https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.941

黄土丘陵沟壑区山地苹果林蒸散特征

李青华[1,2,3],穆 艳[1*],王延平[2]

1. 西北农林科技大学风景园林艺术学院,陕西杨凌 712100
2. 西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100
3. 开封市环境监测站,河南开封 475000

摘 要: 以黄土丘陵沟壑区的典型代表米脂为研究区,选取苹果林地生态系统为研究对象,揭示苹果林地的蒸腾蒸发耗散规律及其影响机制,为指导有限水资源条件下苹果产业发展科学布局、优化管理措施及充分挖掘苹果林地的生产潜力提供科学依据. 运用热扩散茎流计(TDP)、小型蒸发皿测定了组成苹果林地蒸散的果树蒸腾量和土壤蒸发量,运用水量平衡公式计算了冠层截留量,分析了各气象因子与蒸腾速率的关系,并评估了苹果林地的蒸散量,以期正确认识和评价苹果林地生态水文效应. 不同生育期的日均蒸腾速率大小依次为果实膨大期>果实着色期>新梢生长及幼果发育期>萌芽开花期,小时尺度下,不同生育期蒸腾速率到达峰值的时间不同. 不同天气条件下,晴天状况下树干蒸腾量明显大于阴天,影响苹果林地蒸腾速率的主要气象因子为太阳辐射和空气温度. 果实膨大期及果实着色期为果树耗水的主要时期. 降水对蒸腾的影响表现出滞后效应. 植被蒸腾量、土壤蒸发量、冠层截留量对蒸散的贡献率由大到小依次为58.9%、26.8%、14.3%. 试验期间,降水量大于蒸散量,果园水分收支略有盈余,不同月份土壤水分收支情况不同,应加强萌芽开花期、新梢生长及幼果发育期果园的水分管理.

关键词: 山地苹果林;蒸腾速率;蒸散特征;TDP;水文地质.

中图分类号: P343.8 **文章编号:** 1000-2383(2019)08-2818-11 **收稿日期:** 2018-10-22

Evapotranspiration Characteristics of Apple Forest in Hilly-Gully Region of the Loess Plateau

Li Qinghua[1,2,3], Mu Yan[1*], Wang Yanping[2]

1. *College of Landscape Architecture and Arts, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*
2. *College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*
3. *Environmental Monitor Station in Kaifeng, Kaifeng* 457000, *China*

Abstract: In this paper, Mizhi County, a typical example of hill-gully region in the Loess Plateau, was selected as the study area to analyze the water balance and evapotranspiration characteristics of apple forestland. The purpose was to understand correctly and evaluate the eco-hydrological effect of apple forest. A thermal dissipation probe (TDP) and micro-lysimeter were used to measure various components of evapotranspiration such as plant transpiration and soil evaporation, and canopy interception was calculated by water balance formula. This study analyzed the relationship between meteorological factors and transpiration rate, evaluated condition of the evapotranspiration of 7-years apple forest. The results show that the average daily transpiration rate in the different growth periods ranked in the order of fruit growth period>fruit coloring stage>new shoots growth and young fruit growth period>germination and flowering period. The time of peak which the transpiration rate reached at different growth stages was different at

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41401613,41571218).

作者简介: 李青华(1993-),女,硕士研究生,主要从事生态水文研究. ORCID: 0000-0002-9804-011X. E-mail: liqinghua826@163.com

*__通讯作者:__ 穆艳,E-mail: muyanyl@126.com

引用格式: 李青华,穆艳,王延平,2019. 黄土丘陵沟壑区山地苹果林蒸散特征. 地球科学,44(8):2818-2828.

the hour scale. Under the different weather conditions, the main meteorological factors affecting the transpiration rate of apple forest were solar radiation and air temperature, and the transpiration in sunny days were significantly larger than that of the rainy days. The main periods of water consumption of apple trees were fruit growth period and fruit coloring period. Precipitation shows significant lagging effect on transpiration. The contribution of plant transpiration, soil evaporation and canopy interception to evapotranspiration in the apple forestland ranked in the order of 58.9%>26.8%>14.3%, respectively. During the experiment period, the precipitation was more than the evapotranspiration, and the water of apple forest was surplus. The water management of apple forest should be strengthened in germination and flowering period, new shoots growth and young fruit growth periods.

Key words: the hilly appleforest; transpiration rate; evapotranspiration characteristics; TDP; hydrogeololgy.

陕北黄土丘陵沟壑地区干旱少雨，生态脆弱，长期以来过度的农业扩张，加剧了当地的水土流失和生态环境的退化（韩永伟等，2012）. 自1999年国家实施退耕还林还草政策以来，陕北地区以苹果林为代表的经济生态林种植规模逐年扩大，截至到2017年底，种植面积已达24.5万 hm^2，凭借独特的自然地理优势，苹果种植已发展为颇具影响力的区域特色产业，成为当地农业经济发展、农民增收的主要方式（王延平等，2013）. 以苹果为代表的人工经济林的发展不仅有利于黄土高原实施退耕还林、深化水土保持，更是促进现代农业可持续发展的成功范例（李玉山，2001）. 然而，随着苹果林地种植面积的扩张及果树树龄的增加，单株和林地总耗水量逐年增加，使有限的降水不能满足生育期内作物蒸散的消耗，水分供需矛盾日益突出，导致土壤水分长期处于亏缺状态，甚至出现“土壤干层”. 土壤干层是指土壤剖面中，隐伏在多年平均降水入渗层以下，因植被深层吸水且不能被雨季降水入渗恢复，由土壤水分负循环而导致的干化土层. 一般认为，土壤干层是气候干旱与植被过度耗水双重作用下形成的. 目前，水资源短缺已成为制约该地区生态环境和农业可持续发展的重要因素.

