

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

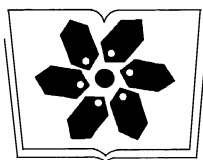
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

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 32 卷 第 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 380 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 38 * 2012-12

DOI: 10.5846/stxb201203150348

曹永慧, 周本智, 陈双林, 萧江华, 王小明. 不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应. 生态学报, 2012, 32(23): 7421-7429.

Cao Y H, Zhou B Z, Chen S L, Xiao J H, Wang X M. Photosynthetic response of different ecotype of *Illicium lanceolatum* seedlings to drought stress and rewatering. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7421-7429.

不同产地披针叶茴香光合特性 对水分胁迫和复水的响应

曹永慧*, 周本智, 陈双林, 萧江华, 王小明

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400)

摘要:为了探讨披针叶茴香(*Illicium lanceolatum*)对水分胁迫的响应,选用4个不同产地的披针叶茴香(浙江临安产地(LA)、浙江开化产地(KH)、江西武宁产地(WN)和福建南平产地(NP))盆栽幼苗为试验材料,采用Li-6400便携式光合作用测定仪对不同水分胁迫下幼苗光合特性进行测定。结果表明:随着水分胁迫强度增加,不同产地幼苗光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)值表现出不同程度的降低,最大净光合速率($P_{\max}$)的变化趋势存在产地差异,基本为先升后降;而表观光量子效率(AQY)呈增加的趋势。在水分胁迫复水后,4个产地幼苗LSP、LCP、AQY和 $P_{\max}$ 值与正常供水时存在显著差异($P < 0.05$),WN、KH和LA幼苗LSP值大于正常供水;除NP幼苗外,其余产地幼苗LCP值均不同程度快速回升;KH和WN幼苗 $P_{\max}$ 值高于正常供水,LA和NP幼苗 $P_{\max}$ 低于正常供水;WN、KH和LA幼苗的AQY值均明显高于正常供水。表明披针叶茴香不同产地植株光合特性对光强和水分敏感性不同,WN产地植株对水分和光照的需求较广、适应能力较强,其次为NP产地,而浙江产地(KH、LA)植株对于水分的要求较高。水分胁迫下,披针叶茴香幼苗光合响应曲线亦存在差异,在低光范围($\leq 200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)时,其净光合速率(P_n)光响应值主要受土壤水分影响,当光强增大时,光照负面影响大于水分影响。表明披针叶茴香生长需要适宜水分,但最需要适宜光照,土壤水分条件较低时需实施弱光栽培措施来缓和逆境胁迫。

关键词:披针叶茴香; 不同产地; 光合参数; 光响应; 水分胁迫; 复水

Photosynthetic response of different ecotype of *Illicium lanceolatum* seedlings to drought stress and rewatering

CAO Yonghui*, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, XIAO Jianghua, WANG Xiaoming

Chinese Academy of Forestry, Research Institute of Subtropical of Forestry Fuyang 311400, China

Abstract: Low availability of soil moisture is considered a major limiting factor for plant growth and crop yield worldwide, and global change will likely aggravate water shortage and make water availability an even greater limitation to plant productivity across an increasing amount of land. The Chinese anise (*Illicium lanceolatum*), a traditional medicinal plant in China, has high content of shikimic acids which have effects of antiphlogosis and analgesis, and can reduce platelet aggregation and suppress vascular and cerebral thrombosis. Shikimic acid can also be an intermediate for antiviral and anticancer drugs. Scattering in its natural habitats, *I. lanceolatum* resources have experienced a rapid decline due to overexploitation. Therefore, it is necessary to study the protection and development strategies of *I. lanceolatum* resources. Until now, there is no study on the mechanism of this species responds to water and light conditions. In this paper, we reported the effects of drought stress on photosynthesis of varied ecotypes of *Illicium lanceolatum*. One year old potted seedlings of four ecotypes, respectively ecotypes from Linan Zhejiang (LA), Kaihua Zhejiang (KH), Wuning Jiangxi

基金项目:浙江省科技计划项目(2009C32097)

收稿日期:2012-03-15; 修订日期:2012-09-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fjcylh77@sina.com

(WN) and Nanping Fujian (NP), were treated with different level of drought stress and their photosynthetic parameters were measured. The results showed that photosynthetic parameters differed significantly between the ecotypes during the drought stress and the recovery period. As the drought stress progressed, the light saturation points (LSP) and the light compensation point (LCP) declined for the four ecotypes. The maximum photosynthetic rate ($P_{\max}$) increased initially and decreased rapidly later during the drought treatment period, however the relative changes in $P_{\max}$ induced by water stress differed from each other among the four ecotypes. The apparent photon quantum yield (AQY) increased as drought stress progressed. Significant differences in LSP, LCP, AQY and $P_{\max}$, were found before and after water stress was released, but the margin of the difference was affected by the ecotypes. After rewatering, the LSPs of WN, KH and LA ecotypes increased, the LCP recovered rapidly, and AQY also remained at a high level. The $P_{\max}$ increased for KH and WN ecotypes, but decreased for LA and NP ecotypes after the water stress was released, implying a difference in the sensitivity to light intensity and water stress among the four ecotypes. The WN ecotype seedlings grew well in a wide range of light intensity and water conditions, presenting a good adaptability to various changing environments. NP ecotype was another one with higher adaptability to light and water stress. The KH and LA ecotypes from Zhejiang province exhibited stricter requirements for soil moisture content. The ecotypic differences existed in rates of recovery of photosynthesis during drought stress. Photosynthesis rate under drought stress was rapidly recovered until one day after re-watering only for WN ecotypes. The photosynthetic response curve also changed in response to drought stress. The light response of net photosynthetic rate (P_n) was affected by soil water content under low light intensity ($\leq 200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). However, the negative effect of light intensity exceeded that of water stress as the light intensified. Studies revealed synergistic effects of water stress and light intensity on the potential photosynthetic capacity of *I. lanceolatum*. The growth of *I. lanceolatum* requires an environment with adequate soil moisture as well as suitable light intensity. When soil water condition becomes poor, the light intensity should be reduced by shading or other measures, thus to reduce the negative impacts on plant growth. This study showed that the interaction of genetic background (ecotypes) and environmental factors (drought and light intensity) should be taken into consideration when introducing the plant species to different climate conditions, and developing water management shading strategy for high-efficiency intensive culture.

