

毛竹快速生长期的水势变化特征

袁佳丽^{1,2}, 温国胜^{1,2}, 张明如^{1,2}, 张汝民^{1,2}, 蔡先锋^{1,2}, 曾莹莹^{1,2}, 李洪吉^{1,2}, 温星^{1,2}, 朱弘^{1,2}

(1. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 为了探讨毛竹 *Phyllostachys edulis* 在快速生长期从笋长成幼竹这一动态过程与成竹之间是否存在水分供给关系以及水势是否是驱动新竹快速生长的关键因子, 以浙江农林大学毛竹生理生态定位监测站为依托, 利用 PSYPRO 多露点水势系统配套的 L-51A 叶水势探头和 PCT-55 土壤水势探头, 在毛竹快速生长期测定毛竹样株叶水势及土壤水势。结果表明: ①在快速生长期, 不同竹龄毛竹(新竹至 6 年生)的叶水势变化规律均为: 随年龄增大, 水势值也越大, 且竹龄对水势的影响均达到显著水平($P < 0.05$); 在生长中期同一竹龄毛竹叶水势值均低于生长前期和生长后期, 且在生长中期成竹之间的叶水势差异均不显著($P > 0.05$)。说明在毛竹快速生长期母竹向新竹输送水分, 且这种传输作用在生长中期更加强烈。②在快速生长期水分横向传输均为成竹传递给新竹, 纵向传输均为土壤—下层叶—中层叶—上层叶—大气, 正午土壤与叶水势梯度、不同竹龄之间叶水势差增大, 土壤—大气水势差 1~3 个数量级。强大的水势差的存在表明: 母竹将水分传输给新竹主要依靠水势梯度的作用。③在快速生长期土壤—叶、叶—大气、土壤—大气之间的相关性均达到极显著水平($P < 0.01$), 表明在快速生长期土壤水势、叶水势、大气水势相互影响, 形成统一连续体。水势是驱动毛竹快速生长的关键因素。表 5 参 21

关键词: 植物生理学; 毛竹; 叶水势; 土壤水势; 水势梯度; 日变化

中图分类号: S718.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2015)05-0722-07

Water potential with *Phyllostachys edulis* in its fast-growth periods

YUAN Jiali^{1,2}, WEN Guosheng^{1,2}, ZHANG Mingru^{1,2}, ZHANG Rumin^{1,2}, CAI Xianfeng^{1,2}, ZENG Yingying^{1,2}, LI Hongji^{1,2}, WEN Xing^{1,2}, ZHU Hong^{1,2}

(1. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To determine whether 1) water transport from mature to young *Phyllostachys edulis* bamboo and 2) water potential were key factors driving growth of young *Ph. edulis* in its fast-growth period, a PSYPRO water potential system with L-51A leaf water potential probes and PCT-55 soil potential probes were used to measure leaf and soil water potential at the physiological-ecological monitoring station of Zhejiang A & F University. Analysis included analysis of variance (ANOVA), Turkey's test for multiple comparisons and a correlation analysis. Results for the period of rapid growth with new to six-year-old *Ph. edulis* bamboo showed that the water potential value significantly increased ($P < 0.05$) with an increase in age. Leaf water potential of same-aged bamboo was lower in the rapid growth period than before and after. However, among mature *Ph. edulis*, leaf water potential differences in the rapid growth period were not significant. Also, during the rapid growth period correlation of water potential to soil-leaf ($P = 0.627$), soil-atmosphere ($P = 0.908$), and leaf-atmosphere

收稿日期: 2014-11-06; 修回日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270497, 30972397); 省院合作项目(2014SY16); 浙江农林大学研究生科研创新基金资助项目(3122013240229)

作者简介: 袁佳丽, 从事竹林生态学研究。E-mail: cjq881122@126.com。通信作者: 温国胜, 教授, 博士, 博士生导师, 从事生态学研究。E-mail: wgs@zafu.edu.cn

($P=0.716$) were all highly significant ($P < 0.01$). Thus, existence of a strong water potential gradient meant that a key factor with mature *Ph. edulis* water transport to young *Ph. edulis* mainly relied on the water potential gradient for driving fast-growth. [Ch, 5 tab. 21 ref.]

