

# 黄土高原苹果树各生育期需水特征研究

党宏忠<sup>1</sup>, 冯金超<sup>1</sup>, 王檬檬<sup>2</sup>, 陈 帅<sup>1</sup>, 却晓娥<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; <sup>2</sup>内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:**【目的】准确界定苹果树在各个生育期的需水量及需水特征的季节性变化是指导果园节水灌溉的重要依据。【方法】利用热扩散树干液流测定技术, 连续2年监测了旱作果园苹果树(盛果期)的树干液流速率, 计算了单株的耗水强度, 并与同步观测的叶面积指数、物候特征进行关联分析。【结果】2017、2018年苹果树年耗水量分别为295.5 mm、215.3 mm, 分别占同期降水量的88%和58%。在整个年生育周期中, 果实膨大期耗水量最多, 占果树整个生育期耗水总量的51%(2017年)和41%(2018年), 其次依次为果实成熟期、幼果形成期、花期、萌芽期、落叶期和休眠期, 不同生育期果树的耗水量与同期降水量具有相似的季节变化趋势。在萌芽期, 果树耗水强度快速上升, 到果实膨大期时最高可达 $2.17 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 之后逐渐下降, 在落叶期时耗水强度最高值为 $1.19 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 休眠期树液仍有流动, 此阶段的耗水量占年蒸腾总量的5%, 日蒸腾强度最高为 $0.53 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。冠层叶面积指数(LAI)的季节变化表现为从4月初展叶开始快速增加, 到5月上旬达到3.2, 日增速平均为0.07; 之后LAI基本维持不变, 日增速仅为前期的1%, 最高值为3.4。在11月中旬左右遇到大风天气后快速落叶, LAI在数天内降至零。【结论】苹果树在不同生育期的需水特征有明显的差异, 且与叶面积指数的季节变化并不完全同步, 需结合不同生育期的水分需求特征开展合理的灌溉、控水等管理措施。

**关键词:** 苹果; 热扩散技术; 液流速率; 耗水; 生育期; 叶面积指数(LAI)

中图分类号: S661.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2020)05-0659-09

## A study on water demand characteristics of apple trees in different growing stages in the Loess Plateau Area

DANG Hongzhong<sup>1</sup>, FENG Jinchao<sup>1</sup>, WANG Mengmeng<sup>2</sup>, CHEN Shuai<sup>1</sup>, QUE Xiao'e<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; <sup>2</sup>College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** 【Objective】Accurately determining the water demand and seasonal changes of water demand characteristics of apple trees in each growing stage is an important basis for guiding water-saving irrigation in orchards. 【Methods】In this study, the trunk sap flow rates ( $J_s$ ) of sample trees in dry orchard in full productive age was monitored for successive two years by means of thermal dissipation method, and the water consumption intensity of each tree was calculated. Correlation analyses were performed between the  $J_s$  and the leaf area index (LAI) and the phenological characteristics of apples trees. 【Results】The total water consumption of apple trees in 2017 and 2018 was 295.5 and 215.3 mm, respectively, accounting for 88% and 58% of the precipitation in the same period. Specifically, the water consumption of apple trees in fruit expansion stage was the greatest with the proportion of 51% in 2017 and 41% in 2018, of the total transpiration during the entire growing seasons each year. The water consumption in different stages decreased in the order of the fruit ripening stage, fruit formation stage, flowering stage, germination stage, defoliation stage, and the dormancy stage. The seasonal variation in water consumption of the trees was similar to that in precipitation. In the germination stage, the water

收稿日期: 2019-09-12 接受日期: 2020-03-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501704)

作者简介: 党宏忠, 男, 副研究员, 从事树木水分生理研究。Tel: 010-62824086, E-mail: hzdang@caf.ac.cn

consumption intensity of the trees increased rapidly and reached up to  $2.17 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  in the fruit expansion stage. After that, it gradually decreased, and the maximum water consumption intensity in the defoliation stage was  $1.19 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ . In the dormancy stage, the sap flow in apple trees ran at lower level. The water consumption in this stage accounted for 5% of the total annual transpiration. The maximum daily transpiration intensity was  $0.53 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ . The seasonal variation of LAI in apple orchard showed a rapid increase from the early April to the mid May with an average rate of 0.07 (dimensionless) per day and reaching 3.2. After that, however, LAI increased slowly with the rate accounted for only 1% of that in the previous period and up to 3.4 before defoliation. In the mid November, the leaves began to fall rapidly and the LAI dropped nearly to zero within few days in the windy weather.【Conclusion】The water demand of apple trees in different growing stages showed great differences, which was not synchronized with the changes of LAI. It is necessary to carry out precise irrigation based on both water demand and soil moisture in each growing period.

**Key words:** Apple; Thermal dissipation method; Sap flow rate; Water consumption; Growing stage; Leaf area index (LAI)

蒸腾是植物的重要生理过程之一,也是植物水分传输、散失的主要方式。蒸腾作用是物理与生理过程的耦合,一方面受控于土壤中可利用的水分、大气所提供的能量以及植物叶片内外间的水势梯度与阻力<sup>[1]</sup>,另一方面受植物生物学结构和气孔的调节控制<sup>[2]</sup>。树木边材液流(sap flow)是反映树木蒸腾过程、诊断树木水分状况、估算单株蒸腾量的有力工具<sup>[3-5]</sup>。通过对树干边材液流速率的监测来估算单株或林分蒸腾量的方法<sup>[6-7]</sup>,已被成功运用到苹果等经济林树种的蒸腾需水量的测定中来<sup>[8-11]</sup>。

水分短缺是制约北方经济林发展的主要因素之一。苹果树产量高、生物量大,需水量远高于农作物,其规模化种植必然改变栽培地原有的水量平衡,尤其是随着果树树龄的增加,土壤水分逐年消耗,果园的水分亏缺问题在很多地区越来越突出。调查表明,苹果的产量和品质(果径大小、维生素C含量、可溶性氮含量、糖酸比等)受年降水量的影响<sup>[12]</sup>,干旱能显著降低产量和果实品质。但水分过多也会使果实品质下降<sup>[12]</sup>。在某些生长阶段,维持适度的水分胁迫不仅能提高光合产物向果实和籽粒转化,还能抑制地上部分过度的营养生长,促进根系的生长,从而提高产量与品质<sup>[13]</sup>。

