



修剪对山地苹果蒸腾的影响及模拟

叶苗泰¹, 霍高鹏², 杨博², 赵西宁^{1,3}, 高晓东^{1,3}

¹西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 【目的】探究不同修剪强度对旱作山地苹果蒸腾的调控效应, 为山地苹果园田间水分管理与可持续发展提供科学依据。【方法】以黄土丘陵区山地苹果为对象, 设置不同修剪强度(对照 CK: 无修剪; 强度 I: 轻度修剪, 去除 10% 的侧枝长度; 强度 II: 中度修剪, 去除 25% 的侧枝长度; 强度 III: 重度修剪, 去除 40% 的侧枝长度), 采用观测(TDP 插针式茎流计)和数值模拟(MAESPA 模型)结合的手段研究修剪对苹果树蒸腾耗水规律的影响。

【结果】修剪显著降低了苹果树叶面积指数, 强度 III 修剪处理的枝量、叶面积指数, 冠幅直径平均较对照处理减少 28.2%、30.5%、9.5%。修剪显著改变了苹果树蒸腾耗水特征, 随着修剪强度的增加, 日液流峰值下降, 液流强度变弱; 逐月蒸腾耗水量从果实膨大期到着色成熟期逐渐降低, 表现为 7 月最高, 9 月最低, 修剪强度 II、强度 III 处理各月蒸腾耗水显著低于对照; 各处理在整个研究期间的蒸腾耗水量较对照分别降低了 11.1%、24.1%、37.9%, 修剪强度 II、强度 III 蒸腾耗水量与对照存在显著差异。MAESPA 模型能够较好模拟不同修剪强度下果树蒸腾耗水规律, 不同修剪强度 7—9 月份蒸腾耗水量模拟的归一化均方差为 0.163—0.293, 纳什系数为 0.616—0.83, 一致性系数为 0.907—0.960。模型在光合有效辐射和饱和水汽压差较低时, 对蒸腾的模拟效果较差。【结论】随着修剪强度的增加, 苹果蒸腾耗水量基本呈等比例下降趋势, 在没有严重水分亏缺时, 山地果园可采取去除 10% 侧枝的修剪强度; 当发生严重水分亏缺时, 去除 25% 侧枝的修剪强度能以较小的产量损失显著降低蒸腾耗水量, 缓解水分供需矛盾, 促进果园的绿色健康发展。

关键词: 苹果; 修剪; 蒸腾; 旱作果园; MAESPA 模型

Measurements and Modeling of the Impacts of Different Pruning Degrees on Transpiration of Apple Orchard in Hilly Regions

YE MiaoTai¹, HUO GaoPeng², YANG Bo², ZHAO XiNing^{1,3}, GAO XiaoDong^{1,3}

¹Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi; ²College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi; ³Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: 【Objective】 Water deficiency is the major obstacle to restrict the development of apple industry of the Loess Plateau. This study was conducted to investigate the effects of pruning on apple transpiration, aiming to provide helpful information for water management and sustainable development of apple orchards. 【Method】 The study sites was located in Zizhou County, Shaanxi Province, where the apple trees were grown under rain-fed conditions. Sap flow under four pruning intensities, including CK (no pruning), PI-1 (light pruning), PI-2 (moderate pruning) and PI-3 (severe pruning), were measured with thermal dissipation probes.

收稿日期: 2019-04-01; 接受日期: 2019-06-18

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0400204)、国家自然科学基金(41571506, 41771316)、陕西省重点科技创新团队计划(2017KCT-15)、陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDNY-01-03)

联系方式: 叶苗泰, E-mail: yemt@nwafu.edu.cn. 通信作者高晓东, E-mail: gao_xiaodong@nwafu.edu.cn

Combining with model simulations (MAESPA), the effects of pruning on transpiration of apple trees were studied. **【Result】** The results showed that pruning could effectively reduce the leaf area index (LAI) of apple trees. The total branches, LAI and crown diameter of PI-3 decreased by 28.2%, 30.5% and 9.5%, respectively, compared with the CK. Pruning reduced the transpiration of apple trees significantly. At the intraday scale, when the pruning intensity increased, the peak value of sap flow decreased accordingly. Furthermore, the monthly transpiration gradually decreased from the fruit swelling period to fruit ripening period with the peak value in July and the lowest value in September. Transpiration of intensity II (PI-2) and intensity III (PI-3) was significantly lower than that of CK. During the study period, the transpiration of pruning intensity I (PI-1), intensity II (PI-2) and intensity III (PI-3) decreased by 11.1%, 24.1% and 37.9%, respectively, compared with CK (July-September). Meanwhile, the relationship between pruning intensity and transpiration was analyzed through MAESPA model. MAESPA model simulated the diurnal variation characteristics and daily transpiration of apple trees with a good accuracy. The normalized mean square error was between 0.163 and 0.293; the Nash coefficient was between 0.616 and 0.830 and the consistency coefficient was between 0.907 and 0.960. The results also showed that the model had a relatively poor performance when the photosynthetically active radiation (PAR) and saturated water vapor pressure deficit (VPD) were low. **【Conclusion】** Pruning effectively reduced the transpiration of apple trees. Under the context of light water stress in the Loess Plateau, PI-1 could be applied to orchard to reduce water consumption slightly; under the severe water deficit condition, PI-3 could be used as a promising measure to regulate water consumption of apple trees and promote the green healthy development of orchards.

Key words: apple; pruning; transpiration; rainfed orchards; MAESPA model

0 引言

【研究意义】黄土高原是联合国粮农组织认定的全球最大苹果优生区和集中连片栽植区。该区 2017 年苹果产量占全国的 57%，全球的 25%^[1-2]，苹果产业已成为该区扶贫攻坚和农民致富的支柱产业。但黄土高原干旱缺水，灌溉条件差，加上果园管理原因导致水资源供需矛盾突出^[3-5]，在气候暖干化背景下，可能进一步加剧^[6-7]。研究表明黄土高原深层土壤水分过度消耗已导致严重的土壤干燥化，影响土壤水库调节水分的能力^[8-10]。同时，由于该区苹果种植密度高、郁闭度大，通风透光条件差，影响果实品质及产量，制约着苹果产业的持续健康发展^[11-12]。实际上，修剪通过改变树体冠层结构和叶面积进而降低蒸腾耗水量，有利于果园综合生态服务功能发挥和可持续发展，具有作为一种节水型生态调控技术的潜力^[13]。研究修剪调控苹果树蒸腾耗水规律，对黄土高原地区苹果园绿色可持续发展具有重要作用。**【前人研究进展】**修剪作为一种生产力调控措施，被广泛运用在果树生产中。然而，园艺学上果树修剪以提高产量为主要目标，侧重于修剪方式和修剪强度对树体光合、结果能力、产量、果实品质等的影响^[14-17]。目前已有学者研究发现修剪能显著降低生态林和经济林蒸腾耗水量和深层土壤水分消耗^[18-22]，但由于修剪对树体的蒸腾调控作用较为复杂，FORRESTER 等^[23]通过对桉树进行修剪，去除 75%的枝条后发现蒸腾仅下降了 12%，也有相关

研究表明不同品种之间调控亦存在较大差异^[24]，树体自身因素和外界环境因素都会影响修剪调控效果。

【本研究切入点】与生态林相比，苹果园树形管理更为精细，树体冠层结构更为复杂，针对苹果树修剪对蒸腾耗水的研究仍较为薄弱，鉴于近年黄土高原苹果栽植持续在半干旱区扩展，这方面的研究亟需加强。同时，已有的相关研究多基于田间观测数据，数值模拟研究十分薄弱，难以预测修剪对果树蒸腾耗水的长期影响。MAESPA 模型是一个基于植物生理过程的冠层尺度光合蒸腾模型，已被广泛用于林分辐射通量、初级生产力、林分蒸腾耗水等方面的研究^[25-27]，但尚未应用于修剪对果树蒸腾耗水的影响方面。**【拟解决的关键问题】**本研究在田间试验观测数据基础上，结合 MAESPA 模型研究不同修剪强度对黄土高原山地苹果树多时间尺度蒸腾耗水规律的影响，为黄土高原苹果田间水分管理和果业持续健康发展提供科技支撑。

1 材料与方法

试验于 2018 年 7—9 月在陕西省子洲县清水沟村现代农业园区的山地有机果园内进行。

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省子洲县清水沟山地有机苹果种植基地 (37°27' N, 110°20' E)，海拔 1 020 m，该区属于温带大陆性季风气候，多年平均降水 450 mm，主要集中在 7—9 月，气候干燥，日照充沛，无霜期

