.com.cn

Key words: forest biology; vegetation restoration; diurnal course of photosynthesis; light-use efficiency; water-use efficiency

在植被恢复与重建过程中，植物种的合理选择取决于当地自然地理条件及其与生态环境的和谐共存关系^[1-3]。太行山低山丘陵区由于长期的人为开垦过牧，不合理的栽植、刈割、采石等活动，致使该地区植被严重退化^[4-5]。前人的研究工作已经为该区的植被恢复提出有益的生态修复模式及生态技术管理措施，如实施封禁措施利用自然恢复力，采取人工促进措施加速自然恢复进程，在农田与天然植被之间构建生态经济群落，实行林粮、林姜等复合模式进行生态技术管理等^[6-10]，而如何根据现有的植被特征及研究成果，选择适合该地区生长，发挥生态效益强和经济效益持久的树种，仍是现在生产实践面临的重要问题。光合特征参数的变化在很大程度上能够代表植物对环境因子的适应性反应^[11-12]。植物种对该退化生境的适应，以及是否适合作为退化生境的先锋树种，可通过人工控制试验了解该植物的光合适应机制来阐述^[13]。在自然状态下，结合环境因子测定该物种的光合作用更能直接反映该植物种的光合生理过程^[14-17]。本研究选择该退化生境中的主要常见树种作为研究对象，即火炬树 *Rhus typhina*，臭椿 *Ailanthus altissima*，刺槐 *Robinia pseudoacacia*，荆条 *Vitex negundo* var. *heterophylla* 和酸枣 *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* 等 5 种木本植物，研究它们自然生长状态下的光合日进程特性、光能利用效率及水分利用效率差异，为太行山低山丘陵区选择先锋树种及优化配置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河北省西部太行山中段东麓的平山县岗南镇，属于温带湿润季风型大陆性气候。春季干燥风大，冬季寒冷少雪，光照较充足，降水集中，且分布不均，太阳年总辐射量为 5 480 ~ 5 690 MJ·cm⁻²·a⁻¹，年平均气温为 12.7 ℃，无霜期为 140 ~ 180 d，年平均降水量为 609 mm，多年平均蒸发量为 1 815 mm。地貌基本属于丘陵山地类型，西北高峻，东南低矮平缓，海拔变化于 111 ~ 2 281 m。地带性植被属于暖温带落叶阔叶林，现代植被类型是由天然灌木草本植物群落、人工栽植树种与天然灌木草本植物形成的混合群落、人工栽植树种形成的单优群落以及农作物构成的季节性群落所组成。基岩为片麻岩，质地较为松软。土壤为壤质褐土，有机质为 5.50 ~ 8.70 g·kg⁻¹，呈微酸性至中性。

1.2 试验材料与方法

2009 年秋，在试验地随机选择生长正常的 5 种木本植物各 3 株作为测定植株(其形态指标见表 1)，选择各供试植株的树冠中上部健康完整的功能叶片进行光合日动态测定。使用 LI-6400xT 光合系统分析仪测定。采用开放气路，从 8 : 00 到 18 : 00，2 h 测定 1 次，读取稳定数据 3 组·叶片⁻¹，取平均值作为该时刻的生理指标，每次测定更换叶片，避免叶片因叶室长时间挤压而钝化。

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 软件处理数据、做图，采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析，差异显著性检验采用最小显著差数(LSD)法。

光能利用效率(E_{LI}) = 净光合速率(P_n)/ 光合有效辐射(P_{AR})；水分利用效率(E_{wu}) = 净光合速率(P_n)/ 蒸腾作用(E)。

2 结果与分析

2.1 太行山低山丘陵区小气候因子日变化特征

植物的光合速率、蒸腾速率、光能利用效率和水分利用效率等生理过程受众多环境因子的影响。图

表 1 5 种木本植物的形态特征(平均值 ± 标准误差)

