

许楠, 倪红伟, 钟海秀, 等. 不同供氮水平对饲料桑树幼苗生长以及光合特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(4): 865-870.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.04.024

## 不同供氮水平对饲料桑树幼苗生长以及光合特性的影响

许楠<sup>1</sup>, 倪红伟<sup>1</sup>, 钟海秀<sup>1</sup>, 沙威<sup>1</sup>, 伍一宁<sup>1</sup>, 刑军会<sup>1</sup>, 孙广玉<sup>2</sup>

(1. 黑龙江省科学院自然与生态研究所/湿地与生态保育国家地方联合工程实验室/黑龙江省湿地与恢复生态学重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学生命科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 为科学制定饲料桑树幼苗氮肥管理措施, 在水培条件下以青龙桑为试验材料, 设置 4 个供氮水平(每株 0 mg、7.5 mg、15.0 mg 和 22.5 mg), 探求不同供氮水平对桑树幼苗生长及生理特性的影响。结果表明, 桑树幼苗株高、地径、叶片数量、叶面积、根长、生物量、叶片净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、水分利用率( $WUE$ )、蒸腾速率( $T_r$ )均随施氮量的增加而呈现先升高后降低的趋势, 根冠比随着施氮量的增加逐渐降低, 其中每株施 15 mg 氮处理的桑树幼苗长势最好; 此外, 桑树幼苗的叶绿素含量、PSII 最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ )、光化学猝灭系数( $q_p$ )、PSII 实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )、电子传递速率( $ETR$ )均随施氮量的增加而升高, 非光化学猝灭系数( $NPQ$ )随着施氮量的增加而降低。适宜的供氮量可以增强桑树叶体光化学活性和光合能力, 并且促进桑树的生长, 而过高的供氮水平对其促进效应降低。

**关键词:** 桑树; 施氮量; 叶片产量; 光合特性

中图分类号: S945.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2015)04-0865-06

## Growth and photosynthetic characteristics of forage mulberry in response to different nitrogen application levels

XU Nan<sup>1</sup>, NI Hong-wei<sup>1</sup>, ZHONG Hai-xiu<sup>1</sup>, SHA Wei<sup>1</sup>, WU Yi-ning<sup>1</sup>, XING Jun-hui<sup>1</sup>, SUN Guang-yu<sup>2</sup>

(1. Institute of Nature and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences/National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetland and Ecological Conservation/Key Laboratory for Wetland and Restoration Ecology in Heilongjiang Province, Haerbin 150040, China; 2. College of Life Science, Northeast Forest University, Haerbin 150040, China)

**Abstract:** The characteristics of growth and leaf photosynthesis of mulberry seedlings were investigated under four nitrogen application rates, 0 mg (CK), 7.5 mg, 15.0 mg and 22.5 mg, respectively. Grow parameters such as plant height, ground diameter, leaf number, leaf area, and root length, biomass, and leaf photosynthetic parameters such as leaf net photosynthetic rate, leaf conductance, water use efficiency, and transpiration rate increased first and decreased after-

wards as the nitrogen application levels rose. The leaf chlorophyll content, maximum quantum yield of PS II photochemistry ( $F_v/F_m$ ), photochemical quenching values ( $q_p$ ), actual photochemistry efficiency of PS II ( $\Phi_{PSII}$ ), electron transport rate ( $ETR$ ) increased as the nitrogen application levels went up while the root shoot ratio and non photochemical quenching value ( $NPQ$ )

收稿日期: 2015-01-06

基金项目: 国家林业局林业科学技术成果推广项目 [2010-029、(2011)32]; 东北林业大学学术名师支持计划

作者简介: 许楠 (1982-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 研究方向为植物生理生态学。(Tel) 0451-86656111; (E-mail) xunan0451@126.com

通讯作者: 孙广玉, (E-mail) sungu@vip.sina.com

dropped. The nitrogen level at 15.0 mg per plant exhibited the best grow-promotive effects on forage mulberry.