Key words: plant physiology; *Phyllostachys edulis*; leaf water potential; soil water potential; water potential gradient; diurnal variation

毛竹 *Phyllostachys edulis* 属单子叶禾本科 Gramineae 植物, 是中国分布最广、面积最大、开发利用程度最高, 对竹产区地方经济、竹农收入影响最为深远的集经济、生态、社会效益于一体的竹种之一^[1]。毛竹与其他树种不同, 有其独特的生长方式即“爆发式生长”^[2]。“爆发式生长”也称之为“快速生长”, 即指毛竹出笋后的伸长生长, 它主要是在 4 月初到 6 月初约 60 d 内, 由笋长成高达 10 m 以上的竹秆。为了探讨毛竹这种快速生长的机制, 不少学者从不同生长期各个器官的含水率^[3]、构件含水率及其沿不同梯度的变化规律^[4]、种源含水率动态变化^[5]、液流特征及其与环境因子的关系^[6]、蒸腾速率、气孔导度、水分利用关系^[7]等方面进行了研究, 但对毛竹水势方面的研究鲜见报道。本研究通过测定毛竹快速生长期不同林冠层、不同竹龄的叶水势与土壤水势以及大气水势的变化规律, 试图研究毛竹快速生长与水分的供需关系, 深刻理解毛竹“爆发式生长”的机制, 为毛竹固碳增汇技术开发提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 实验地概况与实验材料

实验地为浙江农林大学毛竹生理生态定位监测站, 位于浙江省临安市东部的青山镇研里村(30°14'N, 119°42'E)。当地气候温暖湿润, 光照充足, 雨水丰沛, 四季分明, 属于中亚热带季风气候。年平均气温为 15.9 °C, 极端最高气温 41.2 °C, 最低气温达-13.1 °C, 全年降水量 1 427.0 mm, 全年日照时数 1 920.0 h, 无霜期 234 d。属低山丘陵区, 海拔为 48~49 m。土壤属棕红壤, 土层深度均在 60 cm 以上。试验林为一般经营的纯毛竹林^[8], 林下有少量杂草生长, 如垂珠花 *Styrax dasycanthus*, 寒莓 *Rubus buergeri* 和网络鸡血藤 *Callerya reticulata* 等。竹龄为 1~6 年生, 高度为 9~16 m, 胸径为 8~16 cm。

实验样地为 30 m × 20 m, 共选用样株 22 株, 其中 6 年生 3 株, 4 年生 7 株, 2 年生 4 株, 新竹 8 株。在其周围搭建实验观测塔, 林冠分 3 层, 下层高度 7.22 m, 中层高度 8.57 m, 上层高度 9.97 m。快速生长后期(6 月)不同年龄毛竹样株的特征见表 1。

1.2 实验方法

1.2.1 毛竹年龄的确定 参考熊国辉等^[9]从枝痕个数、皮色、基部笋箨、白粉环、附着物等 5 个方面的外部形态特征, 结合当地竹农对毛竹竹龄的最终确定, 用黑色记号笔进行标注。

1.2.2 叶水势的测定 在 2014 年 3 月、5 月、6 月选择 3 d 典型晴天(3 月 27 日、5 月 8 日、6 月 7 日), 利用露点水势仪(PHYPRO)多露点水势系统 L-51A 探头(禾本科植物使用)测定范围(0~6.5 MPa), 夹叶片方法参考朱建军等^[10]介绍的改进方法进行测定, 即在每种竹龄毛竹随机选择完好的叶片, 在叶背面用记号笔画 1 个内径约为 5 mm 的圆, 然后用医用棉签蘸取少量氧化铝粉末并加 1 滴蒸馏水, 在所画的圆内研磨直至研磨部位刚出现颜色变深为止, 用凡士林将探头与叶片密封。正午叶水势测定时间为 11:30~14:30, 各组探头读数间隔 3 min, 最后将这个时间段内测定的数据取平均值。

1.2.3 叶水势日变化的测定 早晨 6:00 在林冠层的最上层, 对不同年龄毛竹叶水势进行测定, 具体测定方法依照毛竹叶水势的测定方法, 读数读取的时间从早晨 6:00 至下午 4:00 点, 读数间隔 2 h。选取 9 片健康叶, 读 1 次·片⁻¹, 取平均值。