蒸散（evapotranspiration，ET）是土壤－植物－大气系统内连续而复杂的过程，是水量平衡和能量平衡的重要组成部分，也是林地生态系统水分消耗的主要途径（张静等，2016a；范双萍，2018）. 蒸散不仅影响植物的生长发育与产量，还影响大气环流，起到调节气候的作用. 在实际生产中，蒸散引起的水分亏缺是造成植物损伤或死亡的主要原因（续海红等，2015），尤其在干旱半干旱区，有关作物或林地蒸散特征的研究也一直是生态水文、植物生理生态方面的热点. 蒸散的测定或估算方法也多样，目前主要包括热脉冲或热扩散法（王胜和樊军，2015）、蒸渗仪法（甘卓亭和刘文兆，2006）、水量平衡法（王石言等，2016）、包文比能量平衡法、涡度相关法（司建华等，2005）、遥感遥测以及公式或模型估算（段春锋等，2011）等. 阳伏林等（2014）采用涡度相关技术对黄土高原春小麦农田生态系统蒸散进行了观测，并分析了春小麦农田生态系统蒸散日、季动态及其环境影响因子. 张雨航等（2012）采用遥感模型，基于表面能量平衡系统的原理，选取了MOD09地表反射率和MOD11地表温度、辐射率数据，并结合实测的气象水文资料估算了海流兔河流域2008年全年蒸散量为324.94 mm. 王幼奇等（2009）利用称重式蒸渗仪结合Penman-Monteith公式对黄土高原水蚀风蚀交错区苜蓿、柠条和茵陈蒿3种植被不同时间尺度的蒸散特征进行了研究，并分析了植被株高、盖度和降水等因子对蒸散的影响及确定了作物系数. Zhang et al.（2017a）用涡度相关技术测定玉米潜热通量来计算日蒸散量，并将5种计算日蒸散量的方法予以对比研究. 其中，Granier（1985）提出的热扩散法（thermal dissipation probe，TDP），借助插入边材中的探针，通过测定两探针间温度差，计算出液流速率，进而确定树干液流量，可以对树木活体的树干液流量连续自动监测，时间分辨率高，一般不会破坏植物的正常生理活动，野外操作方便，在世界范围内广为应用. 如Zhang et al.（2017b）利用热扩散法（TDP）研究发现黄土高原主要立地条件梯田对土壤水分、油松冠层蒸腾速率及冠层导度均有显著影响. 唐敏等（2016）利用TDP法分析了4种不同地表覆盖处理枣树树干液流速率变化规律及其对环境因子的响应. 胡兴波等（2018）基于热扩散法的青海云杉冠层导度模拟发现青海云杉的冠层蒸腾对环境因子变化的响应时滞为15 min. 本研究采用TDP结合小型蒸发皿的方法测定不同生育期苹果树的蒸腾量与土壤蒸发量，揭示苹果林地的蒸腾蒸发耗散规律及其影响机制，以充分利用有限的土壤水资源，提高林地的水分利用效率，为指导有限水资源条件下苹果产业发展科学布局、优化管理措施及充分挖掘当地苹果林地生产潜

力提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区米脂县位于陕北黄土高原北部、陕西省榆林市境内(109° 49′E～110° 29′E, 37° 39′N～38° 5′N).属典型的黄土丘陵沟壑地貌,暖温带半干旱气候区,多年平均气温8.3℃.日照时数8.35 h,相对湿度为60 %,无霜期160～170 d,年均降雨量400 mm左右,多集中在7—9月.土壤类型主要为黄绵土,土层深厚,土质疏松.试验在陕西省果业管理局榆林山地苹果试验站米脂党塔山地苹果科技示范基地(38°08′32″N,109°57′20″E)进行.地形为梯田,土壤容重1.20～1.35 g·cm^{-3},田间持水量平均为22%(质量含水率),凋萎含水率为3.5%,pH值8.91.果园面积为13.5 hm^2,苹果树龄为7龄,株行距4 m×5 m,主栽品种"红富士",授粉品种"嘎啦"、"秦冠"等.试验监测时间为2016年4月—10月.

1.2 研究方法

1.2.1 苹果树蒸腾量的测定 采用热扩散液流探针法(TDP)测定苹果树的蒸腾量,在试验果园中心地带选择6株标准果树(生长良好、树干通直、无病虫害的苹果树),通过测定插入树干边材的一对有热电偶的探针温差来计算液流速率值(王华田和马履一,2002).所用植物茎流计为美国Dynamax公司生产的插针式FLGS-TDP,探针型号为TDP-10,长10 mm,针头直径为1.2 mm.利用CR1000型数据采集器(Campbell Scientific, UN)和PC400来调节茎流计的工作电压和检测热电偶,每60 s获取一次数据并记录每半小时的平均值,边材液流通量可由以下公式(Granier et al.,1996)计算:

$$K=\frac{\mathrm{d}T_m-\mathrm{d}Ta}{\mathrm{d}T}, \tag{1}$$

$$v=0.0119\times K^{1.231}, \tag{2}$$

$$F_s=3.6\times A\times v, \tag{3}$$

式中:K为无量纲参数,用于消除液流速率为0时的温差;dT_m一般在黎明前无茎流时测得加热探针与参考探针的最大温差(℃);dT为瞬时温差值(℃);v为液流速率(cm·s^{-1});A为树干边材横截面积(cm^2);F_s为蒸腾速率(L·h^{-1}).其中,dT_m和dT结果均由仪器自动监测得出,边材面积A的测定:在试验果园随机选取10棵果树测定胸径后将其伐倒测定或利用生长锥测定求得边材面积,得到平均胸径(x,cm)及边材面积(y,cm^2)的拟合线性曲线(图1),通过测定试验果树的胸径,代入公式y=12.921x−58.683,R^2=0.960求得.

图1 边材面积与平均胸径之间的关系

Fig.1 Relationship of average diameter at breast height and sapwood area

$$T=n\times F_{sd}/S=n\times 24F_s/S, \tag{4}$$

式中:T为苹果林日蒸腾量(mm·d^{-1});n为试验地苹果树株数;F_{sd}为苹果树日蒸腾速率(L·d^{-1});S为试验样地果园面积;F_s为24 h边材液流通量平均值(L·h^{-1}).