**Key words:** mulberry (*Morus alba* L.); nitrogen application level; leaf yield; photosynthetic characteristic

氮是植物生长所必需的最重要的营养元素之一,同时也是影响植物生长和光合作用的重要因素。土壤中的氮可以限制植物的产量并且植物氮素的缺乏会限制植物的生长以及引起变色病(植物叶片逐渐变成黄色),降低植物叶片的健康水平和产量,甚至可以引起叶片的死亡<sup>[1]</sup>。氮通常是谷类植物产量的最重要的限制因素<sup>[2]</sup>,然而,在氮素对饲料桑树等木本植物的生长和叶片光合性能影响方面,国内外研究甚少。桑树(*Morus alba* L.)是中国栽培最早而且用途最广的栽培植物之一,依据桑树的用途可分为蚕桑、食用桑、果桑、饲料桑和绿化桑等。桑树叶片的营养丰富,蛋白质含量与苜蓿相仿,比禾本科牧草高 80%~100%,比豆科牧草高 40%~50%<sup>[3]</sup>,桑树叶片富含多种氨基酸且比例适宜,其中谷氨酸的含量最高,因此,桑叶蛋白是一种优良的蛋白质资源,加入桑叶的饲料可提高饲料的营养价值<sup>[4]</sup>。随着中国南桑北移策略的实施,东北地区桑树的种植面积逐年扩大,尤其是桑树具有耐盐碱和干旱的特点<sup>[5-7]</sup>,在松嫩平原盐碱土地区和以畜牧业为主的草原地区桑树种植面积较大,种植桑树的目的主要是恢复退化的草地植被,增加牧草的承载量。但是,在黑龙江省西北部的盐碱和干旱地区种植桑树,由于春季低温少雨,加之桑树自身的生长特点,在 7 月份之前生长缓慢。为了加快桑树前期的生长,适当增加氮肥可促进桑树生长。黑龙江省是中国最适宜发展蚕桑生产的地区之一,桑蚕业已成为黑龙江省西部干旱半干旱地区脱贫致富的支柱产业,青龙桑是桑农广泛栽种的品种,有较强的抗寒与抗旱能力。但是在实际生产中为了获得较高的桑树叶片产量,一些桑农未能根据桑树需肥规律而无限地增加氮肥的施用量,这不但不能提高饲料桑树的产叶量,反而加大了投入成本。因此,为了解氮肥对青龙桑幼苗叶片生长、光合器官效率以及叶绿素荧光参数的影响,探讨青龙桑幼苗光合作用以及产量形成对不同供氮水平的响应规律,为青龙桑苗期栽培合理施用氮肥提供参

考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验材料为饲料桑树(*Morus alba* L.)品种青龙桑。种子取自黑龙江省桑蚕研究所。试验采用水培法,于 2011 年 7 月-2011 年 8 月在东北林业大学植物营养培养室内进行。2011 年 6 月下旬,将青龙桑种子经 3% 的 NaCl 进行表面消毒 20 min,无菌水洗净后,用灭菌的饱和  $\text{CaSO}_4$  溶液处理 6 h,置于恒温箱中 37 ℃ 催芽。种子露白后,播种到培养基中育苗。培养基为一定比例的蛭石,并经过高温灭菌。育苗期间,观察基质的干湿程度及幼苗发育情况,适当浇无菌水。培养 25 d 左右,种子萌发的主胚根长到 3 cm 左右时,挑选生长大小一致的幼苗,移入到 10 L、pH 值为  $6.0 \pm 0.1$  的 Hogland 营养液的水培箱中培养,水培箱用黑色波软片避光纸包裹,用电动气泵连续通气。每个处理播种 5 株幼苗,供氮水平为每株施氮 0 mg、7.5 mg、15.0 mg 和 22.5 mg,分别用 CK、 $N_L$ 、 $N_M$ 、 $N_H$  表示。青龙桑幼苗生长室昼夜温度为 25 ℃/20 ℃,光照度为 220~250  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,各处理营养液中除氮水平不同外,其他各种营养元素浓度完全相同。每个处理 3 次重复。

