

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

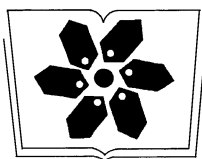
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 23 期
Vol.30 No.23
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 23 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

1940—2002 年长江中下游平原乡村景观区域中耕地类型及其土壤氮磷储量的变化	武俊喜,程 序,焦加国,等 (6309)
海洋生态资本概念与属性界定	陈 尚,任大川,李京梅,等 (6323)
海洋生态资本价值结构要素与评估指标体系	陈 尚,任大川,夏 涛,等 (6331)
黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与 N、P 分布格局及其循环特征	杜有新,潘根兴,李恋卿,等 (6338)
长白山阔叶红松林样地槭属树木木生真菌的群落组成和分布	魏玉莲,戴玉成,袁海生,等 (6348)
内蒙古退化荒漠草原土壤细菌群落结构特征	吴永胜,马万里,李 浩,等 (6355)
盐度对尖瓣海莲幼苗生长及其生理生态特性的影响	廖宝文,邱凤英,张留恩,等 (6363)
基于树轮火疤塔河蒙克山樟子松林火灾的频度分析	胡海清,赵致奎,王晓春,等 (6372)
不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响	赵紫华,石 云,贺达汉,等 (6380)
黑河中游荒漠灌丛斑块地面甲虫群落分布与微生境的关系	刘继亮,李锋瑞,刘七军,等 (6389)
刺槐树冠光合作用的空间异质性	郑 元,赵 忠,周 慧,等 (6399)
南海北部夏季基础生物生产力分布特征及影响因素	宋星宇,刘华雪,黄良民,等 (6409)
怒江三种裂腹鱼属鱼类种群遗传结构	岳兴建,汪登强,刘绍平,等 (6418)
大型水生植物对重金属的富集与转移	潘义宏,王宏镔,谷兆萍,等 (6430)
依据大规模捕捞统计资料分析东黄渤海白姑鱼种群划分和洄游路线	徐兆礼,陈佳杰 (6442)
正交试验法分析环境因子对苦草生长的影响	朱丹婷,李铭红,乔宁宁 (6451)
基于中分辨率 TM 数据的湿地水生植被提取	林 川,官兆宁,赵文吉 (6460)
基于 CVM 的三江平原湿地非使用价值评价	敖长林,李一军,冯 磊,等 (6470)
耕地易地补充经济补偿的生态价值——以江阴市和兴化市为例	方 斌,杨 叶,郑前进,等 (6478)
自然旅游地居民自然保护态度的影响因素——中国九寨沟和英国新森林国家公园的比较	程绍文,张 捷,徐菲菲 (6487)
基于 PSR 方法的区域生态安全评价	李中才,刘林德,孙玉峰,等 (6495)
灌浆期高温对水稻光合特性、内源激素和稻米品质的影响	滕中华,智 丽,吕 俊,等 (6504)
秦岭北坡不同生境栓皮栎实生苗生长及其影响因素	马莉薇,张文辉,薛瑶芹,等 (6512)
子午岭三种生境下辽东栎幼苗定居限制	郭 华,王孝安,朱志红 (6521)
温度、盐度对龟足胚胎发育和幼虫生长的联合影响	饶小珍,林 岗,张殿彩,等 (6530)
锡林郭勒盟气候干燥度的时空变化规律	王海梅,李政海,韩国栋,等 (6538)
北京市水足迹及农业用水结构变化特征	黄 晶,宋振伟,陈 阜 (6546)
延安北部丘陵沟壑区退耕还林(草)成效的遥感监测	孙智辉,雷延鹏,卓 静,等 (6555)
冰川前缘土壤微生物原生演替的生态特征——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例	王晓霞,张 涛,孙 建,等 (6563)
储藏方式和时间对三峡水库消落区一年生植物种子萌发的影响	申建红,曾 波,施美芬,等 (6571)
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	刘万德,苏建荣,李帅锋,等 (6581)
青藏高原高寒矮嵩草草甸碳增汇潜力估测方法	曹广民,龙瑞军,张法伟,等 (6591)
基于 CEVSA2 模型的亚热带人工针叶林长期碳通量及碳储量模拟	顾峰雪,陶 波,温学发,等 (6598)
太原盆地土壤呼吸的空间异质性	张义辉,李洪建,荣燕美,等 (6606)
专论与综述	
热带森林碳汇或碳源之争	祁承经,曹福祥,曹受金 (6613)
景观对河流生态系统的影响	欧 洋,王晓燕 (6624)
自由空气中臭氧浓度升高对大豆的影响	杨连新,王云霞,赵秩鹏,等 (6635)
研究简报	
基于生态系统服务价值的区域生态补偿——以山东省为例	王女杰,刘 建,吴大千,等 (6646)
鹤伴山国家森林公园土壤甲螨群落结构	许士国,付荣恕 (6654)
栓皮栎人工林树干液流对不同时间尺度气象因子及水面蒸发的响应	桑玉强,张劲松,孟 平,党宏忠,等 (6661)
赤眼蜂发育速率对梯度恒温的响应	陈洪凡,岑冠军,黄寿山 (6669)
学术信息与动态	
GIS 和遥感技术在生态安全评价与生物多样性保护中的应用	李文杰,张时煌 (6674)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 374 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 42 * 2010-12	

刺槐树冠光合作用的空间异质性

郑元, 赵忠*, 周慧, 周靖靖

(西北农林科技大学 西部环境与生态教育部重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 林木冠层是森林与外界环境相互作用最直接的部分, 冠层光合作用是研究森林生产力的基础。为了深入了解冠层内部光合作用的差异性, 以陕西省永寿县马莲滩流域阳坡和阴坡立地的刺槐林为研究对象, 对比分析了光合速率(A_n)、蒸腾速率(E)、水分利用效率(WUE)、气孔导度(g_s)、羧化效率(V_c)、水汽压亏缺(VPD)、气孔限制值(ls)、光合有效辐射(PAR)、空气温度(T_a)在树冠不同层次、不同方位, 以及不同坡向之间的差异性。结果表明, 刺槐树冠不同层次的光合作用差异性显著, 大部分光合生理生态指标表现为: 上 > 中 > 下。对于阳坡刺槐, VPD 、 T_a 、 g_s 、 E 是影响不同层次 A_n 的主要因子; 对于阴坡刺槐, VPD 、 E 、 PAR 是影响不同层次 A_n 的主要因子。光合作用在刺槐树冠的不同方位没有显著差异, 大多数光合指标变化很小, E 、 ls 、 PAR 、 T_a 是影响不同方位 A_n 的主要因子。对于刺槐冠层内部的任何层次或方位, 阴坡刺槐具有更高的日均 A_n 、 E 、 V_c 、 VPD 、 ls , 而阳坡刺槐具有更高的日均 WUE 、 g_s 、 PAR 、 T_a 。阳坡刺槐树冠中层西方和阴坡中层东方的日总光合速率值, 可以分别代表阳坡和阴坡刺槐整个冠层的日总光合速率。研究认为, 在冠层水平模拟和估计森林生产力时, 必须考虑冠层光合作用的空间异质性, 对于从单木到林分的尺度推演和模型拟合具有重要的意义。