Table 1 Growth characteristics of five woody plants ($\bar{x} \pm s$)				
树种	树龄/a	株高/m	冠幅/m	地径/cm
火炬树	2	1.133 ± 0.181	0.858 ± 0.280	1.966 ± 0.538
臭椿	2	0.600 ± 0.166	0.670 ± 0.723	1.198 ± 0.310
刺槐	2	1.507 ± 0.485	0.693 ± 0.307	1.754 ± 0.710
荆条	1	0.073 ± 0.006		0.274 ± 0.070
酸枣	1	0.004 ± 0.001		0.414 ± 0.052

1 为测定日小气候因子变化过程。光合有效辐射是一个瞬时变化较大的环境因子,呈倒“V型”曲线,中午 12:00 时出现峰值。气温呈现出先升后降的变化趋势,与光合有效辐射变化一致,而相对湿度则呈现出先降后升的变化趋势,随着光合有效辐射、气温的升高而逐渐下降,午间降至最低,之后随着光合有效辐射和气温的下降又逐渐升高。但气温与相对湿度的变化都滞后于光合有效辐射,气温在 14:00 时出现峰值,相对湿度在 14:00 时出现谷值。

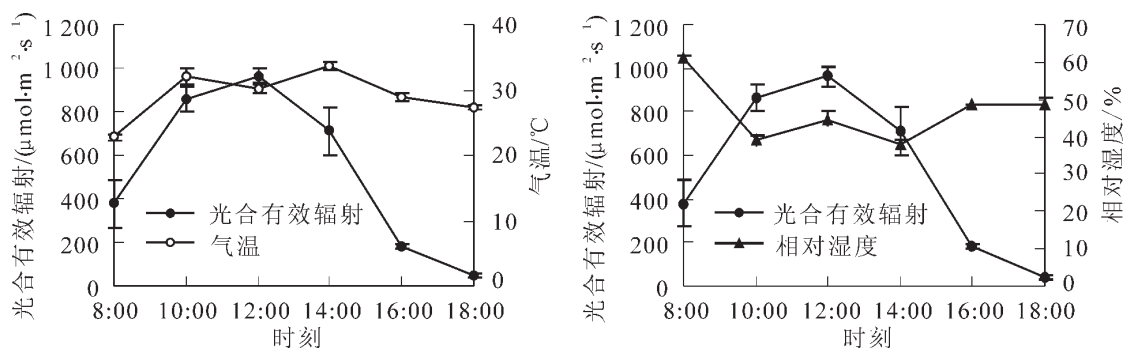


图 1 2009 年 9 月 25 日光合有效辐射、气温和相对湿度日变化

Figure 1 Diurnal changes of photosynthetically active radiation, air temperature and relative humidity on Sep. 25, 2009

2.2 5 种木本植物的光合参数日进程特征

由图 2 可知, 5 种木本植物净光合速率日变化均呈单峰型, 其净光合速率在中午 12:00 时均达到最大值, 由大至小依次为火炬树 $[(19.61 \pm 0.64) \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}] > \text{刺槐} [(19.26 \pm 0.17) \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}] > \text{酸枣} [(18.69 \pm 1.43) \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}] > \text{荆条} [(18.03 \pm 1.85) \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}] > \text{臭椿} [(15.71 \pm 0.40) \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ 。方差分析表明, 5 种木本植物的最大光合速率差异不显著 ($P > 0.05$)。火炬树、刺槐的气孔导度日变化均呈单峰型, 火炬树的峰值出现在中午 12:00 时, 而刺槐在 10:00 时出现峰值, 火炬树和刺槐的气孔导度峰值分别为 0.40 和 $0.41 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 臭椿气孔导度以 8:00 时最大, 之后总体上呈下降的趋势; 荆条和酸枣的气孔导度日变化以 8:00 时最高, 随后总体上呈现下降趋势。5 种木本植物的胞间二氧化碳浓度与气孔导度呈现相反的变化趋势, 火炬树与刺槐的胞间二氧化碳浓度分别在 12:00 时和 10:00 时出现峰值, 分别为 335.58 和 $311.71 \text{ mol}\cdot\text{mol}^{-1}$; 臭椿的胞间二氧化碳浓度与其气孔导度的变化不同, 呈明显的凹型曲线; 荆条的胞间二氧化碳浓度在 10:00 时略有升高, 之后随着气孔导度的降低而逐渐升高; 酸枣的胞间二氧化碳浓度出现 2 个谷值, 分别在 10:00 时和 16:00 时, 其值为 433.81 和 $533.62 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。火炬树、刺槐蒸腾速率均出现 2 个峰值, 分别出现在 10:00 时和 14:00 时, 而臭椿呈现左偏的单峰特征, 即在 10:00 时出现峰值; 荆条呈现左偏的单峰特征, 峰值出现在 10:00 时; 酸枣的蒸腾速率日变化为双峰值, 即出现在 10:00 时和 14:00 时。