### 1.2 测定方法

1.2.1 生长参数测定 选择各处理生长相对一致的桑树测量单株叶片数,并测量桑树主干的高度以及与地面接触处直径,分别记为株高和地径,测量桑树幼苗主干上倒数第 2~3 片完全展开叶的叶片长度和叶片宽度,并计算其叶面积,公式为:叶长×叶宽×0.634 5,其中 0.634 5 为叶面积指数;每个处理各收获长势均匀的 3 株桑树待测,将根系洗净,分别将根和地上部 105 ℃ 杀青 30 min、60 ℃ 烘干 30 h 至恒质量后称其干质量,即得到地下生物量和地上生物量,并计算总生物量(地下生物量和地上生物量之和)、根冠比(地下生物量/地上生物量)。

1.2.2 光合参数和叶绿素荧光参数的测定 选择长势相对一致的桑树幼苗主干上倒数第 2~3 片完全展开叶,利用 CIRAS-1 便携式光合作用测定系统(英国

PPsystem 公司生产)于上午9:00开始测定桑树叶片的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ ),根据净光合速率( $P_n$ )/蒸腾速率( $T_r$ )计算水分利用效率,用光合仪分别记录大气温度、叶面温度和光合有效辐射等参数。在测定光合参数指标的同时,利用便携式脉冲调制荧光仪 FMS-2 (英国 Hansatch 公司生产)测定经过 0.5 h 暗适应后倒数第 2~3 片完全展开叶片的最大荧光( $F_m$ )和最大光化学效率( $F_v/F_m$ )以及自然光照条件下的实际光化学效率( $\Phi_{\text{PSII}}$ )和电子传递速率( $ETR$ ),测定方法参照文献[8],每次测定重复 3 次,每一叶片的测定部位选择在叶片的第 3 与第 4 叶脉之间,距离主叶脉 1 cm 左右处,为减少因测定时间引起的差异,每个测定时间提前 15 min 开始测定,并且每一处理的 3 次重复采用循环测定方法进行。

1.2.3 数据处理 运用 Excel 和 DPS 软件对试验数据进行统计分析,图中数据为 3 次重复的平均值±标准差,采用单因素方差分析法和最小显著差异法进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 供氮水平对饲料桑树幼苗叶片全氮含量、全磷含量和叶绿素含量的影响

由表 1 可知,饲料桑树幼苗叶片的全氮、全磷含量均随着供氮水平的升高而增加,且差异极显著( $P<0.01$ ),其中  $N_H$  处理饲料桑树幼苗叶片的全氮、全磷含量最高,是对照处理的 2.25 倍、2.20 倍。不

同供氮水平青龙桑幼苗叶片叶绿素含量变化趋势与供氮水平正相关, $N_H$  的叶绿素含量最高,分别是对照处理、 $N_L$  处理、 $N_M$  处理的 4.6 倍、2.7 倍、1.4 倍,差异极显著( $P<0.01$ )。

表 1 不同供氮水平对饲料桑树幼苗叶片氮含量、磷含量和叶绿素含量的影响

Table 1 Effects of different nitrogen application levels on leaf nitrogen, phosphorus and chlorophyll content of mulberry

供氮水平	每株叶片氮含量 (g)	每株叶片磷含量 (g)	每株叶片叶绿素含量 (g)
CK	2.3±0.064dD	2.12±0.033dD	0.84±0.20dD
$N_L$	3.39±0.025cC	3.16±0.045cC	1.42±0.12cC
$N_M$	4.58±0.053bB	4.18±0.054bB	2.72±2.7bB
$N_H$	5.18±0.038aA	4.85±0.073aA	3.9±0.31aA

