

弱光对大豆苗期生长及光合荧光特性的影响

武晓玲, 张丽君, 聂邵仙, 杨峰, 余跃辉, 杨文钰

(四川农业大学 农学院, 四川 成都 611130)

摘要: 选用大豆品种贡选1号(耐荫)和桂夏3号(不耐荫)为材料, 在室内模拟玉米/大豆套作下的光照强度, 设定光照强度分别为12 000, 7 200和3 600 lx, 考察弱光对于大豆苗期生长及叶片光合荧光特性的影响。结果表明: 随光照强度的下降两个大豆品种幼苗株高逐渐增加, 而茎粗、根长、生物量以及根冠比降低, 桂夏3号的变化幅度大于贡选1号; 光照强度为3 600 lx时叶绿素a含量均显著提高; 净光合速率(P_n)和蒸腾速率(Tr)随光照强度的下降呈现先上后降的趋势, 气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)则逐渐上升; 桂夏3号的实际荧光(F)、最大荧光产量(F_m')、初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)值随着光强的降低而增大, 而贡选1号却呈现低-高-低的趋势; 两个品种的非光化学淬灭(NPQ)随光强降低变化趋势相反, 而在PSII潜在活性(F_v/F_o)方面呈现高-低-高的一致趋势。因此, 不同耐荫性大豆品种的生长及光合荧光特性对弱光的响应存在差异, 适宜品种的选择是间套作大豆生产的关键因素之一。

关键词: 大豆; 光照强度; 光合作用; 叶绿素荧光

中图分类号: S565.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-9841(2014)01-0053-05

Effects of Low Light on Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics in Soybean Seedling

WU Xiao-ling, ZHANG Li-jun, NIE Shao-xian, YANG Feng, SHE Yue-hui, YANG Wen-yu

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Soybean seedlings are usually affected by shading in maize-soybean relay strip intercropping conditions. This work aimed to investigate the response of soybean seedling growth and photosynthetic fluorescence characteristics to low light environment. The light intensity of 12 000, 7 200 and 3 600 lx were chose for simulating different light environment. Soybean (*G. max* L. Merr.) cultivar Gongxuan 1 (shade tolerance) and Guixia 3 (shade sensitive) were used as experimental materials. The results showed that the height increased and the values of stem diameter, root diameter, root length, biomass, and root-shoot ratio decreased with declined of light intensity. For photosynthetic pigments, the 3 600 lx light intensity were significantly higher than that of CK. With light intensity declined, net photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (Tr) appeared the trend of low-high-low, whereas stomatal conductance (G_s) and intercellular CO_2 concentration (C_i) gradually decreased. Fluorescence parameters F , F_m' , F_o and F_m of Guixia 3 increased with the declining of light intensity, however, those of Gongxuan 1 were maximized in light intensity of 7 200 lx. In addition, the non-photochemical quenching (NPQ) increased and the F_v/F_o displayed a trend of high-low-high of two soybean varieties with the decrease of light intensity.

Key words: Soybean; Light-intensity; Photosynthesis; Chlorophyll fluorescent

目前, 在四川、重庆等地大力推广的玉米-大豆带状套作复合种植模式中, 大豆作为低位作物在苗期受高秆玉米的荫蔽影响较大, 植株瘦弱、徒长、倒伏率高, 严重影响产量和品质。因此明确不同光环境对大豆生长发育的影响, 对作物合理空间结构配置, 改善大豆光环境具有重要的指导意义^[1-4]。王祥宁等^[5]研究发现光照强度对植物幼苗的光合能力, 根系对矿质离子的主动吸收, 生物量的分配对幼苗的生长状况影响较大。当大豆所处的环境中光照不足时, 植株会加速纵向生长, 茎秆的干物质积累也显著增加^[6]。在一定的弱光条件下, 植株叶