所测定树种的净光合速率日变化均呈现出单峰型, 表明 5 种木本植物均无光合午休现象。火炬树在 12:00 时的净光合速率最大, 说明火炬树利用强光的能力在 5 种木本植物中最大。刺槐的气孔导度峰值与光合速率峰值出现偏离现象, 可能与其提前关闭气孔以降低蒸腾速率有关。臭椿、荆条和酸枣的气孔导度在测定时间内总体呈下降趋势。荆条、酸枣的胞间二氧化碳浓度较 3 种乔木树种高, 分析可能由于荆条及酸枣较小, 生理代谢过程较缓慢所致。火炬树、刺槐和酸枣的蒸腾速率均出现双峰值, 一方面可能是强光诱导气孔关闭, 从而减弱蒸腾速率, 另一方面可能在午间 3 种木本植物吸收的水分分配于光合过程较多而蒸腾消耗水分的数量降低所致, 而臭椿与荆条均呈现偏左的单峰特征。

2.3 5 种木本植物光能利用、水分资源利用特征分析

如图 3 所示, 火炬树、臭椿的光能利用率在 8:00 时较高, 分别为 0.026 和 $0.017 \text{ mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$; 刺槐的光能利用率在测定时间内变化较为平缓, 在中午 12:00 时最高, 为 $0.019 \text{ mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 午后 14:00 时开始下降。表明火炬树与臭椿在弱光下的光能利用效率较高, 而刺槐对强光的利用效率较高。荆条的光能利用效率在 16:00 时达到最大, 为 $0.031 \text{ mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$; 酸枣的光能利用效率 8:00 时较高, 为 $0.027 \text{ mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 之后下降, 在 16:00 时又一次上升, 为 $0.025 \text{ mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。说明荆条和酸枣表现出弱