145 d, 年平均气温 9.1℃, 土壤主要为黄绵土, 属于砂壤土, 土层深厚均一, 但土壤贫瘠。土壤容重均值为 1.4 g·cm⁻³, 田间持水量约为 22%。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 以典型山地苹果园为试验样地, 供试树种为‘密脆’ (*Malus domestica* Borkh. cv. Honeycrisp), 树龄 8 年, 株间距为 2 m×3 m, 各树施肥的种类、次数和用量一致, 各处理间的土壤性质无显著差异。由于夏季萌生枝叶多, 造成树体之间、树体内部枝叶重叠严重, 过多的枝叶量加剧果树耗水, 考虑到‘密脆’果实和叶片主要着生于侧枝, 选择长势相似的苹果树对其侧枝长度进行梯度修剪调控试验。设置对照 (不修剪, CK), 强度 I (轻度修剪, PI-1: 去除 10% 的侧枝长度), 强度 II (中度修剪, PI-2: 去除 25% 的侧枝长度), 强度 III (重度修剪, PI-3: 去除 40% 的侧枝长度), 共设 4 个处理, 每个处理 3 个重复, 每个重复包括相邻的 3 株果树, 共计 36 株果树。每个重复的 3 株果树为一个小区, 共计 12 个小区, 边界采用隔板进行隔离, 隔离深度为 100 cm, 以防止受到周边果树的影响。修剪时以调控果树奢侈性蒸腾耗水为出发点, 合理保留结果侧枝为原则, 优先疏除树冠外围多头枝、过密枝, 竞争枝、内膛枝、细弱枝、背上枝、背下枝。

1.2.2 数据来源与处理 液流监测采用美国 Dynamax 公司生产的插针式 FLGS-TDP 茎流计, 探针型号为 TDP-10。对不同修剪处理果树液流量进行连续监测, 每个小区选择中间的果树进行液流监测, 共计 12 株果树, 即每个处理 3 株果树。在位于苹果主干 30 cm 高处安装 10 mm 长的探头, 用隔热材料包裹, 减少环境热量的影响, 系统每 30 min 采集 1 次数据。根据以下计算方法计算果树的茎流量, 计算公式如下:

$$K = \frac{dT_m - dT}{dT} \quad (1)$$

$$SF = 0.0119K^{1.231} \quad (2)$$

$$Q = A \times SF \quad (3)$$

式中, K 为无量纲参数; dT_m 为无液流时加热探针与参考探针的最大温差 (°C); dT 为瞬时温差值 (°C); SF 为液流速率 (cm·s⁻¹); A 为边材面积; Q 为液流量。其中, dT_m 和 dT 均为仪器自动监测的温差。

叶面积指数使用美国 LI-COR 公司生产的 LAI-2200 冠层分析仪进行测量, 每次测量时, 选择晴朗无云的傍晚或阴天, 为避免过强的太阳辐射和相邻果

树之间的影响, 选择 90°遮盖帽。测量时, 先将探头放置于冠层上方, 记录背景值 A 值, 保持探头水平, 按下测定按钮, 听到两声蜂鸣后将探头放入树冠下部, 探杆水平紧贴树干读取 B 值, 按下测定按钮, 听到两声蜂鸣声后完成一次测量, 沿着树干绕树一周共测量 5 次, 包含树的各个方向。重复测量 5 次, 测量频率为 2 周一次。

苹果产量在果实成熟后以株为单位采收, 统计不同处理的产量。

采用饱和水汽压差 (VPD) 指标综合表达温度与空气相对湿度的协同效应, 以分析其对模型模拟苹果液流的影响。该指标计算公式如下所示:

$$VPD = 0.611 \times EXP\left(\frac{17.27T}{237.3+T}\right) \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (4)$$

式中, T 为气温 (°C); RH 为相对湿度 (%)。

1.3 MAESPA 模型

MAESPA 模型是一个基于植物生理过程的冠层尺度光合蒸腾模型, 模型采用 FORTRAN 语言编写, 各参数在相应输入文本中直接输入, 经程序运行得到输出结果。MAESPA 模型共有控制模块、气象模块、冠层结构模块、植被生理模块等。模型对冠层蒸腾的模拟主要由光合—蒸腾、冠层辐射截获 2 个子模型组成, 气象、冠层结构等模块的参数通过影响各网格点内的冠层辐射截获模型等来影响蒸腾-光合子模型。冠层辐射截获模型是通过对树冠的位置、形状和大小定义冠层整体结构, 在每个树冠分层的基础上, 通过划分网格点来定义冠层结构, 从而计算不同网格点内的辐射截获。光合—蒸腾子模型采用 Farquhar 光合模型在冠层的每个格点内分别对光合辐射进行模拟, 表达式如下所示:

$$A_n = \min(A_c, A_j) - R_d \quad (5)$$

$$A_c = V_{cmax} \frac{C_i - \Gamma^*}{C_i + K_c \left(1 + \frac{O_i}{K_o}\right)} \quad (6)$$

$$A_j = J \frac{C_i - \Gamma^*}{4(C_i + 2\Gamma^*)} \quad (7)$$

式中, A_n 为净光合速率 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), A_c 、 A_j 分别为 Rubisco 酶、RuBP 酶再生受到限制时的净光合速率 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); R_d 为白天呼吸速率 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); Γ^* 为无暗呼吸时的 CO_2 补偿点 ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$); C_i 与 O_i 为胞间 CO_2 与 O_2 浓度 ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$); V_{cmax} 和 J 分别为最大羧化速率和电子传递速率 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); K_c 和 K_o 为米氏常数 (与温度相关)。

由式(5)、(6)、(7)可知,光合模型是由电子传递效率(与光合有效辐射相关)、叶片温度和胞间CO₂浓度驱动的,但胞间CO₂浓度为未知参数。根据式(8)Fick定律,通过引入气孔导度模型,模型将光合和蒸腾模型相耦合,进而计算冠层每个网格内的光合、蒸腾等气体交换,最后累加每个网格的气体交换整合到冠层尺度。

$$A_n = g_{sc}(C_a - C_i) \quad (8)$$

式中, g_{sc} 为叶片CO₂气孔导度(mol·m⁻²·s⁻¹); C_a 为大气CO₂浓度(μmol·mol⁻¹)。

蒸腾速率的计算采用Penman-Monteith方程(式9)。模型计算蒸腾有两种方法:一种是将Penman-Monteith方程应用到目标树木的每个网格来计算树木蒸腾(Penman网格法);第二种是将Penman-Monteith方程应用到整个冠层尺度,并用整个样地的冠层平均空气动力学导度来计算树木蒸腾(Penman法)。

$$E_L = \frac{sR_n + Dg_B C_p M_a}{\lambda(s + \gamma g_B / g_v)} \quad (9)$$

式中, λ 为水汽化潜热(J·mol⁻¹); S 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率(Pa·K⁻¹); D 为饱和水汽压差(Pa); C_p 为空气定压比热(J·kg⁻¹·K⁻¹); M_a 为空气摩尔质量(kg·mol⁻¹); R_n 为净辐射(W·m⁻²); γ 为湿度计常数(Pa·K⁻¹); g_B 为总边界层导度(mol·m⁻²·s⁻¹); g_v 为水汽总导度(mol·m⁻²·s⁻¹)。

模型输入参数主要为环境因子和冠层特征。本研究将苹果树树冠垂直划分为6层,每层均匀分布12个网格点;气象参数模块的时间步长设置为半小时;冠层结构模块主要输入树高、冠幅与叶面积等,均采用实测值,并通过输入叶面积密度分布函数对叶片分布进行定量描述;植被生理模块根据实测的光合生化参数来描述植被光合及蒸腾能力;同时该模型亦可通过对地下部分土壤饱和和导水率及根系分布、根系生物量等进行参数化,利用输入或间接计算的方式确定树冠生理参数及土壤参数模块,从而对冠层辐射分布、干物质积累量、树木蒸腾及林地水分等进行模拟,输出相应的模拟结果。

1.4 模型参数确定

1.4.1 气象参数 光合有效辐射(PAR)(W·m⁻²)、大气温度(T)(°C)、降水(P)(mm)、大气相对湿度(RH)(%)、风速(W)(m·s⁻¹)等通过样地内的小型气象站自动监测,监测频率为半小时一次,气象数据如图(1)所示。

1.4.2 冠层结构参数 树高(plant height)(cm)、

冠幅(canopy diameter)(cm)、树冠长度(canopy length)(cm)、每棵树的总叶面积(total leaf area)(m²)。在试验期间每月测定一次。树高、冠幅、树冠长度用皮尺测量,冠幅是沿种植行和横行测量获得;冠层叶面积的测量通过对冠层进行分层,各层选取标准枝进行测量累加获得;在苹果生育期结束后,对整株叶面积通过破坏性采样,采用垂直分层采样,计算各层叶面积,进而获得冠层叶面积密度分布函数,用于模型输入;叶角分布与树体的异速生长参数采用模型的默认值。