CK、 $N_L$ 、 $N_M$ 、 $N_H$  分析表示每株施氮 0 mg、7.5 mg、15.0 mg、22.5 mg。同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示差异极显著( $P<0.01$ )。

2.2 供氮水平对饲料桑树幼苗生长的影响

表 2 显示,饲料桑树幼苗株高、地径、叶片数量、叶面积和根长均随供氮水平的升高呈现出先增加后减少的趋势,其中对照处理的各个指标值最低,各供氮水平处理下饲料桑树幼苗株高和叶片数量差异显著( $P<0.05$ )。 $N_M$  处理的株高、地径、叶片数、叶面积、根长均为最高值,与对照处理差异极显著( $P<0.01$ )。

表 2 不同供氮水平对饲料桑树幼苗生长的影响

Table 2 Effects of different nitrogen application levels on physiological characteristics of mulberry

氮水平	株高 (cm)	地径 (mm)	叶片数 (片)	叶面积 (cm <sup>2</sup> )	根长 (cm)
CK	26.9±0.64dD	4.4±0.23cC	19±1.00cC	23.4±3.21cC	10.34±0.20cC
$N_L$	28.9±0.25cC	5.7±0.31bB	20±1.15bB	38.1±4.35bB	13.42±0.12bcBC
$N_M$	37.9±0.53aA	6.8±0.98aA	31±1.00aA	54.1±5.12aA	25.32±2.7aA
$N_H$	30.89±0.38bB	6.25±0.78abAB	24±1.73cBC	53.1±5.15aA	15.9±0.31bB

CK、 $N_L$ 、 $N_M$ 、 $N_H$  见表 1 注。同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示差异极显著( $P<0.01$ )。

2.3 供氮水平对饲料桑树幼苗生长量的影响

不同供氮水平对饲料桑树幼苗生长量的影响如表 3 所示。饲料桑树幼苗叶生物量、茎生物量、根生物量、总生物量均随供氮水平的升高呈现出先增加后减少的趋势,各供氮水平处理下饲料桑

树幼苗生物量差异极显著( $P<0.01$ ),其中对照处理的各指标最低, $N_M$  处理的各指标最高,其次是  $N_H$ 。根冠比随着供氮水平的增加呈递减趋势, $N_M$  处理根冠比最低 对照处理根冠比最高,差异极显著( $P<0.01$ )。

表 3 不同供氮水平对饲料桑树生物量的影响

Table 3 Effects of different nitrogen application levels on biomass of mulberry

氮水平	每株叶生物量(g)	每株茎生物量(g)	每株根生物量(g)	每株总生物量(g)	根冠比(%)
CK	0.36±0.23dD	0.09±0.23dD	0.13±0.011dD	0.58±0.047dD	24.06±0.026aA
N <sub>L</sub>	0.56±0.22cC	0.20±0.31cC	0.19±0.038cC	0.95±0.033cC	23.59±0.015aA
N <sub>M</sub>	1.04±0.15aA	0.47±0.42aA	0.26±0.040aA	1.77±0.052aA	17.72±0.002bB
N <sub>H</sub>	0.89±0.33bB	0.28±0.78bB	0.22±0.021bB	1.39±0.049bB	15.93±0.010bB

CK、N<sub>L</sub>、N<sub>M</sub>、N<sub>H</sub> 见表 1 注。同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示差异极显著( $P<0.01$ )。

## 2.4 供氮水平对饲料桑树幼苗叶片光合特性的影响

叶片净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、水分利用率( $WUE$ )、蒸腾速率( $T_r$ )均随施氮量的增加而呈现先升高后降低的趋势(表 4),各供氮水平处理下饲料桑树幼苗叶片净光合速率( $P_n$ )、气