1.2.4 土壤水势的测定 利用 PHYPRO 多露点水势系统(PCT-55 土壤探头)在毛竹林地选择 3 个样地,

表 1 快速生长后期(6 月)不同年龄毛竹样株的特征
Table 1 Characteristics of different ages of sample *Phyllostachys edulis* in June

| 竹龄 | 样株数 | 株高/m | 胸径/cm | 枝下高/m |
|----|-----|--------------|--------------|-------------|
| 6 | 3 | 10.84 ± 0.57 | 11.38 ± 0.89 | 6.06 ± 0.25 |
| 4 | 7 | 11.57 ± 0.40 | 9.89 ± 0.20 | 6.72 ± 0.17 |
| 2 | 4 | 11.18 ± 0.31 | 8.49 ± 0.88 | 6.69 ± 0.49 |
| 新竹 | 8 | 14.68 ± 0.45 | 8.26 ± 0.43 | 5.70 ± 0.16 |

说明: 表格中数据采用平均值±标准误。

挖土深 25 cm, 分别埋设 3 个探头, 采用原位测定, 待其稳定后进行读数, 取其平均值。

1.2.5 大气水势日变化的测定 利用大气温度、大气湿度这 2 个指标, 根据刘昌明等^[11]的公式进行计算: $\Psi_a=0.462 \times T \ln(R_H)$ 。其中: Ψ_a 为大气水势(MPa); T 为空气绝对温度; R_H 为大气相对湿度(%)。摄氏温度与绝对温度的换算根据公式: $T=(T_c+273.15)^\circ\text{C}$ 。其中: T 为空气绝对温度; T_c 为空气温度($^\circ\text{C}$)。气象资料均来自浙江省临安市气象局。

1.3 数据分析

不同林冠层不同竹龄毛竹的叶水势值进行单因素(ANOVA)方差分析, 对显著性进行 Teuky 检验^[12]和林冠层与竹龄对水势的交互作用的双因素方差分析。对生长期内的土壤水势、毛竹叶水势与大气水势进行相关性分析。数据分析使用 SPSS 和 Excel 软件。

2 结果与分析

2.1 不同生长期不同竹龄毛竹的叶水势比较

水势是植物水分状况的重要指标之一, 它的高低表明植物从土壤或相邻细胞中吸收水分以确保其进行正常的生理活动^[13]。不同生长期不同竹龄毛竹的叶水势如表 2 所示, 从纵向水分传输上看, 在生长期内(表 3)不同林冠层对水势的影响均达到显著水平($P<0.05$), 不同生长期林冠层的叶水势均为下层水势>中层水势>上层水势。从水分横向传输上来看, 在生长期内不同竹龄的叶水势均为竹龄越大水势越高, 新竹的水势最低。在生长前期、生长中期和生长后期, 水分的传输均为 6 年生毛竹将一部分水分供给 4 年生、2 年生和新竹; 4 年生毛竹将一部分水分供给 2 年生和新竹; 2 年生毛竹将一部分水分供给新竹。新竹的生长需要老竹的水分供给。从生长期内双因素方差分析来看(表 3), 3 个时期竹龄对水势的影响均达到显著水平($P<0.05$), 特别是在生长中期, 竹龄对水势的影响比其他 2 个时期更强烈。根

表 2 不同生长期不同竹龄毛竹叶水势比较

Table 2 Comparison of water potential of different ages of *Phyllostachys edulis* in different growth stages

| 竹龄/a | 林冠层 | 生长前期 | 生长中期 | 生长后期 |
|------|-----|---------------------|---------------------|---------------------|
| 2 | 下层 | -1.33 ± 0.10 (a,a) | -1.39 ± 0.11 (a,a) | -1.24 ± 0.15 (a,a) |
| | 中层 | -2.36 ± 0.13 (a,b) | -2.86 ± 0.15 (a,b) | -2.72 ± 0.14 (a,b) |
| | 上层 | -2.94 ± 0.14 (a,c) | -3.32 ± 0.17 (a,c) | -3.06 ± 0.22 (a,b) |
| 4 | 下层 | -1.04 ± 0.09 (a,a) | -1.18 ± 0.10 (a,a) | -1.11 ± 0.07 (a,a) |
| | 中层 | -2.34 ± 0.09 (a,b) | -2.62 ± 0.12 (a,b) | -2.52 ± 0.13 (a,b) |
| | 上层 | -2.72 ± 0.13 (a,c) | -3.04 ± 0.13 (a,c) | -2.86 ± 0.15 (a,b) |
| 6 | 下层 | -0.83 ± 0.06 (ab,a) | -1.11 ± 0.08 (a,a) | -1.06 ± 0.11 (a,a) |
| | 中层 | -1.87 ± 0.13 (b,b) | -2.23 ± 0.12 (ab,b) | -1.98 ± 0.10 (b,b) |
| | 上层 | -2.20 ± 0.18 (ab,b) | -2.73 ± 0.11 (ab,b) | -2.44 ± 0.13 (a,c) |
| 新竹 | 下层 | - | - | -1.37 ± 0.11 (a,a) |
| | 中层 | - | - | -2.85 ± 0.16 (ca,b) |
| | 上层 | - | - | -3.23 ± 0.19 (ba,b) |

