

覆土控鞭栽培对高节竹鞭根养分和抗性生理特征的影响

时俊帅, 章超, 陈双林, 谷瑞, 郭子武

(中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

摘要: 为探明覆土控鞭栽培对高节竹 *Phyllostachys prominens* 鞭根养分和抗性生理特征的影响, 测定了不同覆土厚度 [0(ck), 10, 30, 50 cm] 高节竹 2 年生竹鞭的细根养分含量和抗性生理指标。结果表明: 与 ck 比较, 覆土厚度 30 cm 及以下的覆土控鞭栽培对高节竹鞭根的氮、可溶性蛋白质、可溶性糖质量分数, 丙二醛质量摩尔浓度, 氮碳比, 根系活力及超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性有显著影响 ($P < 0.05$), 但对鞭根碳、磷质量分数, 碳磷比, 氮磷比, 相对电导率影响并不显著 ($P > 0.05$)。其中, 随覆土厚度的增大, 高节竹鞭根氮质量分数、丙二醛质量摩尔浓度、可溶性蛋白质质量分数、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性及氮碳比呈先减小后增大的趋势, 可溶性糖质量分数和根系活力呈先增大后减小的趋势。表明适当厚度的覆土 (10 和 30 cm) 可在一定程度上改善高节竹鞭根的生长环境条件 (水分、温度等), 对高节竹生长有促进作用, 但覆土厚度过大 (50 cm), 对鞭根生长会产生负面影响。综合竹笋品质、经济效益及竹林可持续经营能力等分析, 高节竹覆土控鞭栽培适宜的覆土厚度为 30 cm。表 4 参 32

关键词: 植物学; 高节竹; 覆土; 鞭根; 养分; 抗性生理

中图分类号: S718.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)05-0902-06

Soil cover with rhizome controlling cultivation of nutrients and physiological resistance for a *Phyllostachys prominens* rhizome system

SHI Junshuai, ZHANG Chao, CHEN Shuanglin, GU Rui, GUO Ziwu

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract: The aim is to approach the effect of soil cover with rhizome controlling cultivation on nutrients and physiological resistance of rhizome roots from *Phyllostachys prominens* as well as to determine the optimum soil cover thickness for high-quality root and rhizome system. The content of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) as well as physiological indexes of rhizome roots from *P. prominens* with different soil cover thickness [0(ck), 10, 30, and 50 cm] were determined, and each index was measured three times. Meanwhile, the saliency test was also carried out. Results showed that compared with ck, soil covering management with moderate thicknesses (≤ 30 cm) influenced content of N, malondialdehyde (MDA), superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), soluble protein, soluble sugar, and root activity significantly ($P < 0.05$), but the content of C, P, C/P, N/P, and relative electrical conductivity of those treatment changed slightly ($P > 0.05$). With soil covering thickness increasing, content of N, MDA, soluble protein, SOD, POD, and N/C of root and rhizome systems tended to decrease first and then increase ($P < 0.05$), but soluble sugar and root activity changed in an opposite trends ($P < 0.05$). Thus, moderate thickness of soil covering (10 and 30 cm) could improve the growth environment conditions of root and rhizome systems to some extent, and promote growth of *P. prominens*, but excess thickness of soil covering would have a negative impact on root and rhizome systems. All results indicated the suitable soil covering thickness for better bamboo shoot quality, economic yield benefits, and bam-

收稿日期: 2018-09-11; 修回日期: 2018-12-12

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFD0600903); 中央财政林业科技推广示范资金资助项目 (2015TS09)

作者简介: 时俊帅, 从事竹林生态与培育研究。E-mail: 330027022@qq.com。通信作者: 陈双林, 研究员, 博士, 从事竹林生态与培育研究。E-mail: cslbamboo@126.com

boo forest sustainable management of *P. prominens* should be 30 cm. [Ch, 4 tab. 32 ref.]