片中的叶绿素含量上升, 光合速率提高, 增强了自身对弱光的利用; 然而由于植株冠层截获的太阳辐射能减少, 净光合速率下降, 使得植株的光合能力和叶绿素荧光参数光化学产量降低^[3,7-8]。目前, 已经开展了一些荫蔽对套作大豆光合特性、产量等性状的研究^[3,9], 但针对不同大豆品种在不同光照条件下生长特性及光合荧光特性的报道较少。因此, 本研究模拟套作环境, 分析大豆品种在不同光照强度下的地上、地下部分生长特性以及光合荧光参数变化规律, 以期对套作大豆的空间配置提供理论基础。

收稿日期: 2013-08-09

基金项目: 现代农业产业技术体系专项(CARS-04-PS19); 四川省教育厅育种专项(00128501)。

第一作者简介: 武晓玲(1982-), 女, 博士, 讲师, 主要从事大豆遗传育种研究。E-mail: wuxl2014@163.com。

通讯作者: 杨文钰(1958-)男, 教授, 博士生导师, 主要从事大豆栽培生理研究。E-mail: wenyu_yang@263.net。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2012年在农业部西南作物生理生态与耕作学重点实验室进行,选用贡选1号(耐荫)和桂夏3号(不耐荫)作为试验材料。试验通过光照培养箱调整光照强度,设置3个处理,分别为12 000 (CK),7 200和3 600 lx,光照/黑暗时间为12 h交替,温度为25℃/20℃。将大豆播于直径为12 cm,深10 cm含有营养土的花盆中,每盆3株,每个处理每个品种16盆。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 形态指标及生物量 大豆出苗后30 d测定株高和茎粗,并将大豆植株从花盆中取出,清洗干净,测定植株的地上部分与地下部分的长度,分别装进信封放在烘箱中,105℃下杀青1 h,然后在75℃下烘干至恒重,测定地上、地下生物量。

1.2.2 光合色素含量 选取倒数第二片复叶,去掉叶脉,剪切0.1 g,按照丙酮:无水乙醇:蒸馏水=4.5:4.5:1的混合液提取叶片色素,分别在波长663,646和470 nm下测定光密度,然后计算叶绿素(Chls)和类胡萝卜素(Cars)含量^[10-11]。

1.2.3 光合特征参数 在10:00~12:00利用Li-6400光合仪于室内对大豆幼苗光活化后,测定叶片

的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)等光合特性参数。设定光合有效辐射恒定为1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为450 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,室内温度为25℃。

1.2.4 叶绿素荧光参数 采用便携式叶绿素荧光仪(PAM-2100, Walz, Germany)在设定光强下测定大豆叶片的荧光参数 F (实际荧光)、 F_m' (最大荧光产量),再置于黑暗处2 h后测定大豆叶片的 F_m (暗适应最大荧光)、 F_o (初始荧光),计算获得非光化学淬灭 $NPQ[(F_m - F_m')/F_m']$, PSII 潜在活性 $[(F_m - F_o)/F_o]$ 和 PSII 最大光化学量子产量 $[(F_m - F_o)/F_m]$ ^[12-14]。

1.3 数据分析

采用Excel 2003和SPSS 11.0进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 光照强度对大豆幼苗形态及生物量特征的影响

由表1可知,两大豆品种随着光照强度的降低,株高均显著增加,茎粗、根长、地上部生物量、地下部生物量及根冠比均降低,不耐荫品种桂夏3号对弱光的响应更为敏感,各指标变化幅度均大于耐荫品种贡选1号。

表1 不同光强对大豆幼苗形态及生物量特征的影响

Table 1 Effects of different light intensities on the morphological characteristics and biomass of soybean seedling

