

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

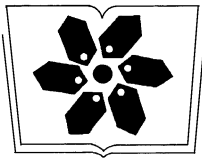
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第23期 Vol.31 No.23 **2011**

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 31 卷 第 23 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

不同海拔高度高寒草甸光能利用效率的遥感模拟·····	付 刚,周宇庭,沈振西,等 (6989)
天山雪岭云杉大气花粉含量对气温变化的响应·····	潘燕芳,阎 顺,穆桂金,等 (6999)
春季季风转换期间孟加拉湾的初级生产力·····	刘华雪,柯志新,宋星宇,等 (7007)
降水量对川西北高寒草甸牦牛粪分解速率的影响 ·····	吴新卫,李国勇,孙书存 (7013)
基于 SOFM 网络对黄土高原森林生态系统的养分循环分类研究·····	陈 凯,刘增文,李 俊,等 (7022)
不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征 ·····	王 琰,陈建文,狄晓艳 (7031)
盐生境下硅对坪用高羊茅生物学特性的影响 ·····	刘慧霞,郭兴华,郭正刚 (7039)
高温胁迫对不同种源希蒙得木叶片生理特性的影响·····	黄激激,张念念,胡庭兴,等 (7047)
黄土高原水土保持林对土壤水分的影响 ·····	张建军,李慧敏,徐佳佳 (7056)
青杨雌雄群体沿海拔梯度的分布特征·····	王志峰,胥 晓,李霄峰,等 (7067)
大亚湾西北部春季大型底栖动物群落特征·····	杜飞雁,林 钦,贾晓平,等 (7075)
湛江港湾浮游桡足类群落结构的季节变化和影响因素·····	张才学,龚玉艳,王学锋,等 (7086)
台湾海峡鲈鱼种群遗传结构·····	张丽艳,苏永全,王航俊,等 (7097)
洱海入湖河流苴河下游氮磷季节性变化特征及主要影响因素·····	于 超,储金宇,白晓华,等 (7104)
转基因鱼试验湖泊铜锈环棱螺种群动态及次级生产力·····	熊 晶,谢志才,蒋小明,等 (7112)
河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征 ·····	王维奇,徐玲琳,曾从盛,等 (7119)
EDTA 对铅锌尾矿改良土壤上玉米生长及铅锌累积特征的影响 ·····	王红新,胡 锋,许信旺,等 (7125)
不同包膜控释尿素对农田土壤氮挥发的影响·····	卢艳艳,宋付朋 (7133)
垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响·····	马 丽,李潮海,付 景,等 (7141)
DCE 不同施用时间对小麦生长期 N ₂ O 排放的影响 ·····	纪 洋,余 佳,马 静,等 (7151)
氮肥、钙肥和盐处理在冬小麦融冻胁迫适应中的生理调控作用 ·····	刘建芳,周瑞莲,赵 梅,等 (7161)
东北有机及常规大豆对环境影响的生命周期评价 ·····	罗 燕,乔玉辉,吴文良 (7170)
土壤施硒对烤烟生理指标的影响·····	许自成,邵惠芳,孙曙光,等 (7179)
不同种植方式对花生田间小气候效应和产量的影响·····	宋 伟,赵长星,王月福,等 (7188)
西花蓟马的快速冷驯化及其生态学代价·····	李鸿波,史 亮,王建军,等 (7196)
温度对麦长管蚜体色变化的影响·····	邓明明,高欢欢,李 丹,等 (7203)
不同番茄材料对 B 型烟粉虱个体发育和繁殖能力的影响 ·····	高建昌,郭广君,国艳梅,等 (7211)
基于生态系统受扰动程度评价的白洋淀生态需水研究·····	陈 贺,杨 盈,于世伟,等 (7218)
两种典型养鸡模式的能值分析 ·····	胡秋红,张力小,王长波 (7227)
四种十八碳脂肪酸抑藻时-效关系分析的数学模型设计 ·····	何宗祥,张庭廷 (7235)
流沙湾海草床重金属富集特征·····	许战州,朱艾嘉,蔡伟叙,等 (7244)
基于 QuickBird 的城市建筑景观格局梯度分析 ·····	张培峰,胡远满,熊在平,等 (7251)
景观空间异质性及城市化关联——以江苏省沿江地区为例·····	车前进,曹有挥,于 露,等 (7261)
基于 CVM 的太湖湿地生态功能恢复居民支付能力与支付意愿相关研究·····	于文金,谢 剑,邹欣庆 (7271)
专论与综述	
北冰洋海域微食物环研究进展·····	何剑锋,崔世开,张 芳,等 (7279)
城市绿地的生态环境效应研究进展·····	苏泳娴,黄光庆,陈修治,等 (7287)
城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应 ·····	方凤满,林跃胜,王海东,等 (7301)
研究简报	
三峡库区杉木马尾松混交林土壤 C、N 空间特征 ·····	林英华,汪来发,田晓堃,等 (7311)
广州小斑螟发生与环境因子的关系·····	刘文爱,范航清 (7320)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 39 * 2011-12



封面图说:黄河的宁夏段属于中国的半荒漠地区,这里气候干燥、降水极少(250mm 以下)、植被缺乏、物理风化强烈、风力作用强劲、其蒸发量超过降水量数十倍。人们从黄河中提水引水灌溉土地,就近形成了荒漠中的绿洲。有水就有生命,有水就有绿色。这种独特的条件形成了人与沙较量的生态关系——不是人逼沙退就是沙逼人退。

彩图提供:陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

王琰, 陈建文, 狄晓艳. 不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征. 生态学报, 2011, 31 (23): 7031-7038.

Wang Y, Chen J W, Di X Y. Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (23): 7031-7038.