Key words: botany; *Phyllostachys prominens*; soil cover with rhizome controlling cultivation; root and rhizome system; nutrient; physiological system of resistance

根系是植物吸收养分和水分的主要器官,对环境变化十分敏感,而土壤环境的变化会时刻影响到植物根系的生理过程。其中,土壤温度是决定植物细胞呼吸速率的重要影响因子,影响根系对水分和养分的吸收。2年生脂松 *Pinus resinosa* 在根际温度 8℃时产生新根的数量最少,16℃时最多,新根总长度与温度在 8~20℃内呈正相关^[1]。欧洲水青冈 *Fagus sylvatica* 细根的呼吸作用对土壤温度的依赖性十分显著^[2];土壤紧实度影响土壤的通气条件和水分状况,会对植物根系的生长发育产生影响。油松 *Pinus tabulaeformis* 种子的发芽率和出苗率与土壤含水量密切相关^[3]。林木根系周围的土壤相对含水率影响着地上、地下部分生物量。针叶树根系生长速度与土壤密度成反比,生长在紧实度高的土壤上的苗木对磷和钾的吸收也减少^[4-6]。另外,土壤各环境因子会随土壤厚度的变化而发生相应变化,必然会对植物产生影响,如土壤厚度影响着林木根系的形态和分布^[7]。可见,土壤各环境因子深刻影响着植物以及根系的生长。高节竹 *Phyllostachys prominens* 隶属禾本科 Gramineae 竹亚科 Bambusoideae 刚竹属 *Phyllostachys*,生态适应性强,具有竹笋产量高、品质佳、加工性能好等特点,在浙江省杭州市、湖州市等地广为栽培。目前,针对高节竹丰产栽培^[8]、病虫害防治^[9-10]、竹笋保鲜^[11]和套袋栽培^[12]等开展了较多的研究,形成了较为系统的高节竹林栽培技术。2011年以来,为满足市场对高品质竹笋的大量需求,根据高节竹的生物学和生态学特性,在高节竹主产区推广应用覆土控鞭高品质竹笋栽培技术,生产的竹笋个大、色白、鲜嫩,明显改善了竹笋的外观形态,香味和甜味增加,酸涩味和粗糙度减少,竹笋营养品质和适口性明显提高,竹林经济效益显著提高^[13]。覆土控鞭栽培如何影响高节竹地下鞭根系统呢?鉴于此,本研究对不同覆土厚度下高节竹2年生竹鞭细根的养分含量和抗性生理指标进行了研究,分析了高节竹鞭根适宜的覆土厚度,为高节竹高品质竹笋培育提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于浙江省桐庐县(29°35'~30°05'N, 119°11'~119°58'E)莪山乡新丰民族村,属亚热带季风气候,日照充足,降水充沛,四季分明。年平均气温为 16.6℃,极端高温为 41.7℃,极端低温为-9.5℃,全年≥10℃的平均积温为 5 262.0℃,年平均无霜期为 252.0 d,年平均降水量为 1 552.0 mm,3-9月降水量均在 130 mm 以上,最多的 6 月为梅雨期,降水集中,月平均降水量为 248 mm。年平均蒸发量为 1 385 mm,年平均相对湿度为 81%。以丘陵山地为主,山地丘陵占 86.3%,平原和水域占 13.7%。土壤主要为红壤,土层厚度 80 cm 以上。高节竹资源丰富,全乡有高节竹林面积约 0.14 万 hm²。

1.2 试验方法

1.2.1 样地设置与材料处理 2017年2月,选取立地条件、经营措施和经营水平基本一致的高节竹试验林4块,每块面积不小于0.4 hm²,利用建房、林道建设等的土方,去除石块、树兜等,在丰产林分结构的高节竹林中加团聚体结构好的红壤客土,以竹子基部为基准,均匀覆盖其中3块,覆土厚度分别为10,30和50 cm,以不覆土(0 cm)竹林为对照(ck)。6月挖除覆土层土壤中的竹鞭,实行季节性施肥、林地垦复和林分结构调控。覆土0,10,30和50 cm试验林立竹密度分别为(7 767±351), (6 500±1 700), (7 167±702), (5 533±513)株·hm⁻²,立竹年龄结构(1年生:2年生:3年生)分别为1.00:2.15:2.25, 1.00:2.89:3.11, 1.00:2.32:1.95, 1.00:2.00:2.50。在每块试验林中分别设置10 m×10 m固定样地3个。9月,在不同覆土的高节竹试验林样地中,对角线法点状挖取原土层10 cm左右深度2年生竹鞭各3条,剪取3 g左右鲜嫩细根放入冰盒带回实验室,用自来水冲洗干净,后用吸水棉吸取鞭根上的水分。每处理3次重复。