参数 Parameter	桂夏3号 Guixia 3			贡选1号 Gongxuan 1		
	A	B	C	A	B	C
株高 Plant height/cm	20.73 ± 1.30 c	26.01 ± 1.80 b	36.17 ± 2.03 a	20.13 ± 1.90 c	26.39 ± 1.60 b	34.50 ± 2.90 a
茎粗 Stem diameter/mm	2.78 ± 0.14 a	2.53 ± 0.15 a	2.42 ± 0.18 a	2.63 ± 2.64 a	2.50 ± 0.16 a	2.46 ± 0.19 a
根长 Root length/cm	25.51 ± 2.01 a	22.13 ± 1.90 a	17.76 ± 0.82 b	21.52 ± 1.20 a	21.00 ± 0.75 a	20.88 ± 1.30 a
地上部分生物量 Shoot biomass/g	0.71 ± 0.06 a	0.59 ± 0.05 ab	0.39 ± 0.08 b	0.57 ± 0.05 a	0.51 ± 0.08 a	0.42 ± 0.09 a
地下部分生物量 Root biomass/g	0.19 ± 0.04 a	0.13 ± 0.02 a	0.07 ± 0.02 b	0.12 ± 0.02 a	0.10 ± 0.01 ab	0.069 ± 0.02 b
根冠比 Root-shoot ratio	0.26 ± 0.03 a	0.22 ± 0.02 ab	0.17 ± 0.02 b	0.21 ± 0.05 a	0.20 ± 0.02 a	0.16 ± 0.01 b

同行不同小写字母分别表示在0.05水平上的差异显著;A,B,C分别代表12 000,7 200和3 600 lx;下同。

Different lowercase letters in the same line are significantly different at 0.05 probability level; A, B and C stand for 12 000, 7 200 and 3 600 lx, respectively. The same below.

2.2 光照强度对大豆幼苗光合色素含量的影响

随着光照强度的下降,叶绿素a、叶绿素b含量呈现先下降再上升的趋势,类胡萝卜素在桂夏3号中也呈现相同的趋势,而在贡选1号中表现为上升趋势(表2)。在光照处理为3 600 lx时,叶绿素a含

量在桂夏3号和贡选1号中与12 000 lx对照相比均差异显著($P < 0.05$),而叶绿素b和类胡萝卜素含量只有桂夏3号与对照差异显著,贡选1号变化不大。不同光照水平下,叶绿素和类胡萝卜素的比值差异不显著,随光照强度的降低整体呈下降趋势。

表 2 不同光强对大豆幼苗光合色素含量的影响

Table 2 Effects of different light intensity on the contents of photosynthetic pigment in soybean seedling leaves

参数 Parameter	桂夏 3 号 Guixia 3			贡选 1 号 Gongxuan 1		
	A	B	C	A	B	C
叶绿素 a 含量 Chla content/mg·g ⁻¹	1.43 ± 0.22 b	1.37 ± 0.18 b	2.29 ± 0.21 a	1.56 ± 0.15 b	1.52 ± 0.19 b	2.12 ± 0.15 a
叶绿素 b 含量 Chlb content/mg·g ⁻¹	0.55 ± 0.18 b	0.51 ± 0.11 b	0.96 ± 0.14 a	0.63 ± 0.13 a	0.60 ± 0.14 a	0.78 ± 0.12 a
类胡萝卜素含量 Car content/mg·g ⁻¹	0.25 ± 0.08 b	0.24 ± 0.03 b	0.43 ± 0.05 a	0.28 ± 0.05 a	0.29 ± 0.05 a	0.38 ± 0.04 a
叶绿素/类胡萝卜素 Chl(a+b)/Car	7.92 ± 0.61 a	7.83 ± 0.43 a	7.55 ± 0.57 a	7.82 ± 0.52 a	7.31 ± 0.58 a	7.63 ± 0.45 a

2.3 光照强度对大豆幼苗叶片光合特性的影响

在不同光照处理中,光照强度为 7 200 lx 时桂夏 3 号和贡选 1 号的净光合速率(*Pn*)、蒸腾速率(*Tr*)和气孔导度(*Gs*)均为最高,而在光照强度为 12 000 lx 时,各指标均为最低值(表 3),这可能由于

在强光下,*Gs* 降低,胞间 CO₂ 浓度(*Ci*)最小,叶片光合作用 CO₂ 的来源受阻,导致叶片净光合速率下降。当光照强度为 12 000 和 3 600 lx 时,贡选 1 号的 *Pn* 均高于桂夏 3 号,说明耐荫性品种的适应性较好。