研究表明,生长期处于盛果期的苹果树其2.0 m土层内的根系占总根量的90%以上,仅1.0 m范围内的根系就占根系总量的68%,尤以60 cm土层处根系密度最大,但最大根系深度可达5.2 m<sup>[14]</sup>,这表明苹果树根系吸水范围的可塑性较强。随着

树龄的增加,苹果树利用水分的来源逐渐变浅,用水策略会趋于更保守<sup>[15]</sup>。苹果树对水分的需求与其物候发展过程密切相关,这是由果树枝叶、果实自身的生长节律所决定的。通过科学的水分管控来平衡果树营养生长与生殖生长间的比例关系是提高果实产量及维持产量稳定性的重要手段。如在幼果期,枝叶快速增长且需水量快速增加,此时提高土壤供水可有效避免因春梢争夺幼果中的水分而导致落果的发生。在果实膨大期,果树需水量很高,此期的土壤水分供应优劣直接影响果实大小与产量。果树在休眠期也要保持一定的需水量以防止冬春“抽条”的发生。而在果实成熟期的后期需要适当的干旱,避免因水分过多引起裂果、落果,抑制新梢二次生长,使果树做好越冬准备<sup>[12]</sup>。可见,“按需(果树)定水(土壤)”是加强果园水分过程管理的重要依据。

我国黄土高原是世界公认的最大苹果优生区,也是全国唯一符合苹果生长要求7项气候指标的优生区<sup>[16]</sup>。然而,黄土高原地区干旱少雨,属于典型极度脆弱生态环境区。近些年来,苹果种植面积的盲目扩大带来了许多生态问题和产业发展问题,必须进一步提高果园管理的精细化、科学化水平,才能缓解水分的制约并推动苹果产业进一步的提质增效。黄土高原苹果园大多数为山地旱作果园,水分供需不平衡是黄土高原山地苹果产业发展的重要制约因素<sup>[17]</sup>,并可能演化、形成土壤深层干化等严重问题<sup>[17-18]</sup>,阻碍果树产业的可持续发展。因此,明

确黄土区苹果树在不同生育期的需水特征及其变化规律对于提高果园精细化管理水平、制定合理的水分动态管理方案、维护果园产量的稳定性具有重要现实意义<sup>[19]</sup>。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

研究区位于山西省临汾市吉县,地貌类型为黄土残塬沟壑区。该地区年均气温 10.2 °C, 年均日较差 11.5 °C, 年均降水 522.8 mm, 大于 10 °C 的有效积温 3 361.5 °C, 无霜期年平均 172 d, 多年平均日照时数 2 538 h, 属暖温带大陆性季风气候<sup>[20]</sup>。试验地具体选择在吉县东城乡上社堤村(N:36°04.739', E:110°35.655'), 海拔 910 m, 所选样地为 2000 年建植的苹果园(品种为红富士, 砧木为海棠, 树形为自由纺锤形), 果园面积为 1.67 ha, 栽植密度为 4 m×6 m。果园土壤机械组成以黏粒和粉粒为主, 分别占 42.6%和 41.6%, 1 m 内土层平均容重为 1.34 g·cm<sup>-3</sup>, 土壤有机质含量平均为 0.85%。果园布设有防雹网, 经营管理措施完备, 果树处于经济成熟期, 平均年产量约 20 t·hm<sup>-2</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 气象要素监测 在试验林内架设可监测多要素的小型气象站(气象要素及传感器型号:AV-10TH 空气温湿度传感器, AV-30WS 风速传感器, AV-30WD 风向传感器, AV-410BP 大汽压力传感器, AV-3665R 雨量传感器, NR-LITE2 太阳净辐射传感器;HFP-01 土壤热通量传感器), 其中 AV 系列传感器来自于美国 AVALON 公司, NR 系列来自于荷兰 Kipp & Zonen 公司, HFP 系列来自于荷兰 Huk Sef-flux 公司。数采器为 SQ2020(Grant, UK)。HFP-01 安装在距地表 2 cm 的土层, 其他探头均通过主杆与支架安装在果树冠层上面(离地面约 3 m 处)。采集、记录间隔时间分别为 10、30 min。

1.2.2 土壤水分监测 在果园内选择 3 处位置(分别为株间、行的两侧带间)监测土壤水分状况。每处位置均在距表层 50、100 cm 处各安装 1 套 ECH<sub>2</sub>O 土壤水分传感器(Decagon, USA)。所有传感器均连接于 Em50 数据采集器(Decagon, USA), 采集间隔为 30 min。平均后求得每小时 100 cm 土层内平均土壤体积含水率(SWC, %)

1.2.3 树干边材液流速率监测 在果园内选定 3 株

冠形完整、生长健康的果树为试验样株, 样株基本情况见表 1。采用 Granier 式热扩散传感器(TDP-3 cm, Plantsensor, AUS)测定果树树干边材的液流速率( $J_s$ , cm·h<sup>-1</sup>)。该传感器由上、下两根探针组成, 其中

表 1 样株基本情况

Table 1 Information of sample trees

样株 Samples	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	(南-北)×(东-西) South-North×East-West/m
Tree 1	20.2	2.4	4.2×4.0
Tree 2	21.5	2.5	4.4×4.2
Tree 3	20.1	2.4	4.1×4.0

上部探针为加热探针。每个样株分别在东、南、西、北 4 个方位(根据手持罗盘仪确定)各安装 1 套 TDP-3 cm 探针。总计 12 套探针均连接于 32 通道 SQ2040 数采器(Grant, UK)。数据采集间隔为 10 min, 记录间隔为 30 min。采用 100 W 多晶太阳能板接 12V-100 AH 铅酸蓄电池连续供电。TDP 安装过程及技术要点见文献<sup>[10,21-22]</sup>。 $J_s$ 的计算采用 Granier 公式<sup>[25]</sup>。

$$J_s = 119 \times 10^{-4} \left( \frac{\Delta T_0 - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \times 60 \quad (1)$$