Key Words: the Chinese anise (*Illicium lanceolatum*); ecotypes; photosynthetic parameters; light response; drought stress; rewatering

全球气候变暖和局部地区的极端干旱事件已发生^[1-2],进一步加剧了水分胁迫事件的频繁发生^[3]。植物与水分的关系研究成为陆地生态系统对全球变化响应研究的热点问题^[4-6],也是植物生理生态学研究领域的重要课题之一^[7-12]。土壤水分和光照强度是影响植物光合生理过程和植被生长及分布的重要生态因子,两者对植物的光合作用、水分代谢及物质运转等生理活性有重要影响^[8-10]。

披针叶茴香(*Illicium lanceolatum*)为中国所特有的传统药用植物^[13]。其所含的莽草酸(Shikimic Acid)具有较强的抗炎、镇痛和抑制血小板聚集、抑制动、静脉血栓及脑血栓形成,还可作为抗病毒和抗癌药物的中间体^[13]。披针叶茴香虽有较广的生态幅,但多处于零星分布,加之当前资源掠夺式利用方式,野生资源日渐稀少,其规模引种保护和栽培日益迫切^[14-15]。披针叶茴香性喜阴湿,土壤水分和光照强度对披针叶茴香生长发育和产量有着直接的影响,但披针叶茴香水分和光生态适应特点及机制尚未开展深入研究^[14-16]。同种植物长期生长在不同光照、水分等异质环境下,其表型及生理生态特性会产生不同的响应,出现趋异适应^[17]。因此,本文通过盆栽法模拟比较研究水分胁迫对不同产地披针叶茴香幼苗水分光合生理生态特征的影响,探讨披针叶茴香对水分胁迫和光照的适应过程和机制,为披针叶茴香迁地保护、精细栽培的土壤水分管理和高效栽培模式选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于浙江省临安市天目山森之源苗场(118°51′—119°52′ E, 北纬 29°56′—30°23′N), 海拔 47 m, 属中北亚热带季风气候区。年平均气温 15.4 ℃, 1 月平均气温不低于 3.2 ℃, 7 月平均气温 29.9 ℃, 年降水量 1250—1600 mm。试验点坡位为坡脚较平缓地。土壤为酸性黄壤土, 有机质 23.95 g/kg, 全氮 0.44 g/kg, 全磷 10.09 g/kg, 全钾 6.31 g/kg, 碱解氮 217.62 mg/kg, 速效磷 363.97 mg/kg, 速效钾 40.51 mg/kg, pH 值 4.62。

1.2 试验材料

本研究供试材料为 4 个不同地理产地的披针叶茴香 1 年生播种幼苗, 根据种子来源地, 依次为浙江临安产地(LA)、浙江开化产地(KH)、江西武宁产地(WN)和福建南平产地(NP)(产地地理、气象指标见表 1)。2006 年 9—10 月从各产地分布区野生健壮母株上采集果实, 自然晾干后, 将其种子分别进行低温砂藏处理(冰箱 4 ℃), 并保持湿度; 于 2007 年 4 月中旬播种, 播种苗床 10 m×1.0 m, 土壤为园土+有机肥=2:1, 平均播种密度 189 株/m²; 播种苗圃地采用常规管理, 在 4 月播种后立即覆盖稻草, 夏季高温期间有遮荫措施(50% 郁闭); 4 个产地幼苗出苗期间浇水、间苗等条件一致。1 年生幼苗生长情况见表 2。

表 1 披针叶茴香引种地主要气象因子

Table 1 The comparison of meteorological index for different origin areas of *I. lanceolatum*

产地 Provenance	地名 Location	地理坐标 Geographical coordinates	海拔 Altitude/m	年均降雨 Mean Annual precipitation/mm	年均温度 Mean annual temperature/℃	极端高温 Maximum temperature/℃	极端低温 Extremely low temperature(℃)
LA	浙江临安 Linan city	119°24′—119°28′ E 30°18′—30°24′ N	420	1390—1870	8.9—15.8	41.9	-13.3
KH	浙江开化 Kaihua county	118°01′—118°37′ E 28°54′—32°30′ N	435	1600—1814	12.9—16.4	41.3	-10.3
WN	江西武宁 Wuning city	114°29′—114°36′ E 28°53′—29°14′ N	380	1230—1488	4.4—16.6	41.9	-5.0
NP	福建南平 Nanping city	117°10′—117°24′ E 26°15′—27°19′ N	410	1430—2032	17.9—21.2	38.6	-5.8