关键词: 刺槐; 光合作用; 冠层; 坡向; 空间异质性

Spatial heterogeneity of canopy photosynthesis in black locust plantations

ZHENG Yuan, ZHAO Zhong*, ZHOU Hui, ZHOU Jingjing

Northwest A & F University/Key Laboratory of Environment and Ecology in Western China of Ministry of Education, Yangling 712100, China

Abstract: Forest canopy is a direct part of a forest interacting with its environment. At the plantation level, there is a huge spatial heterogeneity of forest canopy. At different canopy levels and canopy orientations, energy transmission, solar radiation and water evaporation differ significantly, which may cause the spatial heterogeneity of canopy photosynthesis. Obviously, the spatial heterogeneity of canopy photosynthesis should be considered when forest primary productivity is estimated. However, little information is currently available about the spatial heterogeneity of canopy photosynthesis. To better understand the spatial difference in photosynthesis at the canopy level, we analyzed the net CO_2 assimilation rate (A_n), transpiration rate (E), water use efficiency (WUE), stomatal conductance (g_s), carboxylation efficiency (V_c), vapor pressure deficit (VPD), stomatal limitation (ls), photosynthetic active radiation (PAR), air temperature (T_a) at different canopy levels and orientations of black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations located at sunny and shady slopes at the Maliantan valley of Yongshou county, Shaanxi Province. Photosynthetic parameters at different canopy levels of black locust plantations have showed significantly different values. Irrespective of slope aspects, values for A_n , E , g_s , V_c , and PAR follow the pattern: the upper canopy is more than the middle canopy which is more than the lower canopy. In contrast, values for VPD , ls , and T_a show the pattern: the lower canopy is more than the middle canopy which is more than the upper canopy. The contributions of main photosynthetic parameters to A_n at different canopy levels or orientations of black locust plantations were determined using path analysis. For the black locust plantation on the sunny slope, VPD , T_a , g_s , E are the main factors to impact A_n at different canopy levels. For the black locust plantation on the shady slope, VPD , E , PAR are the main factors to impact A_n at different canopy levels. No marked difference was observed in photosynthesis at

基金项目: 国家“十一五”科技攻关计划项目(2006BAD03A1207)

收稿日期: 2009-12-31; 修订日期: 2010-07-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaozh@nwsuaf.edu.cn

different orientations of black locust canopies both on sunny and shady slopes. Values of most photosynthetic parameters change little and E , ls , PAR , T_a are the main factors to influence A_n at different orientations of the canopies. For any canopy level and/or orientation, the black locusts have higher daily mean A_n , E , V_c , VPD , ls on the shady slope, while they show greater daily mean WUE , g_s , PAR , T_a on the sunny slope. The daily total A_n of black locust plantation at the west middle canopy level on the sunny slope and at the east middle level on the shady slope can represent the daily total A_n of the whole canopies on the sunny and shady slopes, respectively. These results suggest that spatial heterogeneity of canopy photosynthesis in black locust plantations should be considered when forest productivity is simulated at the canopy level, which may have a great implication for the simulation of forest productivity from a single tree to the plantation level. Our observations also imply that black locust plantations on the shady slope present better photosynthetic capacities than those on the sunny slope, which may lead to greater afforestation survival rates and/or higher primary productivities of this species on the shady slope compared to those on the sunny slope on the Loess Plateau.

Key Words: *Robinia pseudoacacia*; photosynthesis; canopy; slope aspect; spatial heterogeneity

绿色植物的光合作用是自然界中将无机碳转变为有机碳的主要途径,是大气二氧化碳重要的汇,也是森林生态系统碳收入的唯一途径和碳素循环过程的开始。因此,光合作用在植物界甚至全球生态系统能量与物质循环中都具有极其重要的作用^[1-2]。林木冠层是森林与外界环境相互作用最直接的部分,成为全球生物多样性和气候变化研究的焦点^[3-5]。由于太阳辐射和水分蒸散在林冠中传递的复杂过程,可能直接导致了光合作用在林冠中的空间异质性^[6-8],所以近年来国内外学者对冠层光合作用进行了大量研究,发展了“大叶模型”、“二叶模型”、“多层模型”等冠层光合作用模型^[9-14],但这些模型大多基于理论经验参数的扩展,而关于冠层不同部位实测光合作用的差异,以及主要生理生态影响因子筛选的报道非常的少。

黄土高原的生态环境脆弱,严重影响了黄河流域甚至整个国家的生态安全。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是黄土高原的主要造林树种之一,由于其具有速生、适应性强、固氮的特性^[15-17],在黄土高原的植被恢复和生态建设中扮演着重要的角色^[18]。前人对刺槐光合的研究主要针对盆栽幼苗^[19-21],对林冠光合作用的空间异质性研究尚未见报道。

本文以陕西省永寿县马莲滩流域阳坡和阴坡立地的刺槐林为对象,通过实际测量树冠内不同层次和不同方位的光合作用参数,对比分析它们在各部位的差异,并试图解释造成这种差异的原因,这对于在冠层水平精确估算刺槐的光合能力具有重要意义。此外,分析了阳坡和阴坡刺槐光合作用的差异,以期为黄土高原干旱和半干旱地区的造林再造林活动提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地设在陕西省永寿县马莲滩流域,地处黄土高原南部的残塬沟壑区,东经 $108^{\circ}08'$ — $108^{\circ}10'$,北纬 $34^{\circ}49'$ — $34^{\circ}47'$,海拔 1116—1276 m;属温带大陆性季风气候;年平均气温 10.8°C ,年极端最高气温 38.9°C ,极端最低气温 -18°C 。年平均降雨量 601.6 mm。多集中于 7、8、9 月份,占全年雨量的 52.2%—52.6%。年平均自然植被蒸腾蒸发量 807.4 mm。地带性土壤为淋溶性褐土和黑垆土等。土壤平均有机质含量 1.0%,碱解氮 $44.2\text{ }\mu\text{g/g}$,速效磷 $164.5\text{ }\mu\text{g/g}$,速效钾 $189.1\text{ }\mu\text{g/g}$,缺氮贫磷,氮磷比例失调。土壤含水量采用烘干法计算:土壤含水量 = (土壤鲜重 - 土壤干重)/土壤干重 $\times 100\%$ 。

以研究地 18a 生刺槐人工林为研究对象,分别从阳坡和阴坡立地上选择 3 个林相整齐的刺槐林分,每个林分中随机设置 3 块样地($20\text{ m} \times 20\text{ m}$),进行每木检尺,确定平均木,并从中选择 1 株测定样木。研究地概况见表 1。

