

苹果树蒸腾规律及其与冠层微气象要素的关系

孟平, 张劲松, 王鹤松, 高峻, 褚建民

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要:采用由热扩散植物液流技术测算得到的、周期为2003年1~12月、时间步长10min的苹果树蒸腾数据,结合同步观测得到果树冠层微气象要素值,分析太行山低山丘陵区10年生苹果树蒸腾耗水规律及其与微气象要素关系,旨在为该地区苹果生产提供必要的水分生态理论依据,并力图进一步完善苹果树蒸腾耗水理论。结果表明:(1)苹果树蒸腾(T_r)具有明显时间变化特征。 T_r 在晴天-多云日的主要和非主要生长季节日变化都表现为单峰曲线趋势。在阴天日,主要生长季节表现为多峰曲线趋势,非主要生长季节单峰除10月和3月份表现为双峰曲线趋势外,其余各月均为单峰曲线趋势。 T_r 日际变化或季节变化特征是3~4月份逐渐升高、5~6月份达到高峰值、7月份逐渐降低、10月末及11月初 T_r 迅速降低。全年 T_r 值为600.9mm,其中,主要生长期(4~9月份)、非主要生长期(1~3月份、10~12月份) T_r 值分别为502.6、98.3mm,分别占全年的83.6%、16.4%。(2)主要生长期内, T_r 与冠层净辐射(R_n),空气温度(T_a),湿度(RH),风速(V)等气象要素有很好的复相关性,统计回归方程为 $T_r = 0.274 + 0.042V + 0.0067T_a - 0.014RH$ ($n=26352$, T_r 为单株蒸腾量, T_r 、 V 、 T_a 、 R_n 的单位分别为L/h、m/s、 $^{\circ}C$ 、 w/m^2 , RH 为无量纲值,以%表示), $R^2=0.716$, $F_{计算}=16573.65 \gg F_{0.01}(4,26347)=3.32$,且计算偏相关系数表明:各月影响苹果树 T_r 的最主要气象因子都是 R_n 。

关键词:苹果树;蒸腾;热扩散植物液流;微气象

文章编号:1000-0933(2005)05-1075-07 中图分类号:Q945,Q948 文献标识码:A

Rule of apple trees transpiration and its relation to the micrometeorology on the canopy

MENG Ping, ZHANG Jin-Song, WANG He-Song, GAO Jun, Chu Jian-Min (Research Institute of Forestry, CAF, Key Laboratory of Forest Silviculture of the State Forestry Administration, Beijing 100091, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1075~1081.

Abstract: The rule of apple trees transpiration and its relation to the micrometeorology on the canopy were analyzed through the experimental data of the apple tree sap flow and canopy micrometeorology, which measured by Thermal Dissipation sap flow velocity Probe (TDP) and CR10X automated meteorology system respectively, and data were recorded very 10minutes. The trees are 10 years old. The experiment was conducted in the hilly region of Taihang Mountain during Jan-Dec of 2003. The aim of this study is to provide essential theory about water ecology for developing and managing the apple orchard in the region, and further more to richen the theory about the transpiration of apple tree. The main results are as follows: The diurnal variations of apple trees transpiration(T_r) were demonstrated single-peak curve in clear-cloudy day in the main growing season and minor growing season, but in the overcast day, it was demonstrated several-peak at the main growing season, and single-peak curve at minor growing season except October and March. The daily variations of T_r is characterized with that T_r rose gradually in March, and reach a peak during May and June, fall down readily in July and descend rapidly in October. The total T_r was 600.9mm annually, and 502.6mm, 98.3mm in the main and minor growing season respectively. T_r per tree was significantly

基金项目:中国林业科学研究院重点基金资助项目;国家自然科学基金资助项目(30371186);国家科技部“十五”科技攻关课题资助项目(2001BA510B04)

收稿日期:2004-10-28; **修订日期:**2005-02-17

作者简介:孟平(1961~),男,辽宁人,研究员,主要从事复合农林业、农(林)业气象研究。E-mail:mengping@forestry.ac.cn

Foundation item: Natural Science Foundation of CAF, National Natural Science Foundation of China(No. 30371186); The National “Tenth Five-year” Key Project of Science and Technology(No. 2001BA510B04)

Received date: 2004-10-28; **Accepted date:** 2005-02-17

Biography: MEN Ping, Professor, mainly engaged in agroforestry and agricultural meteorology. E-mail:mengping@forestry.ac.cn

($a = 0.01$) related to canopy net radiation (Rn), air temperature (Ta), relative humidity (RH), wind velocity (V). The regression equations was $Tr = 0.274 + 0.042V + 0.0067Ta - 0.014RH$ ($n = 26352$, $r = 0.8461$), where the units for Tr , V , Ta , Rn are respectively L/h, m/s, C and w/m^2 , RH is in percentage (%) and Rn is the most important micrometeorology that effects on Tr in the main growing season of the apple tree by the partial correlation coefficient.