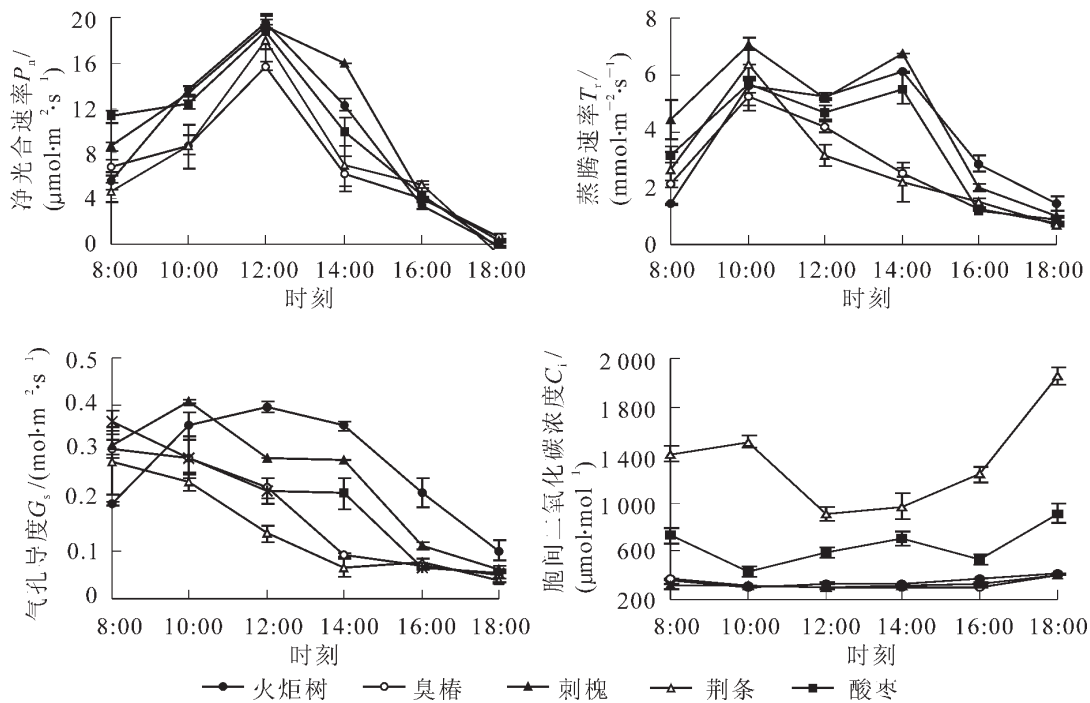


图 2 5 种木本植物的光合特征参数日变化曲线

Figure 2 Diurnal changes of photosynthetic character parameters of five woody plants

光下较高的光能利用效率。

5 种木本植物的日平均光能利用效率由大至小依次为火炬树 $0.020 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ > 刺槐 $0.018 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ > 酸枣 $0.016 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ > 臭椿 $0.015 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ > 荆条 $0.008 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。方差分析表明：火炬树的光能利用效率与刺槐、臭椿、酸枣的光能利用效率差异均不显著 ($P > 0.05$)；与荆条的光能利用效率差异显著 ($P < 0.05$)。刺槐与荆条的光能利用效率差异显著，与酸枣的光能利用效率差异不显著；臭椿的光能利用效率与荆条的光能利用效率差异不显著 ($P > 0.05$)，与酸枣的光能利用效率差异显著 ($P < 0.05$)。

水分利用效率反映出植物生产过程中的能量转化效率，植物的有效水分利用率反映了植物对水分的利用效率，也在一定程度上反映了植物的耗水性和抗旱性^[18]。由图 4 可知，火炬树、臭椿和刺槐的水分利用效率在上午变化较小，12:00 时有所下降，之后火炬树、刺槐均呈上升的趋势，其中在 18:00 时火炬树的水分利用效率最高，为 $0.053 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ；臭椿在下午 14:00 出现一个谷值，其水分利用效率为 $0.003 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。火炬树、臭椿和刺槐在 16:00 时前对水分的利用率均表现为“V”型曲线，此变化与植物的蒸腾速率有关。午间植物的水分大部分用来进行蒸腾作用，从而相对减少了用于进行光合作用的水分，傍晚由于根部及时补水，进而使水分用于光合作用，提高水分利用效率。荆条在下午 14:00 时出现一个谷值，其水分利用效率为 $0.003 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，之后呈上升的趋势；酸枣的水分利用效率呈现出“W”型曲线，分别于 12:00 时和 16:00 时出现谷值。

5 种木本植物的日平均水分利用效率由高到低依次为：火炬树 $0.014 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ > 刺槐 $0.012 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ > 酸枣 $0.010 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ > 荆条 $0.008 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ > 臭椿 $0.005 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。方差分析显示：火炬树和臭椿之间的水分利用效率差异显著 ($P < 0.05$)，与刺槐差异不显著 ($P > 0.05$)；刺槐与臭椿之间差异显著 ($P < 0.05$)；荆条与酸枣之间的差异不显著 ($P > 0.05$)；而火炬树与灌木树种的水分利用效率差异显著 ($P < 0.05$)。说明火炬树和刺槐具有较高的水分利用效率。