表 1 刺槐林样地概况
Table 1 Survey of the *Robinia pseudoacacia* plantation plots

林分 Plantation	立地类型 Site type	坡度 Slope/(°)	树高 Height/m	胸径 Diameter/cm	冠高 Canopy height/m	冠幅 Canopy diameter/m	土壤含水量 Soil moisture content/%	林分密度 Density/ (棵/hm ²)
1	阳向缓坡上部	6.6	10.2 ± 0.6	8.6 ± 0.4	4.4 ± 0.2	2.9 ± 0.4	11.8 ± 1.1	1695
2	阳向缓坡上部	8.9	9.6 ± 0.5	7.8 ± 0.4	4.0 ± 0.2	2.6 ± 0.3	11.7 ± 1.2	1740
3	阳向缓坡上部	7.3	11.1 ± 0.6	9.3 ± 0.4	4.8 ± 0.3	2.8 ± 0.4	11.9 ± 1.4	1650
4	阴向缓坡上部	7.7	9.0 ± 0.5	7.3 ± 0.4	3.9 ± 0.2	3.2 ± 0.4	16.5 ± 1.4	1710
5	阴向缓坡上部	8.2	8.5 ± 0.4	6.8 ± 0.3	3.8 ± 0.2	3.0 ± 0.5	16.8 ± 1.6	1770
6	阴向缓坡上部	6.9	8.2 ± 0.4	6.2 ± 0.3	3.5 ± 0.2	2.9 ± 0.4	16.3 ± 1.8	1815

1.2 气体交换测量

将样木树冠平均分成上、中、下 3 个冠层,用 GPS 定位东、南、西、北 4 个方位,于 2008 年 8 月中上旬进行气体交换测量,在各个测定日的 6:00—18:00,每 2h 按照冠层顺序依次从 4 个方位随机选择一生长正常的枝条,取前端第 5—7 片成熟健康的叶片,采用便携式光合作用系统(Li-Cor 6400; Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)原位测定气体交换进程,具体包括:光合速率 A_n 、蒸腾速率 E 、瞬时水分利用效率 $WUE(A_n/E)$ 、气孔导度 g_s 、瞬时羧化效率 $V_c(A_n/C_i)$ 、水汽压亏缺 VPD 、气孔限制值 $ls(1 - C_i/C_a)$ 、光合有效辐射(PAR)、空气温度(T_a)等光合生理生态指标。

1.3 统计分析

数据的统计分析通过 SPSS 13.0 完成,文中图形在 Origin 7.5 科技绘图软件中完成。文中数据均由平均值 ± 标准误(SE)表示。本研究共选择 9 株样木。分别计算每株样木树冠的(上、中、下 3 个层次,或东、南、西、北 4 个方位)的 A_n 、 E 、 WUE 、 g_s 、 V_c 、 VPD 、 ls 、 PAR 、 T_a 的全日平均值(即,各指标在日变化中的 6:00—18:00 共 7 个测定时间点的平均值),得到各样木上述指标的日均值。然后,分别对刺槐树冠不同层次或不同方位的日均值进行方差分析,从树冠各部位的日均值角度来探讨刺槐不同部位之间的差异性。采用多重比较分析中的邓肯分析(Duncan's test)进行差异检验($n=9$),不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

通径分析可以把各生理生态因子对光合速率的相关系数细分为直接和间接的影响,然后确定每个因子对总体相关性的相对贡献大小^[22-23]。在本文中,设定 A_n 为因变量, g_s 、 E 、 VPD 、 ls 、 PAR 、 T_a 为自变量,各因子的直接通径系数和间接通径系数的计算参照文献^[24]。

2 结果与分析

2.1 刺槐树冠光合作用在不同层次的差异

2.1.1 光合生理生态指标在上、中、下层次的差异

为了了解刺槐树冠光合作用在不同层次的变化规律,在上、中、下 3 个层次分别测定了刺槐的光合生理生态指标。无论在阳坡还是阴坡,尽管刺槐 3 个层次的光合速率 A_n 在日变化的动态方面有着相似的方式,但 A_n 在树冠不同层次均表现出:上 > 中 > 下的规律。在日进程中的大部分测定时间点,阳坡和阴坡刺槐的蒸腾速率 E 、气孔导度 g_s 、羧化效率 V_c 、光合有效辐射 PAR 都表现出:上 > 中 > 下的结果;相反,水汽压亏缺 VPD 、气孔限制值 ls 、空气温度 T_a 显示出:下 > 中 > 上的趋势;而水分利用效率 WUE 在阳坡为:下 > 中 > 上,在阴坡则为:上 > 中 > 下(图 1)。

对这些指标在不同层次日均值的方差分析结果见表 2。阳坡刺槐不同层次的日均 A_n 之间的差异性都达到了显著水平,阴坡刺槐上层日均 A_n 比中层高了 9.31%,而中层 A_n 比下层显著高出 37.38%; E 和 PAR 在阳坡均为上层高于中层且中层显著高于下层,在阴坡则表现为 3 个层次之间都为显著差异;阳坡和阴坡的 g_s 具有相同的趋势,即上层显著高于中层,中层又显著高于下层; V_c 表现为上层和中层都显著高于下层;而 VPD 、 ls 、 WUE 大都为下层显著高于中层和上层; T_a 虽然呈现出随层次的降低而升高的趋势,但各层之间的差异并不显