不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征

王 琰, 陈建文, 狄晓艳 *

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

摘要: 采用盆栽控水试验方法, 设置正常水分 (T_1 , 田间持水量的 70%—80%)、轻度胁迫 (T_2 , 田间持水量的 50%—60%) 和严重胁迫 (T_3 , 田间持水量的 30%—40%) 3 个水分梯度, 对 6 个油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 种源 (陕西洛南 LN, 陕西桥山 QO, 山西灵空山 LK, 辽宁千山 QN, 河北雾灵山 WL 和山西芦芽山 LY) 的光合参数和叶绿素荧光参数进行比较, 探讨种源间光合和水分利用特征的差异及其与气孔导度和荧光参数的关系。结果表明, 3 个水分梯度下 6 个种源的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (Tr)、气孔导度 (G_s)、水分利用效率 (WUE)、原初光能转换效率 (F_v/F_m) 和 PS II 潜在活性 (F_v/F_o) 差异均极显著 ($P < 0.01$), 在 T_1 和 T_3 下, 各种源的实际光量子效率 Φ_{PSII} 和电子传递速率 ETR 差异显著 ($P < 0.05$)。在 T_2 下, LK 和 WL 的 P_n 达到最大, 具有轻度胁迫下提高光合生产力的倾向。在 T_3 下, QN 种源的 P_n 和 WUE 较高 (除 LK 的 WUE 最高外), 而 WL 的 P_n 和 WUE 较低 (除 LK 的 P_n 最低外); 6 个种源中 QN 的 P_n 、 Φ_{PSII} 和 ETR 最大, LY 和 QO 的光合生产力仅次于 QN, 而 LN、LK 和 WL 的 P_n 、 G_s 、 Φ_{PSII} 和 ETR 比较低, 其光合生产力及光量子产量受干旱胁迫影响较大。LK 的 WUE 在各个水分梯度下均显著高于其它种源 ($P < 0.05$)。在 T_3 下, 各种源通过降低 Tr 提高 WUE。在 T_1 下, 气孔限制是影响油松 P_n 的主要因素; 在 T_2 和 T_3 下, P_n 和 WUE 均与气孔导度、PS II 反应中心的光量子产量和电子传递速率密切相关。

关键词: 油松; 光合参数; 叶绿素荧光参数; 水分胁迫

Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.)

WANG Yan, CHEN Jianwen, DI Xiaoyan *

Institute of the Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) is the most widely distributed conifer in North China. Due to its wide adaptability to natural conditions and higher tolerance to environmental stresses such as drought and nutrient deficiency, Chinese Pine has played the most important role in forestation and water and soil conservation in North China. Against a wide range of natural water conditions across the entire distribution area, some of the provenances of Chinese Pine may have evolved a higher degree of adaptability to water stress than others. In this study the possible differences in photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics among six provenances of this species were investigated. Seedlings of six provenances of Chinese Pine, including provenances Luonan (LN) and Qiao Mountain (QO) from Shannxi, provenances Lingkong Mountain (LK) and Luya Mountain (LY) from Shanxi, provenance Qian Mountain (QN) from Liaoning and provenance Wuling Mountain (WL) from Hebei, were transplanted in pots in a greenhouse and treated with progressive water stress. The parameters of photosynthesis and chlorophyll fluorescence for them were measured under three soil water treatments (T_1 , normal water condition; T_2 , mild stress; and T_3 , severe stress; with 70%—80%, 50%—60% and

基金项目: 国家自然科学基金 (31070459); 山西省科技厅攻关项目 (2006031099-01); 山西省自然科学基金 (2007021032)

收稿日期: 2010-10-19; **修订日期:** 2010-12-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dixy@sxu.edu.cn

30%—40% of the field capacity, respectively). The difference in photosynthesis and water utilization characteristics, and the relationships of photosynthetic and water use parameters with stomatal conductance and chlorophyll fluorescence parameters among these provenances were analyzed. The results showed that there were significant differences ($P < 0.01$) in net photosynthetic rate (Pn), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (G_s), water use efficiency (WUE), potential efficiency of primary conversion of light energy of PS II (F_v/F_m) and potential activity of PS II (F_v/F_o) among these provenances under T_1 , T_2 and T_3 . Significant differences ($P < 0.05$) in actual quantum yield of PS II electron transport (Φ_{PSII}) and apparent photosynthetic electron transport rate (ETR) were detected under T_1 and T_3 . Provenances LK and WL had the highest Pn under T_2 , and showed stronger adaptability to mild water stress. Under T_3 , provenance QN had higher Pn and WUE than the rest except for the WUE of provenance LK, and provenance WL had lower Pn and WUE than the others except for the Pn of provenance LK; provenance QN had the highest Pn , Φ_{PSII} and ETR among all the provenances; and provenances QO and LY had the second highest Pn ; while provenances LK, WL and LN had lower Pn , G_s , Φ_{PSII} and ETR, and it indicated that the severe water stress had larger effect on the photosynthetic ability and quantum yield of PS II in provenances LK, WL and LN. Provenance LN showed decreasing F_v/F_m with increasing F_o under T_3 compared with T_1 , and it suggested that its PS II reaction centre might be destroyed or temporarily inactivated. The Pn , G_s , Φ_{PSII} and ETR in provenance LK were significant lower than in the rest under T_3 ($P < 0.05$), and provenance LK had significant higher WUE than the rest under every treatment ($P < 0.05$). The WUE in all the provenances increased due to the decrease of Tr under T_3 . The result of correlation analysis showed that the stomatal conductance was the main influencing factor on Pn of Chinese Pine under T_1 ; and that Pn and WUE were closely related with the stomatal conductance, quantum yield of PS II and electron transport rate under T_2 and T_3 .

Key Words: *Pinus tabulaeformis* Carr; photosynthetic parameters; chlorophyll fluorescence parameters; water stress

我国北方地区降水量少,土壤干旱贫瘠,水分是影响该地区植物生长的主要生态因子。油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)是我国的特有种,适应性强,具有良好的保持水土、涵养水源和改良土壤的功能,在生态恢复和重建中具有重要作用。其分布广泛,地理变异大,不同生态型之间在形态、生理、物候、抗性、生长等方面均有所差别,种内生态遗传分化明显^[1-2]。现有油松林为天然次生林或人工林,天然林比较稳定,破坏后成为疏林或演替为油松-山杨-桦树混交林或油松-辽东栎混交林。油松人工林由于干旱缺水、水土流失严重而遭受到持续干旱的危害,出现了大面积的“小老树”现象,林下形成了极其严重的“土壤干层”,林木生长条件和水分生态环境日趋恶化^[2-3]。关于油松的研究主要集中于其形态、耗水和光合特征,仅有油松与其它针阔叶植物荧光特征的比较研究^[4]。本文通过水分处理盆栽实验,研究了6个油松种源幼苗的光合和叶绿素荧光参数对水分胁迫的响应特征,旨在探讨不同种源在干旱条件下光合生理特性和水分代谢特性的差异性及其形成机理,为油松品种选育提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验采用6个种源油松的4年生幼苗为材料(表1),种源地分别为陕西洛南(LN)、陕西桥山(QO)、山西灵空山(LK)、辽宁千山(QN)、河北雾灵山(WL)、山西芦芽山(LY)。