表 2 不同产地披针叶茴香 1 年生幼苗生长性状

Table 2 The growth characters of one year old seedlings for *I. lanceolatum* different ecotypes

产地 Provenance	平均地径 Mean ground diameter/cm	平均苗高 Mean height/cm	平均枝下高 Mean height under branch/cm	平均冠幅 Mean crown diameter/cm	最长侧枝 Longest lateral branch/cm
WN	1.05±0.14	85.7±1.02	34.1±0.13	33.3±0.80	22.7±0.96
KH	0.99±0.15	84.2±1.24	18.7±0.09	30.5±0.66	26.7±1.05
LA	1.00±0.17	81.2±0.98	17.2±0.15	29.3±0.64	21.1±0.94
NP	1.04±0.14	83.9±0.80	15.0±0.21	28.9±0.70	17.8±0.83

①表中数据为平均值±标准误差(n=50); ②冠幅为 4 个方向的平均值

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

采用盆栽法。于 2008 年 6 月 10 日分别 4 个产地选择 1 年生幼苗代表性标准株 10 株移栽至塑料盆中用于盆栽试验。盆高 30 cm, 口径 25 cm, 每盆土重约 12 kg, 培养土为过筛黄心土(2 份)、河沙土(1 份)和腐殖土(1 份)混合而成, 试验前测定该培养土壤容重, 正常供水管理。7 月中旬进入旺盛生长期时开始试验。试验期间, 利用美国产 Thetaprobe-MI2X 型土壤水分探头监测盆栽土壤体积含水量(W_v)的变化, 每个水分处理重复测定 3 次, 取平均值。然后根据公式 $W_m = W_v/R_d$ 计算其土壤质量含水量(W_m), 式中 W_m 、 W_v 分别表示土壤质量含水量和土壤体积含水量; R_d 表示土壤容重; 式中 R_d 为所有测定盆的平均值。不同产地不同水分处理

阶段 W_m 见表 3。

在开始试验前保持 1 周左右的正常供水,然后于 2008 年 7 月 20 日充足供水,随后停止正常供水,保持自然干旱状态。并在 7 月 20 日供水后测定光响应(作为初始光响应值),然后分别在自然干旱 2 d 后、4 d 后、7 d 后和复水后测定 4 个产地代表性试验固定植株(每个产地选择 5 株)的光响应,每株测定 2 次,每次测定选取同一叶片;若叶片受损,则选择同等部位对应叶片测定备用。

表 3 不同水分胁迫处理阶段土壤质量含水量

Table 3 The soil moisture content under different drought stress treatments for *I. lanceolatum* provenances

产地 Provenance	土壤质量含水量 Soil moisture content/%			
	初期 Initial stage	干旱 2 d Drought stress for 2 days	干旱 4 d Drought stress for 4 days	干旱 7 d Drought stress for 7 days
WN	32.31±1.45	28.47±1.11	23.67±1.32	19.64±0.34
KH	26.67±0.23	23.81±1.36	17.95±0.65	14.96±0.09
LA	35.45±0.78	30.41±0.89	27.89±1.12	21.33±0.14
NP	34.47±2.01	33.77±0.45	32.22±2.45	20.34±1.02

①表中数据为测定植株土壤 3 点测定值的平均值±标准误 ($n=3$)

1.3.2 光合作用指标测定

采用 L_i-6400 便携式光合作用测定仪(LI-COR, Lincoln, USA),分别在充分供水后的试验初期、自然干旱 2 d 后、4 d 后、7 d 后和复水后(干旱 7 d 后开始复水,复水第 2 日进行测定)测定 4 个产地的代表性试验固定植株(5 株)的光响应,每株选取冠上部叶片重复测定 2 次。光响应测定,采用 L_i-6400 红蓝光源,空气流速为 0.5 L/min,控制叶温在 26—35 °C 之间,相对湿度 60% 左右,CO₂ 浓度为 365 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。从 2000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强开始测定,依次降为 1800、1500、1200、1000、800、500、200、120、80、50、20、0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。光响应曲线测定在晴天的 9:00—11:00 之间连续测定。并依据 Thornley 的非直角双曲线拟合 P_n -PAR 的曲线方程^[18-19],计算得出各光合生理参数。

1.3.3 数据分析

用 Spss10.0 统计软件对不同水分胁迫下幼苗光合生理指标进行 One-Way ANOVA 方差分析($P<0.05$),用 LSD 法对各参数平均数进行显著性检验和多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同产地披针叶茴香光合参数对水分胁迫与复水的响应