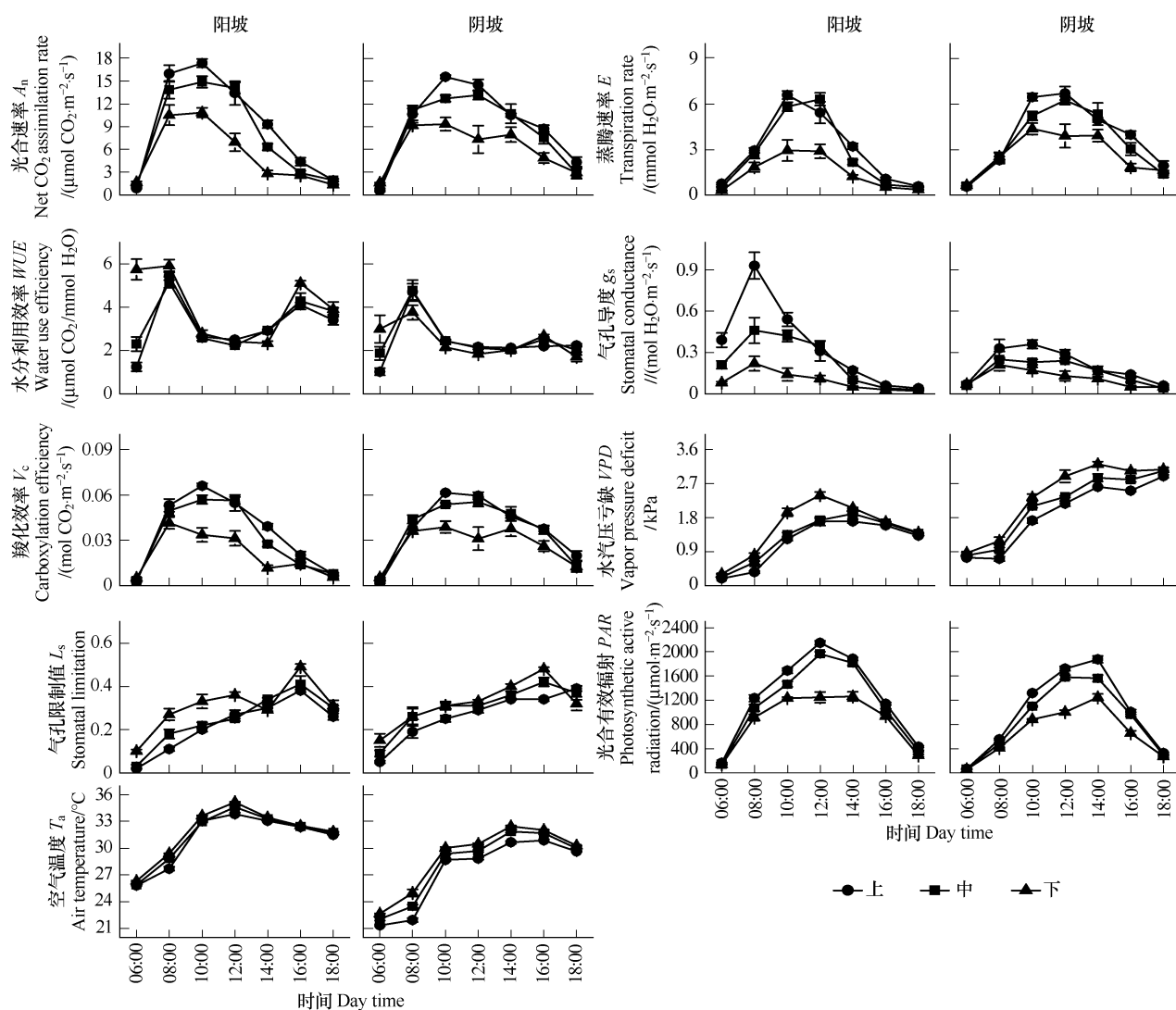


图1 刺槐树冠不同层次光合生理生态指标的日变化

Fig. 1 Diurnal dynamics of photosynthetic ecophysiological parameters in different canopy layers of black locust

著。可见,不同的光合生理生态指标在各层次之间表现出很大的差异。

表2 刺槐树冠不同层次光合指标的方差分析

Table 2 Variance analysis of photosynthetic parameters in different canopy layers of black locust

光合指标 Parameters	阳坡 Sunny slope			阴坡 Shady slope		
	上 Upper	中 Middle	下 Lower	上 Upper	中 Middle	下 Lower
光合速率 $A_n/(\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})$	9.06 ± 0.64a	7.89 ± 0.52b	5.25 ± 0.56c	9.28 ± 0.47a	8.49 ± 0.65a	6.18 ± 0.79b
蒸腾速率 $E/(\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})$	2.94 ± 0.22a	2.68 ± 0.20a	1.43 ± 0.24b	3.84 ± 0.24a	3.46 ± 0.32b	2.68 ± 0.36c
水分利用效率 $WUE/(\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O})$	3.18 ± 0.13b	3.33 ± 0.19b	4.03 ± 0.22a	2.41 ± 0.11a	2.54 ± 0.18a	2.45 ± 0.22a
气孔导度 $g_s/(\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})$	0.35 ± 0.04a	0.23 ± 0.03b	0.09 ± 0.02c	0.20 ± 0.02a	0.16 ± 0.02b	0.11 ± 0.02c
羧化效率 $V_c/(\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})$	0.035 ± 0.002a	0.031 ± 0.002a	0.020 ± 0.002b	0.038 ± 0.002a	0.036 ± 0.003a	0.027 ± 0.004b
水汽压亏缺 VPD/kPa	1.15 ± 0.04b	1.26 ± 0.03b	1.51 ± 0.04a	1.91 ± 0.04b	2.12 ± 0.05b	2.37 ± 0.08a
气孔限制值 l_s	0.22 ± 0.01b	0.25 ± 0.02b	0.31 ± 0.02a	0.26 ± 0.01b	0.30 ± 0.02a	0.32 ± 0.02a
光合有效辐射 $PAR/(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$	1240 ± 44a	1122 ± 40a	860 ± 30b	980 ± 31a	863 ± 35b	646 ± 23c
空气温度 $T_a/^\circ\text{C}$	31.05 ± 1.10a	31.40 ± 1.16a	31.77 ± 1.12a	27.43 ± 0.97a	28.30 ± 1.01a	28.99 ± 1.02a

不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著

2.1.2 主要生理生态因子对不同层次光合速率的影响

光合速率 A_n 是植物光合作用强弱的最直接体现,它的发生过程也受到许多内在和外因子的共同影响。为了进一步了解这些影响因子对 A_n 的直接和间接作用在树冠不同层次的异同,利用通径分析分别探讨了主要生理生态因子对各层次 A_n 的影响大小。由表 3 可知,对于阳坡刺槐,在上层和中间层 VPD 、 T_a 、 PAR 对 A_n 的直接作用较大, VPD 、 E 、 T_a 的间接作用较大,在下层 g_s 和 E 分别有最大的直接和间接作用;对于阴坡刺槐,在树冠上层 VPD 、 ls 、 E 对 A_n 的直接作用较大, VPD 、 PAR 、 g_s 的间接作用较大,而在中层和下层 E 、 ls 有最大的直接作用, PAR 、 T_a 有最大的间接作用(表 3)。

表 3 刺槐树冠不同层次生理生态因子对光合速率的通径结果

Table 3 Path analysis in A_n against photosynthetic ecophysiological factors in different canopy layers of black locust

坡向 Slope aspect	因子 Factor	上 Upper		中 Middle		下 Lower	
		直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect
阳坡 Sunny slope	g_s	0.407	0.267	0.418	0.434	0.733	0.185
	E	0.102	0.779	0.070	0.832	0.332	0.500
	VPD	-1.249	1.312	-1.339	1.447	0.010	0.042
	ls	0.295	-0.311	0.287	-0.399	0.304	-0.306
	PAR	0.512	0.230	0.505	0.167	0.090	0.428
	T_a	1.011	-0.701	1.040	-0.668	-0.201	0.361
阴坡 Shady slope	g_s	0.183	0.649	0.288	0.573	0.414	0.396
	E	0.710	0.201	0.770	0.112	0.703	0.175
	VPD	-0.839	0.978	-0.373	0.471	-0.139	0.171
	ls	0.750	-0.433	0.634	-0.324	0.604	-0.404
	PAR	0.062	0.721	-0.025	0.805	-0.027	0.669
	T_a	0.060	0.338	-0.259	0.595	-0.357	0.600

2.2 刺槐树冠光合作用在不同方位的差异

2.2.1 光合生理生态指标在东、南、西、北方位的差异

为了获得 A_n 在刺槐树冠不同方位差异的信息,分别在东、南、西、北 4 个方位测定了 A_n 。阳坡和阴坡刺槐树冠不同方位的 A_n 呈现出基本相同的日进程,且差别不明显。虽然刺槐叶片气体交换的不同指标的日变化动态趋势各不相同,但是无论在阳坡还是阴坡,所有光合生理生态指标在树冠东、南、西、北方位的差别变化都不大(图 2)。

通过进一步方差分析可知,阳坡刺槐的日均 A_n 在 4 个方位表现为:东 > 北 > 南 > 西,而阴坡刺槐的 A_n 则表现为:北 > 南 > 西 > 东,由分析可知,虽然 A_n 在不同方位间表现出微弱的变化,但它们并无显著差异(表 4); V_c 、 VPD 、 PAR 、 T_a 都表现出相似的结果,这些指标在阳坡和阴坡的不同方位之间都没有显著的差异(表 4);4 个方位的 WUE 、 g_s 、 ls 在阳坡差异不显著,而阴坡刺槐的 WUE 和 ls 为西方和北方显著高于东方和南方, g_s 却表现为东方和南方显著高于西方和北方(表 4);刺槐的 E 在阳坡则表现出东方和北方显著高于西方和南方,在阴坡无显著差异(表 4)。