孔导度( $G_s$ )、水分利用率( $WUE$ )差异极显著( $P<0.01$ ),其中 N<sub>M</sub>处理的各指标最高,其次为 N<sub>H</sub>和 N<sub>L</sub>处理,对照处理的各指标最低。N<sub>M</sub>处理蒸腾速率( $T_r$ )最高,与其他处理差异极显著( $P<0.01$ )。

表 4 不同供氮水平对饲料桑树叶片光合指标的影响

Table 4 Effects of different nitrogen application levels on leaf photosynthetic characteristics of mulberry

氮水平	净光合速率( $P_n$ ) [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	气孔导度( $G_s$ ) [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	水分利用效率( $WUE$ ) [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	蒸腾速率( $T_r$ ) [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]
CK	3.10±0.20dD	31±2.00dD	2.63±0.87dD	1.18±0.13cC
N <sub>L</sub>	3.59±0.15cC	40±3.00cC	2.92±0.11cC	1.44±0.01bB
N <sub>M</sub>	5.89±0.22aA	58±5.00aA	3.54±0.36aA	1.66±0.12aA
N <sub>H</sub>	4.2±0.2bB	52±7.00bB	3.26±0.99bB	1.41±0.26bB

CK、N<sub>L</sub>、N<sub>M</sub>、N<sub>H</sub> 见表 1 注。同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示差异极显著( $P<0.01$ )。

## 2.5 供氮水平对饲料桑树幼苗叶片荧光特性的影响

不同供氮水平对桑树幼苗荧光特性的影响如表 5 所示。桑树幼苗 PSII 最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ )、光化学猝灭系数( $q_p$ )、PSII 实际光化学效率( $\Phi_{\text{PSII}}$ )、电子传递速率( $ETR$ )均随着施氮量的增加而升高,非光化学猝灭系数( $NPQ$ )随着施氮量的增

加而降低, N<sub>H</sub>和 N<sub>M</sub>处理的 PSII 最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ )、光化学猝灭系数( $q_p$ )、PSII 实际光化学效率( $\Phi_{\text{PSII}}$ )和电子传递速率( $ETR$ )极显著高于对照,但 2 个处理间差异不显著。对照处理的非光化学猝灭系数( $NPQ$ )最高, N<sub>L</sub>、N<sub>M</sub>和 N<sub>H</sub>极显著低于对照( $P<0.01$ )。

表 5 不同供氮水平对饲料桑树叶片荧光指标的影响

Table 5 Effects of different nitrogen application levels on leaf chlorophyll fluorescence characteristics of mulberry

氮水平	最大光化学量子产量 ( $F_v/F_m$ )	光化学猝灭系数 ( $q_p$ )	非光化学猝灭系数 ( $NPQ$ )	实际光化学效率 ( $\Phi_{\text{PSII}}$ )	电子传递速率 ( $ETR$ )
CK	0.830±0.003bB	0.222±0.030cC	1.834±0.110bB	0.16±0.13cC	52.4±2.04bB
N <sub>L</sub>	0.832±0.009bB	0.319±0.060bB	1.398±0.200aA	0.19±0.19bB	63.8±2.42bB
N <sub>M</sub>	0.840±0.008aA	0.425±0.030aA	1.405±0.230aA	0.29±0.22aA	171.3±4.93aA
N <sub>H</sub>	0.847±0.004aA	0.429±0.050aA	1.414±0.130aA	0.28±0.12aA	167.8±3.57aA

CK、N<sub>L</sub>、N<sub>M</sub>、N<sub>H</sub> 见表 1 注。同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示差异极显著( $P<0.01$ )。