1.2.2 酶液提取及指标测定方法 称取0.2 g新鲜根系置于预冷的研钵中,加入5 mL预冷的50 mmol·L⁻¹磷酸缓冲液(pH 7.8)冰浴研磨,再用相同磷酸缓冲液定容至10 mL,4℃,10 500 r·min⁻¹离心15 min,取上清液(粗酶液)在4℃下保存备用。相对电导率用初始电导率与煮沸后电导率的比值表示,采

用 DDSJ-308A 型电导仪测定^[14]。丙二醛(MDA)质量摩尔浓度采用硫代巴比妥酸法测定；根系活力采用 α -萘胺法测定^[15]。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定；过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚氧化法测定；可溶性蛋白质采用考马斯亮蓝法测定；可溶性糖采用蒽酮法测定；细根中碳、氮、磷分别用重铬酸钾容量法、凯氏定氮法、钼锑抗比色法测定^[16]。每个指标重复测定3次。

1.3 数据处理与统计分析

试验数据在 Excel 2003 中进行整理，在 SPSS 22.0 中对不同覆土厚度的高节竹鞭根养分和抗性生理指标进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Tukey 检验。试验数据均为平均值 \pm 标准误，显著性水平设置为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 覆土控鞭栽培对高节竹鞭根碳、氮、磷质量分数和化学计量比的影响

由表1可知：随覆土厚度增大，高节竹鞭根氮质量分数呈先减小后增大趋势。其中，覆土10 cm竹林与覆土0(ck)，30，50 cm竹林间均无显著差异，覆土0和50 cm竹林间也无显著差异，但均显著大于覆土30 cm竹林。碳质量分数呈先增大后减小趋势，但不同覆土厚度竹林间无显著差异。磷质量分数呈减小趋势，覆土50 cm竹林显著小于其他试验竹林，覆土0，10和30 cm竹林间均无显著差异。氮碳比呈先减小后增大趋势，覆土0和50 cm竹林间无显著差异，均显著高于覆土10和30 cm竹林，后两者无显著差异；碳磷比呈增大趋势，覆土0，10和30 cm竹林间无显著差异，但均显著小于覆土50 cm竹林；氮磷比呈先减小后增大趋势，覆土0，10和30 cm竹林间无显著差异，均显著小于覆土50 cm竹林。

表1 高节竹鞭根碳、氮、磷质量百分数和化学计量比

Table 1 Content and stoichiometric ratio of carbon, nitrogen, phosphorus of rhizome roots in *Phyllostachys prominens*

覆土厚度/cm	$w_{\text{C}}/(g \cdot kg^{-1})$	$w_{\text{N}}/(g \cdot kg^{-1})$	$w_{\text{P}}/(g \cdot kg^{-1})$	氮碳比	碳磷比	氮磷比
0(ck)	437.33 \pm 7.51 a	11.30 \pm 0.82 a	0.71 \pm 0.15 a	0.26 \pm 0.02 a	63.95 \pm 14.30 b	16.59 \pm 4.15 b
10	456.00 \pm 18.08 a	9.35 \pm 1.23 ab	0.65 \pm 0.13 a	0.20 \pm 0.02 b	71.99 \pm 12.44 b	14.66 \pm 2.27 b
30	440.30 \pm 18.18 a	8.52 \pm 0.44 b	0.58 \pm 0.05 a	0.19 \pm 0.02 b	75.67 \pm 4.66 b	14.72 \pm 2.00 b
50	437.33 \pm 50.14 a	10.95 \pm 0.55 a	0.34 \pm 0.01 b	0.25 \pm 0.04 a	129.59 \pm 11.40 a	32.55 \pm 2.65 a

说明：同列不同小写字母表示试验竹林间差异显著($P<0.05$)

2.2 覆土控鞭栽培对高节竹鞭根根系活力、MDA质量摩尔浓度和相对电导率的影响

由表2可知：随覆土厚度的增大，高节竹鞭根相对电导率呈先减小后增大趋势。其中，以覆土50 cm竹林最大，覆土30 cm竹林最小，但不同覆土厚度竹林间均无显著差异。MDA质量摩尔浓度呈先减小后增大趋势，覆土10和30 cm竹林间差异不显著，均显著小于覆土0和50 cm的竹林，后两者间也无显著差异；根系活力呈倒“N”型变化趋势，其中，以覆土30 cm竹林最大，覆土50 cm竹林最小，覆土0和30 cm竹林间无显著差异，均显著大于覆土10和50 cm竹林，后两者间也无显著差异。