2.2.2 主要生理生态因子对不同方位光合速率的影响

为了弄清刺槐树冠不同方位的光合生理生态因子对 A_n 的直接作用和间接作用,分析了这些因子对 A_n 的通径结果。表 5 显示,对于阳坡刺槐, E 在树冠东、南、西、北 4 个方位都表现出最大的直接作用,而 ls 、 VPD 在东方的间接作用较大, PAR 、 T_a 、 ls 在南、西、北方的间接作用较大;对于阴坡刺槐,各生理生态因子对树冠不同方位 A_n 的影响排序各不相同,但大体趋势表明, ls 、 E 在不同方位有最大的直接作用, PAR 、 T_a 则有最大的间接作用(表 5)。

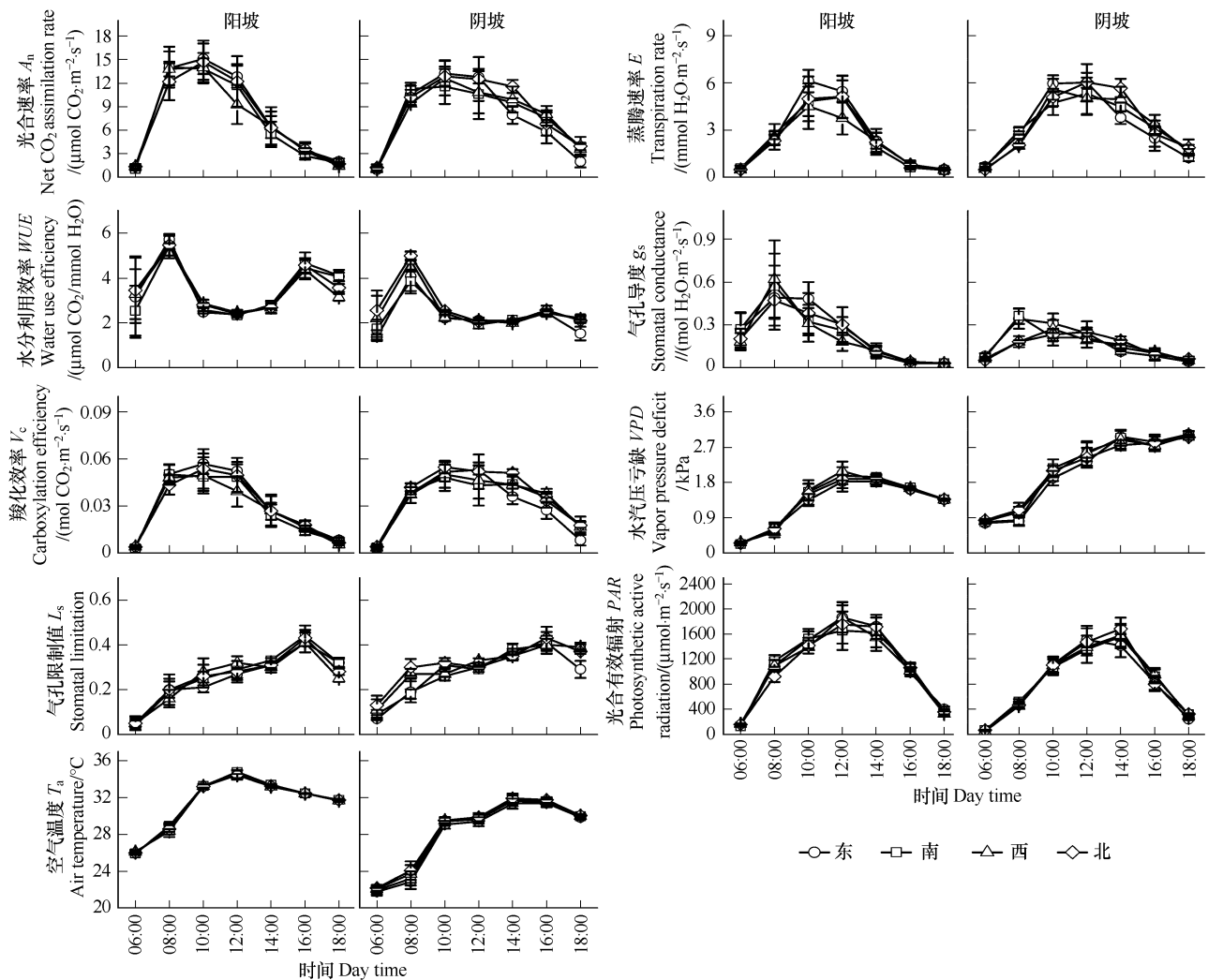


图2 刺槐树冠不同方位光合生理生态指标的日变化

Fig. 2 Diurnal dynamics of photosynthetic ecophysiological parameters in different canopy orientations of black locust

2.3 刺槐树冠光合作用在不同坡向的差异

2.3.1 刺槐日均光合指标在不同坡向的变化

刺槐的光合生理生态指标不仅在树冠不同层次和方位具有不尽相同的差异,而且在黄土高原的不同坡向之间也表现出较大的变化。通过对刺槐的日均光合指标在不同坡向变化的分析,发现无论对于树冠的上、中、下各个层次还是东、南、西、北各个方位,阴坡刺槐大多表现出更高的日均 A_n 、 E 、 V_c 、 VPD 、 L_s ,而阳坡刺槐则具有更高的日均 WUE 、 g_s 、 PAR 、 T_a (图1,图2;表2,表4)。

2.3.2 日总光合速率在刺槐树冠不同部位的对比

通过比较分析,发现刺槐树冠内部12个实测部位叶片的日总光合速率存在着较大的差别,所以先将树冠所有部位的光合速率值加以平均,简单代表整个冠层的光合能力,然后探索了冠层不同部位叶片的光合速率与冠层平均光合速率的接近程度,从而在阳坡和阴坡,分别筛选出了最能代表冠层日总光合速率的测定部位。结果表明,阳坡刺槐树冠的中层西方和阴坡刺槐树冠的中层东方分别与阳坡和阴坡的刺槐冠层平均光合速率最为接近(图3),差值分别仅为 $4.40 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $5.98 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,且均无显著差异。

3 结论与讨论

光合作用及其影响机理历来都是植物生理学家关注的热点,而植物冠层光合作用的空间异质性又成为其中的焦点,是准确估计森林光合生产力的基础^[25]。本研究通过对刺槐树冠不同层次和不同方位叶片的系统

光合测量,获得了光合作用在树冠不同部位是否存在差异的信息,并比较分析了刺槐冠层光合作用在阳坡和阴坡的差异,对于刺槐林生产力由单木到林分的尺度推演和模型耦合有重要的意义。

表 4 刺槐树冠不同方位光合指标的方差分析

Table 4 Variance analysis of photosynthetic parameters in different canopy orientations of black locust