式中,  $\Delta T$  为上下两探针间实际温差(°C),  $\Delta T_0$  为液流为零时上下两探针间的温差(最大值, °C), 该值采用两次回归法确定<sup>[23-24]</sup>。

对 4 个方位的  $J_s$  求平均值得到  $\bar{J}_s$ , 采用公式(2)计算单株的液流量( $T_s$ , cm<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>)。

$$T_s = \bar{J}_s \times A_s \quad (2)$$

式中,  $A_s$  (cm<sup>2</sup>) 为样树的边材面积, 该值通过边材面积与胸径(DBH, cm)间的关系式求得:

$$A_s = 0.61 \times \text{DBH}^{1.941} (R^2_{\text{adj}} = 0.95, n = 36) \quad (3)$$

3 株样株的  $T_s$  值求平均并除以由林分密度换算的单株占地面积(24 m<sup>2</sup>)作为果园苹果树蒸腾需水强度( $T$ , mm·h<sup>-1</sup> 或 mm·d<sup>-1</sup>)。

1.2.4 叶面积指数测定 叶面积指数(LAI)采用 WinSCANOPY2010a 冠层分析仪进行测定<sup>[25]</sup>。该方法利用半球形数码相机(尼康, Coolpix 910, 日本, f = 7-21 mm)180°鱼眼转换器(尼康, FC-E8, f = 8-24 mm)拍摄半球形照片, 采用程序 WinSCANOPY-TM 2010(Regent Instruments Inc., Canada)进行图像处理并计算出样地的平均 LAI 值。测定前先在果园内行间、株间分别选取 5 个点做固定标记, 作为每次测定时仪器支架架设的位置, 点与点之间相距 2 m, 使测定液流的样株包括在点连线的范围之

内。拍照高度 0.75 m。在 4 月初到 5 月上旬期间, 叶面积变化较大, 每天进行测定, 选择在上午 8:00 开始测定, 以避免云层和阳光直射的影响。之后, 每隔 1 周测定 1 次。11 月中旬有落叶开始时又回

复到每天测定 1 次, 直至全部落叶。

1.2.5 苹果树生育期的划分 为方便比较不同生育期果树的需水特征, 参照文献[26]及实地观测、调查, 对试验区苹果生育期进行时间划分(表 2)。

表 2 试验地区苹果生育期划分及对应时间

Table 2 Timetable of growing seasons for apple trees in experimental area

生育期 Growing period	休眠期 Dormancy stage	萌芽期 Germination stage	花期 Flower stage	幼果期 Fruit formation stage	果实膨大期 Fruit expansion stage	果实成熟(着色)期 Fruit ripening (coloring) stage	落叶期 Defoliation stage
主要月份 Months	12月—1月 December to February	3月 March	4月 April	5月 May	6月—8月 June to August	9月—10月 September to October	11月 November

1.2.6 数据分析方法 采用 Origin 2019 进行边材面积与胸径间关系的非线性拟合及叶面积指数(LAI)与自然天(DOY)间的分段拟合, 并绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 降水与土壤水分的季节动态

2017 年主要生长季期间(5—10 月)观测到的降水总量为 334.4 mm, 各月降水量分别为 38.4、45、108.3、73.1、10.8 和 58.4 mm, 其中最大一日降水为 27 mm·d<sup>-1</sup>

(2017-08-12)(图 1)。期间 1.0 m 内土壤平均体积含水率为 13.2%, 各月分别为 13.1%、14.5%、13.6%、13.4%、12.8%和 12%, 日最低值为 11.1%(2017-10-03)。

2018 年生长季期间(4—10 月)降水总量为 373.0 mm, 各月降水量分别为 28.8、58.6、32.8、121.2、66、59 和 3.2 mm, 其中最大一日降水为 27.4 mm·d<sup>-1</sup> (2018/8/2)(图 1)。期间 1.0 m 内土壤平均体积含水率为 13.4%, 各月分别为 13.1%、13.4%、13.6%、

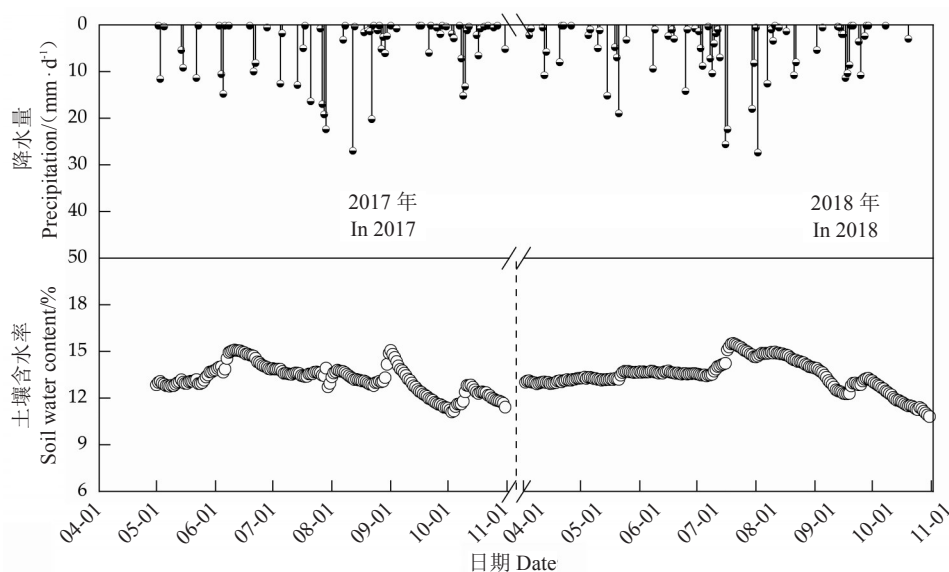


图 1 试验期间(2017—2018年)主要生长季每日降水量与土壤体积含水率的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of daily precipitation and daily average volumetric soil water content during the experimental period (2017—2018)