说明: 表内字母标记法逗号前部分表示在同一生长期内, 同一林冠层的不同竹龄水势的显著性比较; 逗号后半部分表示在同一生长期内, 同一竹龄毛竹在不同林冠层的水势显著性比较。由于在不同生长期, 同一竹龄毛竹在同一林冠层均不显著, 故不在表内进行标记。数据显著性比较水平为 $P<0.05$ 。数据采用平均值±标准误。

表 3 毛竹水势双因素方差分析

Table 3 Two-way (ANOVA) of water potential in *Ph. edulis*

| 生长时期 | 竹龄 | | 冠层 | | 竹龄×冠层 | |
|------|--------|-------|---------|-------|-------|-------|
| | F 值 | P | F 值 | P | F 值 | P |
| 生长前期 | 17.111 | 0.000 | 126.989 | 0.000 | 0.716 | 0.584 |
| 生长中期 | 18.149 | 0.010 | 253.500 | 0.000 | 0.678 | 0.610 |
| 生长后期 | 11.756 | 0.000 | 156.756 | 0.000 | 1.006 | 0.426 |

据土壤—植物—大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)理论, 水分从高水势流向低水势, 表明毛竹在快速生长期内老竹向新竹依次传输水分。

2.2 土壤与叶片水势梯度的比较

不同竹龄毛竹在不同生长期的土壤—叶水势梯度见表 4。在生长期内, 毛竹的叶水势值都较低, 其中在生长中期不同竹龄毛竹的叶水势值均达到最低。在生长前期 6 年生毛竹的水势显著高于 2 年生的, 在生长中期的水势却比生长前期和后期的水势低。这说明在生长中期(竹笋进入快速生长期)成竹将更多的水分供给幼竹, 以支持其快速生长; 在生长后期高生长完成, 此时 6 年生毛竹与新竹的水势达到显著差异, 而 2 年生和 4 年生毛竹虽也有部分水分供给, 但强度相比生长中期有所减弱。从土壤水势值分析, 生长前期的土壤水势与生长中期的土壤水势差异达到显著水平($P < 0.05$)。一方面土壤水势的高低与当时的气象因子有关, 另一方面也反映了毛竹快速生长期需要从土壤中吸收更多的水分。从水势梯度分析, 生长中期大于生长前期和生长后期。4 种不同竹龄的叶水势比较, 生长后期的新竹的水势差最低, 达 (2.35 ± 0.33) MPa, 说明新竹的吸水能力最为强烈。

表 4 不同生长期不同竹龄毛竹的土壤-植物水势梯度的比较

Table 4 Soil-plant water potential gradient of different ages of moso bamboo in the different growth stages

| 生长阶段 | 毛竹年龄/a | Ψ_L | Ψ_S | Ψ_{S-L} |
|------|--------|------------------------|-----------------------|-----------------|
| 生长前期 | 2 | -2.21 ± 0.47 (a) | -0.09 ± 0.01 (a) | 2.14 ± 0.29 |
| | 4 | -2.03 ± 0.51 (a) | | 1.94 ± 0.28 |
| | 6 | -1.63 ± 0.42 (ab) | | 1.54 ± 0.22 |
| 生长中期 | 2 | -2.52 ± 0.58 (a) | -0.14 ± 0.02 (b) | 2.38 ± 0.34 |
| | 4 | -2.28 ± 0.57 (a) | | 2.14 ± 0.30 |
| | 6 | -2.02 ± 0.48 (a) | | 1.88 ± 0.27 |
| 生长后期 | 2 | -2.34 ± 0.56 (a) | -0.13 ± 0.01 (ba) | 2.21 ± 0.31 |
| | 4 | -2.16 ± 0.54 (a) | | 2.03 ± 0.29 |
| | 6 | -1.83 ± 0.40 (a) | | 1.70 ± 0.24 |
| 新竹 | | -2.48 ± 0.57 (b,a) | | 2.35 ± 0.33 |