表 3 不同光强对大豆幼苗叶片光合和呼吸的影响

Table 3 Effects of different light intensity on the photosynthesis and respiration in soybean seedling leaves

参数 Parameter	桂夏 3 号 Guixia 3			贡选 1 号 Gongxuan 1		
	A	B	C	A	B	C
净光合速率 <i>Pn</i> /μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	2.18 ± 0.92 c	9.29 ± 0.72 a	5.38 ± 0.53 b	3.90 ± 1.14 b	7.61 ± 1.11 a	5.55 ± 0.99 ab
蒸腾速率 <i>Tr</i> /μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	0.42 ± 0.18 a	4.29 ± 1.29 a	3.39 ± 0.58 a	1.11 ± 0.69 a	2.80 ± 0.65 a	1.89 ± 1.0 a
气孔导度 <i>Gs</i> /μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	0.02 ± 0.006 b	0.22 ± 0.02 a	0.18 ± 0.04 a	0.046 ± 0.02 b	0.088 ± 0.03 b	0.15 ± 0.03 a
胞间 CO ₂ 浓度 <i>Ci</i> /μmol·mol ⁻¹	265.57 ± 38.47 b	380.27 ± 21.78 a	374.38 ± 11.09 a	298.77 ± 13.32 b	348.44 ± 20.11 a	300.15 ± 36.47 ab

2.4 光照强度对大豆幼苗叶绿素荧光参数的影响

由表 4 可知,两个大豆品种在不同的光照强度下的实际荧光(*F*)、最大荧光产量(*Fm'*)、初始荧光(*Fo*)、最大荧光(*Fm*)值规律不一致,桂夏 3 号随光照强度的减弱而增大,贡选 1 号却呈现低-高-低的趋势。随光强下降最大光化学量子产量(*Fv/Fm*)

在两个品种中均呈降低趋势,但差异不显著;PSII 潜在活性(*Fv/Fo*)呈现高-低-高的趋势。对于非光化学淬灭(*NPQ*),两个大豆品种随光强的降低其变化趋势完全相反,桂夏 3 号的 *NPQ* 逐渐下降,而贡选 1 号却逐渐上升,这可能与不同耐荫性大豆品种对光环境变化的适应性存在差异有关。

表 4 不同光强对大豆幼苗叶片荧光参数的影响

Table 4 Effects of different light intensity on the fluorescence parameter in soybean seedling leaves

参数 Parameter	桂夏 3 号 Guixia 3			贡选 1 号 Gongxuan 1		
	A	B	C	A	B	C
<i>F</i>	220.14 ± 10.14 b	236.36 ± 16.28 ab	260.75 ± 16.17 a	254.54 ± 12.21 b	299.31 ± 11.94 a	225.43 ± 17.04 b
<i>Fm'</i>	908.27 ± 20.54 b	922.27 ± 29.85 b	1071.92 ± 28.16 a	1064.31 ± 29.57 a	1117.25 ± 21.47 a	944.07 ± 23.28 b
<i>Fo</i>	226.94 ± 15.03 b	243.00 ± 10.69 ab	268.40 ± 11.72 a	258.50 ± 13.21 ab	285.94 ± 11.23 a	248.93 ± 10.98 b
<i>Fm</i>	1116.19 ± 43.21 b	1121.33 ± 37.25 b	1287.64 ± 38.99 a	1202.77 ± 28.99 b	1303.54 ± 39.52 a	1151.23 ± 24.96 b
<i>Fv/Fm</i>	0.80 ± 0.01 a	0.78 ± 0.01 a	0.79 ± 0.02 a	0.79 ± 0.01 a	0.78 ± 0.02 a	0.78 ± 0.02 a
<i>NPQ</i>	0.23 ± 0.01 a	0.22 ± 0.008 a	0.20 ± 0.007 b	0.13 ± 0.008 c	0.17 ± 0.011 b	0.22 ± 0.012 a
<i>Fv/Fo</i>	3.92 ± 0.11 a	3.62 ± 0.12 b	3.80 ± 0.13 ab	3.65 ± 0.09 a	3.56 ± 0.11 a	3.63 ± 0.12 a