14.4%、14.6%、13% 和 11.9%, 日最低值为 10.8% (2018-10-31)。

### 2.2 果树蒸腾强度的季节变化过程

2017 年主要生长季期间(5—10 月), 观测到苹果树日蒸腾强度平均为 1.46 mm·d<sup>-1</sup>, 各月日蒸腾量分别为 1.58、1.76、1.68、1.45、1.39 和 0.69 mm·d<sup>-1</sup>, 6

月份的日平均蒸腾量最高, 其中最大日蒸腾量为 2.17 mm·d<sup>-1</sup>(2017-06-20)(图 2)。非生长季(11—12 月)的日蒸腾强度分别为 0.47、0.35 mm·d<sup>-1</sup>, 平均约 0.41 mm·d<sup>-1</sup>, 占生长季蒸腾强度的 28%。

2018 年生长季期间(4—10 月), 苹果树日蒸腾量平均 0.86 mm·d<sup>-1</sup>, 各月日蒸腾量分别为 0.66、0.9、

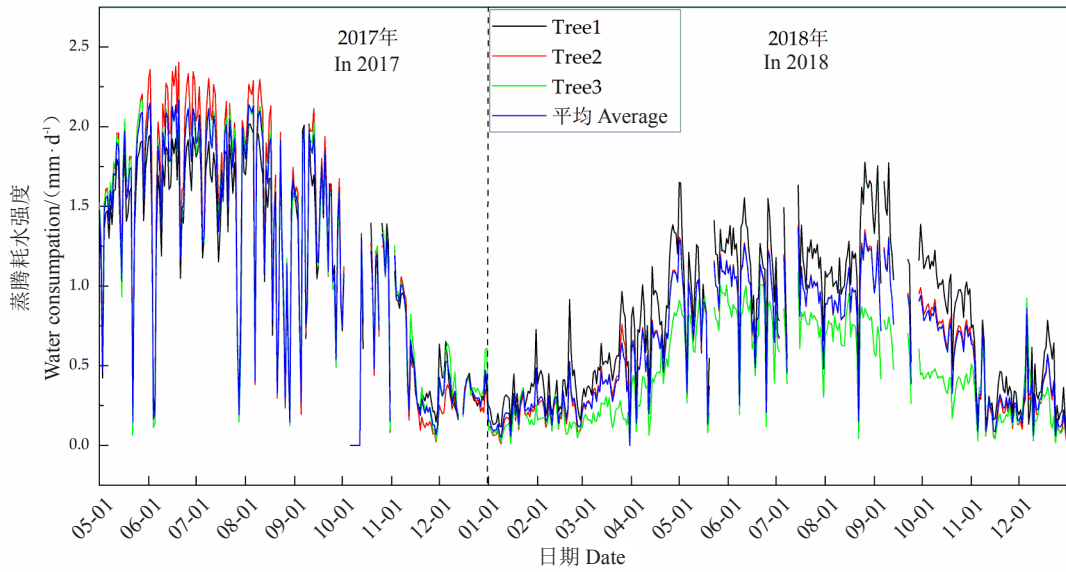


图2 试验期间(2017—2018年)苹果树蒸腾强度的季节变化过程

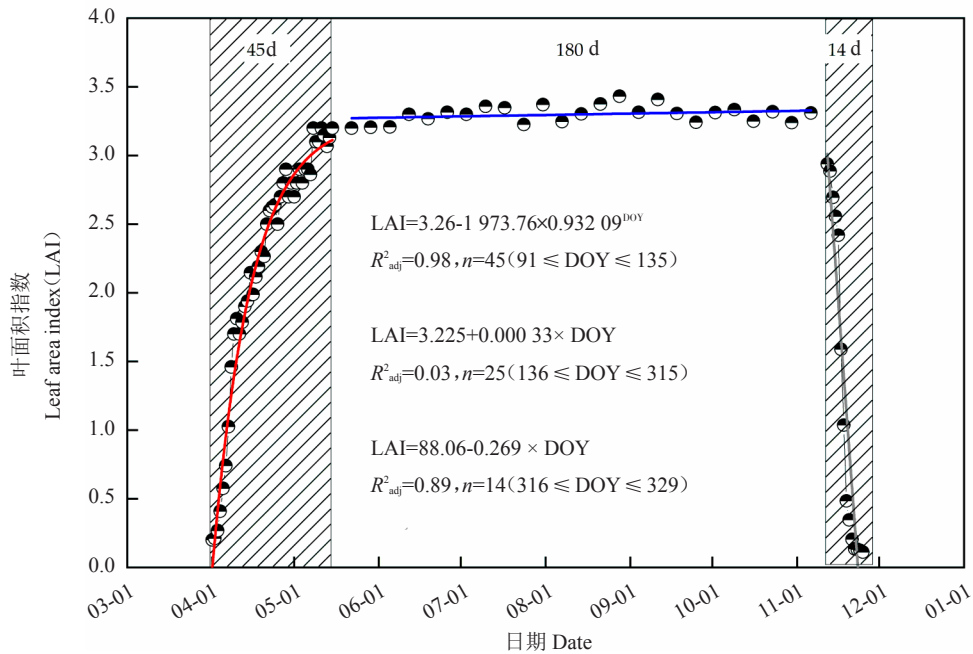
Fig. 2 Seasonal variation of transpiration intensity of apple trees during the experimental period (2017—2018)

0.95、0.92、0.97、0.97、0.72 mm·d<sup>-1</sup>, 9与10月份的日平均蒸腾量均比较高, 其中最大一日为 1.37 mm·d<sup>-1</sup> (2018-07-15)。非生长季(1—3月, 11—12月)日蒸腾量分别为 0.20、0.24、0.37、0.29、0.29 mm·d<sup>-1</sup>, 平均约为 0.28 mm·d<sup>-1</sup>, 占生长季日蒸腾强度的 32%。