Key words: apple tree; transpiration; TDP; micrometeorology

蒸腾是植物耗水特征的主要方式,在土壤-植物-大气连续体(SPAC)水热传输过程中占有极为重要的地位,一直是农学、林学、气象学、水文学、生态学等相关学科及领域共同关注的重要课题之一。随着水资源紧缺问题的日益严重化,蒸腾问题的研究已受国际社会的愈加重视。揭示林木耗水规律及其影响机制对水资源紧缺地区林业建设战略规划、林种布局、树种选择、林分结构配置及林地水分管理等具有重要的理论指导意义,可为我国正在实施的退耕还林工程建设提供必要的水分生态理论依据。选择合适的测算技术及方法是上述研究的工作基础。热扩散植物液流(TDP)法是当前测算林木蒸腾速率的最为稳定的技术,在国外已得到普遍应用,我国这方面研究刚刚起步。但国内外基于TDP技术研究苹果树蒸腾问题的应用研究均未见详尽文献报道。已有有关苹果树蒸腾或液流(sap flow)的类似研究方法是热脉冲技术(HPV)^[1~7]。但 HPV 在脉冲信号和读数之间所需要的一个等待间隔期偏短以致影响了精度,此外存在着不能连续监测等局限性。TDP 就是针对 HPV 上述缺陷而改进形成的液流测定技术。

我国有关苹果树蒸腾问题虽有研究报道^[4,7~20],但因蒸腾速率测定技术条件的限制,致使原始数据时间连续性、稳定性、代表性不强,不能深入揭示蒸腾耗水规律而影响研究结果的应用价值。除 Fusheng^[4]、丁日升等^[7]采用 HPV 技术外,多数研究采用以 Li-1600 稳态气孔仪或 Li-6400、LAC-4、CID 光合分析仪为代表的气孔计法,且其主要内容不涉及蒸腾变化规律及其影响机制等问题。因叶片间变异程度剧烈,在由单叶蒸腾耗水量向整株推算时误差较大,也无法进一步了解蒸腾在一段时期内连续变化规律。张劲松等^[20]根据单株苹果树蒸腾计算修正模式^[21],测算了苹果~小麦复合系统中单株苹果树潜在蒸腾量,并建立了以水面蒸发和叶面积指数为自变量的经验模式为长期、连续逐日地计算苹果树蒸腾量提供了借鉴思路。但由于当时条件的限制,无法连续、长期地测算数据,没有进行结合同步冠层微气象参数来分析苹果树蒸腾耗水规律及其影响机制的研究。

苹果是我国太行山低山丘陵区主要水果产业,但该地区包括苹果在内的果树水分管理一直采用粗放经营,致使水资源浪费十分严重。故急需了解苹果树蒸腾耗水规律及其影响机制,以能取得生产上的理论依据。冠层微气象是果园主要生态要素,对果树蒸腾等生理生态过程具有重要的影响作用。本研究采用基于 TDP 技术测算得到的、周期为 1a、监测时间步长 10min 的苹果树蒸腾数据,结合同步观测得到果树冠层微气象要素值,分析太行山低山丘陵区 10 年生苹果树蒸腾耗水规律及其与微气象要素的关系,旨在为该地区苹果生产提供必要的水分生态理论依据,并力图进一步完善苹果树蒸腾耗水理论。

1 试验设计

1.1 试验区概况

试验地设在河南省济源市裴村“太行山低山丘陵区复合农林业综合研究”试验区内(35°11'N,112°03'E)。试验区地处太行山南段南麓,属温带大陆性季风气候。全年日照时数为 2367.7h,年日照率为 54%,稳定通过 0℃ 的多年平均积温为 5282℃,大于等于 10℃ 的多年平均积温达 4847℃。历年平均降水量 641.7mm,基本上能满足作物生长的需要,但由于受季风气候的影响,年内季节性分布不均匀。6~9 月份多年平均降水量为 438.0mm,占全年的 68.3%。试验区土壤以石灰岩风化母质淋溶性褐色土为主,土层厚度 50~80cm,pH 值 6.8~8.5,石砾含量为 10%~18%,有机质含量在 10g/kg 左右,速效氮 21.4~80.0mg/kg,速效磷 5.4~16mg/kg,速效钾 60~103mg/kg。

1.2 试验材料及方法

本研究的具体对象是水平梯田苹果果园,梯田南北宽度 36m、东西长度 200m,株行距 3m×4m,密度 787 株/hm²,株高 2.4m,南北冠幅 3.7m,郁闭度 98%。栽植于 1992 年,果树带行向为东西行,品种:新红星(*Starkrimson*)。

1.2.1 冠层小气候观测 在试验地中部选择 4 株代表性较好的以矩形形式相邻果树,在矩形中心处活动面上 0.5m、1.5m 高度处小气候自动监测系统连续观测空气温度(Ta)、相对湿度(RH)及风速(V),活动面上 1.0m 高度处观测太阳总辐射(Q)、冠层净辐射(Rn)、降雨量(P),并于其中一棵树的南、北冠幅边缘活动面上 1.0m 高度处再同步观测 Rn 。 Q 、 Rn 、 V 、 Ta 和 RH 、 P 所采用的传感器(探头)分别为 LI200X、Q7-1、05103、HMP45C、TE525M。数据采集器为 CR10X,每 2min 采集 1 次,每 10min 输出 1 组平均值。观测时期:2003 年 1 月 1 日~2003 年 12 月 31 日。

1.2.2 果树液流与蒸腾观测 在上述 4 棵树的东、南、西、北 4 个方向处采用 TDP 技术测定树干液流,传感器型号 30mm 探针。下部探针距离地面 15cm 左右。观测时间与小气候同步观测。计算公式^[22]如下:

$$Fs = 0.0119K^{1.231} \times SA \times 3.6 \quad (1)$$

$$K = \frac{dT_M - dT}{dT} \quad (2)$$

式中, F_s 为树干液流速率(L/h), 可近似为蒸腾速率; SA 为边材面积(cm^2)。 dT_M 为一日内最大温差值, dT 为某时刻温差值。取 4 棵树的 F_s 平均值为最终测定值。

2 结果与分析

2.1 日变化规律

将天气划分为晴天-多云和阴天两种类型, 以各月同一天气类型对应时刻蒸腾速率平均值为基数, 再结合某一具体日的数据, 分析苹果树主要与非主要生长季节蒸腾速率(T_r)日变化规律。