3 结论与讨论

3.1 大豆形态特征及生物量与光照强度的关系

光照是植物生长必须的环境因子。徐飞等^[15]研究发现,与全光环境相比,适度的遮荫可以促进幼苗的伸长生长。本研究也发现在弱光条件下,大

豆幼苗的茎粗减小,株高极显著增加。刘贤赵等^[16]认为荫蔽对作物苗高和茎秆的积极效果源于弱光减少了强光对幼苗的伤害。在弱光条件下,大豆除株高增加以外,根长变短,根系也不发达,地上生物量和地下生物量都下降,根冠比减小,这可能由于在荫蔽条件下,大豆幼苗的光合能力降低,影响植物生物化学能的供应,导致积累的生物量减小,而

且地下生物量较地上生物量减少得快,根冠比随光强减弱呈减小趋势^[17-18]。

3.2 大豆光合色素含量及光合作用与光照强度的关系

光合作用是植物将太阳能转化为化学能的主要过程,而光合色素又是光合作用的重要色素分子,在光能的吸收、传递和转化的过程中都起到了关键性的作用^[6]。研究表明,随着光照强度的减弱,叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量均有所升高,说明大豆幼苗为了适应弱光环境,通过增加叶绿素含量来增强光合作用强度,同时也是由于在遮荫时叶片的叶绿体没有受到强光的灼伤。而叶绿素与类胡萝卜素的比值也随着光照强度的减弱而减小,说明叶片的光合作用活性随着光照强度的减弱而降低。

弱光使植物的光合能力下降,光合速率降低,而在弱光环境中导致光合速率降低的主要原因是叶绿素捕获光能总量的不足,虽然在弱光环境中大豆叶片的气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)都比较大,胞间 CO_2 的浓度(C_i)值较高保证了光合作用的供应,有利于植物同化作用^[18],但光合速率(P_n)很低,这说明在弱光环境下限制大豆幼苗生长的主要因素是光照不足。

3.3 光照强度对大豆光合荧光特性的影响

最大光化学量子产量(F_v/F_m)和 PS II 的潜在活性(F_v/F_o)是反映光合能力大小的指标。 F_v/F_m 和 F_v/F_o 的值越大,表明植物光能利用潜力越大^[19]。宋艳霞等^[3]提出套作遮荫提高了大豆幼苗叶片的 F_o ,降低了 F_v/F_o 和 NPQ 。本研究也发现在弱光条件下, F_v/F_o 降低,而 NPQ 的变化不一致,其在不耐荫品种桂夏 3 号中是减小的,而在耐荫品种贡选 1 号中是增大的,这代表在弱光条件下,植株幼苗叶片吸收的剩余光能将通过非辐射的热能及相关途径耗散,造成植物光合化学效率的降低,发生光合作用的光抑制^[20],最终导致光合速率降低。 F_v/F_o 是随着光照强度的减弱发生高-低-高的变化,大豆幼苗叶片 PS II 在 12 000 和 3 600 lx 光照下的潜在活性,都高于 7 200 lx 光照条件,可能是由于遮光使 PS II 吸收的光能以电子的形式传递用于光合作用^[21]。PS II 最大光化学量子产量(F_v/F_m)随着光照减弱有减小的趋势,但变化不明显,与宋艳霞等^[3]的结果一致,说明大豆幼苗叶片的最大光能转化效率受光照条件的影响较小。