2.3 覆土控鞭栽培对高节竹鞭根抗氧化酶活性的影响

由表3可知：随覆土厚度的增大，高节竹鞭根SOD和POD活性的变化趋势一致，均呈先减小后增大的趋势。其中，以覆土50 cm竹林最大，覆土30 cm竹林最小，覆土0和50 cm竹林间无显著差异，但均显著大于覆土10和30 cm的竹林，并且后两者间无显著差异。

2.4 覆土控鞭栽培对高节竹鞭根可溶性蛋白质和可溶性糖质量分数的影响

由表4可知：随覆土厚度的增大，高节竹鞭根可溶性蛋白质质量分数呈先减小后增大的趋势。其中，以覆土50 cm竹林最大，覆土10 cm竹林最小，而且覆土试验竹林与覆土0 cm(ck)均无显著差异，覆土30和50 cm竹林间也无显著差异，但均显著大于覆土10 cm竹林。可溶性糖质量分数呈先增大后减小的趋势。其

表2 高节竹鞭根根系活力、MDA质量摩尔浓度和相对电导率

Table 2 Root activity, MDA, content and relative conductivity of rhizome roots in *Phyllostachys prominens*

覆土厚度/cm	相对电导率/%	$b_{\text{MDA}}(\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$	根系活力/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$
0(ck)	19.02 \pm 4.60 a	21.15 \pm 2.39 a	51.73 \pm 10.59 a
10	18.33 \pm 3.99 a	13.33 \pm 3.62 b	30.98 \pm 5.41 b
30	17.54 \pm 1.51 a	11.73 \pm 0.99 b	59.43 \pm 1.63 a
50	22.61 \pm 9.36 a	20.55 \pm 0.60 a	13.02 \pm 1.86 c

说明：同列不同小写字母表示试验竹林间差异显著($P<0.05$)

中，以覆土 10 cm 竹林最大，覆土 50 cm 竹林最小，覆土 0, 30 和 50 cm 竹林均显著小于覆土 10 cm 竹林，覆土 50 cm 竹林显著小于 ck，但覆土 30 cm 竹林与 ck 无显著差异，覆土 30 和 50 cm 竹林间也无显著差异。

表 3 高节竹鞭根超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性

Table 3 Antioxidant enzyme activity of rhizome roots in *Phyllostachys prominens*

覆土厚度/cm	SOD/($\times 16.67$ nkat \cdot g $^{-1}$)	POD/($\times 16.67$ nkat \cdot g $^{-1}$)
0(ck)	1 049.79 \pm 80.89 a	22 068.25 \pm 2 363.49 a
10	768.43 \pm 9.13 b	17 573.02 \pm 544.44 b
30	661.88 \pm 56.53 b	14 085.71 \pm 190.48 b
50	1 062.84 \pm 54.82 a	23 439.68 \pm 2 414.29 a

说明：同列不同小写字母表示试验竹林间差异显著($P < 0.05$)

表 4 高节竹鞭根可溶性蛋白质和可溶性糖质量分数

Table 4 Soluble protein content and soluble sugar content of rhizome roots in *Phyllostachys prominens*

覆土厚度/cm	$w_{\text{可溶性蛋白质}}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$w_{\text{可溶性糖}}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$
0(ck)	4.87 \pm 0.81 ab	10.8 \pm 0.4 b
10	3.68 \pm 0.32 b	13.3 \pm 1.3 a
30	5.24 \pm 0.23 a	9.6 \pm 0.7 bc
50	5.90 \pm 0.19 a	7.7 \pm 0.2 c

说明：同列不同小写字母表示试验竹林间差异显著($P < 0.05$)