1.2.2 环境因子的测定 气象数据由位于样地旁边安置的Campbell Scientific生产的农田小气象站连续监测,每30 min记录一次数据.测定的指标主要有降雨量P(precipitation,mm)、太阳净辐射R_s(solar radiation, w·m^2)、空气温度T_a(air temperature,℃)、相对湿度RH(relative humidity,%)、风速W_s(wind speed,m·s^{-1}).为综合反映大气温度和相对湿度的协同效应,采用水气压差VPD(vapor pressure deficit,kPa)这一指标.其计算公式为(张静等,2016b):

$$\mathrm{VPD}=0.611\mathrm{e}^{[17.502T/(Ta+240.97)]}(1-RH). \tag{5}$$

1.2.3 冠层截留量的测定 穿透雨量(T_s):在试验果园内选择6株标准果树,分别在冠层下布设不透水的简易雨量筒(直径20 cm,高度30 cm).在单次降水事件结束后30 min内称量简易雨量筒内收集的穿透降水量的重量,作好数据记录,后期数据处理时将穿透降雨量的质量(g)换算成单位面积上的水量深度(mm)(樊军等,2004).

树干茎流量(F):在选定的苹果树干距地面80 cm处以螺旋状绕树干裹上剖开的聚乙烯软管,至少缠绕2圈,使橡胶管上沿与树干接触处敞开,便于树干雨水流入橡胶管,用玻璃胶密封橡胶管下沿

与树干接触处，确保下沿不漏水，软管末端连接到细口承接容器（10 L 塑料桶），于每场降雨后 30 min 内记录数据．将所测水量除以平均单棵果树的树冠投影面积折算成树干流水深（mm）．

冠层截留量（I_c）：冠层截留量用水量平衡法，即通过实测林外降雨、树干茎流和穿透降雨量，由以下公式计算得到（韩雪等，2014）：

$$I_c = P - T_s - F, \tag{5}$$

式中：I_c 为冠层截留量（mm）；P 为林外降雨量（mm）；T_s 为穿透雨量（mm）；F 为树干茎流量（mm）．

1.2.4 土壤蒸发的测定　采用微型土壤蒸发皿测定 0～20 cm 的土壤蒸发量．在苹果树冠下、株间、行间随机选取 10 个样点，每个点上安置一个微型土壤蒸发皿（PVC 管，内径 11 cm，高度 20 cm）并编号．土壤蒸发量的计算依据 24 小时称重的差额与相应蒸发面积之比，取平均值．降雨期间在目前的测量条件下无法观测，故降雨期间的土壤蒸发数据以阴天时所观测到的最小数值来代替．根据蒸发强度，一般每隔 3～5 d，对蒸发皿进行彻底换土后，继续测定．土壤蒸发量计算公式如下（穆艳和王延平，2017）：

$$E = \frac{\Delta m}{\rho \times s} \times 10, \tag{6}$$

式中：E 为土壤蒸发量（$mm \cdot d^{-1}$）；Δm 为 24 小时称重的土壤质量差（g）；ρ 为水的密度（$g \cdot cm^{-3}$）；s 为微型蒸发皿的面积（cm^2）；10 为换算系数．

1.2.5 蒸散量的测定　冠层截留量、土壤蒸发量与植被蒸腾量之和即为总的蒸散量，可用以下公式表示：

$$ET = I_c + E + T, \tag{7}$$

式中：ET 为总蒸散量（mm）；I_c 为冠层截留量（mm）；E 为土壤蒸发量（mm）；T 为植被蒸腾量（mm）．

1.3 数据处理

运用 Microsoft Excel 2010 对试验数据进行统计分析及作图，运用 SPSS 19.0 统计分析软件对数据进行相关及回归分析．

2 结果与分析

2.1 苹果树蒸腾速率

2.1.1 不同天气条件下蒸腾速率日变化规律　分别选择苹果树 4 个生长期（萌芽开花期、新稍生长及幼果发育期、果实膨大期和果实着色期）的不同天气条件，即典型晴天（4 月 14 日、6 月 29 日、8 月 15 日、9 月 8 日）和阴天（4 月 19 日、6 月 18 日、8 月 19 日、9 月 20 日）监测其液流变化规律，进而估算苹果树的蒸腾速率（图 2）．结果表明，晴天和阴天条件下苹果树蒸腾速率均呈现出明显的昼夜变化规律，昼高夜低，整体上呈“几”字形的单峰曲线，夜间蒸腾量变化不明显，较稳定，趋于零，但不完全为零，表明夜间树干仍存在微弱的流量，主要是由根压引起，水分以主动方式吸收进入体内，补充白天植物蒸腾丢失的大量水分，恢复植物体内的水分．典型晴天条件下，苹果树蒸腾速率在 6:00～7:30 开始迅速上升，而在阴天条件下，果树蒸腾速率在 8:00～9:00 开始迅速上升，液流启动时间较晴天晚 2 h 左右，在 18:00 左右急剧下降到最低点．晴天果树蒸腾速率变化速度和幅度均显著大于阴天，阴天条件下的蒸腾速率波峰则较为平缓，波峰较宽，波动较小．晴天和阴天的日均蒸腾速率分别为 0.58 和 0.31 $L \cdot h^{-1}$，相差 0.27 $L \cdot h^{-1}$．日均蒸腾量分别为 14.1 和 7.56 $L \cdot d^{-1}$，相差 6.54 $L \cdot d^{-1}$．

不同生长期苹果树蒸腾速率变化规律不同，典型晴天条件下，萌芽开花期、新梢生长及幼果发育期的蒸腾速率在 10:00 左右达到一天中的最大值，然后逐渐下降，在 17:00 左右降至最低点，波峰相对较宽．果实膨大期和果实着色期的蒸腾速率在 13:00 左右达到峰值，在 19:00 左右急剧下降到最低点，之后趋于平稳，蒸腾速率接近于 0，但在 12:30 左右蒸腾速率出现短暂降低，这是因为在这段时间，由于太阳辐射和气温都较高，气孔暂时关闭而导致的蒸腾下降．不同生育期的蒸腾速率峰值大小依次为果实膨大期＞果实着色期＞新梢生长及幼果发育期＞萌芽开花期．