### 2.3 果园叶面积指数的季节变化

对苹果树叶面积指数(LAI)值随季节的变化进

行统计(图3), 结果表明, 苹果树果园 LAI 在 4月初到 5月中旬近 45 d 的时段内快速增长, 达到 3.2 以上, 平均每天增长 0.07。随着叶片生长接近成熟, 在之后的近 180 d 内冠层叶面积指数不再有显著的增加, 每天增长的幅度只有前期的 1%, 直至到 11月中旬叶片经风刮落, LAI 呈近直线下降, 在近半月内趋于零。



采用分段函数进行拟合。阴影区域分别表示 LAI 快速上升期(红色拟合线)和快速下降期(灰色拟合线)。中间区域表示 LAI 稳定期(蓝色拟合线)。

The plot is fitted by piecewise functions. The shaded areas represent the fast rising period (red fitting line) and quick falling period (gray fitting line) of LAI. The area between shaded areas represents the stabilization period of LAI (blue fitting line).

图3 苹果树叶面积指数(LAI)的季节变化动态(2018)

Fig. 3 Seasonal dynamics of leaf area index (LAI) of apple trees in 2018

## 2.4 不同生育期蒸腾需水量特征

计算表明,2017年从幼果形成期到休眠期的蒸腾总量为295.5 mm,占同期降水量的88%,其中幼果形成期、果实膨大期、果实成熟期、落叶期和休眠期蒸腾量分别为49.0、150.0、66.5、14.2、15.9 mm,果实膨大期耗水量最大,占所测生育期总和的51%。休眠期果树仍然有水分传输,占总和的5%。各生育期果树的蒸腾量与同期的降水的季节变化趋势基本一致(图4-a)。

2018年从萌芽到休眠期的蒸腾总量为215.3 mm,

占同期降水量的58%,其中萌芽期、花期、幼果形成期、果实膨大期、果实成熟期、落叶期和休眠期蒸腾量分别为11.4、20.0、27.9、87.3、49.2、8.6、11.0 mm,全生育期中仍然是果实膨大期耗水量最大,占所测生育期总和的41%。休眠期果树水分传输占整个测定期间总和的5%,与2017年所测定的相同。萌芽期果树的水分传输量略高于休眠期。各生育期间果树的蒸腾量与同期的降水间具有相似的季节变化趋势(图4-b)。

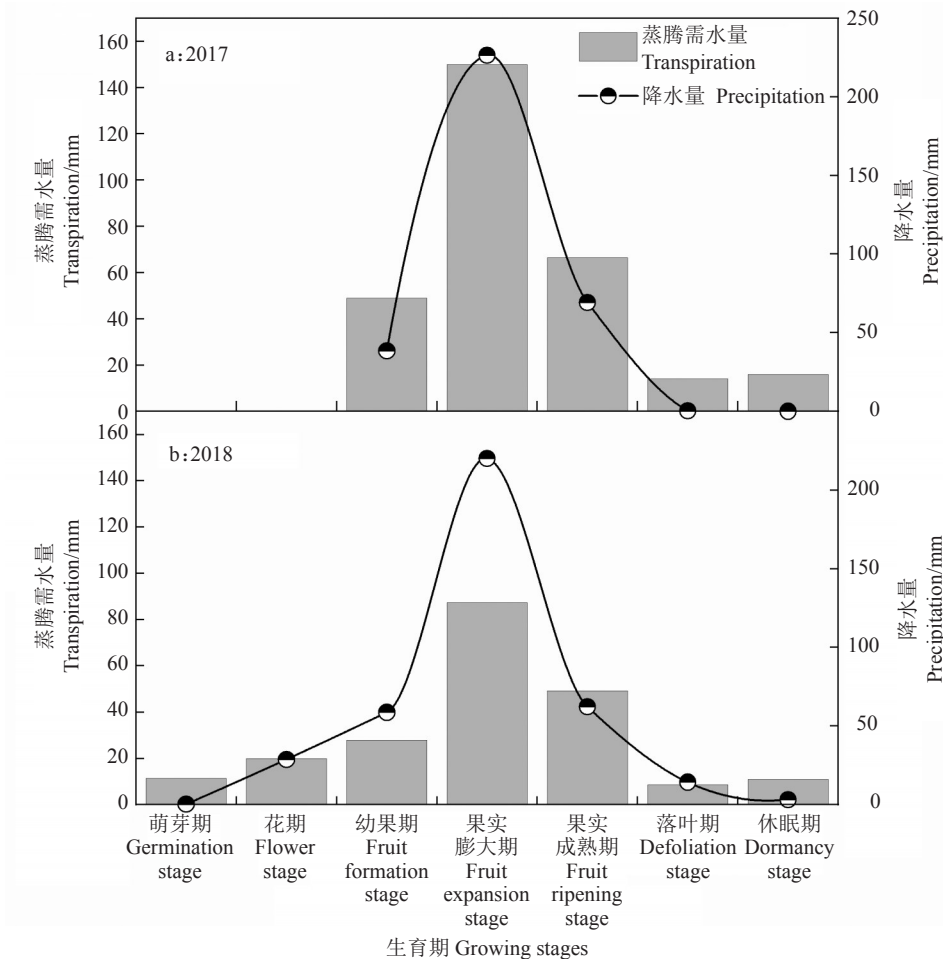


图4 不同年份苹果树各生育期的需水量特征及其与同期降水量的比较

Fig. 4 Comparison of water demand of apple trees and precipitation in different growing stages in two years

## 2.5 叶面积指数与日最大蒸腾强度随生育期变化的比较

统计表明,2017年苹果树在幼果形成期、果实膨大期、果实成熟期、落叶期和休眠期的日蒸腾量最高值分别为2.09、2.17、1.99、1.19、0.53  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,2018年在萌芽期、花期、幼果形成期、果实膨大期、果实成熟期、落叶期和休眠期的日蒸腾量最高值分别为0.64、1.09、1.29、1.37、1.30、0.71、0.43  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,果实膨大期果树蒸腾潜力最大,其次为幼果形成期