1.4.3 植物生理参数 植被电子传递速率(μmol·m⁻²·s⁻¹)与光合有效辐射的关系通过德国Walz公司生产的PAM-2500便携式叶绿素荧光仪测得,初始斜率 α (-)和电子传递的光响应曲率 θ (-)通过拟合电子传递速率对光合有效辐射的曲线得到,采用非直角双曲线模型进行拟合。最大羧化速率与最大电子传递速率的关系采用WULLSCHLEGER等^[28]文章中的计算公式,最大电子传递速率随温度的变化关系参考NIU等^[29]文章中使用的参数。光合参数及气孔导度参数利用Li-6400XT便携式光合仪进行测量,在8月初选择晴朗无云的天气采用美国Li-COR公司生产的Li-6400XT便携式光合测定系统测定净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、暗呼吸速率以及其他主要生理指标和环境因子,测定在6:00—18:00进行,每2h测定一次。同时,利用美国PMS公司生产的压力室对黎明前、正午时分的叶片水势进行测量,整株水力导度利用公式 $K_{plant} = E / (\psi_{pd} - \psi_{md})$ 计算。其中, E 为正午时植被蒸腾速率, ψ_{pd} 和 ψ_{md} 分别为黎明前和正午时植被的叶水势。

本研究的气孔导度测定采用Medlyn最优气孔导度模型,基于Farquhar等的最优气孔表现,结合经验算法得到:

$$g_s = g_0 + \left(1 + \frac{g_1}{\sqrt{D}}\right) \times \frac{A}{C_a} \quad (10)$$

式中, g_0 为最小气孔导度参数(-), g_1 为气孔斜率参数(-), A 为净光合速率(μmol·m⁻²·s⁻¹), D 为叶表面饱和水汽压差(kPa), g_s 为气孔导度(mol·m⁻²·s⁻¹)。对每棵树冠层的上、中、下分别随机采集15片叶测量叶片宽度用于叶边界层导度的计算,各处理间的叶宽无显著差异。

1.5 模型模拟评价指标和数据分析方法

本研究采用归一化均方根误差(normalized root

mean square error, NRMSE)、纳什系数(Nash coefficient, NE)、一致性指数 d 来评价模型蒸腾耗水量模拟效果。

$$NRMSE = \frac{1}{O_m} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{si} - O_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$NE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{si} - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_m - O_i)^2} \quad (12)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (|P_{si} - P_m| + |O_i - O_m|)^2} \quad (13)$$

式中, P_{si} 和 O_i 为第 i 天蒸腾预测值和实测值; n 为观测天数; O_m 为观测值均值。

采用 Microsoft Excel 2013 对数据进行整理, 用 SPSS 16.0 软件对数据进行单因素方差分析, 多重比较采用 LSD 法, 采用 Origin 2016 软件作图。图表中的数据为平均值±标准差。

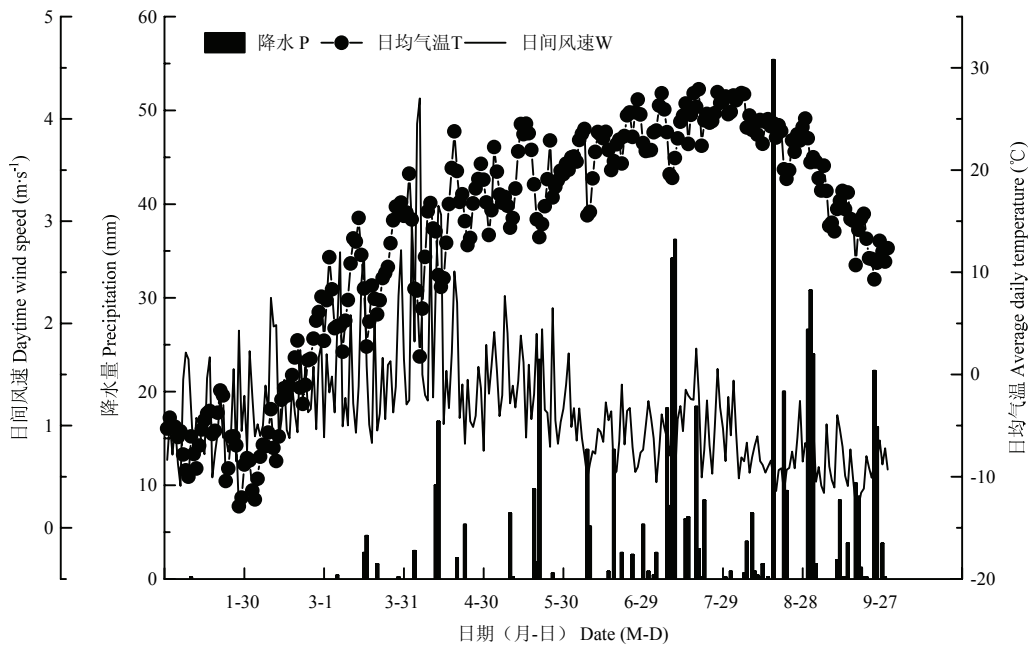


图 1 研究期间环境因子变化

Fig. 1 Variation of environmental factors during the study period

2 结果

2.1 不同修剪处理的树体冠层结构差异

6 月底各处理的叶幕已基本形成, 叶面积指数达到了较高的水平, 修剪显著改善了树体冠层结构 (图 2, 表 1), 修剪后, 叶面积指数随修剪强度增加迅速降低, 强度 III 修剪处理的枝量、叶面积指数, 冠幅直径平均分别较对照处理减少 28.2%、30.5%、9.5%。强度 II 和强度 III 修剪处理显著 ($P < 0.05$) 降低了果树总枝量, 但是不同修剪强度对果树枝类组成影响不显著。随着修剪强度的增加, 苹果产量逐渐降低, 强度 III 修剪处理的产量显著低于其余 3 个处理, 较对照降

低了 16%, 但强度 I 和强度 II 修剪处理与对照之间均无显著差异。修剪对叶片光合能力的驱动因子也有较大的影响, 修剪后由于树体光照条件等改善, 对植物光合能力有一定的改善, 而最大电子传递速率 (J_{max}) 与光合能力紧密相关, 强度 III 处理的 J_{max} 较对照提高了 13.5%, α 在各处理间差异较小, 平均为 0.272, 均无显著性差异。

2.2 不同修剪强度对苹果树蒸腾耗水的影响

2.2.1 典型天气条件下不同处理蒸腾日变化差异
选取果实膨大期 (7—8 月) 和着色成熟期 (9 月) 典型晴天和多云天气条件, 分析果实膨大期和着色成熟期树干液流的日变化 (图 3)。晴天条件下, 果实膨大

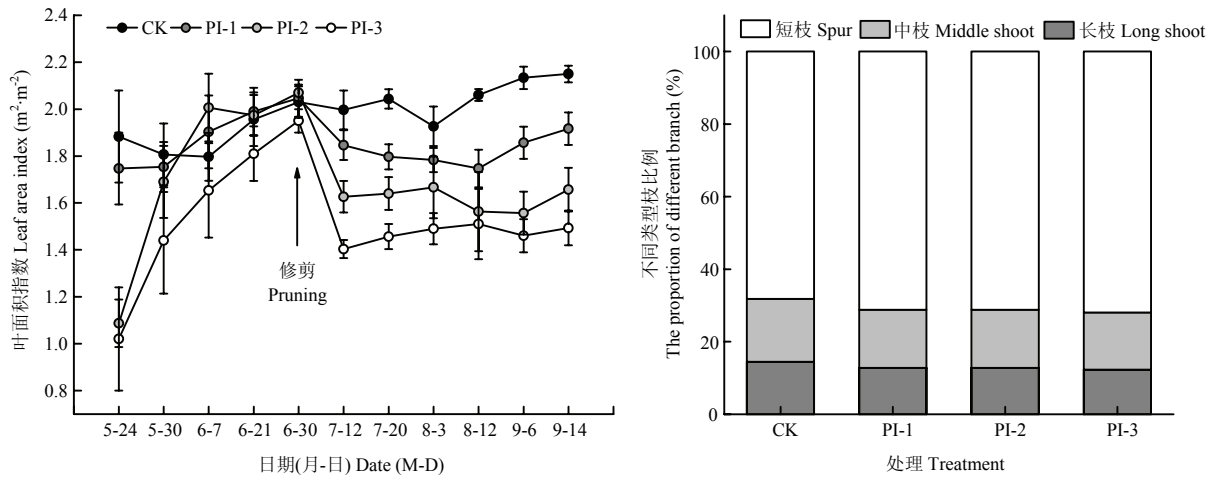


图 2 不同处理冠层结构差异

Fig. 2 Canopy structure difference under different pruning treatments

表 1 各修剪处理冠层结构、产量与快速光响应曲线参数差异

Table 1 Canopy structure and rapid light curves difference in different pruning treatments