3 讨论

根系是植物养分和水分的源，也是碳的汇^[17]，因此，根系吸收养分能力的差异是导致植物生长发育发生变化的重要原因之一^[18]，其碳同化物的多寡则是根系活力的重要表征。在整个根系统中，根系吸收活力增强，则会引起碳消耗的增多^[19]，而当根系吸收能力减弱，碳向根系的供应则会减少^[20-21]。本研究中，高节竹鞭根碳质量分数在不同覆土厚度竹林无显著差异，说明不同的覆土厚度对竹林鞭根系统吸收养分的能力没有明显变化，也即高节竹覆土控鞭栽培措施不会影响竹林的鞭根吸收能力。而根系中磷和碳质量分数及其比例与其衰老、寿命长短密切相关^[22]，磷越高，碳越低，呼吸越强烈^[23]，越容易导致根系衰老。本研究中鞭根的氮碳比在覆土 0(ck)和 50 cm 竹林显著大于覆土 10 和 30 cm 的竹林，说明一定厚度的覆土对高节竹鞭根的生长更新有利，但覆土厚度过大，则会导致鞭根更容易衰老，寿命更短。覆土 10 和 30 cm 的高节竹林鞭根碳磷比、氮磷比与 ck 无显著差异，说明一定厚度范围内的覆土，高节竹鞭根可以维持较高的养分内稳性，但覆土厚度达 50 cm 时，碳磷比、氮磷比显著增大，高节竹鞭根通过养分化学计量比的适应性调节来应对较大厚度的覆土胁迫环境。

MDA 质量摩尔浓度的高低与细胞原生质膜的氧化伤害程度呈正比，已被广泛用来表明逆境胁迫下植物细胞膜的过氧化伤害程度^[24]，相对电导率通常与 MDA 的变化趋势一致。SOD 可将超氧自由基转化为氧气和过氧化氢，POD 可把过氧化氢分解为分子氧和水，解除活性氧的伤害^[25-26]。本研究中，高节竹鞭根 MDA 质量摩尔浓度、相对电导率和 SOD、POD 活性均随覆土厚度的增大呈先减小后增大的趋势，说明适当厚度的覆土能改善高节竹地下鞭系分布区域的光照、水分、温度等环境条件，更有利于鞭根的生长更新，但覆土厚度过大(50 cm)，鞭根细胞受到较大的环境胁迫，鞭根的生长阻力加大，受伤程度增大，较早的进入衰老。根系活力能够直接反映植物整个根系代谢程度的强弱，能够客观反映植物根系生命活动的生理指标，对植物生长发育起到了决定性的作用^[27]。虽然覆土 50 cm 的高节竹鞭根根系活力下降明显，但鞭根相对电导率远小于 50%，说明高节竹鞭根受到的胁迫伤害是可逆的，体现出高节竹较强的生态适应能力，这也是高节竹可以实施覆土控鞭高品质竹笋栽培的重要原因。

植物细胞内无机和有机小分子等渗透调节物质的积累可以降低细胞的渗透势^[28-29]，可溶性糖和可溶性蛋白质是常见的渗透调节物质。本研究表明：高节竹鞭根可溶性蛋白质质量分数在覆土 30 和 50 cm 的竹林显著大于覆土 10 cm 的竹林，而可溶性糖质量分数相反。说明高节竹鞭根在适当厚度(30 cm 及以下)的覆土环境中，可以维持较高的可溶性糖质量分数，这可能与覆土后地下鞭根系统分布区加深，温度相对较低，土壤含水率相对较高，影响了鞭根碳、氮等代谢有关。随覆土厚度的增大，鞭根需要减少可溶性糖的积累以应对土壤水分增加的影响^[30-31]；可溶性蛋白质大多是参与各种代谢的酶类^[32]，虽然植物在遭受胁迫时会抑制部分蛋白质的合成，但环境胁迫同时也会诱导细胞内与适应性有关基因表达，促进逆境蛋白质的合成。因此，鞭根可能会通过增加可溶性蛋白质的积累以应对较大覆土厚度的环境胁迫。

4 结论

适当厚度(30 cm及以下)的覆土控鞭栽培能改善高节竹地下鞭根系统分布区域的光照、水分、温度等环境条件,有利于高节竹鞭根的生长更新,维持较高的养分内稳性,减缓鞭根衰老速率。但覆土厚度过大(50 cm),鞭根会受到一定程度的环境胁迫,发生过氧化伤害,根系活力明显降低,鞭根寿命缩短,产生化学计量比的适应性调节来保持鞭根吸收养分能力的相对稳定。也即高节竹覆土控鞭高品质竹笋培育的覆土厚度应控制在30 cm以下,但覆土10 cm对高节竹笋外观品质、食味品质提高程度有限,也难以显著地增加经济效益。因此,从竹笋品质、经济效益和竹林可持续经营能力等综合分析认为高节竹覆土控鞭高品质竹笋培育的适宜覆土厚度为30 cm。