说明: Ψ_L 中午叶水势值, Ψ_S 中午土壤水势值, Ψ_{S-L} 中午土壤—植物水势梯度。数据采用平均值 \pm 标准误。

2.3 不同生长期不同竹龄毛竹的水势日变化比较

清晨植物的水势值反映根系周围土壤的水分状况, 同时也反映植物水分的恢复状况^[13-15]。毛竹快速生长不同期土壤—竹叶—大气水势的日变化见表 5。在毛竹快速生长的前期(冬笋分化成春笋, 长高到 5 cm 膨大结束)、中期(主要是竹笋的伸长生长)、后期(从幼竹过渡到新竹, 主要是枝条与竹叶的生长)^[9], 水势的波动幅度依次为大气水势 > 毛竹叶水势 > 土壤水势, 其中大气水势的最小波动幅达 25.66 MPa, 最大波动幅可达 107.38 MPa。大气水势绝对值要比毛竹地土壤水势和毛竹叶水势高出 1~3 个数量级, 强大的水势差也为毛竹吸收、运输和蒸腾耗水提供了保证。在快速生长期, 大气水势的最小值出现在 6 月 (-136.41 MPa), 最大值出现在 5 月 (-9.55 MPa), 均表现出明显的日变化规律, 变动幅度较大。在清晨 6:00, 大气水势均为最高(除 3 月最高值出现在上午 8:00), 之后开始慢慢下降, 14:00 左右大气水势值为最低。此后开始慢慢回升(3 月 8:00-16:00 大气水势慢慢下降, 未见回升)。毛竹叶水势表现出相同的日变化规律, 最高值均出现在 6:00 左右, 此后开始慢慢下降, 至 14:00 左右达到最低值, 此后开始慢慢回升。土壤水势的日变化规律与大气水势基本保持一致, 但土壤水势的日变动幅度小。不同竹龄毛竹叶水势基本都表现为随年龄增长, 叶水势不断增大, 在快速生长中期(5 月)不同竹龄毛竹叶水势均较前期和后期有一定程度的下降, 不同时期土壤水势均较高, 而叶水势却较低。这样就使得土壤与叶的水势梯度有所增大, 以满足毛竹自身生长和蒸腾耗水的需要。而到了生长后期(6 月), 土壤水势较前期和中期有一定程度的下降, 而叶水势却比生长中期高, 导致土壤—毛竹叶水势梯度的缩小, 吸水能力下降。在正午时, 不同竹龄毛竹叶水势较低, 均达到干旱胁迫的程度, 但此时毛竹的土壤水势却较高, 说明毛竹在正午时的蒸腾耗水比较强; 而清晨时毛竹的叶水势都比较高, 说明毛竹的水分恢复能力很强,

6年生毛竹叶水势最高可达 -0.04 MPa, 接近饱和水势。笔者测定的土壤水势为25 cm左右的深度, 因毛竹的竹鞭根系80%以上分布在20~30 cm的深度^[9], 所以这一深度的土壤水势能反映毛竹利用水分的状况。

表5 不同生长期土壤—毛竹叶—大气水势梯度比较

Table 5 Comparison of soil—leaf—atmosphere water potential in a day in different growth stages