土壤水分胁迫对植物光合作用的影响十分明显^[20-21]。如图 1 所示,披针叶茴香幼苗经过短期水分胁迫处理后,其光合参数在胁迫及复水过程中存在明显差异。

充分供水初期,4 个产地幼苗土壤质量含水量(W_m)为 26.67%—35.45%,分析表明, W_m 对幼苗光饱和点(LSP)值呈极显著的正相关影响($R^2=0.947$)。在干旱处理 2 d 后(W_m 为 23.81%—33.77% 范围),KH 幼苗 LSP 显著高于初期($P<0.01$);干旱处理 4 d 后,除 WN 产地(LSP 大小此时为最高值,为 332.30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),其余产地幼苗 LSP 大小基本随着干旱时间的延长,即水分胁迫强度增加而快速下降;其中 WN、NP 产地 LSP 值与初期差异极显著($P<0.01$)。干旱处理 7 d 后(W_m 为 14.96%—21.33%),幼苗 LSP 迅速降至较低水平,KH、LA 和 NP 产地均与初期达显著差异($P<0.05$)。

复水后,幼苗 LSP 快速回升,其中 WN 和 LA 产地 LSP 极显著大于初期值($P<0.01$),LA 产地 LSP 在复水后达到最高值(684.63 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),与初期比其增幅为 155.54%。可见,短期干旱可有效提高 WN、LA 产地幼苗对光强的利用能力。

供水初期,4 个产地幼苗的光补偿点(LCP)值大小与 W_m 排序一致,分析表明 W_m 对幼苗 LCP 值则呈极显著线性正相关($R^2=0.9602$)。随着土壤水分胁迫增强,LCP 值较初期不同程度下降;复水后又不同程度快速回升。其中 LA 产地 LCP 复水后上升幅度高达 5.22 倍,与其余干旱处理极显著差异($P<0.01$),表明 LA 产地

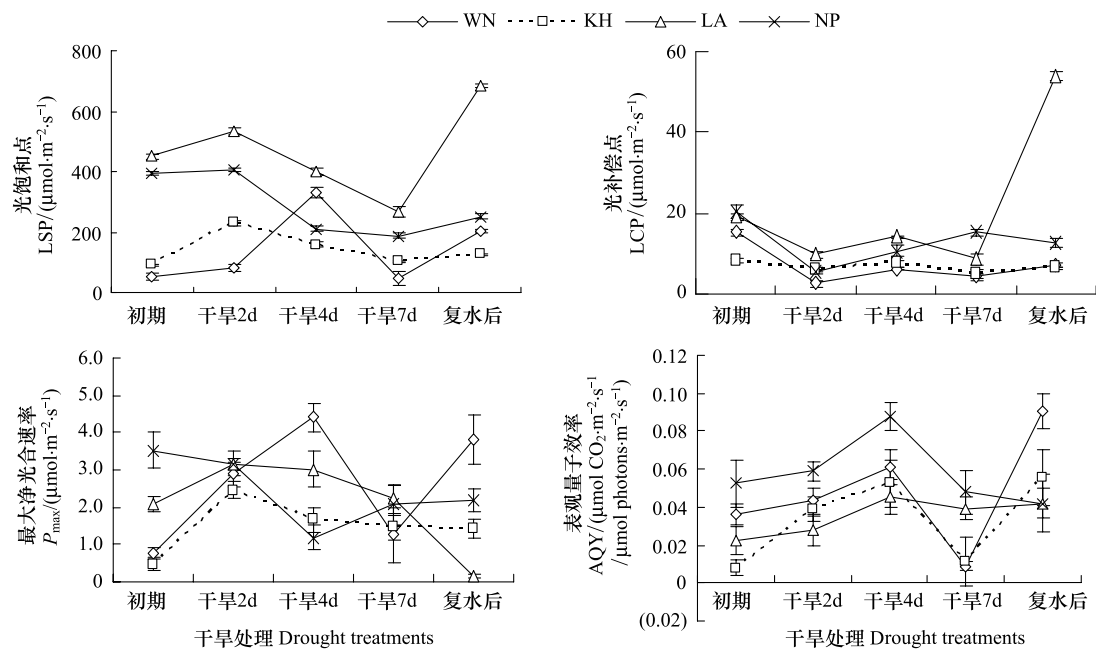


图1 水分胁迫下不同产地披针叶茴香幼苗光合参数

Fig. 1 The photosynthesis parameters of *I. lanceolatum* provenances seedlings under drought stress

幼苗经历短期水分胁迫后复水,对较高光照的利用能力有所提高。NP 产地 LCP 值复水后显著低于初期。WN 产地 LCP 值在不同水分胁迫期间差异不显著,但显著低于初期 ($P < 0.05$);复水后,极显著低于初期 ($P < 0.01$)。

最大净光合速率 ($P_{\max}$) 大小反应植物的光合能力。如图 1 所示,处理初期,各产地 $P_{\max}$ 大小排序与 LCP 相同,分析表明初期供水后植株光合能力与 W_m 显著正相关 ($R^2 = 0.7541$)。随着水分胁迫程度增加,披针叶茴香 $P_{\max}$ 大小基本表现出先上升后下降的趋势。其中,浙江产地植株 $P_{\max}$ 均表现出明显的“单峰型”曲线,复水后 $P_{\max}$ 值仍下降,均与初期显著差异 ($P < 0.05$);WN 产地植株 $P_{\max}$ 复水后则可迅速回升,极显著高于供水初期值 ($P < 0.01$)。表明 KH 和 LA 产地植株忍受干旱能力有限,经历水分胁迫后恢复较为困难;表明 WN 产地植株对短期干旱忍受能力较高,复水恢复快。