和果实成熟期,相应地,该3个时期果树的LAI也处于最高阶段。果树在萌芽期尽管LAI仍近似于零,但蒸腾潜力提升明显。进入落叶期时,尽管该时段平均LAI值仍较高(该时期包含了叶落前和叶落后),但蒸腾潜力下降的幅度更大(图5)。

## 3 讨论

### 3.1 苹果树的需水特征

蒸腾是果园系统蒸发散的重要组成部分,果树在不

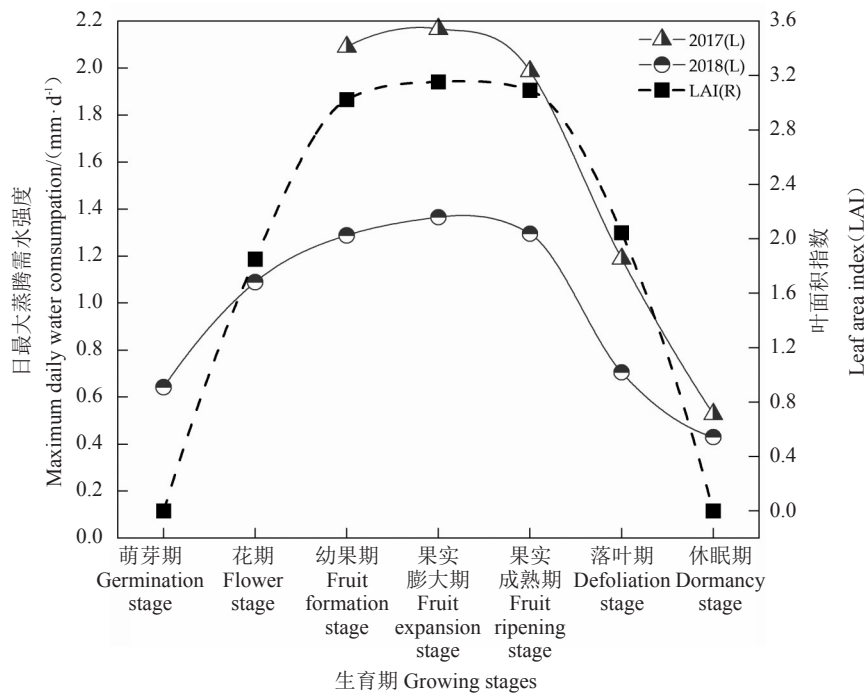


图5 苹果树不同生育期日最大耗水强度与叶面积指数的变化

Fig. 5 Changes of maximum water consumption intensity and leaf area index(LAI) at different growing stages of apple trees

同生育期蒸腾强度的差异反映了果树的活力及在各生育期对水分的需求强度。调查表明,黄土高原苹果树生长的盛果期可以从10龄持续到25龄左右<sup>[27]</sup>。本次历时两年对处于盛果期富士苹果园的观测表明,苹果树平均日蒸腾强度分别为 $1.46 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  (2017)和 $0.86 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  (2018),有较大的年际间差异。苹果日最高耗水强度可达 $2.17 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,与黄土高原其它地区的测定结果接近<sup>[28]</sup>,但低于降水更高地区苹果(品种未知)的 $3.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[29]</sup>和 $4.87 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[4]</sup>,这与果树个体生长状况、修剪及管理水平、气候、土壤等多种因素的差异有关。以往的研究一般通过对土壤水分的动态监测来推算果园的用水量(不仅仅是果树的蒸腾量),如通过对60 cm内土壤水分的监测推算出黄土高原苹果园的用水量可达 $475 \sim 583 \text{ mm}$ <sup>[30]</sup>,在有灌溉的情况下可达 $676 \text{ mm}$ <sup>[4]</sup>。而对于苹果树的蒸腾耗水量,一般认为在黄土高原占果园蒸发散量的58.9%<sup>[19]</sup>。如果按该比例去推算旱地果树的蒸腾量约为 $280 \sim 343 \text{ mm}$ ,这一范围略高于本研究中测得的 $215.3 \sim 295.5 \text{ mm}$ ,其原因主要包括2方面,一是本次测定期间均为干旱年份(年降水 $334 \sim 373 \text{ mm}$ ),降水显著低于多年平均水平( $576 \text{ mm}$ );二是苹果自身的含水量可达80%~90%,而2018年北方地区发生大范围严重的霜冻造成苹果大面积减产甚至绝收<sup>[31]</sup>,减产可能是2018年果树

需水量比2017年显著下降的主要原因。同时也表明苹果年产量的多寡对于需水量的高低也有较大的影响。

与大多数研究结果相类似,苹果树在不同生育阶段对水分的需求量有较大差异,一般在生育中期需求量最大,其次依次为快速发育期、初始生长期和成熟期<sup>[4]</sup>。苹果在果实膨大期的需水量最大<sup>[27]</sup>,这与其在该时期生育活动旺盛、果质量迅速增加、果径呈指数增长有关<sup>[4]</sup>。本次研究表明,果实膨大期苹果树需水量约占总需水量的41%~51%,这与在陕北地区测得的51%相接近,表明在黄土高原6—8月是苹果树需水的主要时期,此时期果实日平均增重在 $3 \text{ g}$ 以上<sup>[4]</sup>,此阶段土壤水分的供应状况直接影响着果实的生长速度,决定着果实的最终大小与产量。果实膨大期若水分不足或干旱持续时间过长,即使随后有充分的供水也不能弥补因前期缺水导致的果实生长减少的量。开花坐果期是苹果树的关键需水期,此时日需水量虽然仍处于较低水平(在本研究中占总需水量的9%),但此期的果树对于土壤水分状况最为敏感<sup>[27]</sup>,若土壤水分不足,将导致新梢生长受抑制,叶片生长与果实生长争夺水分,易引起大量落果。本次测定表明果树在冬季休眠期仍有树液流动,在休眠期(12—2月份)果树的需水量占年总需水量的5%,与在陕北地区同期测