处理	叶面积 Leaf area (m ²)	株高 Plant height (cm)	冠幅直径 Canopy diameter (cm)	总枝量 Total branches (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	产量 Yield (kg·tree ⁻¹)	最大电子传递速率 J _{max} (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	最大羧化速率 V _{max} (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	初始斜率 α (-)
CK	8.81±0.46a	310±24a	210±18a	100.02±6.01a	4.33±0.22a	163.40±11.06a	81.89±6.74a	0.27±0.03a
PI-1	7.93±0.36b	302±15a	205±33a	95.35±5.97a	4.44±0.26a	166.43±7.73a	83.74±4.71a	0.28±0.03a
PI-2	6.50±0.26c	320±14a	200±20a	83.35±3.35b	4.06±0.27ab	178.18±16.09a	90.90±9.81a	0.27±0.02a
PI-3	5.09±0.17d	300±21a	190±14a	71.85±4.67c	3.64±0.19b	185.43±7.56a	95.32±4.61a	0.27±0.03a

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments at $P < 0.05$ level

期和着色成熟期苹果树液流日变化主要呈现“单峰”曲线形式，具有明显的昼夜变化规律。果实膨大期液流启动时间在 7:30 左右，在 8:00 左右有明显上升趋势，随着修剪强度的增加，对液流的强度有较大的影响，表明修剪在某种程度上抑制了树体液流的流动；着色成熟期液流启动时间在 8:00 左右，与果实膨大期相比较晚，可能是着色成熟期接受日照较晚造成的。夜间茎干液流仍保持较低值，修剪强度越大，夜间液流较对照有所提升，表明修剪在一定程度上促进了夜间苹果液流的增加。多云天气下，苹果树的液流主要呈现“多峰”变化，波动较明显；苹果液流变化产生的波峰、波谷可能与当时天气状况有关，由于太阳辐射等气象因子波动较大，液流呈现出“多峰”的变化特征，受到云层的遮挡，使液流相对晴天较低。但着色成熟期晴天、多云天液流差距较小，可能是着色成熟期气温相对较低，叶片开始衰老，使液流整体下降。

2.2.2 不同处理苹果树蒸腾耗水差异 8 月份之后随着气温降低，各处理苹果树的蒸腾耗水量逐渐下降（图 4-A）。试验期内不同处理苹果树日均蒸腾耗水量有显著差异 ($P < 0.05$)，但各处理的变化趋势相似。修剪强度决定了各处理蒸腾的变化范围，随着修剪强度的加大，日蒸腾量的波动幅度减小。对照 (CK)、强度 I (PI-1)、强度 II (PI-2)、强度 III (PI-3) 修剪苹果树日均蒸腾量和变化范围 (mm·d⁻¹) 分别为 1 (0.061—1.609)、0.890 (0.039—1.781)、0.761 (0.038—1.421)、0.623 (0.039—1.570)，对照与强度 I 日均蒸腾耗水无显著差异，强度 II、强度 III 日均蒸腾耗水显著低于对照（图 4-E）。修剪初期（7 月 1—22 日），由于气温较高、降水较多，蒸散作用强烈，强度 I、强度 II、强度 III 蒸腾量较对照分别减少了 6.2%、21.8%、24.9%；而在 7 月中下旬（22 日）至 8 月中旬（16 日）经历了一段较干旱时期，期间

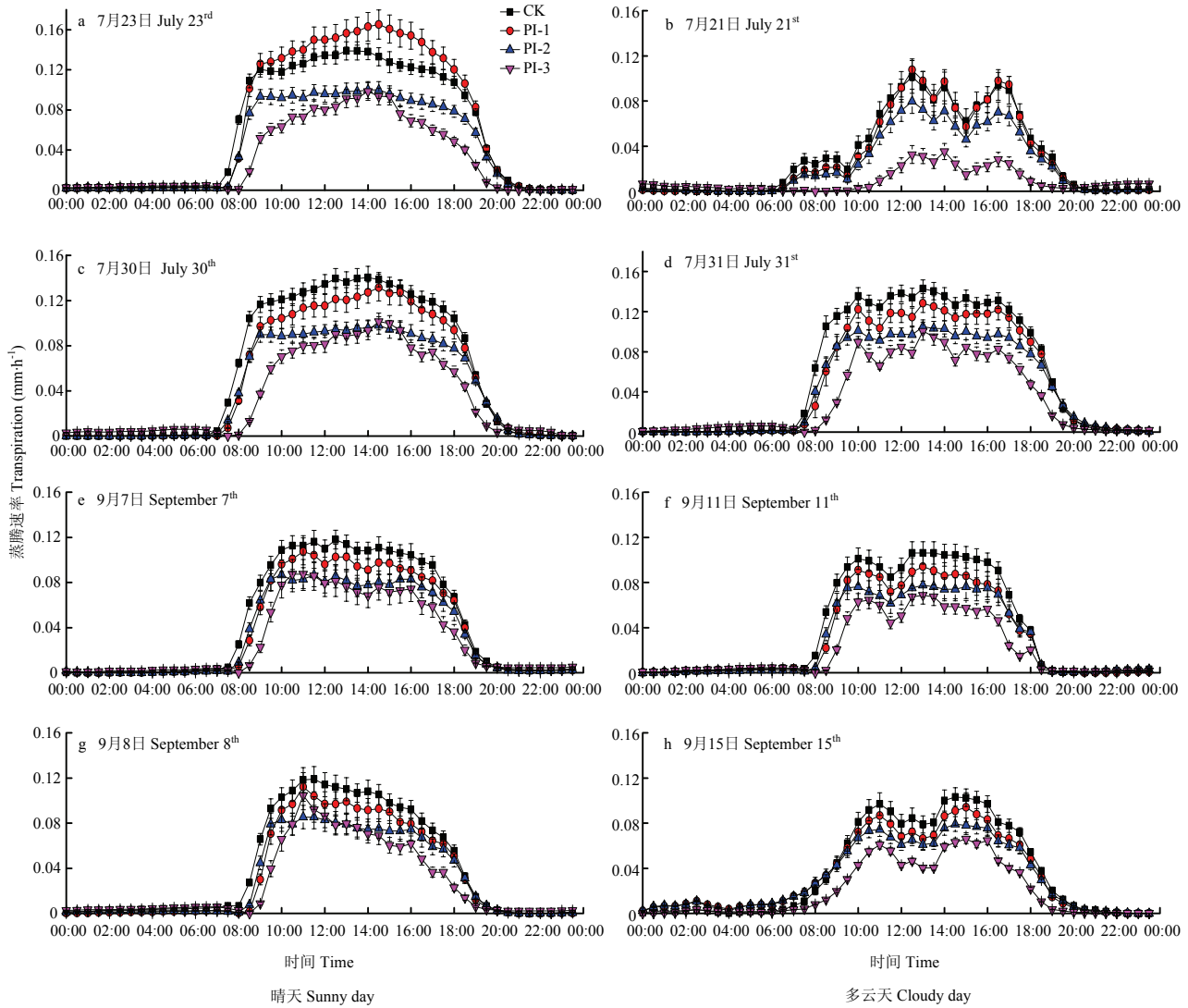


图 3 不同天气条件下各处理日蒸腾变化

Fig. 3 Daily variation of transpiration with different treatments under different weather conditions