2.2.1 晴及多云天气日变化规律 在苹果树主要生长期(4~9 月份)内, 晴-多云天气日, 各月 T_r 都有明显的昼夜变化特征, 表现为单峰曲线趋势(图 1)。最高值出现在 12:00 时左右, 最低值出现在 13:00 时左右。统计表明: 2003 年 4 月至 9 月期间, 晴-多云天气下日内单株 T_r 最大值为 3.50~4.97L/h。全天日平均值为 1.60L/h, 其中, 白天(7:00~19:00)平均 T_r 为 2.60 L/h。

只不过由于各月的气象条件, 土壤水分以及苹果自身的生理状况不同, 蒸腾的启动时间、结束时间、最大值及其出现的时间出现了一定的差异。具体来说, 各月 T_r 在夜间差异不大, 而在白天则表现出了明显的不同。其中, 5 月和 6 月份蒸腾启动的时间最早, 提高的速度也最大, 且 T_r 在 2L/h 的强度上维持了 9h, 直到 20:00 左右时, T_r 才回复到较低的水平上。这是由于 5 月和 6 月份的气温、太阳辐射强度都较高, 并且苹果处于新梢旺长期, 需要吸收大量的水分, 故 T_r 较高。而 4 月、7 月、8 月和 9 月份同上 2 个月份相比, 蒸腾启动时间延后 0.5h 左右, 提升的速度也较低, T_r 在 2L/h 的强度上仅维持了 7h 左右, 下降的时间也比 5 月和 6 月份早 0.5h 左右, 在 19:00 左右时, 回复到了较低的水平上。

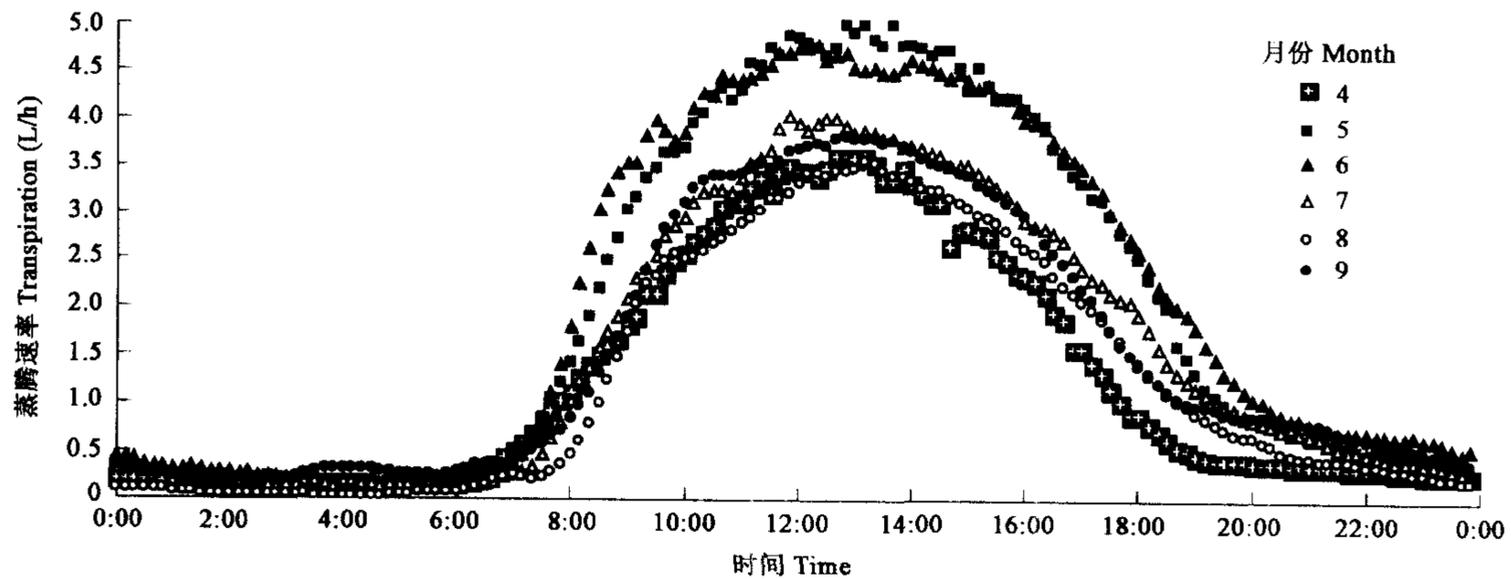


图 1 晴-多云天气主要生长期各月苹果蒸腾日变化(2003 年)

Fig. 1 The diurnal variations of apple trees transpiration in the clear-cloudy day of all months at the main growing season(2003)

为进一步揭示 T_r 日变化特征, 每月选取 1 个典型日进行分析, 以 2003 年 4 月 7 日、5 月 12 日、6 月 4 日、7 月 29 日、8 月 22 日、9 月 12 日, 结果表明: 晴天-多云天气 T_r 日变化表现出明显的昼夜变化(图 2), 夜间 T_r 低, 变化不大, 白天清晨日出开始, T_r 迅速升高, 到午后开始下降, 日落后缓慢下降至次日日出前。这种变化趋势与各月平均 T_r 日变化规律基本一致。图 2 中各日 T_r 均有波动, 这是由苹果树自身的生理变化与冠层微气象条件的变化引起的。