2.1.2 不同天气条件下蒸腾速率与环境因子的关系　不同天气条件下 4 个生长期果树蒸腾速率与环境因子变化特征如图 3 所示，蒸腾速率主要受气象因子和下垫面的共同作用．由图 3 可知，蒸腾速率的日变化受到气象因子的扰动，但阴天条件下蒸腾速率受气象因子的扰动更为显著．总体而言，两种天气条件下，蒸腾速率的日变化规律与太阳辐射强度、空气温度、水气压差的变化规律基本一致，日变化峰形基本相同，呈正相关；蒸腾速率与太阳辐射、空气温度、相对湿度、水汽压差的变化具有不同步性，最高峰值较太阳辐射提前或滞后 0.5～1.0 h，空气温度、水汽压差的最大值提前 1.0～2.5 h 左右；但蒸腾速率与相对湿度变化趋势正好相反，呈负相关，最

图2　不同天气条件下果树蒸腾速率变化规律

Fig.2　Dynamics of apple tree transpiration as affected by weather conditions

高峰值较相对湿度的最低值提前1～2 h左右.

太阳辐射是光合作用的驱动力,影响气孔的开放程度,进而影响到蒸腾作用的强弱,因此太阳辐射对蒸腾作用起着决定性作用.空气温度影响叶片气孔开放程度,进而增加叶片的生理活动,此外植物从土壤中吸收水分,要有足够大的根压才能够实现,温度对根压起着决定性的作用.在晴天条件下,光照充足,太阳辐射强,叶片生理活性强,光合速率和蒸腾速率高,蒸腾拉力大;而阴天条件下,太阳辐射弱,气温相对低,叶片生理活性降低,同时空气湿度相对较高,风速和水汽压差波动较大,使得果树蒸腾速率明显低于晴天.

为了进一步分析果树蒸腾速率与各气象因素之间的关系,在不同天气条件下分别各选取4个典型晴天和阴天,对蒸腾速率与太阳辐射、空气温度、相对湿度、水气压差、风速等5个主要气象因子在小时尺度上的观测数据进行Pearson相关分析(见表1,表2).结果表明,晴天条件下,蒸腾速率与太阳辐射、空气温度、水汽压差呈极显著正相关($P<0.01$),与相对湿度呈极显著负相关($P<0.01$),与风速不相关.在阴天条件下,蒸腾速率与太阳辐射、风速、空气温度、水汽压差也均呈极显著正相关($P<0.01$),与相对湿度呈极显著负相关($P<0.01$).晴天和阴天条件下均对太阳辐射和温度的相关性最为显著,但阴天条件下对水汽压差和风速的关联程度高于晴天.

为了阐明影响因子对蒸腾速率的复合影响,根据引入因子$P_1<0.05$,剔除因子$P_2>0.1$的准则,利用多元线性逐步回归分析中的自淘汰变量法,建立蒸腾速率与环境因子的综合关系模型(表3).可以看出,回归方程均达到了显著水平($P<0.01$),能较好地反映果树蒸腾速率变化与各气象因子变化的复合相关关系.从入选回归方程的气象因子可以看出,两种天气条件下,太阳辐射和温度均是影响蒸腾速率的主要因素,但典型晴天小时尺度苹果蒸腾速率还受水汽压差的影响.水汽压差反映的是大气温度与相对湿度的协同作用.空气相对湿度通过影响下垫面地表和大气的水分交换,进而影响蒸散量,当空气湿度较大时,下垫面与大气的水分交换减少,蒸散量也较小,反之则增加.阴天条件下空气

表 1　不同天气条件下果树蒸腾速率与各气象因子的相关性分析（n=192）

Table 1　Pearson correlation coefficient of evapotranspiration rate to meteorological factors under different weather conditions

天气	太阳辐射	风速	温度	相对湿度	饱和水汽压差
晴天	0.777**	−0.007	0.433**	−0.292**	0.370**
阴天	0.757**	0.443**	0.466**	−0.280**	0.406**

注：**表示在0.01水平（双侧）上显著相关.

表 2　不同天气条件下蒸腾速率与气象因子的逐步回归模型

Table 2　Multivariable regression models for relationships between evapotranspiration rate and meteorological factors relative to weather conditions

天气	回归方程	决定系数	显著水平
晴天	$Q=-0.351+0.002R_a+0.048T-0.366\mathrm{VPD}$	0.856	0.000
阴天	$Q=0.155+0.001R_a+0.013T$	0.746	0.000

相对湿度较高，相对应的蒸腾速率总体较低.

2.2　苹果林地蒸散特征

2.2.1 苹果林地蒸腾量　图 4 为 2016 年 4 月—10 月苹果树生育期内蒸腾量的日变化过程，由图可知，苹果林地不同生育期内蒸腾量波动较大，7 月 15 日—9 月 20 日期间是苹果树蒸腾量的高峰，对应发育时期即果实膨大期及果实着色期. 不同生育期作物需水规律不同，果树自 4 月份开始进入发育期，同时降水量逐渐增加，温度升高，日蒸散量逐渐增大，自 7 月份果树进入果实膨大期，树体本身需水量增加，理论上日蒸散量均应较高，但由于 7 月份降雨较多，降水量为 130.3 mm，而蒸散量 42.8 mm，空气湿度偏高，果树蒸腾量下降，因此 7 月份日蒸散量较 4、5、6 月份变化不显著. 但 8、9 月均出现了蒸散耗水大于当月降水的情况，此时果实膨大期及果实着色期对果树耗水占主导因素. 由于土壤水库（李鹏展等，2017）巨大的储水作用，在水分供应充足时具有较强的蓄水保墒功能，因而能够确保在土壤水分发生亏缺时期，水分上移供给植物，因此虽然 8、9 月均出现了蒸散耗水大于当月降水的情况，但因 7 月份降雨量大于蒸散量，土壤水库储水，此时降水的补偿作用才得以体现. 因此，在日尺度下，降水对蒸散的影响表现出明显的滞后效应，降水过后，土壤含水量得到补充，相应地降水后的日蒸散量曲线上也出现一个峰值.