参考文献

- [1] 杨文钰,雍太文,任万军,等. 发展套作大豆,振兴大豆产业[J]. 大豆科学,2008,27(1):1-7. (Yang W Y, Yong T W, Ren W J, et al. Develop relay-planting soybean, revitalize soybean industry[J]. Soybean Science, 2008, 27(1):1-7.)
- [2] 高阳,段爱旺,刘祖贵,等. 玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性[J]. 应用生态学报,2008,19(6):1248-1254. (Gao Y, Duan A W, Liu Z G, et al. Light environment characteristics in maize-soybean strip intercropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6):1248-1254.)
- [3] 宋艳霞,杨文钰,李卓玺,等. 不同大豆品种幼苗叶片光合及叶绿素荧光特性对套作遮荫的响应[J]. 中国油料作物学报,2009,31(31):474-479. (Song Y X, Yang W Y, Li Z X, et al. The effects of shading on photosynthetic and fluorescent characteristics of soybean seedlings under maize-soybean relay cropping[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2009, 31(31):474-479.)
- [4] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:7. (Li H S. Modern plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:7.)
- [5] 王祥宁,熊丽,陈敏,等. 不同光照条件下东方百合生长状态及生物量的分配[J]. 西南农业学报,2007,20(5):1091-1096. (Wang X N, Xiong L, Chen M, et al. The growing status and biomass partition of oriental lilies under different light intensity[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2007, 20(5):1091-1096.)
- [6] 梁镇林. 耐阴与不耐阴大豆茎叶性状的变异及差异比较研究[J]. 大豆科学,2000,19(1):35-41. (Liang Z L. Studies on variation and difference of characters of stem and leaf between shade-enduring and shade-non-enduring soybeans[J]. Soybean Science, 2000, 19(1):35-41.)
- [7] 满为群,杜维广,张桂茹,等. 高光效大豆几项光合生理指标的研究[J]. 作物学报,2009,29(5):697-700. (Man W Q, Du W G, Zhang G R, et al. Photosynthetic characteristics of soybean cultivars with high photosynthetic efficiency[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 29(5):697-700.)
- [8] 谢云成,李强,王国强. 长期弱光对苦草幼苗生长发育的影响[J]. 生态学杂志,2012,31(8):1954-1960. (Xie Y C, Li Q, Wang G Q. Influence of long-term weak light on the growth and development of *Vallisneria natans* seedling[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(8):1954-1960.)
- [9] 王竹,杨文钰,吴其林. 玉/豆套作荫蔽对大豆光合特性与产量的影响[J]. 作物学报,2007,33(9):1502-1507. (Wang Z, Yang W Y, Wu Q L. Effects of shading in maize/soybean relay-cropping system on the photosynthetic characteristics and yield of soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(9):1502-1507.)
- [10] 王正瑞,芮玉奎,申建波,等. 氮肥施用量和形态对玉米苗期叶绿素含量的影响[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(2):410-412. (Wang Z R, Rui Y K, Shen J B, et al. Effects of forms and