非主要生长期, 晴-多云天气日各月 T_r 也都有明显的昼夜变化, 大多表现为单峰曲线(图 3), 最大值出现在 12:00~14:00 时刻范围内。不过由于各月的气象条件, 土壤水分条件的状况不同, 液流或蒸腾启动时间、结束时间、最大值及其出现的时间也出现了一定的差异。从 10 月开始, 随着日出时间的推迟、太阳辐射的减少、气温的降低, 果树蒸腾的启动时间逐渐延后, 果树为了减少体内水分含量, 提高抗寒能力, 使叶片逐渐脱落, 仅吸收少量水分以维持自身的生理活动, 日内 T_r 最大值也逐渐变小。白天(6:00~19:00)平均 T_r 为 0.13L/h, 同主要生长季的 2.60L/h 相比, T_r 明显降低。

2.1.2 阴天天气日变化规律 苹果树主要生长期内阴天天气日, 各月的 T_r 有比较明显的昼夜变化特征, 表现为多峰曲线趋势(图 4)。但由于各月的气象条件, 土壤水分以及苹果自身的生理状况不同, T_r 启动时间、结束时间、峰值及其出现的时间出现了较大的差异。

具体来说, 主要生长期内阴天日时, 各月 T_r 在夜间都很平缓, 差异不显著。而在白天的变化则比较明显。在白天, 除 9 月份 T_r 提高不大外, 各月 T_r 均有较大程度的提升, 且都伴有一定的波动。4、6、7 月份的 T_r 白天提升幅度最大, 5、8 月份次之, 9 月份的 T_r 变化变化最小。 T_r 变化曲线呈现出的多峰值与天气状况有关, 同晴天-多云日相比, 虽然日照时数大体相等, 但阴天日

白天太阳辐射强度弱,大气温度相对低,使得 T_r 下降。

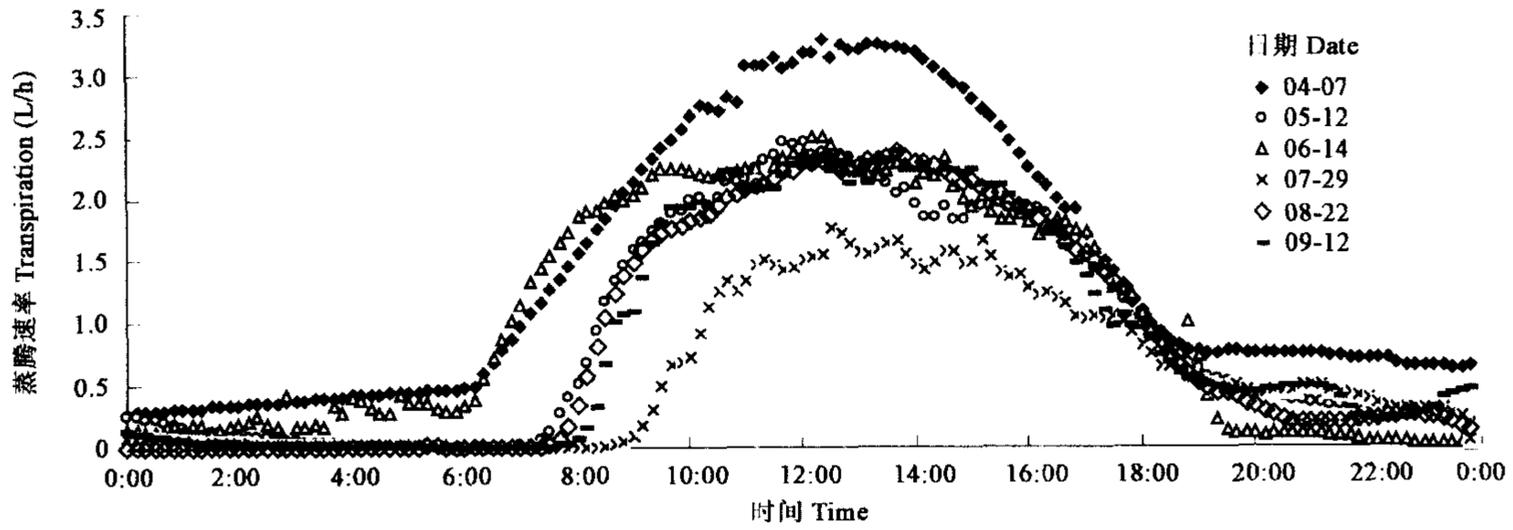


图 2 晴-多云天气主要生长期典型日苹果蒸腾日变化(2003 年)

Fig. 2 The diurnal variations of apple trees transpiration in the representative clear-cloudy day of all months at the main growing season (2003)