2.2.2 苹果树干冠层截留特征　水分进入植物冠层后进行再分配，显著地改变了冠层顶部和地表之间的水量分布，作物的冠层截留量作为水分利用效率的一个重要组成部分，在土壤－植被－大气系统水文循环过程中有重要的作用. 试验从 2016 年 4 月—10 月，共观测到 42 场降雨，累计降雨总量达 298.3 mm，当雨水到达果树冠层，降雨发生重新分配过程，形成林内穿透雨、树干茎流及冠层截留量（表 3）. 在降雨再分配过程中，林内穿透雨量所占比例最大，冠层截留量次之，树干茎流量占的比例最小，冠层截留量占到降雨量的 9.8%～17.5%. 冠层截留量虽然只占果树蒸散的较小部分，但其贡献不可忽略，因植株的冠层截留受到植物生理生态特征以及多种气象因子的影响，如株高、叶面积指数、降雨量、降雨强度及风速等，不同月份的冠层截留量及截留率均表现出不同特征，如 7 月降雨最多，且有单次降雨量级及强度高的特点，7 月的冠层截留量最高，为 12.7mm，而冠层截留率却是所有月份中最低的，仅占 7 月降雨总量的 9.8%.

2.2.3 苹果林地蒸散量　果树蒸散强度的高低受气象条件和果树生物学特性的双重制约，而蒸散发比值是有效反映不同时期土壤水分散失的主要方式. 试验期间 2016 年 4—10 月，降水量为 298.3 mm，蒸散量为 270.5 mm，果园水分收支略有盈余. 通过对苹果林地各月份的蒸散总量进行分析（表 4 和图 5），植被蒸腾量、土壤蒸发量、冠层截留量对蒸散的贡献率由大到小依次为 58.9%、26.8%、14.3%. 在观测期间，8、9 月份的土壤蒸发量及植被蒸腾量均较其他月份高（$P<0.05$），果树生育期内果园蒸腾量与土壤蒸发量的月变化趋势相似，均为增大—减小—再增大—再减小的变化趋势，这与降雨量、太阳辐射及温度等气象因子的变化有关. 果树自 4 月份开始进入发育期，气温逐渐回升，果树抽芽开花，叶面积指数不断增大，树体的耗水量不断增多，因此蒸散量也均逐渐增大，但进入雨季 7 月份以后，降雨增多，且空气湿度增加，影响到土壤的蒸发量，因此 7 月的蒸发及蒸腾量较前几个月份无显著变化，8 月进入果实膨大期，为苹果树耗水的高峰期，蒸腾量最大，蒸腾量占蒸散的比值也最高.

3　讨论

不同生育期苹果树干蒸腾速率日变化规律明显，昼高夜低，整体上呈“几”字形单峰曲线，主要原因为气孔是植物蒸腾水分散失的主要途径，不同生

图3 不同天气条件下蒸腾速率雨各气象因子的关系

Fig.3 Variation of evapotranspiration and meteorological factors under different weather conditions

图4　苹果林地生育期内蒸腾量的日变化过程

Fig.4　Diurnal variation of transpiration in apple forest in growing season

图5　不同月份植被蒸腾量、土壤蒸发量、冠层节流量分别占蒸散量比值

Fig.5　Ratio of plant transpiration, soil evaporation and canopy interception to evapotranspiration in different months

育期叶面积指数不同,气孔数量不同,且气孔的开闭也与太阳辐射和大气温度有着密切的关系(Wever et al.,2002),不同发育时期植物叶片气孔对太阳辐射及温度的敏感度不同(吴冰洁等,2015),成熟的植物叶片更耐高温,早晨随着太阳辐射和气温的上升,苹果树蒸腾也逐渐增大,当太阳辐射和温度达到一定值时,蒸腾速率达到最大值后开始逐渐降低,但成熟植物叶片能够忍受的阈值较高,对应的苹果林地不同生育期蒸腾速率峰值出现时间不同.在8、9月份中午时蒸腾速率出现短暂下降的过程,持续时间一般为0.5～1.0 h,这是因为在这段时间,由于太阳辐射和气温都较高,气孔暂时关闭(Yu et al., 1998),引起苹果防止叶片失水的自我保护机制,致使蒸腾降低,液流速率减慢.不同生育期的日均蒸腾速率大小依次为果实膨大期>果实着色期>新梢生长及幼果发育期>萌芽开花期.不同天气条件下,晴天状况下树干蒸腾量明显大于阴天,这是因为除了受植物自身生理特性的影响,蒸腾速率还受多种气象因子的复合影响.阴天条件下太阳辐射和气温相对低,空气相对湿度较高,极大地降低了叶片气孔内外的蒸汽压梯度,导致蒸腾速率较晴天有所降低.苹果林地小时尺度下日蒸腾速率对不同气象因子的响应也不同,蒸腾速率与太阳辐射、空气温度、相对湿度、水汽压差的变化具有不同步性,与太阳辐射、空气温度、水汽压差呈正相关,与相对湿度呈负相关,最高峰值较太阳辐射提前或滞后0.5～1.0 h,不同生育期及不同天气表现不同.较空气温度、水汽压差的最大值提前1.0～2.5 h,较相对湿度的最低值提前1～2 h左右.研究表明,树干上升液流量的99.8%以上用于植株蒸腾(张小由等,2005),由于树木的液流速率和蒸腾速率有着很好的相关性,能较好地预测树木的蒸腾耗水量(王瑞辉等,2006),可以通过观测液流速率变化规律来反应植物的蒸腾耗水规律.这与王力和王艳萍(2013)对黄土塬区苹果树干液流特征的研究结果较为一致,同时尽管研究表明热扩散茎流计测定植物蒸腾耗水的可靠性和精确性,但实际操作中仍有许多因素影响测量的精度.通过对蒸腾速率与各气象因子的相关及逐步回归分析表明,两种天气条件下,蒸腾速率与各气象因子的复合相关性较好,影响苹果林地蒸腾速率的主要气象因子为太阳辐射和空气温度,这与于金凤等(2010)对黄土塬区红富士苹果树蒸腾速率与环境因子的关系研究结果一致.