3 讨论与结论

考虑到在植被恢复过程中植物群落是乔木、灌木和草本植物的复合体，因此强调乔、灌、草相结合的原理会使植物群落利用退化生境的资源更加充分。植被恢复必须依赖于当地的自然条件，优先考虑当地的天然植被及其优势种是植被恢复到稳定自然生态系统的前提条件。选择本土优势种进行植被恢复是

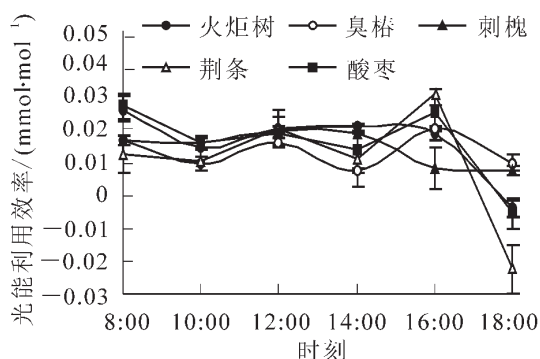


图 3 5 种木本植物的光能利用效率日动态变化

Figure 3 Diurnal variation of instantaneous light use efficiency

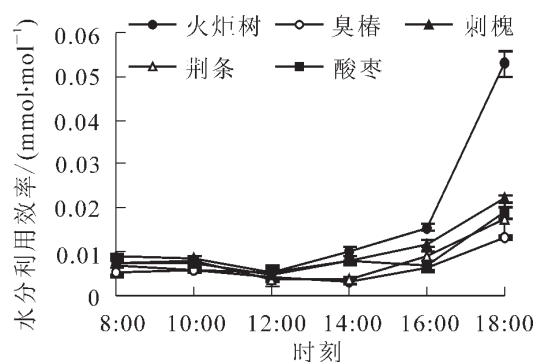


图 4 5 种木本植物的水分利用效率日动态变化

Figure 4 Diurnal variation of instantaneous water use efficiency

退化生境树种选择的关键, 因为部分外来植物种尚存在入侵可能性, 所以不提倡使用外来植物种^[1,8,19-20], 以避免造成当地生物多样性锐减, 形成外来树种构成的单优群落而引起本土植物数量下降的可能。5 种木本植物中, 臭椿、荆条、酸枣为本土树种, 刺槐与火炬树均属于外来树种。尽管刺槐在西北干旱地区的植被建设中功不可没^[21], 火炬树亦在退耕还林植被恢复中发挥了极大地作用^[22], 但它们仍是颇具争议的树种^[23-25]。使用外来种需经历一个漫长的试验过程, 因此, 刺槐和火炬树作为该区的植被恢复树种还需慎重考虑^[26,28]。植被或群落植物组分的完整与和谐, 意味资源充分利用, 种间关系协调, 因而改善退化环境。促进演替进程的生态效果更为理想^[27]。

采取优先选择本土灌木和草本植物为主要组分的自然恢复方式, 并采取适宜的人为措施加速植被演替进程, 增加群落内部植物组分的空间异质性以及自然生态系统的季节动态, 提高空间和时间上不均匀资源的利用效率, 最终形成结构合理、功能完善的天然植被^[20,27-28]。在太行山低山丘陵区退化生境中, 强光、干旱、贫瘠及水分、养分的流失是限制植物生长的关键因子组合。因此, 提高植物的光能利用效率和水分利用效率是该区植被恢复的重要问题^[26]。在该区进行植被恢复可通过增加群落内部组分的空间和时间异质性进行植被组合配置。本研究仅针对 5 种木本植物在秋季光合日进程、光能和水分利用效率进行了测定分析, 火炬树、刺槐、酸枣的日平均净光合速率、光能利用效率均较臭椿、荆条高; 火炬树、刺槐、酸枣的水分利用效率较臭椿、荆条高; 而酸枣的水分利用效率日变化与其他 4 种的水分利用效率日变化存在时间上的分异现象。若选择火炬树、刺槐和酸枣进行合理搭配进行植被恢复, 可以在高温强光季节有效提高该地区的剩余光能利用率, 可通过这 3 种树种在水分利用方面的分异现象有效提高该地区稀缺资源水分的利用效率。但是, 考虑到所研究的树种在其生境中生长存在一定的年际变化, 且种间关系能否形成和谐的生态关系, 需要在整个生长季甚至连续多年对 5 种树种的光合生理指标进行跟踪测定研究, 这样才能为该地区的树种选择提供更为可靠的理论依据。