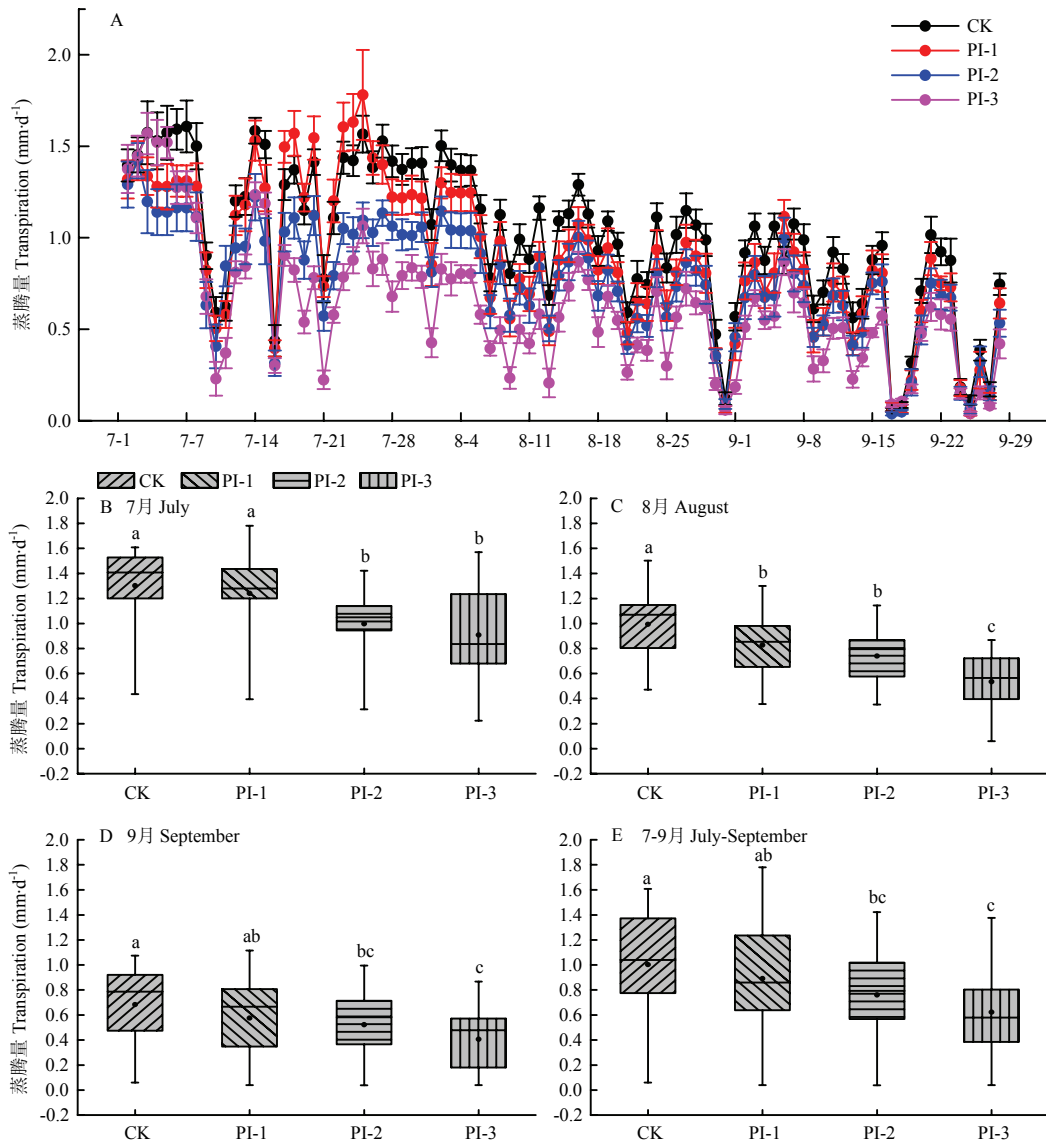
共降水 15.8 mm，由于苹果可利用水减少，各处理的蒸腾量逐渐下降，蒸腾量较对照分别减少了 10.2%、25.7%、45.5%，可见修剪在干旱时期对树木蒸腾的调控作用较显著。

在月尺度上（各月日蒸腾耗水量的算术平均值），蒸腾耗水在各月之间差异较大，各处理蒸腾耗水量呈现为 7 月 > 8 月 > 9 月，修剪强度越大，差异越显著。由于 7 月气温较高，蒸散强烈，对照与强度 I 之间日均蒸腾耗水无显著差异；8 月气温开始逐渐下降，降水减少，土壤水分亏缺严重，苹果蒸腾耗水下降，各处理与对照之间日均蒸腾耗水均存在显著差异；9 月随着气温的进一步下降以及叶片的衰老，蒸腾耗水进

一步降低，但强度 II、强度 III 日均蒸腾耗水仍显著低于对照处理。

2.3 苹果蒸腾耗水模拟与验证

2.3.1 蒸腾日内变化模拟 MAESPA 模型对苹果树晴天（2018 年 7 月 27 日）和阴天（8 月 21 日）日内蒸腾耗水变化模拟结果如图 5 所示。结果表明，晴天模拟的蒸腾速率峰值偏高，Penman 网格法所模拟的蒸腾峰值小于 Penman 法所模拟的峰值，但最大蒸腾速率的模拟值与实测值的时段相接近，蒸腾模拟值在正午时期有较明显波动，但实测值未出现这种波动现象；阴天由于有效光合辐射减弱，树木蒸腾速率下降，液流峰值较晴天提前，液流活动在 16:00 左右就基



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P < 0.05$ level

图 4 试验期内苹果树逐日、月蒸腾耗水量变化

Fig. 4 Changes in transpiration of apple tree at different time scales during the trial period

本停止,较晴天提前了约 2 h, MAESPA 模型也很好的捕捉到了这一趋势。

图 6 表明了模型预测蒸腾的能力与光合有效辐射和饱和水汽压差之间的关系(选取 8 月 3、4、6、7、8 和 13 日,9 月 1、9 和 10 日进行分析),在饱和水汽压差和光合有效辐射较低时,模型模拟值往往较实测值偏低,且模型在较低的饱和水汽压差和较低的光合有效辐射下表现出较高的敏感性,在饱和水汽压差和光合有效辐射较高时,模拟值较实测值高。

2.3.2 逐日蒸腾量变化模拟 MAESPA 模型对苹果逐日蒸腾有较好的模拟效果,两种蒸腾计算方法都能较好的反映苹果树蒸腾的变化趋势(图 7)。Penman 法对蒸腾的模拟效果较 Penman 网格法差,各处理的 NRMSE 在 0.206—0.293, NE 在 0.616—0.751, d 在 0.907—0.940;而 Penman 网格法各处理的 NRMSE 在 0.163—0.233, NE 在 0.751—0.830, d 在 0.930—0.960。在修剪初期,模型低估了修剪对蒸腾的影响,模拟值较实测值偏小,造成了较大误差,后期模型对蒸腾的

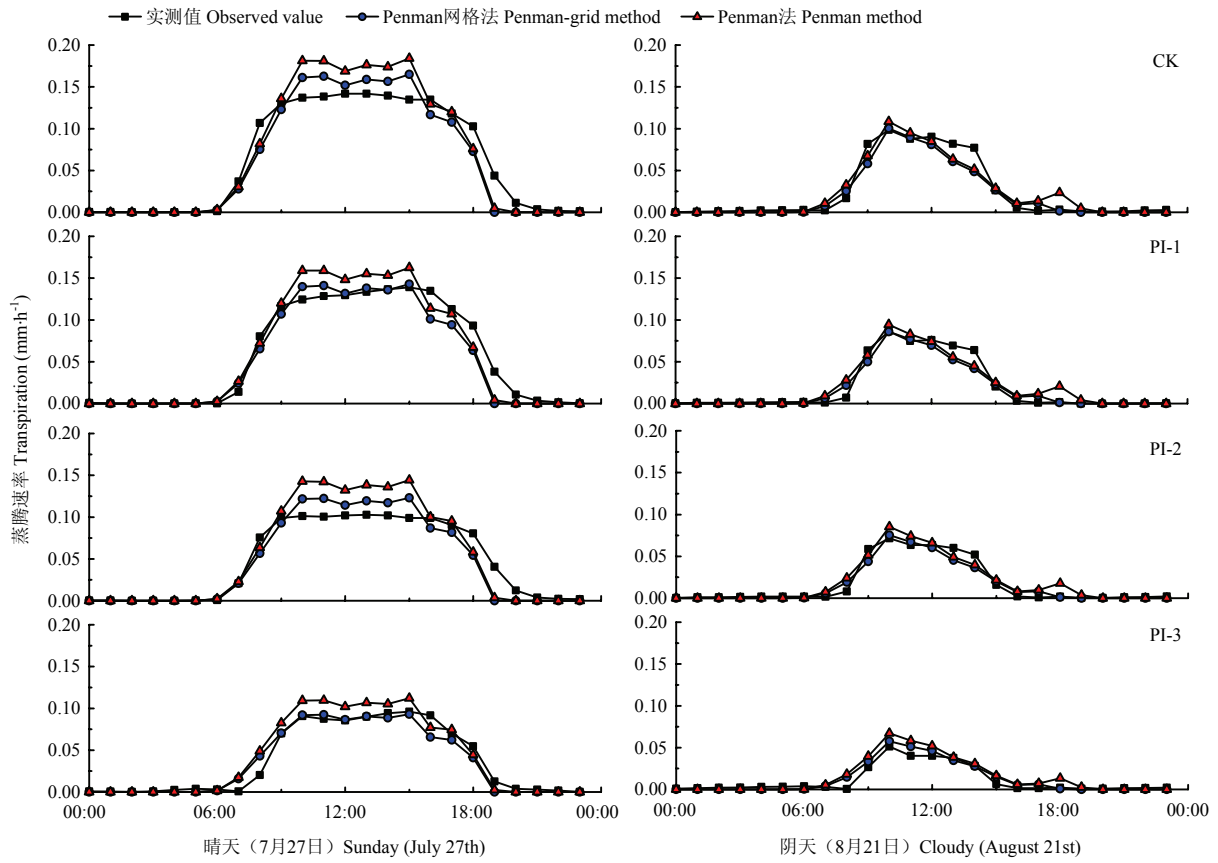


图 5 不同天气条件下模拟蒸腾与实测值的日变化

Fig. 5 A comparison between the observed and simulated diurnal variation in different weather condition