得的6%相接近<sup>[14]</sup>。休眠期果树较高的水分传输有利于提高枝条的含水量,含水量越高,受冻害而被“抽干”的风险越低<sup>[32]</sup>。

### 3.2 液流速率与叶面积指数随季节变化关系的不一致性

研究表明,苹果树的叶幕(在苹果树冠内集中分布并形成一定形状和体积的叶群体)一般从展叶开始的33 d内就能形成较高的水平(叶面积占总叶面积的80%),在接下来的17 d内再增加占总叶面积的约10%,而在之后的72 d内只增加占叶面积的5%<sup>[33]</sup>。苹果树叶幕在年周期的变化中表现出先快后慢的规律。本此研究中LAI的季节变化规律与叶幕的变化基本一致。叶幕前期快速形成(LAI快速增加),中、后期维持时间长(LAI长时间保持在较高水平),有利于营养物质的积累。

研究认为,黄土区苹果园的叶面积指数(LAI)以2.5~3.5为宜<sup>[33]</sup>,本研究中最高为3.4,符合这一范围。LAI过高则叶片相互遮荫,降低功能叶比例和果实品质;LAI过低则光合产物合成减少,产量降低。黄土区苹果树LAI(约每周测定1次)的季节变化一般经历快速增长期与稳定期2个时期<sup>[34]</sup>,大约在5月中旬进入稳定期,这与本研究结果基本吻合并在本研究中得到了进一步的分段拟合。本研究发现果树的叶面积指数的各生育期变化尽管表现出与日蒸腾强度最大值较一致的时间变化趋势,但并不完全耦合。因此,过去认为果树作物系数与LAI间呈线性关系并依据这一关系用普通气象资料推算果园蒸发散的方法<sup>[35]</sup>,需要分不同生育期做进一步细化<sup>[14]</sup>,才可取得更靠的结果。

## 4 结 论

苹果树在不同生育期的需水特征是指导果园科学开展水分管理的重要依据。晋西黄土区苹果树在整个年生育周期中,以果实膨大期的需水量最大,其次依次为果实成熟期、幼果形成期、花期、萌芽期、落叶期和休眠期。果实膨大期耗水量占整个生育期耗水量的41%~51%,试验期间日最大蒸腾强度为 $2.17 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。休眠期蒸腾量占年蒸腾总量的5%,对保证安全过冬起到重要作用。苹果园冠层叶面积指数(LAI)从4月初展叶到5月上旬快速上升到约3.2,之后至10月末的较长时间内增加非常缓慢,最高达3.4,11月中旬后快速降至零。果树的日

最大蒸腾需水强度与LAI的季节变化过程并不完全一致,反映出果树的果实膨大与叶片蒸腾对水分需求的不同特征。苹果树的水分管理应以不同生育期的需水特征为依据,针对土壤水分状况制定动态的水分管理方案。

### 参考文献 References:

- [1] GRANIER A, HUC R, BARIGAH S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(1/2):19-29.
- [2] AROCA R. Plant responses to drought stress: from morphological to molecular features[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [3] BØRJA I, SVĚTLÍK J, NADEZHDIRIN V, ČERMÁK J, ROSNER S, NADEZHDIRINA N. Sap flux - a real time assessment of health status in Norway spruce[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2016, 31(5):450-457.
- [4] NADEZHDIRINA N, ČERMÁK J, DOWNEY A, NADEZHDIRIN V, PERĀMĀKI M, DAVID J S, PINTO C A, DAVID T S. Sap flow index as an indicator of water storage use[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2015, 63(2):124-133.
- [5] HERBST M, ROBERTS J M, ROSIER P T W, TAYLOR M E, GOWING D J. Edge effects and forest water use: a field study in a mixed deciduous woodland[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 250(3):176-186.
- [6] HATTON T J, MOORE S J, REECE P H. Estimating stand transpiration in a *Eucalyptus populnea* woodland with the heat pulse method: measurement errors and sampling strategies[J]. *Tree Physiology*, 1995, 15(4):219-227.
- [7] VERTESSY R A, HATTON T J, REECE P, OSULLIVAN S K, BENYON R G. Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique[J]. *Tree Physiology*, 1997, 17(12):747-756.
- [8] 丁日升, 康绍忠, 龚道枝. 苹果树液流变化规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(2):21-25.
- [9] DING Risheng, KANG Shaozhong, GONG Daozhi. Responses of apple trees sap flow to temporal change in weather condition and soil water content by heat-pulse technique[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(2):21-25.
- [9] 刘春伟, 邱让建, 王振昌, 郭维华. 基于液流量的苹果树蒸腾量模拟[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2):105-112.
- LIU Chunwei, QIU Rangjian, WANG Zhenchang, GUO Weihua. Transpiration modeling of apple trees based on sap flow measurements[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2):105-112.
- [10] 党宏忠, 冯金超, 却晓娥, 王檬檬, 张金鑫. 晋西黄土区苹果树边材液流速率的方位差异研究[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(2):46-52.
- DANG Hongzhong, FENG Jinchao, QUE Xiaoe, WANG Mengmeng, ZHANG Jinxin. Study on azimuthal variation of sap flow velocity of apple trees in loess plateau area, western Shanxi province[J]. *Forest Research*, 2019, 32(2):46-52.
- [11] 党宏忠, 却晓娥, 冯金超, 王檬檬, 张金鑫. 晋西黄土区苹果树边材液流速率对环境驱动响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3):823-831.
- DANG Hongzhong, QUE Xiaoe, FENG Jinchao, WANG Mengmeng, ZHANG Jinxin. Response of sap flow rate to environmental factors on apple trees in loess plateau area in western Shanxi province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019,