本研究中根据水量平衡原理,将蒸散分割为果树蒸腾、土壤蒸发、冠层截留,并对生育期内4—10月苹果林地3组分分别进行测定,结果表明,植被蒸腾量、土壤蒸发量、冠层截留量对蒸散的贡献率由大到小依次为58.9%、26.8%、14.3%.在日尺度上,苹果林地7月15日—9月20日的日蒸腾量维持在较高水平,对应生育期果实膨大期及果实着色期为果树耗水的主要时期.降水对蒸腾的影响表现出明显的滞后效应,蒸腾量的峰值总是出现在降水之后,主要原因可能为降雨增加了表层土壤的含水量,使得蒸腾量增大.魏新光等(2015)研究表明土壤水分的增加会使枣树液流旺盛蒸腾时间延长.由于土壤水分状况受到多方面的影响,且一般认为在土壤水分充足状况下,植物蒸散和蒸腾与土壤含水量相关性较好,反之则相关性不强(Parent et al., 2012).月

表3 果树冠层截留观测值

Table 3 The observed canopy interception of apple trees during growth season

月份	降雨量P(mm)	穿透雨量T_s(mm)	树干茎流量F(mm)	冠层截留I_c(mm)	T_s/P (%)	F/P (%)	I_c/P (%)
4	13.2	11.2	0.1	1.8	85.1	1.0	13.9
5	30.2	25.6	0.2	4.3	85.0	0.8	14.2
6	45.7	36.2	0.4	9.0	79.3	0.9	19.8
7	130.3	116.4	1.2	12.7	89.4	0.9	9.8
8	56.5	49.2	0.7	6.6	87.1	1.2	11.6
9	22.5	18.4	0.1	3.9	81.9	0.6	17.5
总计	298.3	257.1	2.8	38.4	/	/	/

注:T_s/P表示穿透雨量占林外降雨量的百分比;F/P表示树干茎流量占林外降雨量的百分比;I_c/P表示冠层截留量占林外降雨量的百分比.

尺度下,通过对每次降雨后冠层截留量的测定,林内穿透雨量所占比例最大,冠层截留量次之,占到降雨量的9.8%~17.5%,树干茎流量占的比例最小,这与李晶晶和白岗栓(2013)的研究结果一致.7月份降雨较多,对土壤水分有所补偿,8、9月份蒸散量较大,土壤水分收支处于负平衡,但土壤水分含量因雨季的补充,可能不会出现严重干旱情况;需要注意的是雨季之前4、5月份萌芽开花期、新梢生长及幼果发育期果园的水分管理.同时,在野外试验过程中,一方面由于环境、技术及仪器操作等均会对试验数据造成误差,测定采用简化的水量平衡方程,忽略了深层土壤水分上移而进入研究土层等项目,可能会出现水量平衡不闭合的状况,造成实际的土壤水分含量较估计值偏低的情况.

本研究没有涉及气象因子及不同土壤水分条件下对蒸散速率的影响,且缺少对研究区苹果林地土壤剖面水分动态的长期监测,已有研究发现不同深度土壤水分状况对玉米蒸散和蒸腾存在不同影响(郭映等,2014).因此,今后应加强对影响苹果林地蒸散机理的分析,以期提升对黄土丘陵沟壑区苹果林地生态效应及经济效应的认识.

4 结论

(1)不同生育期苹果树干蒸腾速率日变化规律明显,昼高夜低,整体上呈"几"字形单峰曲线,但不同生育期蒸腾速率到达峰值时间不同.不同天气条件下,晴天状况下树干蒸腾量明显大于阴天,通过对蒸腾速率与气象因子的逐步回归分析得到两种天气下影响苹果林地蒸腾速率的主要气象因子为太阳辐射和空气温度.

(2)通过计算日蒸腾量得到,果实膨大期及果实着色期为果树耗水的主要时期.其中降水之后,蒸腾量出现峰值,降水对蒸腾的影响表现出滞后效应.

(3)植被蒸腾量、土壤蒸发量、冠层截留量对蒸散的贡献率由大到小依次为58.9%、26.8%、14.3%.试验期间,不同月份土壤水分收支情况不同,应加强萌芽开花期、新梢生长及幼果发育期果园的水分管理.

References

Duan, C.F., Miao, Q.L., Cao, W., 2011. Changing Characteristics of Reference Crop Evapotranspiration and Main Causes in the Northwest China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27(8): 77-83 (in Chinese with English abstract).

Fan, J., Hao, M.D., Shao, M.A., 2004. Water Consumption of Deep Soillayers and Eco-Environmental Effects of Agricultural Ecosystemin the Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 20(1): 61-64 (in Chinese with English abstract).

Fan, S.P., 2018. Variation Tendency of Potential Evapotranspiration and Aridity Index in Central Gansu Province in Recent 55 Years. *Journal of Earth Environment*, 9(2): 172-181 (in Chinese with English abstract).

Gan, Z.T., Liu, W.Z., 2006. Evapotranspiration of Winter Wheat Field on Loess Plateau Tableland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17(8): 1435-1438 (in Chinese with English abstract).

Granier, A., 1985. A New Method of Sap Flow Measurement in Tree Stems. *Annals of Forest Science*, 42: 193-200.