5 参考文献

- [1] ANDERSEN C P, SUCOFF E I, DIXON R K. Effects of root zone temperature on root initiation and elongation in red pine seedlings [J]. *Can J For Res*, 1986, **16**(4): 696 – 700.
- [2] GANSERT D. Root respiration and its importance for the carbon balance of beech sapling (*Fagus sylvatica* L.) in a montane beech forest [J]. *Plant Soil*, 1994, **167**(1): 109 – 119.
- [3] 边银霞, 王辉, 李永斌, 等. 土壤水分和覆土厚度对油松种子萌发和幼苗出土的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, **44**(2): 116 – 121.
BIAN Yinxia, WANG Hui, LI Yongbin, *et al.* The responses of seed germination and seedling emergence of *Pinus tabulaeformis* Carr. to soil water content and covering depth [J]. *J Gansu Agric Univ*, 2009, **44**(2): 116 – 121.
- [4] 赵垦田. 国外针叶树种根系生态学研究综述[J]. 世界林业研究, 2000, **13**(5): 7 – 12.
ZHAO Kentian. Review on the study of conifer rootsystem ecology abroad [J]. *World For Res*, 2000, **13**(5): 7 – 12.
- [5] 刘建军. 林木根系生态研究综述[J]. 西北林学院学报, 1998, **13**(3): 74 – 78.
LIU Jianjun. A review on root ecology of forest trees [J]. *J Northwest For Coll*, 1998, **13**(3): 74 – 78.
- [6] 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展[J]. 生态学报, 1999, **19**(2): 270 – 277.
HUANG Jianhui, HAN Xingguo, CHEN Lingzhi. Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, **19**(2): 270 – 277.
- [7] 童亮, 李平衡, 周国模, 等. 竹林鞭根系统研究综述[J]. 浙江农林大学学报, 2019, **36**(1): 183 – 192.
TONG Liang, LI Pingheng, ZHOU Guomo, *et al.* A review of research about rhizome-root system in bamboo forest [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(1): 183 – 192.
- [8] 方伟, 杨德清, 马志华, 等. 高节竹笋用林培育技术及经济效益分析[J]. 竹子研究汇刊, 1998, **17**(3): 15 – 20.
FANG Wei, YANG Deqing, MA Zhihua, *et al.* The cultivation technique and economic benefit analysis of shoot stand of *Phyllostachys prominens* [J]. *J Bamboo Res*, 1998, **17**(3): 15 – 20.
- [9] 胡国良, 俞彩珠, 楼君芳, 等. 高节竹梢枯病发生规律及防治试验[J]. 中国森林病虫, 2005, **24**(5): 38 – 41.
HU Guoliang, YU Caizhu, LOU Junfang, *et al.* Occurrence regularity and control experiment of shoot wilt in *Phyllostachys prominens* [J]. *For Pest Dis*, 2005, **24**(5): 38 – 41.
- [10] 张稼敏. 高节竹丛枝病研究初报[J]. 浙江林业科技, 2000, **20**(5): 38, 53.
ZHANG Jiamin. Preliminary report of research on *Balansia take* endangering *Phyllostachys prominens* [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2000, **20**(5): 38, 53.
- [11] 余学军, 陈庆虎, 吴家森, 等. 保鲜处理对高节竹笋采后生理的影响[J]. 竹子研究汇刊, 2004, **23**(1): 46 – 48.
YU Xuejun, CHEN Qinghu, WU Jiasen, *et al.* The effects of different fresh-keeping treatments on postharvest physiology and storage of bamboo shoots in *Phyllostachys prominens* [J]. *J Bamboo Res*, 2004, **23**(1): 46 – 48.
- [12] 白瑞华, 丁兴萃, 杜旭华, 等. 套袋栽培对高节竹笋品质的影响[J]. 浙江林业科技, 2011, **31**(1): 64 – 67.
BAI Ruihua, DING Xingcui, DU Xuhua, *et al.* Influence of covering black film-bags on quality of *Phyllostachys prominens* shoot [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2011, **31**(1): 64 – 67.
- [13] 郭子武, 江志标, 陈双林, 等. 覆土栽培对高节竹笋品质的影响[J]. 广西植物, 2015, **35**(4): 515 – 519.