- level of nitrogen fertilizer on the content of chlorophyll in leaves of maize seedling[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29 (2): 410-412.)
- [11] 李得孝, 郭月霞, 员海燕, 等. 玉米叶绿素含量测定方法研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21 (6): 153-155. (Li D X, Guo Y X, Yuan H Y, et al. Determined methods of Chlorophyll from maize [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21 (6): 153-155.)
- [12] Lazar D, Naus J. Statistical properties of chlorophyll fluorescence induction parameters[J]. Photosynthetica, 1998, 35(1): 121-127.
- [13] Maxwell K, Johnson G N. Perspectives in experimental botany. chlorophyll fluorescence – a practical guide[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51 (345): 659-659.
- [14] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444-448. (Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(4): 444-448.)
- [15] 徐飞, 郭卫华, 徐伟红, 等. 不同光环境对麻栎和刺槐幼苗生长和光合特性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30 (12): 3098-3107. (Xu F, Guo W H, Xu W H, et al. Effects of light intensity on growth and photosynthesis of seedlings of *Quercus acutissima* and *Robinia pseudoacacia* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (12): 3098-3107.)
- [16] 刘贤赵, 康绍忠, 周吉福. 遮阴对作物生长影响的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(4): 65-73. (Liu X Z, Kang S Z, Zhou J F, et al. Development of research on the effects of shading on crop growth[J]. Agricultura Research in the Arid Areas, 2001, 19(4): 65-73.)
- [17] 吴其林, 王竹, 杨文钰. 苗期遮荫对大豆茎秆形态和物质积累的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26 (6): 868-872. (Wu Q L, Wang Z, Yang W Y, et al. Seedling shading affects morphogenesis and substance accumulation of stem in soybean [J]. Soybean Science, 2007, 26(6): 868-872.)
- [18] 郭志华, 张旭东, 黄玲玲, 等. 落叶阔叶树种蒙古栎对林缘不同光环境光能和水分的利用[J]. 生态学报, 2006, 26 (4): 1047-1056. (Guo Z H, Zhang X D, Huang L L, et al. Solar energy and water utilization of *Quercus mongolica*, a deciduous broadleaf tree, in different light regimes across the edge of a deciduous broad leaved forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (4): 1047-1056.)
- [19] 王博轶, 冯玉龙. 生长环境光强对两种热带雨林树种幼苗光合作用的影响[J]. 生态学报, 2005, 25 (1): 23-30. (Wang B Y, Feng Y L. Effects of growth light intensities on photosynthesis in seedlings of two tropical rain forest species [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (1): 23-30.)
- [20] 翟洪波, 呼和牧人, 周梅, 等. 不同年龄华北落叶松光合、蒸腾生理生态特征的研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2010, 31 (2): 66-71. (Zhai H B, Huhemuren, Zhou M, et al. Studies on photosynthetic physiological characteristics of different ages of *Larix principis-rupprechtii* [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2010, 31 (2): 66-71.)
- [21] 吴飞燕, 伊力塔, 李修鹏, 等. 不同光照强度对石栎幼苗叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43 (4): 88-92. (Wu F Y, Yi L T, Li X P, et al. Effect of different light intensity on intensity chlorophyll content and chlorophyll fluorescence in *Lithocarpus glaber* [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43 (4): 88-92.)
- (上接第 45 页)
- [18] 邱栋梁, 刘星辉. 模拟酸雨对龙眼叶绿体活性的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13 (12): 1559-1562. (Qiu D L, Liu X H. Effects of simulated acid rain on chloroplast activity in *Dimorcarpus longana* Lour. cv. *Wulongling* leaves [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (12): 1559-1562.)
- [19] 张佩, 周琴, 张国正, 等. 模拟酸雨对油菜幼苗生物量及其生理指标的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32 (2): 229-234. (Zhang P, Zhou Q, Zhang G Z, et al. Effect of simulated acid rain on biomass and physiological index of rape (*Brassica napus* L.) seedling [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010, 32 (2): 229-234.)
- [20] 严丹, 葛玉晴, 周青, 等. 模拟酸雨和稀土镧对大豆幼苗的复合影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35 (3): 43-46. (Yan D, Ge Y Q, Zhou Q, et al. Combined effects of simulated acid rain and rare earth element La (III) on soybean seedlings [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35 (3): 43-46.)
- [21] 李晓科. 模拟酸雨对大麦幼苗部分生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40 (4): 329-331, 335. (Li X K. Effects of simulated acid rain on leaf physiological indices in the *hordeum vulgare* seedling [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2012, 40 (4): 329-331, 335.)
- [22] Velikova V, Yordanov I, Edreva A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: Protective role of exogenous polyamines[J]. Plant Science, 2000, 151: 59-66.
- [23] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 1991, 27 (2): 84-90. (Chen S Y. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell [J]. Plant Physiology Communications, 1991, 27 (2): 84-90.)
- [24] 郑有飞, 李璐, 梁骏, 等. 模拟酸雨及其 SO_4^{2-} 离子对油菜生长及品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2008, 30 (2): 185-190. (Zheng Y F, Li L, Liang J, et al. Effect of SO_4^{2-} in simulated acid rain on growth and quality of rapeseed [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2008, 30 (2): 185-190.)