| 日期 | 时间 | 土壤水势/MPa | 叶水势/MPa | | | | 大气水势/MPa |
|-------|-------|----------|---------|-------|-------|-------|----------|
| | | | 新竹 | 2年生 | 4年生 | 6年生 | |
| 03-31 | 6:00 | -0.04 | - | -0.09 | -0.08 | -0.04 | -26.08 |
| | 8:00 | -0.05 | - | -0.27 | -0.26 | -0.19 | -25.07 |
| | 10:00 | -0.06 | - | -0.82 | -0.70 | -0.67 | -33.28 |
| | 12:00 | -0.06 | - | -2.08 | -2.02 | -1.90 | -36.66 |
| | 14:00 | -0.08 | - | -3.18 | -2.97 | -2.49 | -41.56 |
| | 16:00 | -0.09 | - | -2.08 | -1.88 | -1.69 | -51.74 |
| 05-21 | 6:00 | -0.06 | - | -0.18 | -0.16 | -0.11 | -9.55 |
| | 8:00 | -0.09 | - | -0.53 | -0.44 | -0.33 | -34.11 |
| | 10:00 | -0.11 | - | -1.01 | -0.96 | -0.88 | -66.07 |
| | 12:00 | -0.15 | - | -2.55 | -2.52 | -2.40 | -96.44 |
| | 14:00 | -0.17 | - | -3.41 | -3.12 | -2.87 | -114.98 |
| | 16:00 | -0.13 | - | -2.15 | -2.00 | -2.03 | -111.10 |
| 06-15 | 6:00 | -0.08 | -0.16 | -0.15 | -0.12 | -0.09 | -29.03 |
| | 8:00 | -0.13 | -0.34 | -0.32 | -0.27 | -0.25 | -53.48 |
| | 10:00 | -0.15 | -0.83 | -0.77 | -0.76 | -0.71 | -83.45 |
| | 12:00 | -0.21 | -2.24 | -2.13 | -2.22 | -2.11 | -91.89 |
| | 14:00 | -0.26 | -3.41 | -3.15 | -3.02 | -2.63 | -136.41 |
| | 16:00 | -0.19 | -2.14 | -2.05 | -1.85 | -1.70 | -128.33 |

2.4 不同生长期土壤、叶、大气水势之间的关系分析

通过对土壤、叶、大气水势之间的相关分析, 在快速生长不同期内土壤水势与叶水势、叶水势与大气水势、土壤水势与大气水势的 R 值分别达到(0.627, 0.716, 0.908), 三者之间的相关关系均达到极显著水平($P < 0.01$)。说明毛竹在快速生长的不同阶段, 毛竹的叶水势与土壤水势以及大气水势显著相关。毛竹在生长阶段会消耗大量水分, 此时, 土壤和大气水分含量的高低将影响到毛竹的自身生长。

3 讨论

毛竹地上立竹散生, 而地下鞭竹相连^[9]。有研究表明: 在由笋长成新竹的过程中成熟的竹秆向新秆输送碳和营养^[16-17]。那么成竹是如何将营养输送给新竹? 黄浩等^[18]对毛竹爆发式生长机制进行探究发现, 水分是毛竹爆发式生长的最根本因素。而水势能反映水分在土壤—植物—大气界面的传输方向和强度。我们对不同竹龄毛竹的水势研究发现, 在生长期均存在着成竹向新竹输送水分, 其中6年生毛竹的输送能力最强。熊国辉等^[9]、关郁善等^[19]发现毛竹的鞭根, 随鞭龄的增加形成鞭根系, 鞭根萌发后不重复更新, 主要依靠伸长生长分生的支根来更新, 支根的量越多, 则吸收功能越强; 鞭根系的有效吸收面积, 随鞭龄的变化而变化, 6年生前随鞭龄的增加而增大, 6年生时达最大值, 此后开始下降。这也解释了为什么6年生毛竹对新竹的水分输送能力最强。在我们的研究中发现: 竹龄对水势的影响在生长期都达到显著水平。说明老竹对新竹的传输作用在快速生长期内特别明显。而在对不同生长期内的叶水势差异性进行分析时发现, 在爆发式生长中期, 6年生毛竹、4年生毛竹、2年生毛竹之间的水势差异不显著。这说明成竹地上部分已经形成, 维持自身生长所需的水分比较稳定。在同一鞭竹系统中由于幼竹的伸长生长消耗大量水分和养分, 这时不同竹龄的老竹都会加强对幼竹的水分传送, 以保证幼竹的健康生长。在我们对生长期内的土壤水势进行差异性比较时发现, 在生长前期和生长中期毛竹样地的土壤水势差异显著, 说明在生长中期毛竹鞭系系统从土壤中获取充足的水分。同时在生长期内, 正午土壤