- 30(3):823-831.
- [12] 朱德兰,吴发启.黄土高原旱地果园土壤水分管理研究[J].水土保持研究,2004,11(1):40-42.  
ZHU Delan, WU Faqi. Study on water management in dry orchard in loess plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(1):40-42.
- [13] 龚道枝,雷志栋,郝卫平.基于果树需水信号的精准灌溉控制理论与技术[J].灌溉排水学报,2009,28(4):6-9.  
GONG Daozhi, LEI Zhidong, HAO Weiping. Theory and technology of plant-based precision irrigation in orchard[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(4):6-9.
- [14] 孟秦倩.黄土高原山地苹果园土壤水分消耗规律与果树生长响应[D].杨陵:西北农林科技大学,2011.  
MENG Qinqian. Soil moisture consumption pattern and growth response of hilly apple orchard in the loess plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011.
- [15] 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园土壤水分利用策略[J].林业科学,2018,54(10):31-38.  
WANG Shaofei, ZHAO Xining, GAO Xiaodong, HUO Gaopeng, PAN Yanhui. Water use source of apple trees with full productive age in loess hilly region[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(10):31-38.
- [16] 毕华兴,云雷,朱清科.晋西黄土区农林复合系统种间关系研究[M].北京:科学出版社,2011.  
BI Huaxing, YUN Lei, ZHU Qingke. Interspecific relationship of agroforestry complex system in loess region of western Shanxi province[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [17] 郭正.黄土高原旱作苹果园地水分生产力和深层土壤干燥化效应模拟研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2015.  
GUO Zheng. Simulation of water productivity and deep layer soil desiccation effects of rainfed apple orchards of loess plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015.
- [18] 刘柯渝.深层土壤水对黄土塬区苹果蒸腾的贡献[D].杨陵:西北农林科技大学,2018.  
LIU Keyu. Contribution rate of deep soil water to apple transpiration in loess plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [19] 李青华.黄土丘陵沟壑区山地苹果林地水文特征及水分生产力模拟研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2018.  
LI Qinghua. Soil hydrological characteristics and water productivity simulation of apple forest in the hilly-gully region of loess plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [20] 蔡智才,毕华兴,许华森,常译方,王丹,陈玥.晋西黄土区苹果花生间作系统光合有效辐射及其对花生生长的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(4):51-58.  
CHAI Zhicai, BI Huaxing, XU Huasen, CHANG Yifang, WANG Dan, CHEN Yue. Distribution of photosynthetically available radiation and its effect on growth of *Arachis hypogaea* in *Malus pumila* and *Arachis hypogaea* intercropping system in loess area of western shanxi[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(4):51-58.
- [21] DANG H Z, ZHA T S, ZHANG J S, LI W, LIU S Z. Radial profile of sap flow velocity in mature Xinjiang poplar (*Populus alba* L. var. *pyramidalis*) in Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(5):612-627.
- [22] 党宏忠,杨文斌,李卫,刘世增,张友焱.新疆杨树干液流的径向变化及时滞特征[J].生态学报,2015,35(15):5110-5120.  
DANG Hongzhong, YANG Wenbin, LI Wei, LIU Shizeng, ZHANG Youyan. Radial pattern and time lag of sap flow in *Populus alba* L. var. *pyramidalis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15):5110-5120.
- [23] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(4):309-320.
- [24] LU P, URBAN L, ZHAO P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6):631-646.
- [25] 高登涛.应用冠层分析仪对渭北地区苹果树冠层结构及光照分布的研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2006.  
GAO Dengtao. The characteristic of configuration and light distribution in apple tree canopy using winscanopy2004a in weibei of Shaanxi province[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006.
- [26] 窦兴华.吉县精品苹果生产技术[M].北京:中国农业科学技术出版社,2015.  
DOU Xinghua. The technology of Ji county quality apple production[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015.
- [27] 王绍飞.黄土丘陵区盛果期苹果园土壤水分利用来源研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2018.  
WANG Shaofei. Soil water use source of apple trees with full productive age in the loess hilly region[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [28] 王斌,李怀有,王志雄.黄土高原沟壑区苹果园的水肥耦合试验研究[J].土壤肥料,2004(6):49-51.  
WANG Bin, LI Huaiyou, WANG Zhixiong. Study on water-fertilizer coupling experiment of apple orchard in gully region of loess plateau[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2004(6):49-51.
- [29] 陈凯.山东丘陵区苹果树蒸腾耗水规律及果园蒸散特征研究[D].泰安:山东农业大学,2011.  
CHEN Kai. Apple tree transpiration rule and apple orchard evapotranspiration features in hilly area of Shandong province[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2011.
- [30] 闫琪.红富士苹果树需水规律与产量的相关性[J].甘肃农业科技,2009(4):19-21.  
YAN Qi. The correlation between water demand and yield of apple trees[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2009(4):19-21.
- [31] 宋素智,柴全喜,张大彪.2018年果树花期冻害调查[J].北方果树,2018(4):51-53.  
SONG Suzhi, CHAI Quanxi, ZHANG Dabiao. Investigation on freezing damage of fruit trees during flowering in 2018[J]. Northern Fruits, 2018(4):51-53.
- [32] 李向民,许春霞,苏陕民.黄土高原沟壑区苹果树休眠枝条含水量研究[J].果树科学,1998,15(1):6-9.  
LI Xiangmin, XU Chunxia, SU Shanmin. Study on the water content of dormant apple young branch in loess plateau region[J]. Journal of Fruit Science, 1998, 15(1):6-9.
- [33] 韩明玉.黄土高原苹果发育调控理论与实践[M].北京:中国农业出版社,2015.  
HAN Mingyu. Theory and practice of apple growth regulation in loess plateau[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
- [34] LIU C, DU T, LI F, KANG S, LI S, TONG L. Trunk sap flow characteristics during two growth stages of apple tree and its relationships with affecting factors in an arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104(1):193-202.
- [35] 龚道枝,康绍忠,张建华,姚立民.苹果树蒸发蒸腾量的测定和计算[J].沈阳农业大学学报,2004,35(5/6):429-431.  
GONG Daozhi, KANG Shaozhong, ZHANG Jianhua, YAO Limin. Measuring and estimating evapotranspiration of an apple (*Malus pumila* Mill.) orchard[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(5/6):429-431.