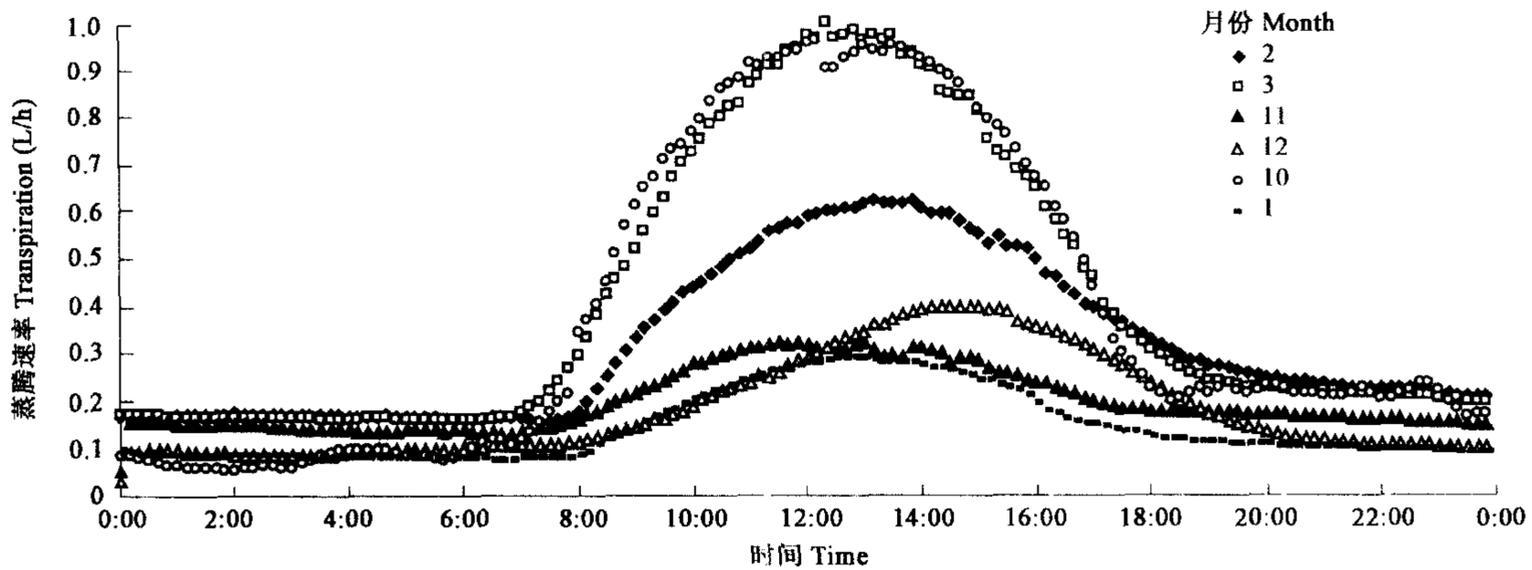


图 3 晴-多云天气非主要生长期各月苹果蒸腾日变化(2003 年)

Fig. 3 The diurnal variations of apple tress transpiration in the clear-cloudy day of all months at the minor growing season(2003)

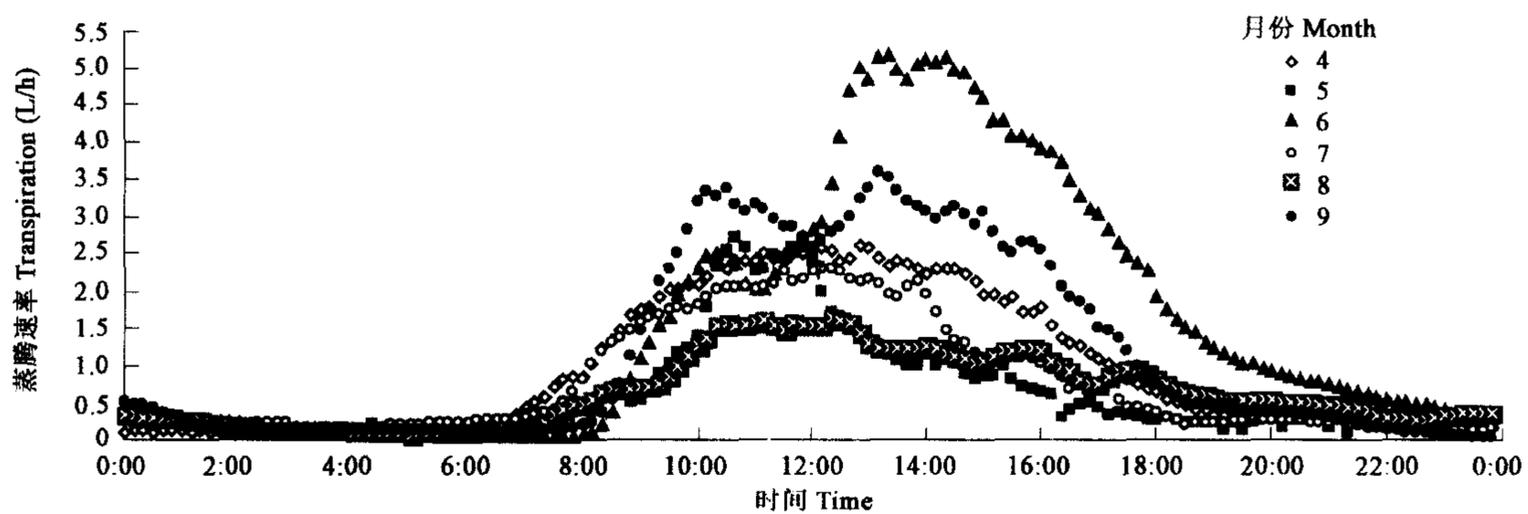


图 4 阴天天气主要生长期各月苹果蒸腾日变化(2003 年)

Fig. 4 The diurnal variations of apple trees transpiration in the overcast day of all months at the main growing season(2003)

非主要生长期阴天日时,各月 T_r 都有明显的昼夜变化,除 10 月和 3 月份表现双峰曲线趋势外,其余各月均为单峰曲线趋势(图 5)。但 T_r 同晴天-多云日的相比,该值很低,各月的最大值没有超过 1.0L/h。由于各月的气象条件,土壤水分以及苹果自身的生理状况不同,果树蒸腾的启动时间、结束时间、峰值及其出现的时间出现了较大的差异。