水势值都比较高。Imaji 等^[20]发现: 毛竹的地下根系是其他植物的 5~14 倍, 发达的毛竹根系有利于毛竹储水, 从而提高土壤水势。而对快速生长不同期的土壤—毛竹叶—大气水势日变化研究以及三者之间的相关性进行分析, 表明不同竹龄毛竹在生长期内的清晨水势较高, 6 年生毛竹甚至接近于饱和水势。Aster 等^[14]认为: 黎明前植物高的水势值说明植物能更好地获取水分。这些都说明毛竹的水分恢复能力和获取水分能力较强。而在正午时毛竹的水势都下降到很低, 从水势值看都已达到干旱胁迫的程度, 说明在正午毛竹的蒸腾失水作用强烈。毛竹水分的获取与毛竹地的土壤水势以及大气水势有极显著的正相关关系。廖光庐^[21]对毛竹林进行调查发现毛竹林由大小不一的鞭竹系统构成, 鞭系平均长度在 53.3~100.7 m, 平均立竹为 3.3~8.6 株, 立竹度 2 700~3 000 株·hm⁻² 的竹林有鞭系 500 个。我们研究所选择样地的样株共 22 株, 其中 2~6 年生成竹 14 株, 新竹 8 株, 来自不同的鞭竹系统, 依照廖光庐^[21]每个鞭竹系统立竹为 3.3~8.6 株, 推测样地内样株所属的鞭竹系统在 3~7 个。从我们测得的水势看, 样株中有来自同一鞭竹系统的毛竹, 也有来自不同鞭竹系统的毛竹, 但老竹将水分传送给新竹的规律是不变的。当然若是能对同一鞭竹系统的毛竹与不同鞭竹系统的毛竹水势进行分类比较, 将能更好地说明问题, 这有待于今后的进一步研究。

4 结论

从我们的研究发现, 幼竹在生长期内能够快速生长, 主要依靠母竹对新竹的水分传输, 这种水分传输关系在生长中期尤为明显。在快速生长期毛竹水势的高低与毛竹地土壤水势以及大气水势的高低密切相关。说明毛竹水势受土壤水势和大气水势的双重影响。依靠水势, 母竹将水分源源不断地供给新竹, 以保证新竹健康快速生长。因此, 水势成为了驱动毛竹快速生长的关键因素。

5 参考文献

- [1] 李雪涛, 金爱武, 李国栋, 等. 毛竹低产低效林的经营策略研究[J]. 竹子研究汇刊, 2012, **31**(2): 47 - 51.
LI Xuetao, JIN Aiwu, LI Guodong, et al. Management strategies to transform the low-yield or low-efficiency Moso bamboo forests [J]. *J Bamboo Res*, 2012, **31**(2): 47 - 51.
- [2] 曹福亮, 楼崇. 毛竹林出笋与幼竹生长发育规律的研究[J]. 竹子研究汇刊, 1991, **10**(1): 64 - 71.
CAO Fuliang, LOU Chong. A study on the laws of bamboo shooting and the growth and development of young bamboo of *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Bamboo Res*, 1991, **10**(1): 64 - 71.
- [3] 姚兆斌, 江洪, 曹全. 不同高生长阶段毛竹器官含水率的测定[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(5): 2778 - 2780, 2858.
YAO Zhaobin, JIANG Hong, CAO Quan. Measurement of water content in different organs of *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2011, **39**(5): 2778 - 2780, 2858.
- [4] 王晨, 郭起荣, 石雷, 等. 毛竹构件含水率及其沿不同梯度的变化规律[J]. 世界竹藤通讯, 2013, **11**(4): 1 - 6.
WANG Chen, GUO Qirong, SHI Lei, et al. Water content of Moso bamboo and their changes along with different gradients [J]. *World Bamboo Rat*, 2013, **11**(4): 1 - 6.
- [5] 邱尔发, 陈存及, 蒋家雄. 毛竹种源含水率动态变化[J]. 江西农业大学学报, 2001, **23**(3): 355 - 360.
QIU Erfa, CHEN Cunji, JIANG Jiaxiong. Water content dynamic in different provenances of *Phyllostachys pubescens* [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2001, **23**(3): 355 - 360.
- [6] 侯小金, 谢锦忠, 格日勒图. 毛竹液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(7): 1263 - 1269.
HOU Xiaojin, XIE Jinzhong, Geriletu, et al. *Phyllostachys pubescens* sap flow and its relationships with environmental factors [J]. *Chin J Ecol*, 2010, **29**(7): 1263 - 1269.
- [7] 林琼影, 陈建新, 杨淑贞, 等. 毛竹气体交换特征[J]. 浙江林学院学报, 2008, **25**(4): 522 - 526.
LIN Qiongying, CHEN Jianxin, YANG Shuzhen, et al. Gas exchange with *Phyllostachys pubescens* on Mount Tianmu, Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, **25**(4): 522 - 526.
- [8] 周国模, 姜培坤, 徐秋芳. 竹林生态系统中碳的固定与转化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 75 - 76.
- [9] 熊国辉, 张朝晖, 楼浙辉, 等. 毛竹林鞭竹系统——“竹树”研究[J]. 江西林业科技, 2007(4): 21 - 26.
XIONG Guohui, ZHANG Chaohui, LOU Zhehui, et al. Study on rhizome-culm system of *Phyllostachys heterocycla-bamboo-tree* [J]. *J Jiangxi For Sci Technol*, 2007(4): 21 - 26.
- [10] 朱建军, 柏新富, 刘林德. 露点水势仪用于植物活体原位水势测定的技术改进[J]. 植物学报, 2013, **48**(5): 531