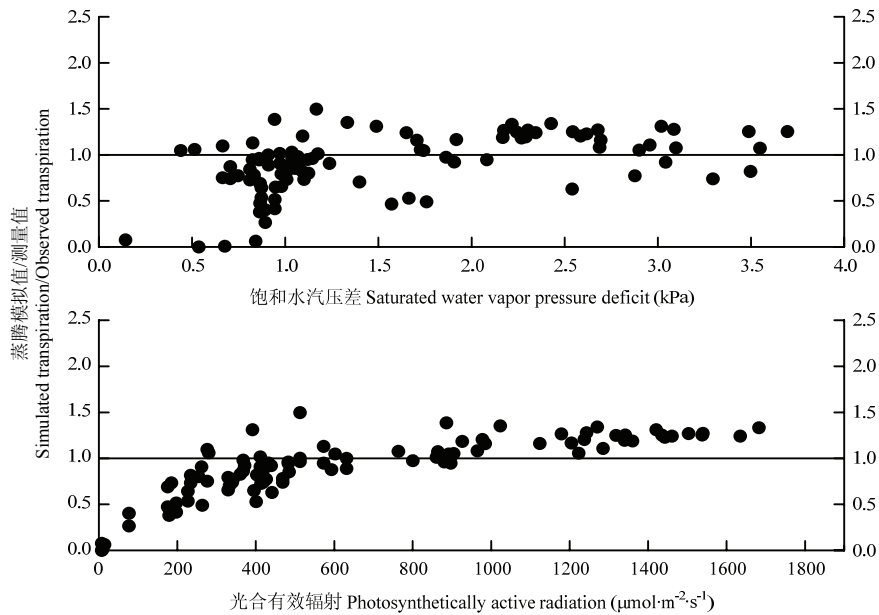


图 6 模型模拟蒸腾能力与气象因子之间的关系

Fig. 6 The relationship between simulated transpiration capacity and meteorological factors

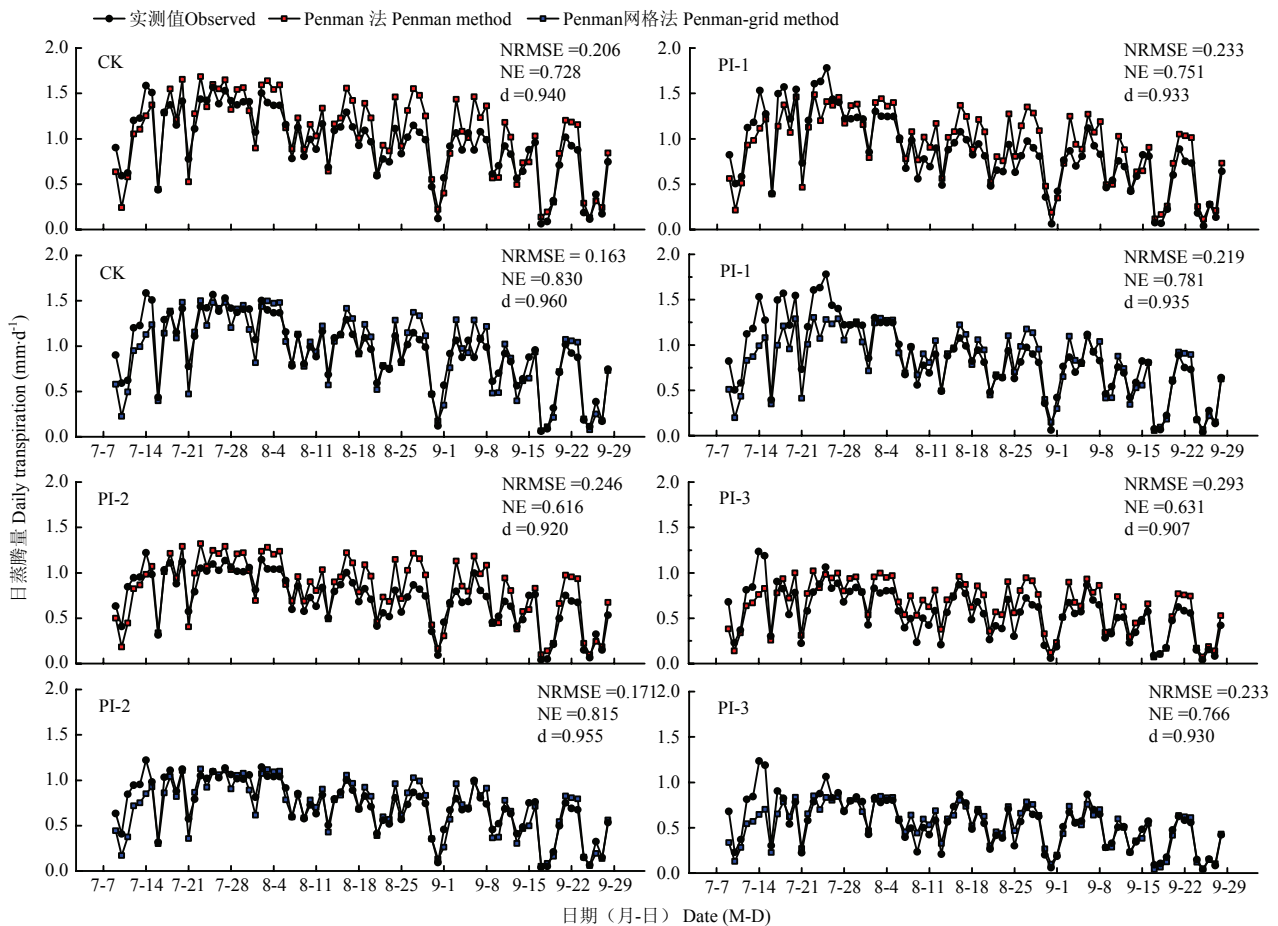


图 7 试验期不同处理蒸腾观测值与模型模拟值对比情况

Fig. 7 Observed and simulated apple tree transpiration under different pruning treatments

模拟误差减小，且随着修剪强度增大，模拟效果变好。总体来说，Penman 法所模拟的蒸腾较实测值偏大，对蒸腾的估计偏高，而用 Penman 网格法所模拟的蒸腾与实测值较为接近。

3 讨论

3.1 修剪对树木蒸腾的影响

树木蒸腾的影响因子大致分为两类，一类是外部环境因子（气象因子、水分等）^[30-31]，一类是树木本身因素（树种、树木生理变化等）^[32-33]。叶面积与蒸腾量之间存在一定的正相关关系^[34]，通过修剪，导致树木蒸腾作用的主要器官（叶片）的减少，进而减少蒸腾量。但同时，修剪造成树木通风环境及气孔导度的变化可能会促进剩余叶片的蒸腾作用，目前认为这可能是基于树木自身的一种补偿机制^[35]。但本研究中，修剪后的总蒸腾量并未体现明显的补偿，可能是

由于修剪改变了树木内在供水能力。有研究表明，在干旱缺水地区通过修剪这一生产力调控的手段在一定程度上可以使树木木质部导管直径变窄，树木导水能力下降，从而抑制树木的蒸腾作用^[36-37]。本研究较大强度的修剪导致了蒸腾耗水的显著减少，减少的叶面积是一主要原因，也可能是由于修剪致使树木木质部产生侵填体。侵填体的形成是植被对外界环境的一种响应，往往是由于受到病害或机械性损伤而引起的。赵现华^[38]在对葡萄液流速率的研究中发现修剪导致了木质部侵填体的产生，降低其水分输送的性能，阻碍了液流运输的过程，从而降低了蒸腾耗水。

白天的各处理蒸腾强度时长存在差异，修剪强度越大，液流强度比对照越弱，其可能是（1）因为修剪减少了主要蒸腾耗水的器官叶片；（2）修剪诱导产生的侵填体堵塞木质部导管，使得液流速率下降。通过液流观测发现，夜间苹果树木也存在微弱的液流速率，

而夜间植被并不进行蒸腾作用,这可能是由于白天强烈的蒸腾作用导致树体体内的水分亏缺,土壤水分通过根系根压主动吸收进入植物体内,补充白天过度消耗的水分,缓解蒸腾耗水造成的水分亏缺。根压的存在也有利于降低树体木质部栓塞的可能性,有研究表明在干旱条件下,白天树体木质部部分导管形成空穴化和栓塞,使树体保持适当的水分运输速度,避免植被过度失水^[39-40],夜间树体由于根压吸水从而修复了栓塞,根压在树体水生理调节方面起到了重要的作用^[41-42]。在夜间,强度 III 处理的液流较其他处理较大(图 3),其可能的原因是(1)由于修剪强度 III 处理在日间蒸腾作用相对较弱,形成的空穴化和栓塞相对较少,水分运输阻力较小;(2)强度 III 较其他处理土壤水分条件较好,根系接触到高土壤水势的机会更多,因此通过根压对树体内部水分补充的较多^[41]。