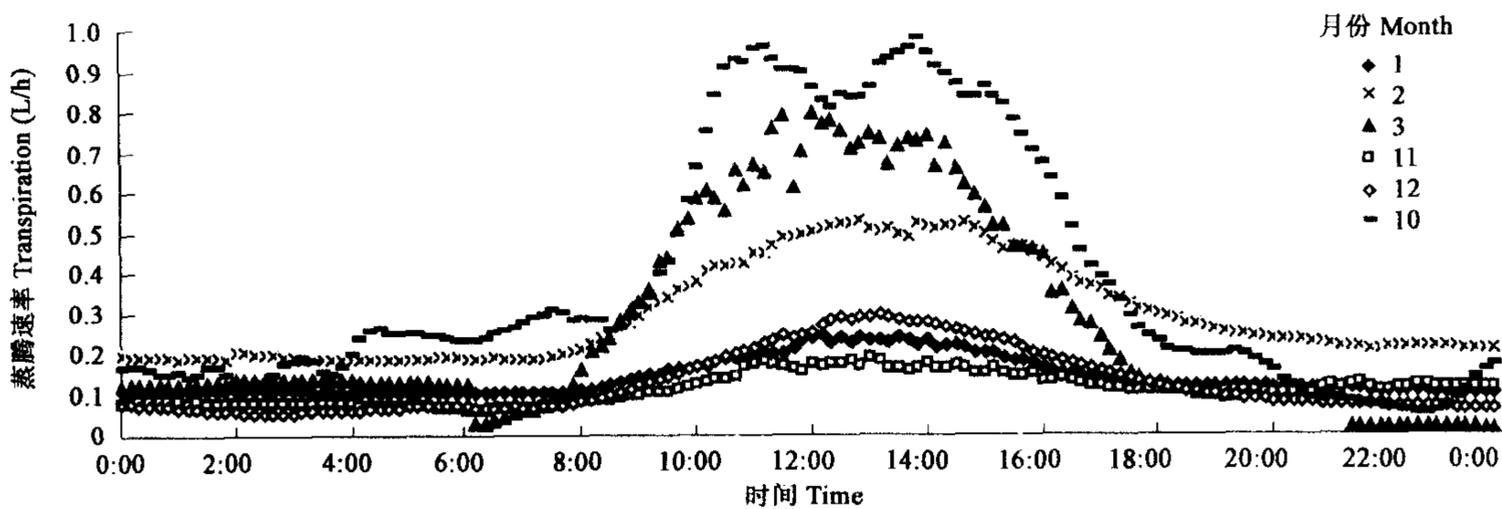


图5 阴天天气非主要生长期各月苹果蒸腾日变化(2003年)

Fig. 5 The diurnal variations of apple trees transpiration in the overcast day of all months at the minor growing season(2003)

具体来说,主要生长期,阴天日各月 T_r 在夜间都很平缓,差异不显著。而在白天的变化则比较明显,2~3月份、10月份白天的 T_r 提升幅度最大,1月份及12月份次之,11月份 T_r 日变化幅度最小,昼夜变化差异不大。

总之,果树在全年内的 T_r 日变化,无论主要生长期还是非主要生长期,都表现出了明显的昼夜日变化节律。只不过由于气象条件,土壤水分以及苹果自身的生理状况的不同,蒸腾的大小,启动时间,结束时间、最大值及其出现的时间有各自的不同。日内表现为在清晨,太阳辐射强度弱,气温低,空气相对湿度高,苹果树蒸腾速率上升缓慢;随着太阳辐射强度的逐渐增加,气温逐渐升高, T_r 逐渐增强,而后,太阳强度减弱,温度降低,导致叶内外水汽压差减少,蒸腾速度减小,到次日日出时,蒸腾速度降低为最低值。

2.2 苹果树蒸腾日际变化规律

按 787 株/hm² 的密度将单株 T_r 转换为群体或单位土地面积 T_r ,并对 2003 年 1 月至 12 月内各日的 T_r 进行积分,得到了苹果树全年 T_r 日际变化曲线(图 6)。从图 6 可以看出, T_r 呈现出明显的日际变化或季节变化特征。从 4 月份起,随着叶片的生长,苹果叶面积指数的增加, T_r 迅速增加。5、6 月份是苹果新梢旺长期,耗水量进一步加大,最终使苹果树在 5、6 月份 T_r 达到全年的最大值,分别为 107.67mm、115.31mm。说明 5 月份和 6 月份是苹果树的主要需水期,应加强水分管理,保证果树水分的供应。此后,苹果树耗水量有所减小。从 10 月份开始,苹果的叶片脱落, T_r 值逐渐降低,从 11~12 月份及翌年 1 月份,果树叶片全部脱落,每天仅需少量水分维持自身的生理活动, T_r 值很低,此 3 个月 T_r 值分别为 9.6mm、10.6mm、8.5mm。经统计:苹果树全年 T_r 值为 600.9mm,其中,主要生长期(4~9 月份)、非主要生长期(1~3 月份、10~12 月份) T_r 值分别为 502.6mm、98.3mm,分别占全年的 83.6%、16.4%。