- 539.

ZHU Jianjun, BAI Xinfu, LIU Linda. Improved protocol for the in situ measurement of water potential of plants with a thermocouple psychrometer [J]. *Chin Bull Bot*, 2013, **48**(5): 531 - 539.

- [11] 刘昌明, 王会肖, 等. 土壤—作物—大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [12] FOWLER J, COHEN L, JARVIS P. *Practical Statistics for Field Biology* [M]. 2 ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 1998.
- [13] 曾凡江, 张希明, 李小明. 怪柳的水分生理特性研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(5): 611 - 614.
ZENG Fanjiang, ZHANG Ximing, LI Xiaoming. A review on the water physiological characteristics of *Tamarix* and its prospect [J]. *Chin J App Ecol*, 2002, **13**(5): 611 - 614.
- [14] GEBREKIRSTOS A, TEKETAY D, FETENE M, *et al.* Adaptation of five co-occurring tree and shrub species to water stress and its implication in restoration of degraded lands [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **229**(1/3): 259 - 267.
- [15] GEBREHIWOT K, MUYS B, HAILE M, *et al.* The use of plant water relation to characterize tree species and sites in the drylands of northern Ethiopia [J]. *J Arid Environ*, 2005, **60**(4): 581 - 592.
- [16] LI R, WERGER M J A, DURING H J, *et al.* Carbon and nutrient dynamics in relation to growth rhythm in the giant bamboo *Phyllostachys pubescens* [J]. *Plant & Soil*, 1998, **201**(1): 113 - 123.
- [17] LIN Yiming, PENG Zaiqing, LIN Peng. Dynamics of leaf mass, leaf area and element retranslocation efficiency during leaf senescence in *Phyllostachys pubescens* [J]. *Acta Bot Sin*, 2004, **46**(1): 1216 - 1323.
- [18] 黄浩, 温国胜. 毛竹爆发式生长的机理探究[J]. 科技资讯, 2009(31): 218 - 219.
HUANG Hao, WEN Guosheng. Study on the mechanism of explosive growth of *Phyllostachys pubescens* [J]. *Sci & Technol Inf*, 2009(31): 218 - 219.
- [19] 郑郁善, 洪伟. 毛竹经营学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998.
- [20] 今治安弥, 上田正文, 和口美明, 他. モウソウチク・マダケアの侵入がスギ・ヒノキ人工林の水分生理状態に及ぼす影響[J]. 日本森林学会誌, 2013, **95**(3): 141 - 146.
IMAJI A, UEDA M, WAGUCHI Y, *et al.* Effects of bamboo colonization on water relations of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) [J]. *J Jpn For Soc*, 2013, **95**(3): 141 - 146.
- [21] 廖光庐. 毛竹林鞭系结构调查分析[J]. 竹子研究汇刊, 1988, **7**(3): 35 - 44.
LIAO Guanglu. Analysis and investigation on the structure of rhizome system of bamboo forests [J]. *J Bamboo Res*, 1988, **7**(3): 35 - 44.