通过分析 5 种木本植物的光合日进程测定结果, 其净光合速率均表现为单峰型, 最大净光合速率均出现在中午 12:00 时, 证实所测定的 5 种木本植物在秋季均未出现光合午休现象。综合 5 种木本植物光合生理参数的分析结果, 认为火炬树、刺槐、荆条和酸枣比臭椿在高温强光季节利用强光的能力强。光能利用效率是表征植物固定太阳辐射能的效率指标, 系指植物通过光合作用将所截获、吸收的能量转化为有机干物质的效率^[30]。5 种木本植物的光能利用效率分析结果显示, 火炬树的光能利用效率最高, 其次是刺槐、酸枣、臭椿和荆条。综合上述 5 个树种的光能利用效率, 并与本土树种臭椿、酸枣和荆条相比较, 外来树种火炬树与刺槐均表现出较强的光合能力和光能利用效率。

除酸枣外, 其余 4 种木本植物的水分利用效率的日变化均呈现“V”型曲线, 酸枣的水分利用效率日变化呈“W”型。火炬树与刺槐水分利用效率较高, 灌木树种酸枣的水分利用效率也较高。结合水分利用效率日变化, 酸枣与火炬树、刺槐、臭椿和荆条的水分利用效率之间形成时间分异现象。因此, 结合 5 种木本植物的光合日进程特性、光能利用效率和水分利用效率, 考虑到植被重建恢复原则以及种间关系的生态和谐, 外来树种具较强的光能及水分利用效率是其具有入侵性的表现之一^[31]。因此, 在太行山低山丘陵区需慎重使用而不是广泛栽植外来树种火炬树。

参考文献:

- [1] MIYAWAKI A. Restoration of urban green environments based on the theories of vegetation ecology [J]. *Ecol Eng*, 1998, **11**: 157 – 165.
- [2] SAUCER L J. *The Once and Future Forest: A Guide to Forest Restoration Strategies* [M]. Covelo: Island Press, 1998.
- [3] 彭少麟. 恢复生态学与退化生态系统的恢复[J]. 中国科学院院刊, 2000, **15** (3): 188 – 192.
- PENG Shaolin. Restoration ecology and restoration of degraded ecosystems [J]. *Chin Acad Sci*, 2000, **15** (3): 188 – 192.
- [4] 张明如, 翟明普, 尹昌君, 等. 火炬树克隆分株前后端水平侧根直径不对称性分析[J]. 林业科学, 2005, **41** (6): 65 – 72.
- ZHANG Mingru, ZHAI Mingpu, YIN Changjun, *et al.* Analysis on asymmetry of horizontal lateral root diameter in clonal ramets of *Rhus typhina* [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41** (6): 65 – 72.
- [5] 张明如, 温国胜, 颜文洪, 等. 太行山低山丘陵区火炬树克隆分株的生长策略[J]. 浙江林学院学报, 2008, **25** (3): 282 – 288.
- ZHANG Mingru, WEN Guosheng, YAN Wenhong, *et al.* Growth strategy of *Rhus typhina* clonal ramets in the hilly area of the Taihang Mountains [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, **25** (3): 282 – 288.
- [6] ANDY P, DOBSON A P, BRADSHAW A D, *et al.* Hope for the future: restoration ecology and conservation biology [J]. *Science*, 1997, **277** (25): 515 – 522.
- [7] 蔡虹, 刘金铜, 王建江. 太行山低山丘陵区牧草引种的气候生态适应性研究[J]. 生态学杂志, 1999, **18** (2): 22 – 25.
- CAI Hong, LIU Jintong, WANG Jianjiang. Climate adaption of herbage in the drought hill of Taihang Mountains [J]. *Chin J Ecol*, 1999, **18** (2): 22 – 25.
- [8] 王仁卿, 滕原一绘, 尤海梅. 森林植被恢复的理论和实践: 用乡土树种重建当地森林——宫胁森林重建法介绍[J]. 植物生态学报, 2002, **26** (增刊): 133 – 139.
- WANG Renqing, FUJIWA K, YOU Haimei. Theory and practices for forest vegetation restoration: native forest with native trees introduction of the Miyawaki's method for reconstuction of “environmental protection forest (Ecological method to reforestation)” [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2002, **26** (supp): 133 – 139.
- [9] 樊巍, 田朝阳. 太行山低山丘陵区抗旱造林及水分管理技术[J]. 浙江林学院学报, 2004, **21** (4): 398 – 403.
- FAN Wei, TIAN Chaoyang. Technologies of drought-resistant afforestation and moisture management in the hilly region of Taihang Mountain [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2004, **21** (4): 398 – 403.
- [10] 张明如, 翟明普, 王学勇. 太行山低山丘陵区植被恢复构建的生态对策和途径[J]. 中国水土保持科学, 2006, **4** (2): 75 – 81.
- ZHANG Mingru, ZHAI Mingpu, WANG Xueyong. Ecological strategies and approaches of vegetation restoration in the hilly area of Taihang Mountain [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2006, **4** (2): 75 – 81.
- [11] 尤鑫, 龚吉蕊, 葛之葳, 等. 2 种杂交杨叶绿素荧光特性及光能利用[J]. 植物生态学报, 2009, **33** (6): 1148 – 1155.
- YOU Xin, GONG Jirui, GE Zhiwei, *et al.* Light energy utilization and chlorophyll fluorescence in two crossbreed poplars [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, **33** (6): 1148 – 1155.
- [12] 王凯, 朱教君, 于立忠, 等. 遮阴对黄波罗幼苗的光合特性及光能利用效率的影响[J]. 植物生态学报, 2009, **33** (5): 1003 – 1012.
- WANG Kai, ZHU Jiaojun, YU Lizhong, *et al.* Effects of shading on the photosynthetic characteristics and light use efficiency of *Phellodendron amurense* seed [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, **33** (5): 1003 – 1012.
- [13] 应叶青, 吴家胜, 戴文圣, 等. 桧木苗期光合特性研究[J]. 浙江林学院学报, 2004, **21** (4): 366 – 370.
- YING Yeqing, WU Jiasheng, DAI Wensheng, *et al.* Photosynthetic characteristics of *Eurya muricata* at seedling stage [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2004, **21** (4): 366 – 370.
- [14] 黄成林, 傅松玲, 梁淑云, 等. 5 种攀缘植物光合作用与光因子关系的初步研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (7): 1131 – 1134.
- HUANG Chenglin, FU Songling, LIANG Shuyun, *et al.* Relationships between light and physiological characters of five climbing plant [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (7): 1131 – 1134.