- GUO Ziwu, JIANG Zhibiao, CHEN Shuanglin, *et al.* Influence of soil covered cultivation on shoot quality of *Phyllostachys prominens* [J]. *Guihaia*, 2015, **35**(4): 515 – 519.
- [14] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [15] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [17] CHAPIN III F S, MATSON P A, MOONEY H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* [M]. New York: Springer-Verlag, 2002.
- [18] 李天忠, 张志宏. 现代果树生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [19] BLOOMFIELD J, VOGT K, WARGO P M. Tree root turnover and senescence[C]// WAISEL Y, ESHEL A, KAFKAFI U, *et al.* *Plant Roots: The Hidden Half* [M]. 2nd ed. New York: Naarcel Dekker, 1996: 363 – 381.
- [20] EISSENSTAT D M, WELLS C E, YANAI R D, *et al.* Building roots in a changing environment: implications for root longevity [J]. *New Phytol*, 2000, **147**: 33 – 42.
- [21] EISSENSTAT D M, YANAI R D. The ecology of root lifespan [J]. *Adv Ecol Res*, 1997, **27**: 1 – 60.
- [22] 吴楚, 王政权, 范志强. 树木根系衰老研究的意义与现状[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(7): 1276 – 1280.
WU Chu, WANG Zhengquan, FAN Zhiqiang. Significance of senescence study on tree roots and its advances [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15**(7): 1276 – 1280.
- [23] RAYNAL D J, JOSLIN J D, THORNTON F C, *et al.* Sensitivity of tree seedlings to aluminum (III) red spruce and loblolly pine [J]. *J Environ Qual*, 1990, **19**(2): 180 – 187.
- [24] HODGES D M, DeLONG J M, FORNEY C F, *et al.* Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds [J]. *Planta*, 1999, **207**(4): 604 – 611.
- [25] 蒋明义, 郭绍川. 水分亏缺诱导的氧化胁迫和植物的抗氧化作用[J]. *植物生理学通讯*, 1996, **32**(2): 144 – 150.
JIANG Mingyi, GUO Shaochuan. Oxidative stress and antioxidation induced by water deficiency in plants [J]. *Plant Physiol Commun*, 1996, **32**(2): 144 – 150.
- [26] SOFO A, DICHIO B, XILOYANNIS C, *et al.* Effects of different irradiance levels on some antioxidant enzymes and on malondialdehyde content during rewatering in olive tree [J]. *Plant Sci*, 2004, **166**(2): 293 – 302.
- [27] 惠宏杉, 林立昊, 齐军仓, 等. 干旱胁迫对大麦幼苗根系的影响[J]. *麦类作物学报*, 2015, **35**(9): 1291 – 1297.
HUI Hongshan, LIN Lihao, QI Juncang, *et al.* Effect of drought stress on the roots of barley seedling [J]. *J Triticeae Crops*, 2015, **35**(9): 1291 – 1297.
- [28] PARIDA A, DAS A B, DAS P. NaCl stress causes changes in photosynthetic pigments, proteins and other metabolic components in the leaves of a true mangrove, *Bruguiera parviflora*, in hydroponic cultures [J]. *J Plant Biol*, 2002, **45**(1): 28 – 36.
- [29] BLUMWALD E, AHARON G S, APSE M P. Sodium transport in plant cells [J]. *Biochim Biophys Acta*, 2000, **1465**(1/2): 140 – 151.
- [30] 隋方功, 葛体达, 刘鹏起, 等. 干旱对夏玉米碳素同化、运转与分配的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, **14**(3): 234 – 237.
SUI Fanggong, GE Tida, LIU Pengqi, *et al.* Studies on accumulation, translocation and redistribution of carbon in summer maize under drought [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2006, **14**(3): 234 – 237.
- [31] 张玉梅, 林琪, 刘义国, 等. 不同抗旱性小麦品种花后旗叶生化特性的研究[J]. *华北农学报*, 2006, **21**(4): 43 – 47.
ZHANG Yumei, LIN Qi, LIU Yiguo, *et al.* A study on biochemical characters of flag leaf drought resistance after anthesis on different wheat varieties [J]. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2006, **21**(4): 43 – 47.
- [32] 范苏鲁, 苑兆和, 冯立娟, 等. 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(3): 651 – 657.
FAN Sulu, YUAN Zhaohe, FENG Lijuan, *et al.* Effects of drought stress on physiological and biochemical parameters of *Dahlia pinnata* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22**(3): 651 – 657.