### 3 讨论

黑龙江省桑树栽培的历史较短,虽然近些年桑树生产得到了较大发展,但在实际生产中饲料桑树栽培仍然处于粗放管理的状态,饲料桑树产量水平普遍偏低,其中主要原因是氮肥施用量不合理。许多研究结果表明,叶片的含氮量与光合能力呈线性正相关<sup>[9-10]</sup>,不同植物的光合作用与生长对氮素的需求量及对氮肥施用量的反应不同,因此植物氮素需求和氮素施用的有效性已成为植物营养学家或生理学家关注的重点。麻疯树(*Jatropha curcas* L.)<sup>[11]</sup>、落叶松(*Larix gmelini*)<sup>[12]</sup>、日本赤松(*Pinus densiflora*)<sup>[13]</sup>、西南桦(*Betula alnoides*)<sup>[14]</sup>和黑云杉(*Picea mariana*)<sup>[15]</sup>幼苗分别在施氮量为 288 kg/hm<sup>2</sup>、8 mmol/L、113 kg/hm<sup>2</sup>、每株 200 mg N 和 340 kg/hm<sup>2</sup>时光合能力最强,植株生长势最好。在本试验中,青龙桑幼苗叶片  $P_n$  随施氮量的增加而升高,当施氮量达到每株 22.5 mg 时  $P_n$  反而下降。青龙桑幼苗叶片  $P_n$  随施氮量的增加而升高可能是由于叶绿体光化学活性增强、气孔导度增加和叶肉细胞羧化能力提高共同作用的结果。研究结果表明,光合电子传递不依赖于叶片氮素的量,也发现  $F_v/F_m$  不受氮素亏缺的影响<sup>[16-17]</sup>。青龙桑幼苗叶片各荧光参数均对施氮处理反应明显( $P<0.05$ ),叶片  $F_v/F_m$ 、 $F'_v/F'_m$ 、 $\Phi_{PSII}$  和  $ETR$  均随施氮量的增加而升高,且各处理各荧光参数值均显著高于对照( $P<0.05$ ),表明施氮能显著提高青龙桑幼苗光化学效率,促进光合电子传递。但当施氮量达到每株 22.5 mg 时各荧光参数值增长较慢。青龙桑幼苗叶片  $q_p$  随施氮量的增加而升高,同时伴随着  $NPQ$  的降低,表明在一定范围内增施氮肥能提高光能转化效率,增加 PSII 反应中心的开放程度,PSII 吸收的光能更多地用于光合电子传递,提高光能利用率,同时也有利于保护光合机构免受破坏。因此,适量增施氮肥可以提高光能转化效率及 PSII 的潜在活性,增强叶片光捕获能力和光化学反应效率,为碳同化提供更充足的能量(ATP)和同化能力(NADPH),有利于光合作用的进行和光合同化物的积累<sup>[18]</sup>。在本研究中,通过提高供氮水平使青龙桑幼苗叶片的气孔导度、叶片碳同化所需 CO<sub>2</sub> 和植株蒸腾速率增

加,显著促进植物的生长及生物量的积累,其中,施氮对青龙桑幼苗地上部分(尤其是叶片)生长的促进作用远大于地下部分,施氮后根冠比显著降低。这表明氮素对植株地上部分生长的促进作用比地下部分更为明显,氮素的增加使苗木将营养物质更多地分配至地上部分。

有研究结果表明,过量供氮引发负面效应的原因是多方面的,一方面可能是由于气孔限制的结果,气孔细胞的水分(渗透势)状况,  $N_H$  处理下植株体内氮素浓度较高,细胞液渗透压的降低迫使植株在低气孔导度下运作<sup>[19]</sup>。此外,氮代谢、碳同化对光合作用光反应产生的同化力(即 ATP 和 NADPH)的竞争也可能是导致碳同化速率降低的原因之一<sup>[20-22]</sup>。本试验结果表明,随着施氮量的增加,桑树叶片中的叶绿素、全氮与全磷含量也随之增加,说明氮肥有利于桑树光合作用的增强和光合产物的积累,施用适量的氮肥有利于桑树叶片对全氮和全磷的积累。增加施氮量虽然能够提高桑树叶片的氮素含量,但植株净光合指标的提高并不完全依赖于施氮量的增加,气孔导度的响应表现更为明显。本研究中,过量供氮引发的负面效应中气孔限制因素占了很大比重。