- [15] 田大伦, 罗勇, 项文化, 等. 樟树幼树光合特性及其对 CO₂ 浓度和温度升高的响应[J]. 林业科学, 2004, **40** (5): 89 – 92.
TIAN Dalun, LUO Yong, XIANG Wenhua, *et al.* Photosynthetic characteristics of *Cinnamomum camphora* and its response to elevation of CO₂ and temperature [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40** (5): 89 – 92.
- [16] 张明如, 翟明普, 温国胜, 等. 太行山退化生境主要乔木树种光合日进程分析[J]. 浙江林学院学报, 2005, **22** (5): 475 – 480.
ZHANG Mingru, ZHAI Mingpu, WEN Guosheng, *et al.* Photosynthesis diurnal courses of main species in degraded habitat of Taihang Mountains [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2005, **22** (5): 475 – 480.
- [17] 林夏珍, 卢婷. 遮光对窄头囊吾形态及光合特性的影响[J]. 浙江林学院学报, 2008, **25** (5): 614 – 618.
LIN Xiazhen, LU Ting. Morphological and photosynthetic characteristics of *Ligularia stenocephala* with shading [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, **25** (5): 614 – 618.
- [18] 赵思金. 北方地区 2 种主要类型裸露坡面植被恢复及生态功能评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
ZHAO Sijin. *Study on Vegetation Restoration and Evaluation of Their Ecological Function on Two Main Types of Bare Slope in the North* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [19] YOUNG T P. Restoration ecology and conservation biology [J]. *Biol Conserv*, 2000, **92**: 73 – 83.
- [20] 解焱. 恢复中国的天然植被[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 7 – 18.
- [21] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被恢复与持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [22] 王丽香. 退耕还林工程的优良树种——火炬[J]. 河北林业科技, 2002 (6): 49.
WANG Lixiang. *Rhus typhina* using in the project of conservation of farmland back to forests [J]. *J Hebei For Sci Technol*, 2002 (6): 49.
- [23] 北京生态学会. 火炬树未对北京地区的自然生态系统构成威胁[J]. 植物生态学报, 2006, **30** (1): 190.
Beijing Ecological Society. *Rhus typhina*, an introduced plant, has not significantly threatened the natural ecosystems in Beijing [J]. *J Plant Ecol*, 2006, **30** (1): 190.
- [24] 蒋高明. 绿色奥运要警惕外来物种入侵[J]. 生命世界, 2004 (4): 6.
JIANG Gaoming. Green Olympics to be alert to alien species [J]. *Life World*, 2004 (4): 6.
- [25] 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.
LIU Quanru, YU Ming, ZHOU Yunlong. A preliminary study on the invasive plants in Beijing [J]. *J Beijing Norm Univ Nat Sci*, 2002, **38** (3): 399 – 404.
- [26] 张明如, 翟明普, 王学勇, 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.
ZHANG Mingru, ZHAI Mingpu, WANG Xueyong, *et al.* A study on the characteristics of the growth and the biomass of clonal ramets in *Rhus typhina* [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40** (3): 39 – 45.
- [27] 常杰, 葛滢. 生态学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.
- [28] 翟明普. 西北地区植被恢复与建设的原则[J]. 中国水土保持科学, 2003, **1** (1): 60 – 63.
ZHAI Mingpu. Concept for vegetation rehabilitation and construction in the north-west region of China [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2003, **1** (1): 60 – 63.
- [29] 张明如. 太行山低山丘陵区植被恢复机理与构建模式[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
ZHANG Mingru. *The Mechanisms of the Vegetation Restoration and the Reconstruction Model in the Hilly Area of Taihang Mountains* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2004.
- [30] 赵育民, 牛树奎, 王军邦, 等. 植被光能利用率研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, **26** (9): 1471 – 1477.
ZHAO Yumin, NIU Shukui, WANG Junbang, *et al.* Light use efficiency of vegetation: a review [J]. *Chin J Ecol*, 2007, **26** (9): 1471 – 1477.
- [31] 郑丽, 冯玉龙. 入侵植物的生理生态特性对碳积累的影响[J]. 生态学报, 2005, **25** (6): 1430 – 1438.
ZHENG Li, FENG Yulong. The effects of ecophysiological traits on carbon gain in invasive plants [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (6): 1430 – 1438.