Granier, A., Huc, R., Barigah, S. T., 1996. Transpiration of Natural Rain Forest and its Dependence on Climatic Factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78(1/2): 19-29. https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02252-x

Guo, Y., Dong, Y., Dang, H.H., *et al.*, 2014. Evapotranspiration and Transpiration of Maize in Two Time Scales

and the Environmental Effects. *Resources Science*, 36 (7): 1501—1508(in Chinese with English abstract).

Han, X., Wang, L., Wang, Y.P., 2014. Canopy Interception of Summer Corn and Its Influencing Factors under Natural Rainfall. *Scientia Agricultura Sinica*, 47(8): 1541—1549(in Chinese with English abstract).

Han, Y.W., Gao, J.X., Wang, B.L., et al., 2012. Evaluation of Soil Conservation Function and Its Values in Major Eco-Function Areas of Loess Plateau in Eastern Gansu Province. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(17): 78—85(in Chinese with English abstract).

Hu, X.B., Lu, X.J., Yu, Y., et al., 2018. Simulation of Canopy Conductance of Qinghai Spruce (*Piceacrassifolia*) Plantation Based on Granier's Thermal Dissipation Probe Method. *Scientia Silvae Sinicae*, 54(3): 8—18 (in Chinese with English abstract).

Li, J.J., Bai, G.S., 2013. Crown Interception of Apple trees in Loess Hilly and Gully Region, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(2): 379—387 (in Chinese with English abstract).

Li, P.Z., Wang, L, Wang, D., 2017. Dynamics of Soil Reservoir of Wheat Field in Rain-Fed Area of the Loess Tableland, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28 (11): 3635—3662(in Chinese with English abstract).

Li, Y. S., 2001. Effects of Forest on Water Cycle on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 16(5): 427—432(in Chinese with English abstract).

Mu, Y., Wang, Y.P., 2017. Study on Soil Water Balance of Apple Orchards in the Loess Tableland of China. *Research of Agricultural Modernization*, 38(1): 161—167 (in Chinese with English abstract).

Parent, A.C., Anctil, F., 2012. Quantifying Evapotranspiration of a Rainfed Potato Crop in South—Eastern Canada Using Eddy Covariance Techniques. *Agricultural Water Management*, 113(10): 45—56. https://doi. org/10.1016/j.agwat.2012.06.014

Si, J.H., Feng, Q., Zhang, X.Y., et al., 2005. Research Progress on Surveying and Calculation of Evapotranspiration of Plants and Its Prospects. *Advances in Water Science*, 16(3): 450—459(in Chinese with English abstract).

Tang, M., Zhao, X.N., Wu, P.T., et al., 2016. Effects of Different Surface Mulching on Jujube Stem Sap Flow Characteristics. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 34 (1):120—126(in Chinese with English abstract).

Wang, H.T., Ma, L.Y., 2002. Measurement of Whole Tree's Sater Consumption with Thermal Dissipation Sap Flow Probe(TDP). *Acta Phytoecologica Sinica*, 26(6): 661—667(in Chinese with English abstract).

Wang, L., Wang, Y.P., 2013. Characteristics of Stem Sap Flow of Apple Trees in Loess Tableland. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 44 (10): 152—158, 151(in Chinese with English abstract).

Wang, R.H., Xi, R.C., Xu, J.L., et al., 2006. Measurement of the Water Consumption of Gardening Trees with Thermal Dissipation Sap Flow Probe (TDP). *Journal of Central South Forestry University*, 26(2): 7—12(in Chinese with English abstract).

Wang, S., Fan, J., 2015. Application of Three Heat Pulse Technique-Based Methods to Determine the Stem Sap Flow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26(8): 2244—2230(in Chinese with English abstract).

Wang, S.Y., Wang, L., Han, X., et al., 2016. Evapotranspiration Characteristics of Apple Orchard at Peak Period of Fruiting in Loess Tableland. *Scientia Silvae Sinicae*, 52 (1): 128—135(in Chinese with English abstract).

Wang, Y.P., Han, M.Y., Zhang, L.S., et al., 2013. Spatial Characteristics of Soil Moisture of Apple Orchards in the Loess Plateau of Shaanxi Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(7): 16—25(in Chinese with English abstract).

Wang, Y.Q., Fan, J., Shao, M.A., et al., 2009. Evapotranspiration of Three Types of Plants in Water-Wind Erosion Crisscross Regions in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 29(10): 5386—5394(in Chinese with English abstract).

Wei, X.G., Nie, Z.Y., Liu, S.Y., et al., 2015. Soil Moisture Characteristics and Its Influence on Jujube Tree Transpiration in Loess Hilly Region. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 46(6): 130—140(in Chinese with English abstract).

Wever, L.A., Flanagan, L.B., Carlson, P.J., 2002. Seasonal and Interannual Variation in Evapotranspiration, Energy Balance and Surface Conductance in a Northern Temperate Grassland. *Agricultural & Forest Meteorology*, 112 (1): 31—49.

Wu, B.J., Liu, Y.J., Jiang, C.D., et al., 2015. Effects of Stomatal Development on Leaf Temperature during Leaf Expansion. *Plant Physiology Journal*, 51(1): 119—126 (in Chinese with English abstract).

Xu, H.H., Guo, X.H., Qiu, Q.Y., 2015. Research on Daily Variation of Sap Flow of Apple Trees under Different Weather Conditions. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31(22): 120—124(in Chinese with English abstract).

Yang, F.L., Zhang, Q., Wang, W.Y., et al., 2014. Evapotranspiration and Factors Influencing Evapotranspiration in the Spring Wheat Farmland of China's Loess Tableland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 34(9): 2323—2328(in Chinese with English abstract).

Yu, J.F., Liu, W.Z., Gan, Z.T., et al., 2010. The Characteristics of Apple Tree Transpiration Rate and Its Influencing Factors on the Loess Tableland Region. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 28(4): 59—63 (in Chi-

nese with English abstract).