3.2 日内蒸腾变化模拟分析

苹果树日内蒸腾速率模拟值与实测液流值有较为相似的变化,但变化并不同步,存在一定的滞后。研究表明,树木的液流变化与光合有效辐射密切相关,树干液流往往滞后光合有效辐射 0—30 min^[43],而下午液流速率也滞后于模型模拟的蒸腾,其原因可能是下午有效光合辐射下降较快,而液流相对还未发生快速下降。有学者^[44]应用错位分析对液流速率与光合有效辐射进行分析,探讨液流与光合有效辐射的时滞效应,发现在生长季的不同时期,光合有效辐射的滞后效应存在差异。随着光合有效辐射强度的增加,蒸腾速率也明显增加,但蒸腾速率到达峰值的时间较光合有效辐射滞后 80 min,这与前人的研究相似^[45],由于模型蒸腾模拟与光合有效辐射联系密切,因此模型对液流启动的模拟较差。白天光合有效辐射在短期内可能有一定的波动(云层干扰等),而实际液流速率并未减少(图 5),可能是由于茎干液流中的水分缓冲了这一现象,储存在树体内部的水分可以防止因蒸腾速率变化过大导致木质部导管内水势变化,造成木质部空穴化,以保障水分传输的顺利^[46],由于模型中并未考虑到植物茎干中水分的这一缓冲作用,因此模拟的蒸腾有较为明显的波动。

3.3 逐日蒸腾量模拟差异

MAESPA 模型模拟的逐日蒸腾与实测值较为吻合,能较好地模拟各修剪处理下苹果的蒸腾,在较低的 PAR 和饱和水汽压差下,模型对树木蒸腾能力有低估的表现,且模拟的效果较差,这与前人得出的结论相似^[47]。但也有相关研究表明,在饱和水汽压差较低

或光合有效辐射较低时,液流观测数据误差较大,这也可能是造成模型与实测蒸腾有较大差异的原因。实测数据表明蒸腾与光合有效辐射(PAR)和饱和水汽压差(VPD)存在显著相关,而模型也体现了这一点。各处理前期模拟蒸腾速率较实测值偏小,模拟误差较大,也可能是由于该段时间内降水较多,日间饱和水汽压差较低,实测液流有较大的误差。前期模拟误差随修剪强度的增大而增大,其可能的原因是修剪改善了通风透光条件,使树体下层、内部的叶片接受到了较多的光照,在一定程度上能促进剩余叶片的蒸腾能力^[48],蒸腾作用在短期内得到增强,导致实测蒸腾较模拟值更高。

4 结 论

修剪造成白天液流强度下降,在一定程度上抑制了液流活动。MAESPA 模型能较好的模拟苹果树修剪调控后日蒸腾速率变化和日蒸腾量,表明可用于预测修剪对果树蒸腾耗水的长期影响,但在光合有效辐射和饱和水汽压差较低时,模型对蒸腾的模拟效果较差。随着修剪强度的增加,苹果蒸腾耗水量基本呈等比例下降趋势,研究期间强度 I、强度 II 和强度 III 修剪蒸腾量较对照分别降低了 11.1%、24.1%和 37.9%,但是强度 I 修剪处理产量反而增加了 2.7%,强度 II 和强度 III 修剪处理也仅分别降低了 6.2%和 16%。这表明,在没有严重水分亏缺时,研究区山地果园可采取去除 10%侧枝修剪强度;当发生严重水分亏缺时,去除 25%侧枝修剪强度能以较小的产量损失显著降低蒸腾耗水量,缓解水分供需矛盾,促进果园的绿色健康发展。

References

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Statistical Databases [DB/OL]. [2019-02-08]. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2017.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese)
- [3] PENG X X, GUO Z, ZHANG Y J, LI J. Simulation of long-term yield and soil water consumption in apple orchards on the Loess Plateau, China, in response to fertilization. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 5444.
- [4] 王绍飞, 赵西宁, 高晓东, 霍高鹏, 潘燕辉. 黄土丘陵区盛果期苹果树土壤水分利用策略. *林业科学*, 2018, 54(10): 31-38.

- WANG S F, ZHAO X N, GAO X D, HUO G P, PAN Y H. Water use source of apple trees with full productive age in Loess hilly region. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(10): 31-38. (in Chinese)
- [5] 王力, 李裕元, 李秧秧. 黄土高原生态环境的恶化及其对策. 自然资源学报, 2004, 19(2): 263-271.
- WANG L, LI Y Y, LI Y Y. The eco-environment deterioration and its counter-measures in the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(2): 263-271. (in Chinese)
- [6] SUN Q H, MIAO C Y, DUAN Q Y, WANG Y F. Temperature and precipitation changes over the Loess Plateau between 1961 and 2011, based on high-density gauge observations. *Global & Planetary Change*, 2015, 132(1): 1-10.
- [7] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁, 高晓东. 基于可变下渗容量模型和 Palmer 干旱指数的区域干旱化评价研究. 水利学报, 2012, 43(8): 926-934.
- ZHANG B Q, WU P T, ZHAO X N, GAO X D. Study on regional drought assessment based on variable infiltration capacity model and Palmer drought severity index. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(8): 926-934. (in Chinese)
- [8] 王石言, 王力, 韩雪, 张林森. 黄土塬区盛果期苹果园的蒸散特征. 林业科学, 2016, 52(1): 128-135.
- WANG S Y, WANG L, HAN X, ZHANG L S. Evapotranspiration characteristics of apple orchard at peak period of fruiting in Loess Tableland. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(1): 128-135. (in Chinese)
- [9] 焦瑞, 赵英, 司炳成, 兰志龙, 张建国. 黄土高原退耕还林措施对深层土壤含水率的影响. 干旱地区农业研究, 2017, 35(35): 135.
- JIAO R, ZHAO Y, SI B C, LAN Z L, ZHANG J G. Effects of conversion of cropland to forest measures on deep soil moisture in Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(35): 135. (in Chinese)
- [10] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.
- SHAO M A, JIA X X, WANG Y Q, ZHU Y J. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 14-22. (in Chinese)
- [11] 包睿, 邹养军, 马锋旺, 折小锋, 党志明, 贺武春. 种植年限及密度对渭北旱塬苹果园深层土壤干燥化的影响. 农业工程学报, 2016, 32(15): 143-149.
- BAO R, ZOU Y J, MA F W, SHE X F, DANG Z M, HE W C. Effects of planting year and density on deep soil desiccation of apple orchards in Weibei dryland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(15): 143-149. (in Chinese)
- [12] LORDAN J, FRANCESCOTTO P, DOMINGUEZ L I, ROBINSON T L. Long-term effects of tree density and tree shape on apple orchard performance, a 20 year study-Part 1, agronomic analysis. *Scientia Horticulturae*, 2018, 238: 303-317.
- [13] MA L H, WANG X, GAO Z Y, WANG Y K, NIE Z Y, LIU S Y. Canopy pruning as a strategy for saving water in a dry land jujube plantation in a Loess hilly region of China. *Agricultural Water Management*, 2019, 216: 436-443.
- [14] KUMAR M, RAWAT V, RAWAT J M S, TOMAR Y K. Effect of pruning intensity on peach yield and fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125(3): 218-221.
- [15] WILKIE J D, SEDGLEY M, OLESEN T. The timing of pruning affects flushing, flowering and yield of macadamia. *Crop & Pasture Science*, 2010, 61(7): 588-600.
- [16] 李明霞, 白岗栓, 闫亚丹, 耿桂俊, 杜社妮. 山地苹果树更新修剪对树体营养及生长的影响. 园艺学报, 2011, 38(1): 139-144.
- LI M X, BAI G S, YAN Y D, GENG G J, DU S N. Effects of renewal pruning on mountain apple tree's nutrition and growth. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(1): 139-144. (in Chinese)
- [17] 宋凯, 魏钦平, 岳玉苓, 王小伟, 张继祥. 不同修剪方式对'红富士'苹果密植园树冠光分布特征与产量品质的影响. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1224-1230.
- SONG K, WEI Q P, YUE Y L, WANG X W, ZHANG J X. Effects of different pruning modes on the light distribution characters and fruit yield and quality in densely planted 'Red Fuji' apple orchard. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1224-1230. (in Chinese)
- [18] 汪星, 高志永, 汪有科, 聂真义, 靳姗姗, 董建国. 修剪与覆盖对黄土丘陵区枣林土壤干层的修复效应. 林业科学, 2018, 54(07): 24-30.
- WANG X, GAO Z Y, WANG Y K, NIE Z Y, JIN S S, DONG J G. Effects of pruning and mulching on soil desiccation remediation in rain-fed Jujube plantation in the semi-arid Loess hilly gull region. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(07): 24-30. (in Chinese)
- [19] SUN X C, ONDA Y, OTSUKI K, KATO H, HIRATA A, GOMI T. The effect of strip thinning on tree transpiration in a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 197(6): 123-135.
- [20] WENG S H, KUO S R, GUAN B T, CHANG T Y, HSU H W, SHEN C W. Microclimatic responses to different thinning intensities in a Japanese cedar plantation of northern Taiwan. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241(1): 91-100.
- [21] 魏新光, 陈滇豫, Liu Shouyang, 汪星, 高志永, 汪有科. 修剪对黄土丘陵区枣树蒸腾的调控作用. 农业机械学报, 2014, 45(12): 194-202.