2002年分赴各种源地采集油松天然林种子,2003年在自控温室内的苗盘中播种育苗,2005年移栽于室外苗圃。2007年8月4日盆栽移植,每个种源为一组,每组15盆,每盆1株,在室内进行正常苗期管理。花盆上径19cm,下径13cm,高12.5cm。将花盆和幼苗称重后,每盆添加等量的土壤(泥炭土:根系原土=1:1),并取3份以烘干法测定土壤干重。环刀法测得土壤田间持水量(θ_f)为38%。

表 1 6 个油松种源地概况

Table 1 Characteristics of sampling sites in six provenances of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.)

种源 Provenance	地点 Site					
	陕西洛南 LN	陕西桥山 QO	山西灵空山 LK	辽宁千山 QN	河北雾灵山 WL	山西芦芽山 LY
经度 Longitude	110°20′	109°45′	112°13′	123°4′	117°25′	111°53′
纬度 Latitude	34°20′	35°48′	36°37′	41°18′	40°33′	38°35′
年均温 Annual mean temperature/℃	12	8.6	8	8.7	7.6	4
年降水量 Annual precipitation/mm	850	580	600	720	760	500

1.2 试验方法

1.2.1 土壤水分胁迫处理

2007 年 9 月 2 日开始处理实验,首先对苗木 1 次性充分浇水,然后在室内自然失水。土壤含水量采用称重法进行控制,每日 7:00—8:00 测定花盆总重(花盆+苗+土壤+水),并计算土壤相对含水量(土壤相对含水量=土壤含水量/田间持水量)。在土壤相对含水量^[5]为 70%—80% $\theta_f(T_1)$ 、正常水分)、50%—60% $\theta_f(T_2)$ 、轻度胁迫)和 30%—40% $\theta_f(T_3)$ 、严重胁迫)的梯度下测定油松幼苗的各种生理生化参数。实验结束时测定花盆总重、苗木重、土壤湿重和烘干土重。因为苗木较小,其重量在处理期间变化忽略不计。

1.2.2 生理生化参数测定

采用 Li-6400(LI-COR, U. S., 叶室为 2cm×3cm)便携式光合测定系统,从每个种源中选取健康的盆栽幼苗 5 株(5 个重复),每株苗木上部选 5 个生长良好的成熟针叶,测定光合参数:净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)和气孔导度(G_s)以及相应的环境因子,每个重复测定 10 个记录。参考李轩然等的方法^[3, 6],将单个油松叶片的横切面看做一段圆弧,利用游标卡尺(精确 0.02mm)测量叶片长 1/2 处的叶片弦长(a)和弦高(b)值,依据公式 $r = (a^2 + 4b^2) / 8b$ 计算圆弧半径 r ,然后采用 $S = L \times [2r \times \arcsin(a/2r) + a]$ ($L = 2\text{cm}$) 计算单叶的叶面积。参考油松相同叶龄的光饱和点^[7],借助人工光源,稳定光照于 $(1000 \pm 50) \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。配备 6400-40 荧光叶室测定叶绿素荧光参数,样品暗适应一夜(12h)后,从测定日的 8:00 开始取植株上部的 5 个成熟针叶,测定初始荧光(F_o),随后加一个强闪光($6000 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,脉冲时间 0.7s)测定最大荧光(F_m),然后在自然光下适应 20min,当荧光基本稳定时测定稳态时的荧光(F_s),之后再加一个强闪光($6000 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,脉冲时间 0.7s),记录光下最大荧光(F_m'),同时将叶片遮光,暗适应 3s 后打开远红外光,5s 后测定最小荧光(F_o')。测定的同时,记录原初光能转换效率 F_v/F_m 、实际光量子产量 Φ_{PSII} 、电子传递速率 ETR。每个土壤水分梯度下每个种源测定 5 个重复(各 1 个植株)。实验期间环境条件相对稳定,气温(24 ± 0.5)℃,空气相对湿度(49 ± 1)%。

1.2.3 数据处理

采用 SPSS 12.0 软件对所得数据进行 One-way ANOVA、Duncan 多重比较和 Person 相关分析。

2 结果与分析

2.1 土壤水分对光合参数的影响

在 3 个水分梯度下,6 个种源的 P_n 、 G_s 、 Tr 和 WUE 差异均极显著($P < 0.01$),表明 6 个种源光合能力和水分利用能力差别较大。从不同土壤水分梯度下 6 个油松种源的光合水分参数(图 1)可见, T_1 和 T_2 下,种源 QN 的 P_n 和 G_s 显著低于其它种源(T_2 下 LN 的 P_n 除外), T_1 下,其 P_n 比其它 5 个种源低 20%—30%, G_s 低 24%—51%; T_2 下, P_n 比 WL、LK、QO 和 LY 的分别低 37%、33%、23% 和 23%, G_s 比其它 5 个种源的低 42%—56%。 T_3 下 6 个种源的净光合速率排序为:种源 QN > LY > QO > LN > WL > LK, QN 的 P_n 比其他种源高 4.0%—80.0%,与 LN、WL 和 LK 差异显著($P < 0.05$),LK 的 P_n 显著低于其他种源($P < 0.05$)。3 个水分梯度下,种源 LK 的 WUE 均显著高于其他种源。 T_3 下,6 个种源 WUE 排序为:种源 LK > QO $\approx$ QN > LN > LY > WL。其中 LK 的 WUE 最高,主要与气孔开度的减少或部分关闭(G_s 降低了 77.5%),蒸腾耗散大幅降低有