指标 Index	阳坡 Sunny slope				阴坡 Shady slope			
	东 East	南 South	西 West	北 North	东 East	南 South	西 West	北 North
光合速率 A_n /($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	7.84 ± 1.12a	7.23 ± 1.26a	7.10 ± 1.33a	7.43 ± 1.62a	7.61 ± 1.03a	7.94 ± 1.21a	7.92 ± 1.27a	8.45 ± 1.27a
蒸腾速率 E /($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	2.60 ± 0.38a	2.32 ± 0.54b	2.12 ± 0.54b	2.35 ± 0.62ab	3.27 ± 0.38a	3.30 ± 0.48a	3.31 ± 0.51a	3.43 ± 0.55a
水分利用效率 WUE /($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$)	3.56 ± 0.40a	3.49 ± 0.39a	3.45 ± 0.34a	3.55 ± 0.41a	2.25 ± 0.23c	2.38 ± 0.18bc	2.55 ± 0.29ab	2.68 ± 0.23a
气孔导度 g_s /($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	0.24 ± 0.08a	0.22 ± 0.08a	0.21 ± 0.08a	0.22 ± 0.08a	0.17 ± 0.03a	0.16 ± 0.03ab	0.14 ± 0.03c	0.15 ± 0.03bc
羧化效率 V_c /($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	0.031 ± 0.004a	0.028 ± 0.005a	0.027 ± 0.006a	0.029 ± 0.006a	0.031 ± 0.004a	0.033 ± 0.004a	0.034 ± 0.005a	0.036 ± 0.004a
水汽压亏缺 VPD /Kpa	1.26 ± 0.09a	1.34 ± 0.10a	1.33 ± 0.13a	1.31 ± 0.13a	2.09 ± 0.13a	2.14 ± 0.15a	2.16 ± 0.15a	2.14 ± 0.14a
气孔限制值 l_s	0.25 ± 0.03a	0.27 ± 0.03a	0.25 ± 0.03a	0.26 ± 0.04a	0.27 ± 0.03b	0.29 ± 0.02ab	0.30 ± 0.02ab	0.32 ± 0.03a
光合有效辐射 PAR /($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1104 ± 39a	1077 ± 38a	1060 ± 37a	1056 ± 37a	806 ± 29a	832 ± 29a	833 ± 29a	847 ± 30a
空气温度 $T_a/^\circ\text{C}$	31.42 ± 1.11a	31.49 ± 1.11a	31.35 ± 1.11a	31.37 ± 1.12a	27.94 ± 0.99a	28.18 ± 1.00a	28.36 ± 1.00a	28.47 ± 1.01a

不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著

表 5 刺槐树冠不同方位生理生态因子对光合速率的通径结果

Table 5 Path analysis in A_n against photosynthetic ecophysiological factors in different canopy orientations of black locust

坡向 Slope aspect	因子 Factor	东 East		南 South		西 West		北 North	
		直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect
阳坡 Sunny slope	g_s	0.324	0.425	0.434	0.280	0.359	0.337	0.543	0.270
	E	0.666	0.209	0.718	0.165	0.831	0.038	0.734	0.186
	VPD	-0.474	0.541	0.025	0.008	-0.003	-0.017	0.219	-0.196
	l_s	0.478	-0.624	0.365	-0.526	0.469	-0.504	0.408	-0.521
	PAR	0.312	0.412	0.136	0.582	0.031	0.650	-0.011	0.707
	T_a	-0.061	0.384	-0.287	0.557	-0.420	0.594	-0.416	0.699
阴坡 Shady slope	g_s	0.274	0.529	0.447	0.372	0.443	0.481	0.519	0.425
	E	0.898	0.012	0.521	0.375	0.510	0.393	0.504	0.390
	VPD	0.119	-0.210	-0.557	0.557	-0.332	0.443	-0.299	0.407
	l_s	0.591	-0.386	0.583	-0.421	0.516	-0.256	0.440	-0.242
	PAR	-0.102	0.847	0.067	0.667	0.097	0.699	0.018	0.797
	T_a	-0.668	0.820	0.061	0.158	-0.151	0.517	-0.082	0.427

刺槐树冠不同层次的光合作用具有差异性,大部分光合生理生态指标表现出:上 > 中 > 下的规律, VPD 、 T_a 、 g_s 、 E 是导致阳坡刺槐不同层次 A_n 出现差异的主要影响因子,而 VPD 、 E 、 PAR 是导致阴坡刺槐不同层次 A_n 出现差异的主要影响因子。光合作用在阳坡和阴坡刺槐树冠的不同方位没有差异性,4个方位的大多数光合指标的变化都很小, E 、 l_s 、 PAR 、 T_a 是造成刺槐4个方位 A_n 无显著差异的主要原因。阴坡刺槐具有更高的日均 A_n 、 E 、 V_c 、 VPD 、 l_s ,而阳坡刺槐具有更高的日均 WUE 、 g_s 、 PAR 、 T_a ,并确定阳坡刺槐树冠中层西方和阴坡中层东方的日总光合速率值可以代表阳坡和阴坡刺槐整个冠层的日总光合速率。

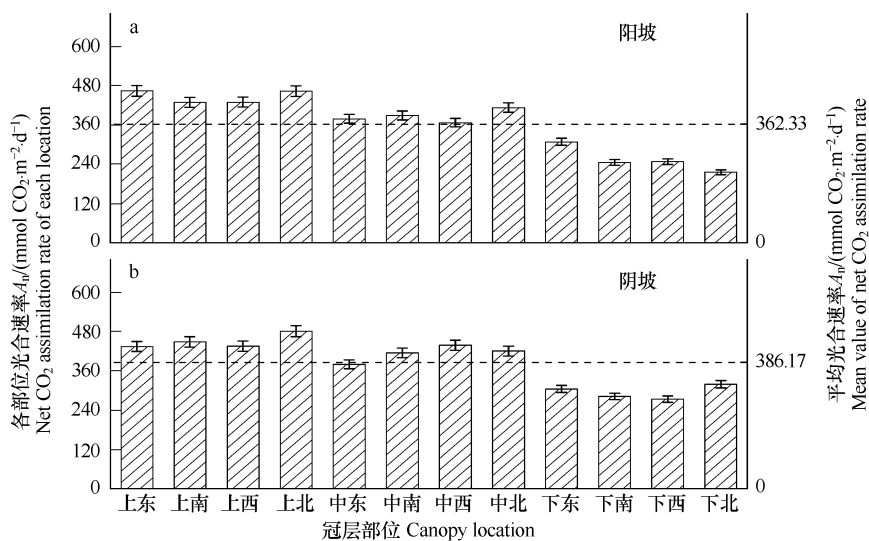


图3 冠层不同部位叶片光合速率的对比

Fig. 3 Contrasts of A_n in leaves in different canopy locations

虚线表示冠层平均光合速率

林木冠层对光能的利用是林冠光合产量的重要进程之一,与林冠的结构和功能特性(包括:冠内生物量密度分布、光吸收和截获方式、冠层叶片的生理生态性质等)密切相关^[26]。Baldocchi 认为,光在冠层中的传递和分配符合比尔定律^[25],光通量从冠层上层到下层呈指数函数衰减。此外,无论对于冠层内叶片的位置还是单叶内色素细胞的位置,在垂直的方向上,其光合能力和气孔导度一般从顶部到底部呈下降趋势,这主要与可利用的光强、叶绿素、叶氮含量等的垂直分布有关^[27-29]。在本研究中,刺槐树冠不同层次的光合生理生态指标表现出显著的差异,进一步表明植物长期生长在自然环境中,由于其冠层的几何结构特征,冠层叶片由上至下接受的光合有效辐射和周围的空气温湿度依次变化,使得树冠内部形成不同等级的微气候环境,导致位于树冠不同高度叶片的光合能力呈现显著差异。