表观光量子效率 (AQY) 变化趋势表明,随着水分胁迫程度的增加,幼苗的 AQY 呈不断上升的趋势,在干旱 7 d 后 (此时 W_m 为 14.96%—43.33%) 迅速下降。复水后,4 个产地 AQY 又快速回升,除 NP 产地,其余 3 个产地的 AQY 复水后均明显高于初期,差异达显著或极显著水平 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。由此可知短期干旱可提高披针叶茴香幼苗对弱光的利用能力。

2.2 披针叶茴香净光合速率光响应对水分胁迫与复水的响应

利用净光合速率的光响应曲线可进一步对不同水分胁迫下的光合作用状态进行分析。如图 2 所示,水分胁迫下,不同产地披针叶茴香幼苗净光合速率 (P_n) 值光响应趋势表现为,一定光强范围内 (光合有效辐射 (PAR) $< 500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), P_n 随着 PAR 的增强而增大;当光强超过一定范围后,这种增大趋势逐渐减弱,并伴随下降趋势。

不同产地植株 P_n 值光响应因水分胁迫时间而异。如图 2 所示,WN 产地植株不同水分胁迫的 P_n 值在低光范围 (PAR $< 200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 随着 PAR 的增强急剧上升,达到光饱和点后,随即下降。不同程度水分胁迫下 P_n 值表现为初期 $<$ 干旱 2 d 后 $<$ 干旱 4 d 后。复水后, P_n 值在低光 (PAR $< 500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 范围随着 PAR 的增强迅速上升至最高值 ($4.64 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),明显高于初期。表明,WN 产地幼苗经历水分胁迫后,低光下恢复较为迅速,有一定的耐旱性。KH 产地植株 P_n 光响应值在供水初期为最低水平,干旱 2 d 后, P_n 光响应

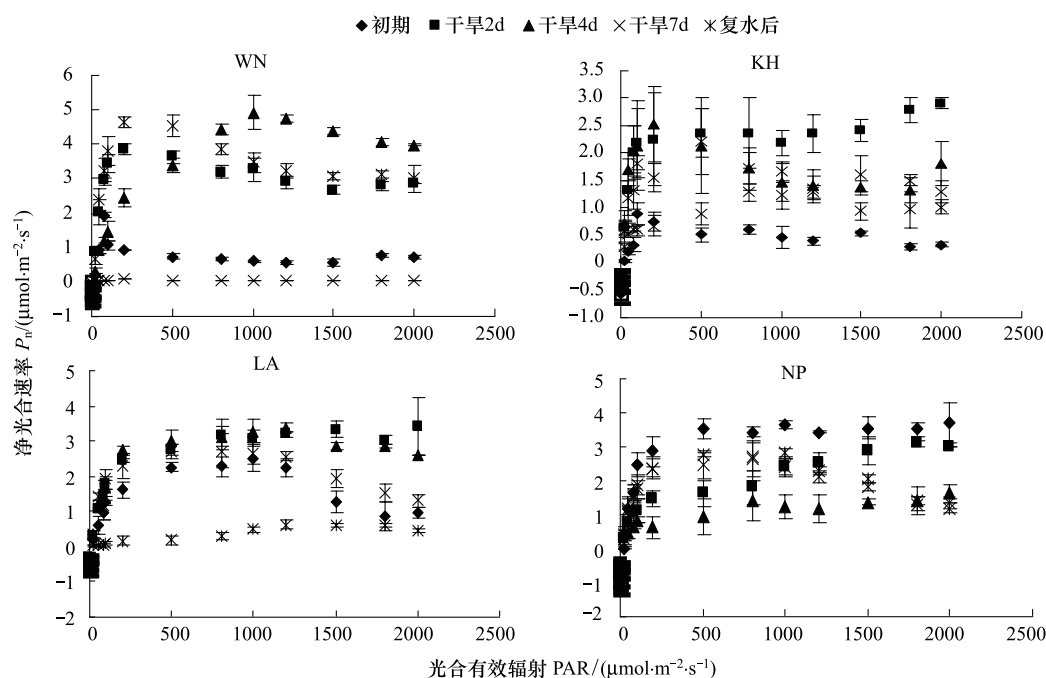


图2 水分胁迫下不同产地披针叶茴香幼苗光合速率光响应曲线

Fig. 2 The photosynthesis light-response curve of net photosynthetic rate (P_n) for different provenance seedlings under drought stress

值为最高水平,随着水分胁迫时间增加 P_n 光响应值下降。复水后,低光范围的 P_n 值显著高于处理初期,存在光抑制现象。表明,水分胁迫可提高 KH 产地植株的光合速率,但光抑制现象明显。

LA 产地植株水分胁迫下 P_n 光响应值均高于供水初期的。复水后, P_n 光响应值明显下降。LA 产地在水分充足和较低条件下,都易发生光抑制,表明 LA 产地对光照的需求和适应性受其对水分的敏感程度限制。图2表明,供水初期, NP 产地植株 P_n 光响应值最高,且随 PAR 增加而保持稳定,随着水分胁迫增强, P_n 光响应值下降,干旱 7d 后发生明显光抑制。复水后,光抑制现象仍存在。可知, NP 产地植株经历短期水分胁迫后光合作用明显受限。