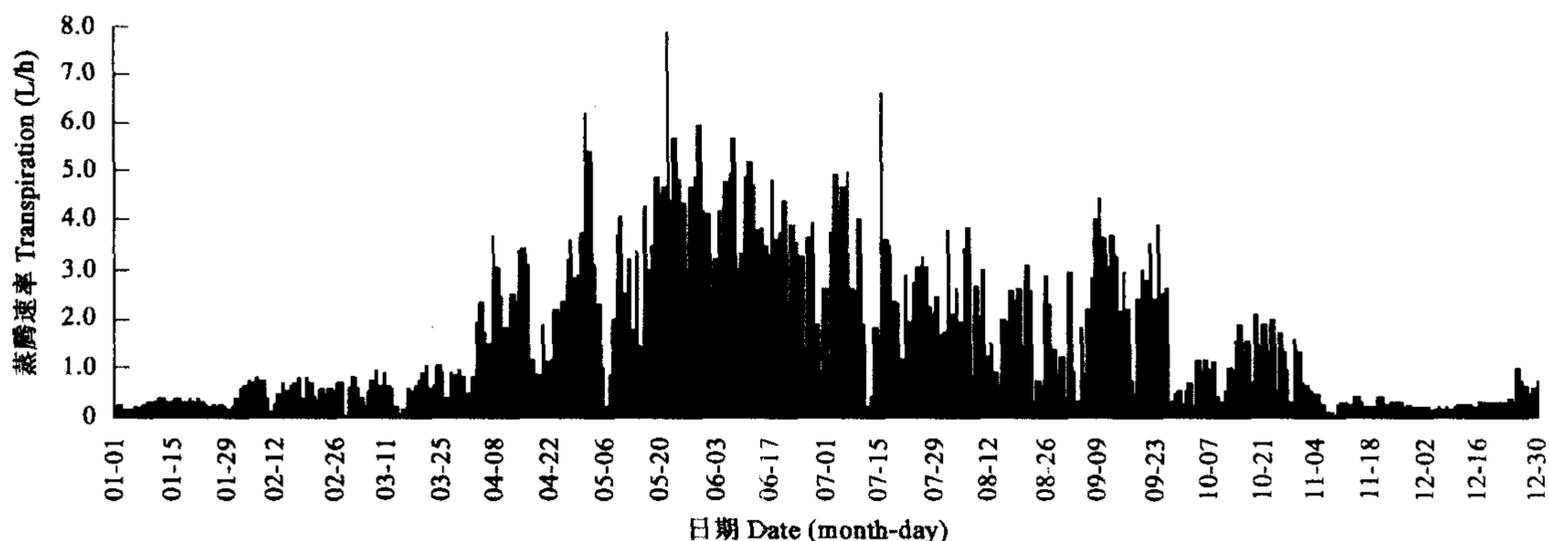


图6 苹果全年蒸腾耗水量日际变化(2003年)

Fig. 6 The daily variations of apple trees transpiration in the whole year(2003)

2.3 苹果树蒸腾与冠层微气象要素的关系

冠层微气象要素对植物蒸腾具有重要的影响作用。本研究引入果树冠层附近风速(V)、大气温度(T_a)、大气相对湿度(RH)、冠层净辐射(R_n),分析主要生长期果树蒸腾与微气象要素的关系,结果表明: T_r 与 V 、 T_a 、 RH 、 R_n 有较好的复相关关

系,复相关系数 $r=0.8461$, $F_{\text{计算}}=16573.65 \gg F_{0.01}(4,26347)=3.32$,可通过 0.01 水平上的显著性检验。回归方程如下:

$$Tr = 0.274 + 0.042V + 0.067Ta - 0.014RH + 0.006Rn \quad (n = 26352) \quad (3)$$

式中, Tr 为单株蒸腾量(L/h), V 、 Ta 、 Rn 的单位分别为 m/s、 $^{\circ}\text{C}$ 、 w/m^2 , RH 为无量纲值,以%表示。计算表明: Tr 与 V 、 Ta 、 RH 、 Rn 的偏相关系数分别为 0.038、0.366、-0.254、0.707。可见,主要生长期,影响苹果树 Tr 最主要微气象因子为 Rn 。

3 结论与讨论

(1) 苹果树蒸腾具有明显的时间变化规律,在日变化方面,无论主要生长期还是非主要生长期,苹果树蒸腾都表现出了明显的昼夜日变化节律。在晴天-多云天气日的主要和非主要生长季节都表现为单峰曲线趋势。在阴天天气日,主要生长季节表现为多峰曲线趋势,非主要生长季节除 10 月份和 3 月份表现为双峰曲线趋势外,其余各月均为单峰曲线趋势。自不过由于气象条件,土壤水分以及苹果树自身的生理状况的不同,蒸腾的大小,启动时间、结束时间、最大值及其出现的时间有各自的不同。

在日际变化或季节变化方面,从 4 月份起,果树的蒸腾耗水量迅速增加,苹果树月蒸腾耗水量在 5 月份和 6 月份达到全年的峰值。此后,苹果树耗水量有所减小。从 10 月份开始,苹果的叶片脱落,蒸腾量逐渐降低,从 11~12 月份,果树叶片全部脱落,每天仅需少量水分维持自身的生理活动,耗水量很低。主要生长期(4~9 月份)、非主要生长期(1~3 月份、10~12 月份)蒸腾分别占全年的 83.6%、16.4%。

(2) 主要生长期,蒸腾速率与冠层净辐射(Rn)、空气温度(Ta)、湿度(RH)、风速(V)等气象要素有很好的复相关性,可通过 0.01 水平上的显著性检验。且影响苹果树蒸腾的最主要气象因子是 Rn 。统计回归方程为 $Tr = 0.274 + 0.042V + 0.067Ta - 0.014RH + 0.006Rn$ ($n=26352$, $r=0.8461$)

(3) 鉴于目前土壤水分观测技术的限制,难以得到日内差异性显著土壤水分观测值。本研究在测定蒸腾速率及冠层微气象参数的同时,没有同步自动观测土壤水分。为了进一步深入、系统地分析蒸腾速率的影响机制,则需进一步开展蒸腾速率与包括土壤含水量在内的环境因子关系研究。

References:

- [1] Green S R, McNaughton K G, Clothier B E. Observations of night-time water use in kiwifruit vines and apple trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, **48**(3~4): 251~261.
- [2] Green S R, Clothier B E, McLeod D J. The response of sap flow in apple roots to localised irrigation. *Agricultural Water Management*, 1997, **33**(1): 63~78.
- [3] Green S R, Clothier B E. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant and Soil*, 1998, **206**(1): 61~77.
- [4] Fusheng Li, Shabtai Cohenb, Amos Naorc, et al. Studies of canopy structure and water use of apple trees on three rootstocks. *Agricultural Water Management*, 2002, **55**(1)1~14.
- [5] Ferrara G, Flore J A. Comparison Between Different Methods for Measuring Transpiration in Potted Apple Trees. *Biologia Plantarum*, 2003, **46**(1): 41~47.
- [6] Naor A, Cohen S. Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. *Hortscience*, 2003, **38**(4): 547~551.
- [7] Ding R S, Kang S Z, Gong D Z. Responses of apple trees sap flow to temporal change in weather and soil water content by Heat-Pluse technique. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, **23**(2): 21~25.
- [8] Xia Y. effects of Anti-transpiration to water status of apple trees. *Journal of Fruit Science*, 1996, **13**(1): 1~4.
- [9] Yao Y C, Zhang D P, Wang D P. Preliminary study of JM effect in the increasing drought to tolerance of young Apple. *Acta horticulturae Sinica*, 1999, **26**(5): 333~334.
- [10] Qu G M, Wang H X, Shu H R. Diurnal variations of WUE for apple trees with different growth vigor. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, **17**(2): 111~115.
- [11] Qu G M, Shen X, Wang H X, et al. Effect of fruit on water use efficiency of apple trees under soil drought. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2000, **18**(2): 86~90.
- [12] Qu G M, Shu H R, Wang H X. Effect of potassium on water use efficiency and relevant parameters of apple trees. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, **37**(2): 257~262.
- [13] Qu G M, Shu H R, Wang H X. Effect of nitrogen on water use efficiency of apple trees. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(2): 199~201.
- [14] Wang K Q, Wang B R, Wang Z H. The water use efficiency of the Goldspur apple tree. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(5): 723~728.
- [15] Yang H Q, Jie Y L, Zhang L Z, et al. Effects of pruning and shooting on water efficiency of Apple leaves. *Acta Horticulturae Sinica*, 2002, **29**(3): 197~202.

- [16] Liu Y, Wang L X, Wang Y N. The effects of active FBP enzyme in chloroplast under water stress on apple tree leaves. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2002, **23**(4):42~45.
- [17] He K N, Tian Y, Shi C Q, et al. The suitable soil moisture condition for forest growth in catchment afforestation in semi-arid region on Loess plateaus. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, **17**(3):174~177.
- [18] Li K R, Wu F Q, Wang J. Effects of natural brassinolide on growth, development and yield of apple trees. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(3):174~177.
- [19] Zhang G C, Liu X, He K N. Responses of gas exchange parameters of goldspur apple tree to soil water variation. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, **28**(1):66~72.
- [20] Zhang J S, Meng P, Yin C J. Estimation transpiration-water requirement from an apple tree in apple-crop intercropping system. *Forest Research*, 2001, **14**(4):384~387.
- [21] Thorpe M. Net radiation and transpiration of apple in rows. *Agri Meteorol.*, 1978, **19**:41~57.
- [22] Granier A, Huc R, Barigah S T. transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, **78**:19~29.

参考文献:

- [7] 丁日升, 康绍忠, 龚道枝. 果树液流变化规律研究. *灌溉排水学报*, 2004, **23**(2): 21~25.
- [8] 夏阳. 叶面喷施抗蒸腾剂对苹果水分状态的影响. *果树科学*, 1996, **13**(1):1~4.
- [9] 姚允聪, 张大鹏, 王有年. 提高苹果幼树抗旱性的研究初报. *园艺学报*, 1999, **26**(5):333~334.
- [10] 曲桂敏, 王鸿霞, 束怀瑞. 苹果树不同植株类型水分利用效率的日变化. *干旱地区农业研究*, 1999, **17**(2):111~115.
- [11] 曲桂敏, 沈向, 王鸿霞, 等. 土壤干旱时苹果果实对叶片水分利用效率的影响. *干旱地区农业研究*, 2000, **18**(2):86~90.
- [12] 曲桂敏, 束怀瑞, 王鸿霞. 钾对苹果树水分利用效率及有关参数的影响. *土壤学报*, 2000, **37**(2):257~262.
- [13] 曲桂敏, 王鸿霞, 束怀瑞. 氮对苹果幼树水分利用效率的影响. *应用生态学报*, 2000, **11**(2):199~201.
- [14] 王克勤, 王斌瑞, 王震洪. 金矮生苹果水分利用效率研究. *生态学报*, 2002, **22**(5):723~728.
- [15] 杨洪强, 接玉玲, 张连忠, 等. 断根和剪枝对盆栽苹果叶片光合蒸腾及 WUE 的影响. *园艺学报*, 2002, **29**(3):197~202.
- [16] 刘艳, 王丽雪, 王有年. 水分胁迫对苹果叶片叶绿体 1,6-二磷酸果糖磷酸酯酶活性的影响. *内蒙古农业大学学报*, 2002, **23**(4):42~45.
- [17] 贺康宁, 田阳, 史常青, 等. 黄土半干旱区集水造林条件下林木生长适宜的土壤水分环境. *林业科学*, 2003, **39**(9):10~16.
- [18] 李凯荣, 吴发启, 王键. 天然油菜素内酯对黄土丘陵区苹果生长发育和产量的影响. *水土保持学报*, 2003, **17**(3):174~177.
- [19] 张光灿, 刘霞, 贺康宁, 等. 金矮生苹果叶片气体交换参数对土壤水分的响应. *植物生态学报*, *植物生态学报*, 2004, **28**(1):66~72.
- [20] 张劲松, 孟平, 尹昌君, 等. 果粮复合系统中单株苹果蒸腾需水量的计算. *林业科学研究*, 2001, **14**(4):384~387.