已有研究表明, VPD 可以对 A_n 起到显著的负相关指数影响^[30-32], T_a 则对 A_n 呈正相关非线性影响^[32-33],且 VPD 和 T_a 经常耦合在一起对 A_n 产生综合影响^[34]。本研究结果显示, VPD 和 T_a 在阳坡刺槐树冠的上层和中层都对 A_n 有最大的直接作用和间接作用,该结果与上述结论相一致。一般认为,气孔是植物进行 CO_2 和水汽交换的重要通道, g_s 是反映这种交换能力的关键指标^[35-36]。而且 E 与 g_s 有着十分密切的联系,二者都是影响 A_n 的重要生理指标^[37],这一结论在本研究结果中也得到了体现。前人重点研究了一些树种在不同冠层水平的光合特性,发现叶片的饱和光合速率都表现为:上 > 中 > 下^[38-41]。本研究进一步指出,在 VPD 、 PAR 、 T_a 、 E 、 g_s 等的共同作用下, A_n 也在树冠的垂直方向呈现显著差异。可见,在冠层水平模拟和估算森林生产力,必须考虑冠层光合生理生态特性的空间异质性。

刺槐树冠不同方位的大部分光合生理生态指标的差异性都不显著,无论在阳坡还是阴坡,对 A_n 产生主要影响的 E 、 l_s 、 PAR 、 T_a 在不同方位上也没有表现出很大的差异。目前已有的冠层光合作用模型大多主要模拟各生理生态指标在冠层垂直方向上的梯度变化,并假定它们在水平方向上是匀质的^[42]。本研究在刺槐冠层 4 个水平方向实测的结果进一步验证了这些冠层光合模型的假设是正确合理的,但对于其它地区或树种的光合作用在冠层内部的表现和差异有待进一步研究。

坡向是影响林木光合作用的重要环境因子之一,尤其对于干旱半干旱地区,因为不同坡向之间的微气候条件往往差异显著^[43],对林木的光合作用产生很大的影响,进而影响到该区林分的生产力和分布方式。在本研究中,黄土高原阴坡刺槐具有更高的日均 A_n 、 E 、 V_c 、 VPD 、 l_s ,这主要是由阳坡与阴坡之间不同的光照条件、空气温度、土壤水分等环境因子造成的(表 1,表 2)。一方面,黄土高原阳坡过高的光照和温度限制了刺槐的

光合作用;另一方面,阴坡更多的土壤水分有利于刺槐的生长发育,又因为刺槐是适生性强的不耐阴树种,阴坡刺槐通过发育更大的树冠来捕捉利用更多的光线,从而促进了自身的光合作用。因此,从光合生理生态角度考虑,阴坡刺槐比阳坡刺槐表现出更强的光合能力,这也是导致黄土高原地区阴坡的造林成活率和效果好于阳坡的原因之一。

References:

- [1] Pan R C. Plant Physiology. 4th edition. Beijing: Higher Education Press, 2001: 55-57, 91-95.
- [2] Zhou G S, Wang Y H. Global Ecology. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 82-83.
- [3] Guo M C, Yu P T, Wang Y H, Shen Z X, Shi Z J, Du A P, He C Q. Rainfall interception model of forest canopy: A preliminary study. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(9): 1633-1637.
- [4] Ozanne C M P, Anhuf D, Boulter S L, Keller M, Kitching R L, Komer C, Meinzer F C, Mitchell A W, Nakashizuka T, Dias P L S, Stork N E, Wright S J, Yoshimura M. Biodiversity meets the atmosphere: A global view of forest canopies. Science, 2003, 301(5630): 183-186.
- [5] Wang A Z, Pei T F, Jin C J, Guan D X. Estimation of rainfall interception by broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountains. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(8): 1403-1407.
- [6] Li D Z, Zang R G. The research advances on the structure and function of forest canopy, as well as their temporal and spatial changes. World Forestry Research, 2004, 17(3): 12-16.
- [7] Vierling L A, Wessman C A. Photosynthetically active radiation heterogeneity within a monodominant Congolese rain forest canopy. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(3): 265-278.
- [8] Liu X D, Zhu C Q, Lei J P, Ju G S, Bai R. The distribution of photosynthetic radiation in the canopy of poplar plantation. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(3): 2-7.
- [9] Amthor J S. Scaling CO₂-photosynthesis relationships from the leaf to canopy. Photosynthesis Research, 1994, 39(3): 321-350.
- [10] Leuning R, Dunin F X, Wang Y P. A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy II. Comparison with measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 91(1/2): 113-125.
- [11] Wang Y P, Leuning R. A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy I. Model description and comparison with a multi-layered model. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 91(1-2): 89-111.
- [12] Leuning R, Kelliher F M, Depury D G G, Schulze E D. Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration-scaling from leaves to canopies. Plant, Cell and Environment, 1995, 18(10): 1183-1200.
- [13] Xiao W F. A study on photosynthesis: Modeling and scaling up from a leaf to canopy in a Chinese fir plantation. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(6): 621-628.
- [14] Zhang X Q, Xu D Y, Zhao M S. Review on forest canopy structure, radiation transfer and canopy photosynthesis. Forest Research, 1999, 12(4): 411-421.
- [15] Burner D M, Pote H, Ares A. Management effects on biomass and foliar nutritive value of *Robinia pseudoacacia* and *Gleditsia triacanthos* f. *inermis* in Arkansas, USA. Agroforestry Systems, 2005, 65(3): 207-214.
- [16] Dini-Papanastasi O. Effects of clonal selection on biomass production and quality in *Robinia pseudoacacia* var. *monophylla* Carr. Forest Ecology and Management, 2008, 256(4): 849-854.
- [17] Wei G H, Chen W M, Zhu W F, Chen C, Young J P W, Bontemps C. Invasive *Robinia pseudoacacia* in China is nodulated by *Mesorhizobium* and *Sinorhizobium* species that share similar nodulation genes with native American symbionts. FEMS Microbiology Ecology, 2009, 68(3): 320-328.
- [18] Wang K Q, Wang B R. Study on thinning to *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(1): 11-15.
- [19] Feng Z, Dyckmans J, Flessa H. Effects of elevated carbon dioxide concentration on growth and N-2 fixation of young *Robinia pseudoacacia*. Tree Physiology, 2004, 24(3): 323-330.
- [20] Mebrahtu T, Hanover J W. Leaf age effects on photosynthesis and stomatal conductance of black locust seedlings. Photosynthetica, 1991, 25(4): 537-544.
- [21] Wang M C, Wang J X, Shi Q H, Zhang J S. Photosynthesis and water use efficiency of *Platycladus Orientalis* and *Robinia Pseudoacacia* saplings under steady soil water stress during different stages of their annual growth period. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, 49(10): 1470-1477.
- [22] Condon A G, Richards R A, Rebetzke G J, Farquhar G D. Breeding for high water-use efficiency. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2447-2460.
- [23] Rebetzke G J, Condon A G, Richards R A. Selection for reduced carbon isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rainfed bread wheat. Crop Science, 2002, 42(3): 739-745.
- [24] Zhao H, Zhang Z B, Shao H B, Xu P, Foulkes M J. Genetic correlation and path analysis of transpiration efficiency for wheat flag leaves. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64(2): 128-134.
- [25] Baldocchi D, Collineau S. The physical nature of solar radiation in heterogeneous canopies: Spatial and temporal attributes//Caldwell M M, Pearcy R W, eds. Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants: Ecophysiological Processes Above and Below Ground. San Diego, CA:

- Academic Press, 1994: 21-64.
- [26] Nahoko K, Hagihara A, Hozumi K. Canopy photosynthetic production in a Japanese larch forest II. Estimation of the canopy photosynthetic production. *Ecological Research*, 1993, 8: 349-361.
- [27] Amthor J S. Scaling CO₂-photosynthesis relationships from the leaf to the canopy. *Photosynthesis Research*, 1994, 39: 321-350.
- [28] Caldwell M M, Meister H P, Tenhunen J D, Lange O L. Canopy structure, light microclimate and leaf gas exchange of *Quercus coccifera* L. in a Portuguese macchia: Measurements in different canopy layers and simulations with a canopy model. *Trees*, 1986, 1: 25-41.
- [29] Han Q M, Chiba Y. Leaf photosynthetic responses and related nitrogen changes associated with crown reclosure after thinning in a young *Chamaecyparis obtusa* stand. *Journal of Forest Research*, 2009, 14: 349-357.
- [30] Pettigrew W T, Hesketh J D, Peters D B, Woolley J T. A vapor pressure deficit effect on crop canopy photosynthesis. *Photosynthesis Research*, 1990, 24: 27-34.
- [31] Day M E. Influence of temperature and leaf-to-air vapor pressure deficit on net photosynthesis and stomatal conductance in red spruce (*Picea rubens*). *Tree Physiology*, 2000, 20: 57-63.
- [32] Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Leaf gas exchange characteristics differ among Sonoran Desert riparian tree species. *Tree Physiology*, 2001, 21: 233-241.
- [33] Bassman J H, Zwier J C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides*, and *Populus trichocarpa* × *P. deltoides* clones. *Tree Physiology*, 1991, 8: 145-159.
- [34] Barron-Gafford G A, Grieve K A, Murthy R. Leaf- and stand-level responses of a forested mesocosm to independent manipulations of temperature and vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 2007, 174: 614-625.
- [35] Chen D X, Li Y D, Luo T S, Chen B F, Lin M X. Short-term responses of photosynthesis to elevated CO₂ in leaves of canopy species *Castanopsis patelliformis* in tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1622-1628.
- [36] Zhang X Q, Xu D Y, Zhao M S, Chen Z L. The responses of 17-years old Chinese fir shoots to elevated CO₂. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 390-396.
- [37] Liu Z C, Bao D E. Relationship between net photosynthetic rate and its physo-ecological factors in Jinguang Plum. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(3): 0564-0568.
- [38] Meng C, Xu M C, Li J X, Gao S P. Spatial heterogeneity of photosynthetic characteristics of *Castanopsis fargesii* canopy. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9): 1932-1936.
- [39] Zhang X Q, Xu D Y. Seasonal changes and daily courses of photosynthetic characteristics of 18-year old Chinese fir shoots in relation to shoot ages and positions within tree crown. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(3): 19-26.
- [40] Zhang X Q, Xu D Y. Light responses of 18-year-old Chinese fir shoots in relation to shoot ages and positions within crown. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 409-414.
- [41] Zhang X Q, Xu D Y. Eco-physiological modelling of canopy photosynthesis and growth of a Chinese fir plantation. *Forest Ecology and Management*, 2003, 173(1/3): 201-211.
- [42] Zhang M, Guan D X, Wu J B, Shi T T, Jin C J, Han S J. Research advances in ecophysiological model of plant canopy scale. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(5): 563-571.
- [43] Kayama M, Makoto K, Nomura M, Sasa K, Koike T. Growth characteristics of Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) planted on the northern Japanese hillsides exposed to strong winds. *Trees*, 2009, 23(1): 145-157.

参考文献:

- [1] 潘瑞炽. 植物生理学, 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 55-57, 91-95.
- [2] 周广胜, 王玉辉. 全球生态. 北京: 中国气象出版社, 2003: 82-83.
- [3] 郭明春, 于澎涛, 王彦辉, 沈振西, 时忠杰, 杜阿朋, 何常清. 林冠截持降雨模型的初步研究. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1633-1637.
- [5] 王安志, 裴铁璠, 金昌杰, 关德新. 长白山阔叶红松林降雨截留量的估算. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1403-1407.
- [6] 李德志, 臧润国. 森林冠层结构与功能及其时空变化研究进展. *世界林业研究*, 2004, 17(3): 12-16.
- [8] 刘晓东, 朱春全, 雷静品, 巨关升, 白锐. 杨树人工林冠层光合辐射分布的研究. *林业科学*, 2000, 36(3): 2-7.
- [13] 肖文发. 杉木人工林单叶至冠层光合作用的扩展与模拟研究. *生态学报*, 1998, 18(6): 621-628.
- [14] 张小全, 徐德应, 赵茂盛. 杉木中龄林树冠叶面积密度空间分布及季节变化. *林业科学研究*, 1999, 12(4): 411-421.
- [18] 王克勤, 王斌瑞. 黄土高原刺槐林间伐改造研究. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 11-15.
- [35] 陈德祥, 李意德, 骆土寿, 陈步峰, 林明献. 短期 CO₂ 浓度升高对雨林树种盘壳栎光合特性的影响. *生态学报*, 2004, 24(8): 1622-1628.
- [36] 张小全, 徐德应, 赵茂盛, 陈仲庐. CO₂ 增长对杉木中龄林针叶光合生理生态的影响. *生态学报*, 2000, 20(3): 390-396.
- [37] 刘遵春, 包东娥. ‘金光杏梅’叶片净光合速率与生理生态因子的关系. *西北植物学报*, 2008, 28(3): 0564-0568.
- [38] 孟陈, 徐明策, 李俊祥, 高三平. 栲树冠层光合生理特性的空间异质性. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 1932-1936.
- [39] 张小全, 徐德应. 杉木中龄林不同部位和叶龄针叶光合特性的日变化和季节变化. *林业科学*, 2000, 36(3): 19-26.
- [40] 张小全, 徐德应. 18年生杉木不同部位和叶龄针叶光响应研究. *生态学报*, 2001, 21(3): 409-414.
- [42] 张弥, 关德新, 吴家兵, 施婷婷, 金昌杰, 韩士杰. 植被冠层尺度生理生态模型的研究进展. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 563-571.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 23 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 23 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元