3 讨论

3.1 披针叶茴香光合参数对水分胁迫的响应

土壤水分胁迫对植物光合作用的影响是通过影响气孔导度实现,也可以直接影响到叶肉细胞的光合能力^[20-21]。水分亏缺会降低植物的光合作用能力。表观光量子效率小,表明叶片吸收与转换光能的色素蛋白复合体可能较少,即利用弱光的能力较低。光饱和点和光补偿点是植物需光特性的 2 个主要指标,环境条件不适宜时,往往降低光饱和点或者提高光补偿点^[6]。本研究表明,不同产地披针叶茴香幼苗表观光量子效率随干旱增强而增加,说明随着干旱增加其通过叶片色素蛋白复合体增加,实现幼苗对弱光的利用能力提升。不同产地幼苗通过降低光饱和点和光补偿点来增加干旱忍受适应能力。

对于不同产地披针叶茴香植株经过不同干旱时间的水分胁迫后,由于其受到干旱胁迫程度不同,导致其复水后光合作用能力恢复水平和能力不同。研究表明,在复水后,其 WN、KH 和 LA 不同产地植株光饱和点、光补偿点、表观光量子效率以及 WN 产地植株最大净光合速率等光合参数均快速恢复到正常水平,甚至不同程度大于正常水平,这可能是由于轻度干旱后复水引起的“补偿效应”,即植物在水分胁迫解除后会存在短暂的快速生长,以补偿胁迫造成的损失^[22],亦可能与植物自身耐旱能力或者干旱胁迫时间周期长短有关。复水能在一定程度上使得由于水分胁迫受到抑制的植物生长得到补偿,这就是复水一段时间后某些植株表现出“疯长”现象的原因,而本研究中由于披针叶茴香植物生长缓慢等固有生物学特性使其幼苗复水后生长改善不很明显,需要进一步研究。

由于不同的物种特性、叶片状况及环境因子的不同,不同物种叶片光合参数达到最大时的土壤水分阈值亦不一致,但其对土壤水分响应的趋势是一致的^[6,12]。研究表明,浙江产地(LA 和 KH 产地)披针叶茴香植株对土壤水分条件敏感,较不耐旱,其受旱后自然恢复较为困难;WN 产地植株较为耐旱(W_m 为 19.64% 时仍保持正常生长),且在水分胁迫的同时对光强增加不十分敏感;NP 产地植株对弱光栽培环境的适应能力因土壤水分降低而下降,但可逆性较强,在恢复土壤水分后适应能力又增强;NP 产地在水分允许范围内逐渐适应水分胁迫,恢复后以较低的光合速率来适应。研究结果显示,披针叶茴香幼苗在短期水分胁迫后可提高对弱光利用能力;经过相同程度的水分胁迫,WN 产地幼苗光合能力恢复较快。因此,WN 产地是适应性最为宽广的产地,对水分和光照的需求较广、适应能力相对较强。披针叶茴香不同产地幼苗植株光合参数对水分变化的响应,为定量描述植物光合参数对干旱胁迫的响应提供了依据。

3.2 净光合速率光响应对水分胁迫的响应

光是影响植物的重要生态因子之一,是植物生长发育和形态建成的必要条件。光通过影响光合速率、水分供需而影响植株生长。近年来,随着水分胁迫和光抑制对植物生长和生产过程的制约日益突出,国内外在不同植物抗旱生理学特性方面的研究日益深入^[23-24]。

大量研究表明水分胁迫可通过气孔和非气孔因素影响光合作用。Attipalli 认为水分胁迫导致气孔关闭是光合作用强度下降的首要原因^[25]。Medrano 等认为,当气孔导度(G_s) $<0.15 \text{ molH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时胞间二氧化碳浓度(C_i)就会上升,气孔限制开始在光合作用的下降中起主要作用^[26]。本研究表明,披针叶茴香光合作用强度随水分胁迫下降的状态,轻中度水分胁迫下由气孔因素决定,而非气孔因素则是逆境破坏光系统的主要原因,严重水分胁迫下成为制约光合速率的主导因素;忍耐干旱能力较强的产地植株同比条件下可在较严重的水分胁迫条件下保持气孔限制的主导作用,这与披针叶茴香不同产地植株对水分的敏感性有关。

干旱和强光是较耐荫蔽型植物生长的主要逆境,大量研究表明,强光与水分胁迫并存时会打破叶绿体内光合作用固定 CO_2 和吸收光能的平衡^[27],导致过剩光能的积累而加剧光系统的破坏^[28],引发光合作用的光抑制^[29],加剧干旱对植物叶片的伤害^[30]。本研究中,披针叶茴香不同产地植株除了 WN 产地植株外,其余三产地植株净光合速率在不同水分胁迫下均存在光抑制现象,而较高光照条件则加剧了光合作用的光抑制现象发生。说明,水分胁迫导致披针叶茴香幼苗阶段叶片对强光敏感性增加,干旱和光抑制对光合作用系统造成了叠加伤害。严重水分胁迫抑制了幼苗光化学活性,使其光系统 PS 域的原初光能转化效率、光合作用潜在活性和 PS 域实际光能转化效率受到抑制。不同产地披针叶茴香净光合速率对不同程度水分胁迫表现出趋异性适应。WN 产地幼苗在短期水分胁迫后,净光合速率恢复较为迅速,表明其有一定的耐旱性。