关;LY 在 T_3 仍保持高的 G_s 和 Tr , 是其 WUE 低的主要原因。

随着土壤相对含水量的降低,各种源的 G_s 和 Tr 与 P_n 的变化基本一致。仅有种源 QN 的 G_s 和 Tr 与 P_n 变化不同,其 G_s 和 Tr 始终处于较低状态且变化平缓, P_n 逐渐增大, T_1 和 T_2 下的 P_n 较其它种源低,而 T_3 下 P_n 最高,干旱胁迫下仍能维持较高的光合能力,对干旱环境适应能力强。其余 5 个种源的 P_n 、 G_s 和 Tr 均在 T_3 下达到最小值,具有通过降低气孔导度、减少水分散失来抵御干旱胁迫的能力。其中种源 LN、QO 和 LY 的 P_n 呈下降趋势,轻度和严重干旱胁迫下光合能力受抑;LK 和 WL 种源呈上升-下降趋势,在 T_2 下达到最大,轻度干旱下光合生产力提高。

6 个种源的 WUE 均在 T_3 下达到最大,表明油松通过降低气孔开度、减少散失来提高水分利用效率,从而避免干旱胁迫造成的损伤。

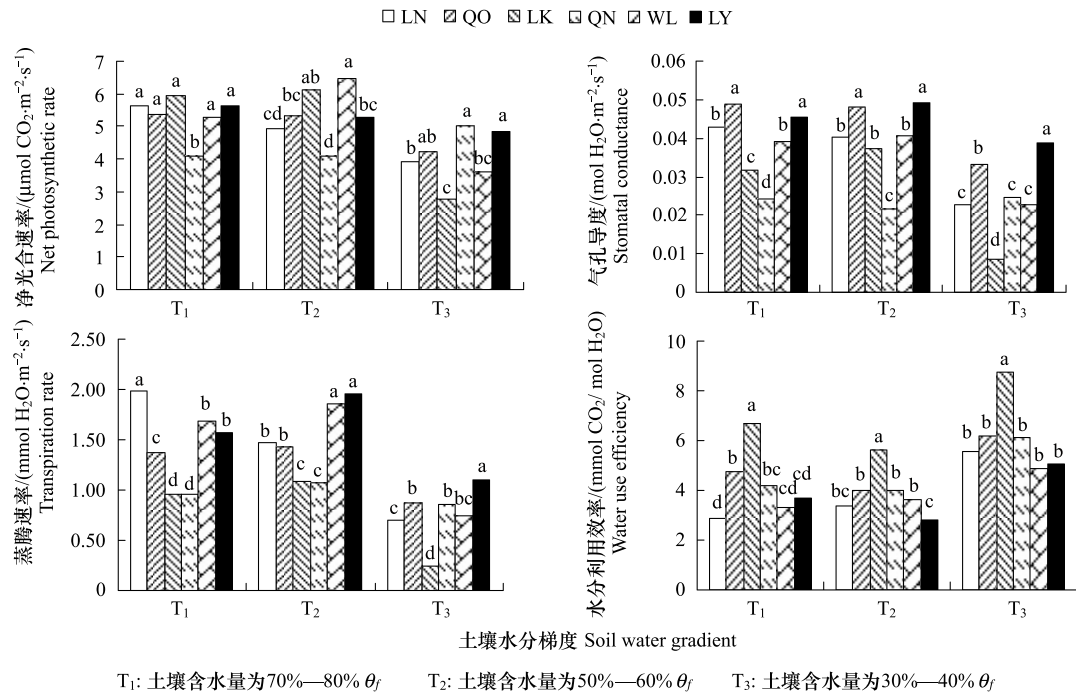


图1 土壤水分梯度下6个油松种源的光合水分参数

Fig. 1 Net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and water use efficiency of six provenances of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) under different soil water gradients

不同字母表示在同一水分条件下种源间差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

2.2 土壤水分对叶绿素荧光参数的影响

初始荧光 (F_o) 是 PS II 反应中心处于完全开放时的荧光产量。从不同水分梯度下 6 个油松种源的量子产量及荧光参数变化 (图 2) 可见,不同干旱胁迫处理间、不同种源间的 F_o 差异不显著 ($P > 0.05$), 6 个种源的 F_o 在 27.32—49.82 之间,说明该参数比较稳定,这与段爱国等^[8]对华山松 F_o 的研究结果一致。 T_2 下 QN 的 F_o 仅为 T_1 的 65%, T_3 下为 T_1 的 102%; LN 变化趋势与其相反, T_2 下的 F_o 为 T_1 的 150%, T_3 下为 T_1 的 127%; T_3 下 LY 和 QO 的 F_o 为 T_1 的 116% 和 120%; LK 和 WL 整个过程中只有很小的变化。

叶绿素荧光参数 F_v/F_m 和 F_v/F_o 常用以度量叶片 PS II 原初光能转换效率和 PS II 的潜在活性。不同干旱胁迫处理间的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 差异不显著 ($P > 0.05$), 6 个种源的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 变化规律基本一致,图 2 仅给出 F_v/F_m 的变化。3 个水分梯度下,6 个种源的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 差异均极显著 ($P < 0.01$), 其范围为 0.798—0.839 和 3.966—5.207, 其中 QN 的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 显著低于其他种源 ($P < 0.05$), 范围为 0.798—0.808 和 3.97—4.24, 该种源 PS II 原初光能转化效率和反应中心潜在活性比较低,对干旱胁迫不敏感。6 个油松种源的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 均在 T_1 下最高,干旱胁迫下有所降低,但降幅不大,表明它们叶片的最大 PS II 光