- WEI X G, CHEN D Y, LIU S Y, WANG X, GAO Z Y, WANG Y K. Effect of trim on jujube transpiration in Loess hilly region. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12): 194-202. (in Chinese)
- [22] 张文飞, 汪星, 汪有科, 张敬晓, 惠倩. 黄土丘陵区深层干化土壤中节水型修剪枣树生长及耗水. *农业工程学报*, 2017, 33(7): 140-148.
- ZHANG W F, WANG X, WANG K Y, ZHANG J X, HUI Q. Growth and water consumption of jujube with water-saving pruning in deep dried soil of Loess hilly area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(7): 140-148. (in Chinese)
- [23] FORRESTER D I, COLLOPY J J, BEADLE C L, WARREN C R, BAKER T G. Effect of thinning, pruning and nitrogen fertiliser application on transpiration, photosynthesis and water-use efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation. *Forest Ecology and Management*, 2012, 266: 286-300.
- [24] ALCORN P J, FORRESTER D I, THOMAS D S, JAMES R, SMITH R G B, NICOTRA A B, BAUHUS J. Changes in whole-tree water use following live-crown pruning in young plantation-grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana*. *Forests*, 2013, 4(1): 106-121.
- [25] CHRISTINA M, NOUVELLON Y, LACLAU J P, STAPE J L, BOUILLET J P, LAMBAIS G R, MAIRE G L. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. *Functional Ecology*, 2017, 31: 509-519.
- [26] VEZY R, CHRISTINA M, ROUPSARD O, NOUVELLON Y, DUURSMA R, MEDLYN B, SOMA M, CHARBONNIER F, BLITZ-FRAYRET C, STAPE J L, LACLAU J P, FILHO E, BONNEFOND J M, RAPIDEL B, DO F C, ROCHETEAU A, PICART D, BORGONOVO C, LOUSTAU D, MAIRE G L. Measuring and modelling energy partitioning in canopies of varying complexity using MAESPA model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 253: 203-217.
- [27] CHRISTINA M, MAIRE G L, BATTIE-LACLAU P, NOUVELLON Y, BOUILLET J P, JOURDAN C, GONCALVES J, LACLAU J P. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. *Global Change Biology*, 2015, 21(5): 2022-2039.
- [28] WULLSCHLEGER S D. Biochemical limitations to carbon assimilation in C3 plants-A retrospective analysis of the A/Ci curves from 109 species. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44(262): 907-920.
- [29] NIU Z M, XIE P, YU L, LI Z Q, WANG H N, HAN P P. Impact of tree-thinning on foliar chlorophyll fluorescence parameters of open-central apple trees. *Bangladesh Journal of Botany*, 2015, 44(5): 889-896.
- [30] 杜斌, 胡笑涛, 王文娥, 马黎华, 周始威. 交替沟灌玉米灌浆期茎流影响因子敏感性分析与模型适用性研究. *中国农业科学*, 2018, 51(2): 233-245.
- DU B, HU X T, WANG W E, MA L H, ZHOU S W. Stem flow influencing factors sensitivity analysis and stem flow model applicability in filling stage of alternate furrow irrigated maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(2): 233-245. (in Chinese)
- [31] 张钧恒, 马乐乐, 李建明. 全有机营养肥水耦合对番茄品质、产量及水分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2018, 51(14): 2788-2798.
- ZHANG J H, MA L L, LI J M. Effects of all-organic nutrient solution and water coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2788-2798. (in Chinese)
- [32] 贾国栋, 陈立欣, 李瀚之, 刘自强, 余新晓. 北方土石山区典型树种耗水特征及环境影响因子. *生态学报*, 2018, 38(10): 3441-3452.
- JIA G D, CHEN L X, LI H Z, LIU Z Q, YU X X. The effect of environmental factors on plant water consumption characteristics in a northern rocky mountainous area. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3441-3452. (in Chinese)
- [33] 张慧玲, 丁亚丽, 陈洪松, 王克林, 聂云鹏. 喀斯特出露基岩生境两种典型乔木的树干液流特征. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2431-2437.
- ZHANG H L, DING Y L, CHEN H S, WANG K L, NIE Y P. Characteristics of sap flow of two typical trees in exposed bedrock habitat of Karst region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2431-2437. (in Chinese)
- [34] GYENGE J E, FERNANDEZ M E, SCHLICHTER T M. Effect of pruning on branch production and water relations in widely spaced ponderosa pines. *Agroforestry Systems*, 2009, 77(3): 223-235.
- [35] QUENTIN A G, O GRADY A P, BEADLE C L, WORLEDGE D, PINKARD E A. Responses of transpiration and canopy conductance to partial defoliation of *Eucalyptus globulus* trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(3): 356-364.
- [36] NAMIREMBE S, BROOK R M, ONG C K. Manipulating phenology and water relations in *Senna spectabilis* in a water limited environment in Kenya. *Agroforestry Systems*, 2009, 75(3): 197-210.
- [37] CHEN D Y, WANG Y K, WANG X, NIE Z Y, GAO Z Y, ZHANG L L. Effects of branch removal on water use of rain-fed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in Chinese semiarid Loess Plateau region. *Agricultural Water Management*, 2016, 178: 258-270.
- [38] 赵现华. 修剪对葡萄液流和光合同化物运输分配特性的扰动[D].

- 西北农林科技大学, 2013.
- ZHAO X H. Pruning effects on sap flow and transportation assignment of photosynthates in grapevine [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- [39] DOMEK J C, GARTNER B L. Cavitation and water storage capacity in bole xylem segments of mature and young Douglas-fir trees. *Trees*, 2001, 15(4): 204-214.
- [40] STRATTON L, GOLDSTEIN G, MEINZER F C. Stem water storage capacity and efficiency of water transport: their functional significance in a Hawaiian dry forest. *Plant Cell & Environment*, 2000, 23(1): 99-106.
- [41] 李卫民, 张佳宝. 植物木质部导管栓塞. *植物生理学报*, 2008, 44(3): 581-584.
- LI W M, ZHANG J B. Embolism in xylem vessel of plants. *Plant Physiology Journal*, 2008, 44(3): 581-584. (in Chinese)
- [42] 员玉良, 程强, Lutz Damerow, 孙宇瑞. 基于茎直径和茎流复合测量的植物根压无损观测方法. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 290-295.
- YUAN Y L, CHENG Q, LUTZ D, SUN Y R. Non-destructive observation of plant root pressure based on combined measurement of stem diameter and sap flow. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 290-295. (in Chinese)
- [43] FORD C R, GORANSON C E, MITCHELL R J, WILL R E, TESKEY R O. Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: Predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees. *Tree Physiology*, 2004, 24(9): 941-950.
- [44] 姚增旺, 褚建民, 吴利禄, 袁祺, 党宏忠, 张晓艳, 甘红豪, 姜生秀. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭树干液流的时滞特征. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2339-2346.
- YAO Z W, CHU J M, WU L L, YUAN Q, DANG H Z, ZHANG X Y, GAN H H, JIANG S X. Time lag characteristics of the stem sap flow of *Haloxylon ammodendron* in the Minqin oasis-desert ectone. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7): 2339-2346. (in Chinese)
- [45] 王华, 赵平, 蔡锡安, 马玲, 饶兴权, 曾小平. 马占相思树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺间的时滞效应. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 225-230.
- WANG H, ZHAO P, CAI X A, MA L, RAO X Q, ZENG X P. Time lag effect between stem sap flow and photosynthetically active radiation, vapor pressure deficit of *Acacia mangium*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 225-230. (in Chinese)
- [46] ZWEIFEL R, HÄSLER R. Dynamics of water storage in mature subalpine *Picea abies*: temporal and spatial patterns of change in stem radius. *Tree Physiology*, 2001, 21(9): 561.
- [47] MEDLYN B E, PEPPER D A, O'GRADY A P, KEITH H. Linking leaf and tree water use with an individual-tree model. *Tree Physiology*, 2007, 27(12): 1687-1699.
- [48] 元玉飞, 尹伟伦, 夏新莉, 孙尚伟. 修枝对欧美杨 107 杨水分生理的影响. *林业科学*, 2011, 47(3): 33-38.
- QI Y F, YIN W L, XIA X L, SUN S W. Effects of pruning on water physiology of poplar clone *Populus × euramericana* cv. '74/76'. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(3): 33-38. (in Chinese)

(责任编辑 赵伶俐)