本研究揭示披针叶茴香植株光合响应受水分胁迫影响的同时还受光强的较大影响。在低光范围($\leq 200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)时,光合响应主要受土壤水分条件的影响,当环境光合有效辐射继续增强时,其光合响应受光照的负面影响大于水分影响。因此,披针叶茴香生长环境需要一定土壤水分条件,但更重要的是需要一定光照,但光强不宜太大,尤其在土壤水分条件较差时需要弱光栽培方式下来缓和逆境胁迫。披针叶茴香作为重要药用植物资源之一,其光合作用是及其复杂的过程,光照、水分对其影响的途径更是多种多样,就干旱对光合电子传递的影响而言目前尚未系统研究,亦存在大量有待研究的机理。以后应结合光系统 II 的研究加强对不同产地披针叶茴香在不同生态区域驯化适应和在不同生长季节加以验证和深入探讨,以进一步明确干旱影响披针叶茴香光合作用的生理机制。

4 结论

(1) 研究表明,幼苗期短期水分胁迫可暂时促进披针叶茴香植株光饱和点、最大净光合速率和表观量子效率增加,同时降低光补偿点;复水后可促进植株光合能力暂时性提高。

(2) 研究表明,水分胁迫一定程度上导致披针叶茴香幼苗叶片对强光敏感性增强,干旱和光抑制的叠加是不同产地植株实际光合作用潜力下降的决定因素;水分胁迫下耐旱性较强的 WN 产地植株同比条件下可在较严重的水分胁迫条件下保持气孔限制的主导作用,配合气孔保护性关闭而维持相对较高的光合作用潜力和

光能利用率,这也是其生态适应性广的主要关键生理机制原因。

(3) 研究揭示披针叶茴香潜在光合能力受水分胁迫与光强的协同影响。其适宜生长需要一定土壤水分条件,更需要适宜的光照;在土壤水分条件较差时需要弱光栽培环境来缓和逆境胁迫。WN 产地披针叶茴香对水分和光照的需求较广,生态适应能力相对较强。

References:

- [1] Morgan J A, Legain D R, Mosier A R, Milchunas D G. Elevated CO₂ enhances water relations and productivity and affects gas exchange in C₃ and C₄ grasses of the Colorado shortgrass steppe. *Global Change Biology*, 2001, 7(4): 451-466.
- [2] Wigley T M L, Raper S C B. Interpretation of high projections for global-mean warming. *Science*, 2001, 293(5529): 451-454.
- [3] Xu Z Z, Zhou G S, Wang Y H. Water threshold of plant and global change. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 154-158.
- [4] Jiang G M. Review on some hot top ICS towards the researches in the field of plant physioecology. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 514-519.
- [5] Yuan Y H, Deng X P. Effect of deficit and rewatering on wheat photosynthesis and yield. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(7): 1250-1254.
- [6] Lin X L, Xu Z Z, Wang Y H, Zhou G S. Modeling the responses of leaf photosynthetic parameters of *Leymus chinensis* to drought and rewatering. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4718-4724.
- [7] Dewar R C, Medlyn B E, Mcmutrie R E. Acclimation of the respiration and photosynthesis ratio to temperature: insights from a model. *Global Change Biology*, 1999, 5(5): 615-622.
- [8] Islam M R, Hamid A, Karim M A, Haque M M, Khaliq Q A, Abdul K Q, Ahmed J U. Gas exchanges and yield responses of mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) genotypes differing in flooding tolerance. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2008, 30(5): 697-707.
- [9] Sofo A, Dichio B, Montanaro G, Xiloyannis C. Photosynthetic performance and light response of two olive cultivars under different water and light regimes. *Photosynthetica*, 2009, 47(4): 602-608.
- [10] Montanaro G, Dichio B, Xiloyannis C. Shade mitigates photoinhibition and enhances water use efficiency in kiwifruit under drought. *Photosynthetica*, 2009, 47(3): 363-371.
- [11] Zhang S Y, Zhou Z F, Zhang G C, Wang M J, Zhan H X. Gas exchange characteristics of natural secondary shrubs *prunus davidiana* and *prunus sibirica* under different water stresses. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(12): 2492-2499.
- [12] Bu L D, Zhang R H, Chang Y, Xue J Q, Han M M. Response of photosynthetic characteristics to water stress of maize leaf in seedling. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1184-1191.
- [13] Lin Q. Medicinal plant resources of *Illicium* L. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2002, 33(7): 54-57.
- [14] Cao Y H, Chen S L, Xiao J H, Wu M, Li Y C. Studies on the interspecific association of *Illicium lanceolatum* community in Tiantong region, Zhejiang Province. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2008, 16(6): 100-108.
- [15] Cao Y H. Study on Ecophysiological Characteristics of *Illicium Lanceolatum* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [16] Cao Y H, Zhou B Z, Chen S L, Xiao J H, Wang X M. The photosynthetic physiological properties of *Illicium lanceolatum* plants growing under different light intensity conditions. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(26): 5736-5741.
- [17] Zhu C Q, Wang S J, Wang F G, Zhang Q, Niu L M, Yuan G W. Comparison of growth, biomass and photosynthesis among six poplar clones in cold semi-arid area of northeast China. *Forest Research*, 1995, 8(4): 388-394.
- [18] Thornley J H M. *Mathematical Models in Plant Physiology*. London: Academic Press, 1976: 85-106.
- [19] Liu Y F, Xiao L T, Tong J H, Li X B. Primary application on the Non-rectangular Hyperbola Model for photosynthetic light-response curve. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(8): 76-79.
- [20] Harrison R D, Cheshire J W, Cheshire J R. Net photosynthesis and conductance of peach seedlings and cutting in responses to changes in soil water potential. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1989, 114: 986-990.
- [21] Munns R. Physiological processes limiting plant growth in saline soils; some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environment*, 1993, 16(1): 15-24.
- [22] Wilson K B, Baldocchi D D, Hanson P J. Spatial and seasonal variability of photosynthetic parameters and their relationship to leaf nitrogen in a deciduous forest. *Tree Physiology*, 2000, 20(9): 565-578.
- [23] Zhang M, Wu J B, Guan D X, Shi T T, Chen P S, Ji R P. Light response curve of dominant tree species photosynthesis in broadleaved Korean pine forest of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1575-1578.