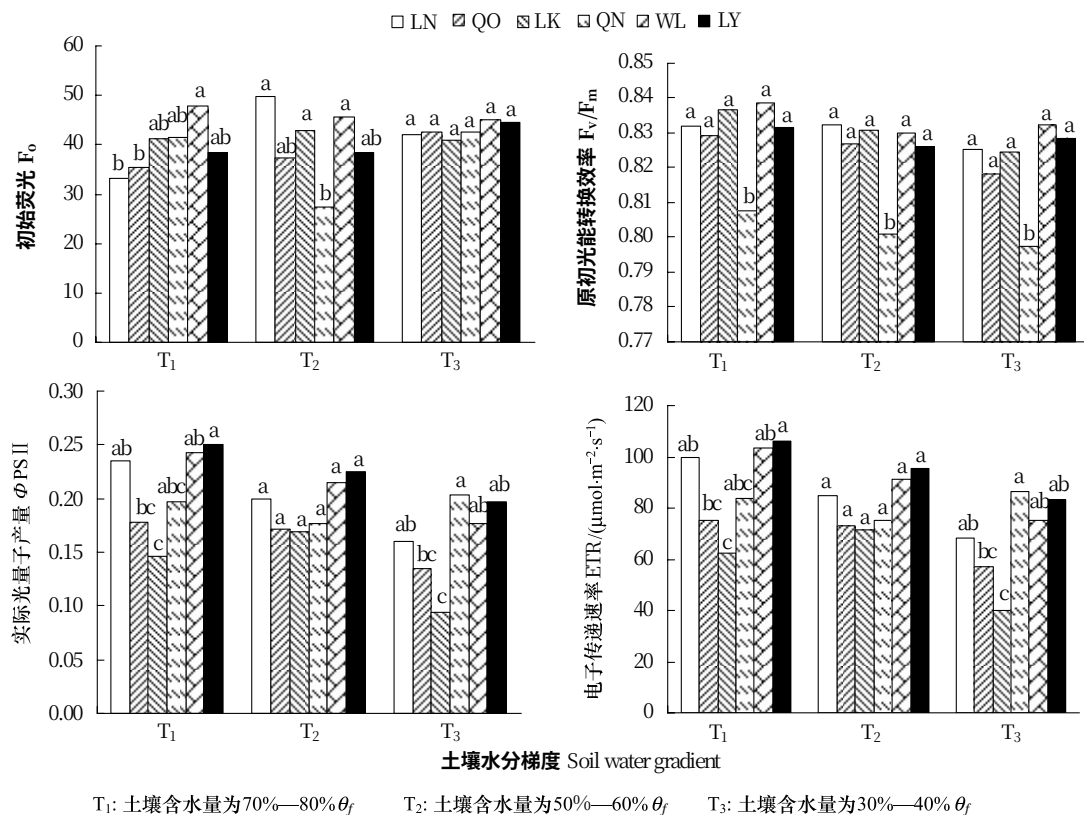


图2 土壤水分梯度下6个油松种源的量子产量及荧光参数变化

Fig. 2 F_0 , F_v/F_m , Φ_{PSII} and ETR of six provenances of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) under different soil water gradients

不同字母表示在同一水分梯度下种源间差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

能转换效率和反应中心潜在活性受水分胁迫的影响比较小。

实际光量子产量 (Φ_{PSII}) 反映 PS II 反应中心部分关闭情况下的实际光能捕获效率, 表观光合电子传递速率 (ETR) 用于度量由光化学反应到碳固定这一过程中的电子传递情况, 即驱动 PS II 的实际量子流量。6 个种源这两个参数的变化基本一致。不同干旱胁迫处理间 Φ_{PSII} 和 ETR 差异均极显著 ($P < 0.01$), 其中 T₃ 与 T₁ 和 T₂ 下的差异显著 ($P < 0.05$)。6 个种源的 Φ_{PSII} 和 ETR 在 T₁ 和 T₃ 下差异均显著 ($P < 0.05$), T₁ 下, LY 的 Φ_{PSII} 和 ETR 显著高于 QO 和 LK ($P < 0.05$); T₃ 下, 种源 QN 的 Φ_{PSII} 和 ETR 显著高于 QO 和 LK ($P < 0.05$) 且达到最大, 此时 PS II 的电子传递活性大, 对于旱适应性强, 光合电子传递速率及 PS II 量子产量大, 与 P_n 变化基本一致。种源 LN、QO、WL 和 LY 的 Φ_{PSII} 和 ETR 随水分含量减少而逐渐降低, 说明随着土壤水分胁迫的加强, 他们 PS II 反应中心的开放比例下降, 叶绿体吸收的光能用于光化学转换的比例减少, 光合电子传递能力降低, 其中 LN 和 WL 降低最多, 其光系统 II 对于旱胁迫更敏感。LK 的 Φ_{PSII} 和 ETR 随水分降低呈先升后降的趋势, 且整个处理中其光化学转换效率和光合电子传递速率均较低。

2.3 相关分析

由表 2 可见, T₁ 下, P_n 与 G_s 极显著正相关 ($P < 0.01$); T₂ 和 T₃ 下, P_n 与 G_s 、 Φ_{PSII} 和 ETR 显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关, P_n 与 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和 F_0 相关性不显著 ($P > 0.05$)。表明适宜水分时, 气孔导度是制约 P_n 的主要因素; 干旱胁迫下, P_n 的下降与气孔导度、量子产量和电子传递速率的降低密切相关。

3 个水分梯度下 6 个种源油松的 WUE 均与 G_s 、 Φ_{PSII} 和 ETR 极显著正相关 ($P < 0.01$), 而与 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和 F_0 相关性不显著 ($P > 0.05$)。表明油松的水分利用效率是其气孔、PS II 反应中心光化学转换效率和电子传递速率的综合表现结果。

对荧光参数 F_o 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 $\Phi PS II$ 和 ETR 的相关分析表明, F_v/F_m 和 F_v/F_o 的相关系数 $r>0.908^{**}$, $\Phi PS II$ 和 ETR 存在线性相关($r=1.000^{**}$), 表明它们相互影响和制约, 在指示油松光合特性方面有一致性。

表 2 净光合速率(P_n)、水分利用效率(WUE)与气孔导度(G_s)和荧光参数的相关分析

Table 2 Correlation analysis of net photosynthetic rate (P_n) and water use efficiency (WUE) with stomatal conductance (G_s) and chlorophyll fluorescence parameters

土壤水分梯度 Water gradient	光合参数 Parameter	气孔导度 G_s	原初光能转换 效率 F_v/F_m	PS II 的潜在活性 F_v/F_o	初始荧光 F_o	实际光量子 产量 $\Phi PS II$	电子传递速率 ETR
T ₁	P_n	0.522 **	0.276	0.225	-0.093	-0.050	-0.051
T ₂	P_n	0.521 **	0.140	0.004	0.217	0.462 *	0.463 *
T ₃	P_n	0.577 **	-0.171	-0.187	-0.049	0.448 *	0.449 *
T ₁	WUE	0.865 **	0.147	0.089	-0.060	0.629 **	0.630 **
T ₂	WUE	0.855 **	0.196	0.190	0.054	0.659 **	0.660 **
T ₃	WUE	0.971 **	-0.057	-0.131	0.118	0.751 **	0.751 **