Yu, Q., Wang, T.D., 1998. Simulation of the Physiological Responses of C3 Plant Leaves to Environmental Factors by a Model Which Combines Stomatal Conductance, Photosynthesis and Transpiration. *Acta Botanica Sinica*, 40(8): 740－754.

Zhang, B.Z., Chen, H., Xu, D, et al., 2017a. Methods to Estimate Daily Evapotranspiration from Hourly Evapotranspiration. *Biosystems Engineering*, 153: 129－139.

Zhang, H. D., Wei, W., Chen, L.D., et al., 2017b. Effects of Terracing on Soil Water and Canopy Transpiration of *Pinustabulaeformis* in the Loess Plateau of China. *Ecological Engineering*, 102: 557－564.

Zhang, J., Wang, L., Han, X., et al., 2016a. Evapotranspiration of Farmland on Loess Tableland and Its Major Influencing Factors. *Acta Pedologica Sinica*, 53(6): 1421－1432(in Chinese with English abstract).

Zhang, J., Wang, L., Han, X., et al., 2016b. The Relationship between Sap Flow Velocity and Environmental Factors of the 19a Apple Trees on the Loess Plateau at Different Time Scales. *Scientia Agricultura Sinica*, 49(13): 2583－2592(in Chinese with English abstract).

Zhang, X. Y., Kang, E. S., Zhang, Z. H., et al., 2005. A Study of the Stem Sap Flux of *Populuseuphratica* in the Lower Reaches of Heihe River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(5): 742－746 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y.H., Wang, X.L., Hu, G.C., 2012. Evapotranspiration Estimation of Hailiutu River Basin Based on MODIS Data. *Earth Science*, 37(2): 375－380 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

段春锋，缪启龙，曹雯，2011. 西北地区参考作物蒸散变化特征及其主要影响因素. 农业工程学报，27(8)：77－83.

樊军，郝明德，邵明安，2004. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应. 农业工程学报，20(1)：61－64.

范双萍，2018. 甘肃陇中地区近55年潜在蒸散量及干旱指数演变趋势. 地球环境学报，9(2)：172－181.

甘卓亭，刘文兆，2006. 黄土塬区麦田蒸散特征. 应用生态学报，19(8)：1435－1438.

郭映，董阳，党慧慧，等，2014. 基于不同时间尺度玉米蒸散蒸腾量及其影响因素. 资源科学，36(7)：1501－1508.

韩雪，王力，王艳萍，2014. 自然降雨条件下夏玉米冠层截留特征及影响因素. 中国农业科学，47(8)：1541－1549.

韩永伟，高吉喜，王宝良，等，2012. 黄土高原生态功能区土壤保持功能及其价值. 农业工程学报，28(17)：78－85.

胡兴波，芦新建，于洋，等，2018. 基于热扩散法的青海云杉冠层导度模拟. 林业科学，54(3)：8－18.

李晶晶，白岗栓，2013. 黄土丘陵沟壑区苹果树冠截留规律. 应用生态学报，24(2)：379－387.

李鹏展，王力，王棣，2017. 黄土旱塬区冬小麦土壤水库动态. 应用生态学报，28(11)：3653－3662.

李玉山，2001. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报，16(5)：427－432.

穆艳，王延平，2017. 黄土长武塬区苹果林地水量平衡研究. 农业现代化研究，38(1)：161－167.

司建华，冯起，张小由，等，2005. 植物蒸散耗水量测定方法研究进展. 水科学进展，16(3)：450－459.

唐敏，赵西宁，吴普特，等，2016. 不同地表覆盖对枣树树干液流特征的影响. 干旱地区农业研究，34(1)：120－126.

王华田，马履一，2002. 利用热扩式边材液流探针测定树木整株蒸腾耗水量的研究. 植物生态学报，26(6)：661－667.

王力，王艳萍，2013. 黄土塬区苹果树干液流特征. 农业机械学报，44(10)：152－158.

王瑞辉，奚如春，徐军亮，等，2006. 用热扩散式茎流计测定园林树木蒸腾耗水量. 中南林学院学报，(2)：7－12.

王胜，樊军，2015. 热脉冲技术3种方法组合在测量树干液流中的应用. 应用生态学报，26(8)：2244－2252.

王石言，王力，韩雪，等，2016. 黄土塬区盛果期苹果园的蒸散特征. 林业科学，52(1)：128－135.

王延平，韩明玉，张林森，等，2013. 陕西黄土高原苹果园土壤水分分异特征. 林业科学，49(7)：16－25.

王幼奇，樊军，邵明安，等，2009. 黄土高原水蚀风蚀交错区三种植被蒸散特征. 生态学报，29(10)：5386－5394.

魏新光，聂真义，刘守阳，等，2015. 黄土丘陵区枣林土壤水分动态及其对蒸腾的影响. 农业机械学报，46(6)：130－140.

吴冰洁，刘玉军，姜闯道，等，2015. 叶片生长进程中气孔发育对叶温调节的影响. 植物生理学报，51(1)：119－126.

续海红，郭向红，仇群伊，2015. 不同天气条件下苹果树液流日变化规律研究. 中国农学通报，31(22)：120－124.

阳伏林，张强，王文玉，等，2014. 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素. 生态学报，34(9)：2323－2328.

于金凤，刘文兆，甘卓亭，等，2010. 黄土塬区苹果树蒸腾速率变化特征及其影响因子. 干旱地区农业研究，28(4)：59－63.

张静，王力，韩雪，等，2016a. 黄土塬区农田蒸散的变化特征及主控因素. 土壤学报，53(6)：1421－1432.

张静，王力，韩雪，等，2016b. 不同时间尺度下黄土塬区19年生苹果树干液流速率与环境因子的关系. 中国农业科学，49(13)：2583－2592.

张小由，康尔泗，张智慧，等，2005. 黑河下游天然胡杨树干液流特征的试验研究. 冰川冻土，27(5)：742－746.

张雨航，王晓林，胡光成，2012. 基于MODIS数据的海流兔河流域蒸散量的计算. 地球科学，37(2)：375－380.