- [24] Larocque G R. Coupling a detailed photosynthetic model with foliage distribution and light attenuation functions to compute daily gross photosynthesis in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) stands. *Ecological Modelling*, 2002, 148(3): 213-232.
- [25] Reddy A R, Chaitanya K V, Vivekanandan M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(11): 1189-1202.
- [26] Medrano H, Escalona M J, Bota J, Gulias J, Flexas J. Regulation of photosynthesis of C_3 plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany*, 2002, 89(7): 895-905.
- [27] Sun Y, Xu W J, Fan A L. Effects of salicylic acid on chlorophyll fluorescence and xanthophylls cycle in cucumber leaves under high temperature and strong light. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 399-402.
- [28] Yang G D, Zhu Z J, Ji Y M. Effect of light intensity and magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence and active oxygen in cucumber leaves. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(1): 115-118.
- [29] Dambrosio N, Arena C, Santo A V D. Temperature response of photosynthesis, excitation energy dissipation and alternative electron sinks to carbon assimilation in *Beta vulgaris* L. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 55(3): 248-257.
- [30] Sinsawat V, Leipner J, Stamo P, Fracheboud Y. Effect of heat stress on the photosynthetic apparatus in maize (*Zea mays* L.) grown at control or high temperature. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52(2): 123-129.

参考文献:

- [3] 许振柱, 周广胜, 王玉辉. 植物的水分阈值与全球变化. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 154-158.
- [4] 蒋高明. 当前植物生理生态研究的几个热点问题. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 514-519.
- [5] 袁永慧, 邓西平. 干旱与复水对小麦光合和产量的影响. *西北植物学报*, 2004, 24(7): 1250-1254.
- [6] 林祥磊, 许振柱, 王玉辉, 周广胜. 羊草 (*Leymus chinensis*) 叶片光合参数对干旱与复水的响应机理与模拟. *生态学报*, 2008, 28(10): 4718-4724.
- [11] 张淑勇, 周泽福, 张光灿, 王梦军, 战海霞. 水分胁迫下天然次生灌木山桃和山杏光合气体交换特征. *西北植物学报*, 2008, 28(12): 2492-2499.
- [12] 卜令铎, 张仁和, 常宇, 薛吉全, 韩苗苗. 苗期玉米叶片光合特性对水分胁迫的响应. *生态学报*, 2010, 30(5): 1184-1191.
- [13] 林祁. 八角属药用植物资源. *中草药*, 2002, 33(7): 654-657.
- [14] 曹永慧, 陈双林, 萧江华, 等. 浙江天童披针叶茴香群落间联结性研究. *热带亚热带植物学报*, 2008, 16(6): 100-108.
- [15] 曹永慧. 披针叶茴香生理生态学特性研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [17] 朱春全, 王世绩, 王富国, 张启, 钮利民, 袁国文. 六个杨树无性系苗木生长、生物量和光合作用的研究. *林业科学研究*, 1995, 8(4): 388-394.
- [19] 刘宇锋, 萧浪涛, 童建华, 李晓波. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用. *中国农学通报*, 2005, 21(8): 76-79.
- [23] 张弥, 吴家兵, 关德新, 施婷婷, 陈鹏狮, 纪瑞鹏. 长白山阔叶红松林主要树种光合作用的光响应曲线. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1575-1578.
- [27] 孙艳, 徐伟君, 范爱丽. 高温强光下水杨酸对黄瓜叶片叶绿素荧光和叶黄素循环的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 399-402.
- [28] 杨广东, 朱祝军, 计玉妹. 不同光强和缺镁胁迫对黄瓜叶片叶绿素荧光特性和活性氧产生的影响. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 115-118.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (<i>Eumeces chinensis</i>): testing the maternal manipulation hypothesis	LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)
Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (<i>Tamias sibiricus</i>)	SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)
Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study	LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)
Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China	YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)
Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau	CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)
Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China	GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)
Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach	REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)
Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province	ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)
Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method	LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)
Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study	ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)
Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing	FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)
The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island	WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)
Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province	QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)
The dynamic variation of maize (<i>Setaria mays</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau	WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)
Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities	LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)
Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land	XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)
Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)
Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating	CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)
Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains	DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)
Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China	SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)
Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones	WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)
Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China	WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)
A model for water consumption by mountain jujube pear-like	XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)
Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants	ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

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 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

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:1000717	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