* $P<0.05$; ** $P<0.01$; $N=30$

3 讨论

油松地理分布广阔,抗旱性强,分布地域内气温、水分变化幅度较大。在长期的环境适应和自然选择过程中,形成了形态、生理特征各异的不同种源和地理小种^[1-2]。已有研究表明,油松的形态性状特征与其自身的生物学特性有关,同时也受温度、水分、坡向、海拔和经纬度等环境因子影响,特别是受经纬度双重影响,其地理变异是随经、纬度的升降而增减,多数由西南向东北逐渐递增或递减^[1,3],说明其光合生产力和水分利用效率的变化规律极为复杂。

本研究表明,油松可通过减少水分散失来提高水分利用效率,从而避免干旱胁迫带来的伤害;不同种源油松表现出不同的光合响应特征。轻度胁迫(50%—60% θ_f)有助于提高 LK 和 WL 种源的光合生产力。种源 QN 在严重胁迫下 P_n 和 WUE 均比较高,而 WL 的 P_n 和 WUE 均比较低。随着水分胁迫增强,种源 QN 的 P_n 逐渐升高,在严重胁迫(30%—40% θ_f)下与多数种源差异显著($P<0.05$),表现出了强的抗旱能力。这与其种源地位于半阳坡,群落立地条件为裸岩和粗骨性土壤(其他 5 个种源为山地棕壤或褐土),土壤有机质含量和水分湿度均较低,且其取样海拔低(约 600m,其最高海拔 708.3m)有关,还与其气孔开度、PS II 反应中心的光量子产量和光合电子传递速率随着水分胁迫的加剧而升高,转化为热能耗散的比例变化不大有关。其他 5 个种源随着水分胁迫的加剧, P_n 显著降低,其原因可能是严重干旱胁迫抑制了光化学活性,使其 PS II 的原初光能转化效率、光合作用潜在活性和 PS II 实际光能转化效率受到抑制。其中芦芽山种源在严重干旱下降低幅度较小,能够保持较高光合,这与其位于吕梁山北端,属于半干旱气候,年均温和年降雨量较其他种源低(4℃和 500mm),年均日照略高于其他种源(2944h)有关,但由于其蒸腾速率亦较高,水分利用效率显著低于 LK。桥山种源地位于子午岭,属于半干旱和半湿润气候的交界处,年均降雨量约 587mm,与其严重胁迫下 P_n 介于 LY 和 LN 之间的结果一致。雾灵山种源地位于迎风坡,降雨量充分(年降雨量 760mm),但蒸发量大且取样海拔(约 1000 m)低,土壤湿度低,这可能是该种源在严重胁迫下 P_n 和 WUE 均比较低的原因,这与已有关于光合特性和保护酶的研究结果一致^[9]。灵空山种源地位于半阳坡,年均温较高(8℃),年均降雨量较少(600mm),种源地温暖偏干的环境使其在正常水分和轻度胁迫下保持了较高的净光合速率,严重胁迫下 WUE 显著高于其他种源($P<0.05$)。洛南种源地位于秦岭东段南坡,属于暖温带湿润气候,年均温和年均降雨量较其他种源高(12℃和 850mm),土壤湿度较高,但其气温、降水年际变化较大,在整个处理过程中其 P_n 和 WUE 均处于中等水平。

通常叶绿素吸收的光能通过光合电子传递,叶绿素荧光发射和热耗散 3 种途径来消耗。干旱胁迫一方面可能影响光合作用的电子传递、光合磷酸化等过程,同时也可能直接引发叶绿素结构的损伤^[10]。 F_o 的变化可以推断 PS II 反应中心的状况, F_v/F_m 下降同时伴随 F_o 的下降,表示 PS II 热耗散增加;若同时出现 F_o 的增加,

表示 PS II 反应中心的破坏或可逆失活^[10-11]。本研究中, QN 在 T_2 下的 F_o 和 F_v/F_m 均有所降低, 表明轻度胁迫下热耗散增加, 一定程度上防止了光合器官受到破坏; T_3 下, 其 F_v/F_m 降低, F_o 却恢复到 T_1 下的水平, 表明严重胁迫下, 它的反应中心受干旱胁迫的影响不大, 具有较高的抵抗干旱的能力。 T_3 下 LN 的 F_v/F_m 降低, F_o 增加, 其 PS II 反应中心受到一定程度的破坏或可逆失活, 光合作用原初反应过程受抑制, 光量子产量和光合电子传递速率降低。

F_v/F_m 常作为环境胁迫程度的探针^[12], 干旱胁迫能显著降低 F_v/F_m , 在没有环境胁迫的条件下, F_v/F_m 比较稳定, 一般在 0.75—0.85^[13-15]。但也有研究表明, 紫花苜蓿、沙枣和孩儿拳头在不同干旱条件下变化很小, 差异不显著^[16-17]。本研究的整个控水过程中, F_v/F_m 比较稳定, 变化范围为 0.80—0.84, 而部分种源在严重干旱胁迫下 P_n 出现负值, 表明油松 F_v/F_m 对干旱胁迫不敏感, 不能作为其干旱胁迫的探针。已有研究表明, F_v/F_m 与光合作用的净产率正相关^[18], 唐礼俊等^[19]发现正常水分下 5 个华山松种源 F_v/F_m 与其生长量大小正相关, 北方种源的 F_v/F_m 低于南方种源。这与本研究中 F_v/F_m 与 P_n 在正常水分下为正相关, 北部种源 QN 的 F_v/F_m 最低的结论相似。说明正常水分下松属的 F_v/F_m 可能与其光合生产力具有一定的相关性。

本研究在盆栽实验时, 最低含水量 T_3 约为 12%, 占田间持水量的 32%, 实验过程中部分幼苗的 P_n 出现负值, 为保证苗木能很快恢复生长, T_3 后采用了复水处理, 一定程度上影响了光合与荧光参数, 致使 QN 种源未达到生长的水分临界点, 今后应进一步加强该种源水分临界点光合特性的研究。

References:

- [1] Tang J L, Xu H C. Comparative research on the water potential and transpiration rate of Chinese Pine plantations from different provenances in Beijing. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1992, 16(2):97-107.
- [2] Xu H C. Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.). Beijing: China Forestry Press, 1993, 18-25.
- [3] Di X Y, Zhu X Q, Ma J P, Chi X M, Chen J W, Wang M B. Effects of soil water stress on photosynthetic characteristics in five provenances of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.). *Bulletin of Botanical Research*, 2009, 29 (4):539-543.
- [4] He Y H, Tian Y L, Guo L S. chlorophyll fluorescence characteristics of some coniferous and deciduous tree species under different irradiance. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (5):467-472.
- [5] Yang J W, Liang Z S, Han R L, Wang P Z. Growth and water consumption characteristics of Chinese Pine under soil drought stress. *Journal of Northwest A& F University: Natural Science Edition*, 2004, (32) 4:89-96.
- [6] Li X R, Liu Q J, Cai Z, Ma Z Q. Leaf area index measurement of *Pinus Elliotii* plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (12): 4009-4105.
- [7] Zhang W Q, He K N, Wang Z N, Tian JH, Yin J. Effect of light radiation intensity on photosynthetic characteristics and water use efficiency to seedlings of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis*. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(2):108-113.
- [8] Duan A G, Bao E J, Zhang J G. Chlorophyll fluorescence parameters in needle leaves of different leafages and locations of *Pinus armandii*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30 (5):26-32.
- [9] Wang Y, Di X Y, Ma J P, Zhu X Q, Chen J W. Drought Resistance of Seedlings of Eight Provenances of Chinese Pine. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(4):47-50.
- [10] Sun J K, Zhang W H, Lu Z H, Liu X C. Chlorophyll fluorescence characteristics of *Elaeagnus angustifolia* L. and *Grewia bioba* G. Don Var: parviflora (Bge.) Hand.-Mazz. Seedlings under drought stress. *Bulletin of Botanical Research*, 2009, 29 (2): 216-223.
- [11] Xu D Q, Li D Y. Studies on stomatal limitation of photosynthesis in the bamboo (*Phyllostachys pubescens*) leaves. *Journal of Plant Physiology*, 1987, 13 (2): 154 -160.
- [12] Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16 (4): 444-448.
- [13] Bjorkman O, Demmi G B. Photon yield of O_2 evolution and chlorophyll fluorescence at 77k among vascular plant s of diverse origins. *Planta*, 1987, 170:489-504.
- [14] Johnson G N, Youn G A J, Scholes J D, Horton P. The dissipation of excess excitation energy in British plant species. *Plant, Cell and Environment*, 1993, 16:673-679.
- [15] Zheng S X, Shangguan Z P. Comparison of leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in eight broad-leaved tree species. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4):1081-1087.

- [16] Han R H, Lu X S, Gao G J, Yang X J. Photosynthetic physiological response of purple alfalfa (*Medicago sativa*) to drought Stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5229-5237.
- [17] Qi W, Tan H, zhai H. Photosynthetic characters and fluorescence parameters of different grape stocks under water stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5):835-838.
- [18] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The Basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42:313-349.
- [19] Tang L J, Li B S, Tang C Q, Kuang T Y, Tang P S. Geographical variation in the parameters of chlorophyll fluorescence induction kinetics of *Pinus Armandii* and its relations with the growth of tree height. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(5):474-479.

参考文献:

- [1] 唐季林, 徐化成. 油松不同种源在北京地区水势和蒸腾速率的比较研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1992, 16(2):97-107.
- [2] 徐化成. 油松. 北京: 中国林业出版社, 1993, 18-25.
- [3] 狄晓艳, 朱小琪, 马建平, 池喜梅, 陈建文, 王孟本. 土壤水分胁迫对5个种源油松光合特性的影响. *植物研究*, 2009, 29(4):539-543.
- [4] 何炎红, 田有亮, 郭连生. 几种针阔叶树种不同光照强度下叶绿素荧光特性的研究. *生态学杂志*, 2005, 24(5):467-472.
- [5] 杨建伟, 梁锁锁, 韩蕊莲, 王培榛. 土壤干旱对油松生长及水分利用的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(4):89-96.
- [6] 李轩然, 刘琪碌, 蔡哲, 马泽清. 湿地松林叶面积指数测算. *生态学报*, 2006, 26(12):4009-4105.
- [7] 张卫强, 贺康宁, 王正宁, 田晶会, 尹婧. 光辐射强度对侧柏油松幼苗光合特性与水分利用效率的影响. *中国水土保持科学*, 2006, 4(2):108-113.
- [8] 段爱国, 保尔江, 张建国, 何彩云, 赛力克. 华山松不同叶龄、部位针叶叶绿素荧光参数的动态变化规律. *北京林业大学学报*, 2008, 30(5):26-32.
- [9] 王琰, 狄晓艳, 马建平, 朱小琪, 陈建文, 王孟本. 8个油松种源抗旱性的比较研究. *水土保持通报*, 2009, 29(4):47-50.
- [10] 孙景宽, 张文辉, 陆兆华, 刘新成. 干旱胁迫下沙枣和孩儿拳头叶绿素荧光特性研究. *植物研究*, 2009, 29(2):216-223.
- [11] 许大全, 李的耀. 毛竹(*Phyllostachys pubescens*)叶光合作用的气孔限制研究. *植物生理学报*, 1987, 13(2):154-160.
- [12] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. *植物学通讯*, 1999, 16(4):444-448.
- [15] 郑淑霞, 上官周平. 8种阔叶树种叶片气体交换特征和叶绿素荧光特性比较. *生态学报*, 2006, 26(4):1081-1087.
- [16] 韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 杨秀娟. 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应. *生态学报*, 2007, 27(12):5229-5237.
- [17] 綦伟, 谭浩, 翟衡. 干旱胁迫对不同葡萄砧木光合特性和荧光参数的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(5):835-838.
- [19] 唐礼俊, 李渤生, 唐崇钦, 匡廷云, 汤佩松. 华山松叶绿素荧光诱导动力学参数的地理变异及其与树高生长的关系. *植物生态学报*, 1997, 21(5):474-479.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 23 December, 2011 (Semimonthly)
CONTENTS