综上所述,合适的供氮水平能明显提高青龙桑幼苗的光合能力、促进植株生长和干物质的积累,过高供氮水平下氮肥的促进效应降低。在本试验条件下,青龙桑幼苗的最适供氮水平为每株 15.0 mg。

#### 参考文献:

- [1] TAIZ L E, ZEIGER. Plant physiology[D]. Sunderland: Sinauer Associates Inc, 2002.
- [2] 范仲学,王璞,梁振兴. 谷类作物的氮肥利用效率及其提高途径研究进展[J]. 山东农业科学, 2001, 4(4): 47-50.
- [3] 吴萍,李龙. 桑树用作畜牧饲料的开发前景[J]. 中国蚕业, 2006, 27(3): 91-93.
- [4] 黄自然,杨军,吕雪娟. 桑树作为动物饲料的应用价值与研究进展[J]. 蚕业科学, 2006, 32(3): 377-385.
- [5] 张会慧,张秀丽,朱文旭,等. 桑树叶片光系统 II 对 NaCl 和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫的响应[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(6): 121-126.
- [6] 张会慧,张秀丽,许楠,等. 外源钙对干旱胁迫下烤烟幼苗光系统 II 功能的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1195-1200.

- [7] 戴廷波. 增铵营养下不同小麦基因型的生长特征和生理调节机制[D]. 南京:南京农业大学, 1999.
- [8] HU Y B, SUN G Y, WANG X C. Induction characteristics and response of photosynthetic quantum conversion to changes in irradiance in mulberry plants[J]. Plant Physiology, 2007, 164: 959-968.
- [9] 许楠, 张晓松, 张秀丽, 等. 供氮水平对田间桑树叶片产量及其生理特性的影响[J]. 经济林研究, 2011, 29(3): 45-49.
- [10] NICODEMUS M A, SALIFU F K, JACOBS D F. Growth, nutrition, and photosynthetic response of black walnut to varying nitrogen sources and rates[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(11): 1917-1936.
- [11] 尹丽, 胡庭兴, 刘永安, 等. 施氮量对麻疯树幼苗生长及叶片光合特性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4977-4984.
- [12] GUO S L, YAN X F, BAI B, et al. Effects of nitrogen supply on photosynthesis in larch seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(6): 1291-1298.
- [13] NAKAJI T, FUKAMI M, DOKIYA Y, et al. Effects of high nitrogen load on growth, photosynthesis and nutrient status of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora* seedlings[J]. Trees, 2001, 15(8): 453-461.
- [14] CHEN L, ZENG J, XU D P, et al. Effects of exponential nitrogen loading on growth and foliar nutrient status of *Betula alnoides* Seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(5): 35-40.
- [15] SALIFU K F, TIMMER V R. Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(7): 1287-1294.
- [16] EVANS J R, TERASHIMA I. Effects of nitrogen nutrition on electron transport components and photosynthesis in spinach[J]. Aust J Plant Physiol, 1987, 14: 281-292.
- [17] CIMOPI S, GENTILI E, GUIDI L, et al. The effect of nitrogen deficiency on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in sunflower[J]. Plant Science, 1996, 118: 177-184.
- [18] 董玥, 陈雪平, 赵建军, 等. 低氮胁迫不同氮效率基因型茄子光合特性差异[J]. 华北农学报, 2009, 24(1): 181-184.
- [19] 赵平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究[J]. 生态科学, 1998, 17(2): 37-42.
- [20] ELIZABETH A, AINSWORTH E A, BUSH D R. Carbohydrate export from the leaf: a highly regulated process and target to enhance photosynthesis and productivity[J]. Plant Physiology, 2011, 155(1): 64-69.
- [21] 王奇峰. 氮磷对欧美 107 杨增产作用机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [22] 徐济春, 林钊沐, 罗微, 等. 矿质营养对光合作用影响的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(7): 23-25.

(责任编辑:陈海霞)