Satellite-based modelling light use efficiency of alpine meadow along an altitudinal gradient	FU Gang, ZHOU Yuting, SHEN Zhenxi, et al (6989)
Changes in the concentrations of airborne <i>Picea schrenkiana</i> pollen in response to temperature changes in the Tianshan Mountain area	PAN Yanfang, YAN Shun, MU Guijin, et al (6999)
Primary production in the Bay of Bengal during spring intermonsoon period	LIU Huaxue, KE Zhixin, SONG Xingyu, et al (7007)
Effect of rainfall regimes on the decomposition rate of yak dung in an alpine meadow of northwest Sichuan Province, China	WU Xinwei, LI Guoyong, SUN Shucun (7013)
SOFM-based nutrient cycling classification of forest ecosystems in the Loess Plateau	CHEN Kai, LIU Zengwen, LI Jun, et al (7022)
Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine (<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.)	WANG Yan, CHEN Jianwen, et al (7031)
Effect of silicon supply on Tall Fescue (<i>Festuca arundinacea</i>) growth under the salinization conditions	LIU Huixia, GUO Xinghua, GUO Zhenggang (7039)
Effects of high-temperature stress on physiological characteristics of leaves of <i>Simmondsia Chinensis</i> seedlings from different provenances	HUANG Weiwei, ZHANG Niannian, HU Tingxing, et al (7047)
Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau	ZHANG Jianjun, LI Huimin, XU Jiajia (7056)
The distribution of male and female <i>Populus cathayana</i> populations along an altitudinal gradient	WANG Zhifeng, XU Xiao, LI Xiaofeng, et al (7067)
Analysis on the characteristics of macrobenthic community in the North-west Daya Bay of South China Bay in spring	DU Feiyan, LIN Qin, JIA Xiaoping, et al (7075)
The effects of season and environmental factors on community structure of planktonic copepods in Zhanjiang Bay, China	ZHANG Caixue, GONG Yuyan, WANG Xuefeng, et al (7086)
Population genetic structure of <i>Pneumatophorus japonicus</i> in the Taiwan Strait	ZHANG Liyan, SU Yongquan, WANG Hangjun, et al (7097)
Seasonal variation of nitrogen and phosphorus in Miju River and Lake Erhai and influencing factors	YU Chao, CHU Jinyu, BAI Xiaohua, et al (7104)
Population dynamics and production of <i>Bellamya aeruginosa</i> (Reeve) (Mollusca: Viviparidae) in artificial lake for transgenic fish, Wuhan	XIONG Jing, XIE Zhicai, JIANG Xiaoming, et al (7112)
Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland	WANG Weiqi, XU Linglin, ZENG Congsheng, et al (7119)
Effects of EDTA on growth and lead-zinc accumulation in maize seedlings grown in amendment substrates containing lead-zinc tailings and soil	WANG Hongxin, HU Feng, XU Xinwang, et al (7125)
Effects of different coated controlled-release urea on soil ammonia volatilization in farmland	LU Yanyan, SONG Fupeng (7133)
Effects of ridge planting on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize in high-yield field	MA Li, LI Chaohai, FU Jing, et al (7141)
Effect of timing of DCD application on nitrous oxide emission during wheat growing period	JI Yang, YU Jia, MA Jing, et al (7151)
The role of the fertilizing with nitrogen, calcium and sodium chloride in winter wheat leaves adaptation to freezing-thaw stress	LIU Jianfang, ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, et al (7161)
Environment impact assessment of organic and conventional soybean production with LCA method in China Northeast Plain	LUO Yan, QIAO Yuhui, WU Wenliang (7170)
Effects of selenium added to soil on physiological indexes in flue-cured tobacco	XU Zicheng, SHAO Huifang, SUN Shuguang, et al (7179)
Influence of different planting patterns on field microclimate effect and yield of peanut (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	SONG Wei, ZHAO Changxing, WANG Yuefu, et al (7188)
Rapid cold hardening of Western flower thrips, <i>Frankliniella occidentalis</i> , and its ecological cost	LI Hongbo, SHI Liang, WANG Jianjun, et al (7196)

- Effects of temperature on body color in *Sitobion avenae* (F.) DENG Mingming, GAO Huanhuan, LI Dan, et al (7203)
- Development and reproduction of *Bemisia tabaci* biotype B on wild and cultivated tomato accessions
..... GAO Jianchang, GUO Guangjun, GUO Yanmei, et al (7211)
- Study on ecological water demand based on assessment of ecosystem disturbance degree in the Baiyangdian Wetland
..... CHEN He, YANG Ying, YU Shiwei, et al (7218)
- Emergy-based analysis of two chicken farming systems: a perspective of organic production model in China
..... HU Qiuhong, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (7227)
- Mathematical model design of time-effect relationship analysis about the inhibition of four eighteen-carbon fatty acids on toxic
Microcystis aeruginosa HE Zongxiang, ZHANG Tingting (7235)
- Enrichment of heavy metals in the seagrass bed of Liusha Bay XU Zhanzhou, ZHU Aijia, CAI Weixu, et al (7244)
- A gradient analysis of urban architecture landscape pattern based on QuickBird imagery
..... ZHANG Peifeng, HU Yuanman, XIONG Zaiping, et al (7251)
- Landscape spatial heterogeneity is associated with urbanization: an example from Yangtze River in Jiangsu Province
..... CHE Qianjin, CAO Youhui, YU Lu, et al (7261)
- CVM for Taihu Lake based on ecological functions of wetlands restoration, and ability to pay and willingness to pay studies
..... YU Wenjin, XIE Jian, ZOU Xinqing (7271)
- Review and Monograph**
- Progress in research on the marine microbial loop in the Arctic Ocean HE Jianfeng, CUI Shikai, ZHANG Fang, et al (7279)
- Research progress in the eco-environmental effects of urban green spaces
..... SU Yongxian, HUANG Guangqing, CHEN Xiuzhi, et al (7287)
- Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust
..... FANG Fengman, LIN Yuesheng, WANG Haidong, et al (7301)
- Scientific Note**
- Spatial structures of soilcarbon and nitrogen of China fir and Masson pine mixed forest in the Three Gorger Reservoir Areas
..... LIN Yinghua, WANG Laifa, TIAN Xiaokun, et al (7311)
- The relationship between *Oligochroa cantonella* Caradja and environmental factors LIU Wenai, FAN Hangqing (7320)

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 31 卷 第 23 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 23 2011

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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.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